



RMITK
ราชภัฏมหาสารคาม

RMITR
ราชภัฏมหาสารคาม

RS

BANSOMDEI
CHAOPRAYA
RAJABHAT UNIVERSITY

ESART
Eastern Siam Art and Technology

IMAKE

nt
Innovation
Network

icee
Innovation
Center



IAMBEST
KMITL PRINCE OF CHUMPHON
1-2 MAY 2025

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 10

Vol.1

ด้านสารสนเทศ การเกษตร
วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

1 – 2 พฤษภาคม 2568

โรงแรมแกรนด์แปซิฟิกชอฟเฟอริน รีสอร์ทแอนด์สปา จังหวัดเพชรบุรี
จัดโดย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ ประจำปี 2568

ด้านสารสนเทศ การเกษตร วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 10 : IAMBEST 2025

จัดโดย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร และ
เครือข่ายมหาวิทยาลัย

สงวนลิขสิทธิ์ตามกฎหมาย

ทัศนคติและข้อคิดเห็นใดๆ ที่ปรากฏในบทความภายในเอกสารรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ
IAMBEST 2025 เป็นทัศนะของผู้เขียน คณะกรรมการจัดการประชุมไม่จำเป็นต้องเห็นพ้องด้วยกับทัศนะ
เหล่านั้น และไม่ถือว่าเป็นความรับผิดชอบของคณะกรรมการจัดการประชุม ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา
และการตรวจร่างบทความแต่ละบทความของผู้แต่งแต่ละท่าน กรณีมีการฟ้องร้องเรียนเรื่องการละเมิด
ลิขสิทธิ์ถือเป็นการรับผิดชอบต่อผู้เขียนแต่เพียงฝ่ายเดียว

พิมพ์ครั้งที่ 1 วันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2568

ออกแบบปก นายสรารัฐ สวัสดิ์

จัดพิมพ์โดย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดม

สารจากรองอธิการบดี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร



การประชุมทางวิชาการระดับประเทศ The 10th National Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business Administration, Engineering, Sciences and Technology และการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ The 6th International Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business Administration, Engineering, Sciences and Technology (IAMBEST 2025) เป็นการประชุมจากผู้เชี่ยวชาญ นักวิชาการและนักวิจัย ในด้านต่างๆ เช่น สารสนเทศ การเกษตร การจัดการและบริหารธุรกิจ วิศวกรรมศาสตร์ และวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มนุษย์ศาสตร์ และสังคมศาสตร์ ซึ่งจัดขึ้นโดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ระหว่างวันที่ 1-2 พฤษภาคม 2568 โดยมีจุดประสงค์เพื่อเป็นเวทีแลกเปลี่ยนเรียนรู้ระหว่างนักวิชาการ นักวิจัย และบุคลากรทางการศึกษา รวมทั้ง

ผู้เชี่ยวชาญในหลากหลายแขนง ความก้าวหน้าและการพัฒนาในวงการวิจัย ซึ่งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ระหว่างกัน เกิดสร้างเครือข่ายและสามารถบูรณาการองค์ความรู้ต่างๆ ไปพัฒนา ชุมชน สังคม ประเทศชาติ ให้มีความเจริญก้าวหน้าต่อไป

ในนามของประธานคณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการ IAMBEST 2025 ผมขอขอบคุณคณะทำงานและผู้นำเสนอผลงานทุกท่านที่เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การจัดประชุมประสบความสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการจัดประชุมในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานทางวิชาการ งานวิจัยและเกิดการสร้างนวัตกรรมอันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศตามความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของทุกท่าน ขอขอบคุณครับ



(รองศาสตราจารย์ ดร.คาร์ณวิทย์ ทิพย์มณี)

รองอธิการบดี วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KEYNOTE SPEAKER

**Topic: AI: Driven Agriculture, Engineering,
Business and Food Innovation
Transformation**



Keynote Speaker :
Associate Prof. Dr. Siridech Boonsang
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Contents

สารจาการองอธิการบดี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ก
Keynote	ข
สารบัญ	ค
กำหนดการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ประจำปี 2568	ช
โปรแกรมการนำเสนอการประชุม วิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 10	ณ
รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 10	ญ
การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 10	
ภาคบรรยาย	
กลุ่ม I : Informatics (ด้านสารสนเทศ)	
OI-94 อัลกอริทึมการเชื่อมโยงบุคคลโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน อรรถศาสตร์ นาคเทวัญ นารารอ สว่างวงศ์ ฮาบีบะ สดอหลง และ นภัสรพี สิทธิวิจิณ	2
กลุ่ม A : Agriculture (ด้านการเกษตร)	
OA-05 ปัจจัยที่มีผลต่อการสุกแก่ของเมล็ดข้าวเปลือก วัชรพงษ์ ตามไรสง ศักดิ์ชัย อาชาวัง เวียง อากรชี ยุทธนา เครือหาญชาญพงศ์ กลวัชร ทิมินกุล เอกภาพ ป้านภูมิ และ ทิวากร กาลจักร	12
OA-44 ประสิทธิภาพของ <i>Bacillus subtilis</i> ในการควบคุมเชื้อราและแบคทีเรียสาเหตุโรคข้าว อัญชลี สวนดอกไม้ และ มัทธนา ต้นชัย	22
OA-49 ผลของการใช้วัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อเซอร์โคไวรัสไทป์ 2 ร่วมกับวัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อ มัยโคพลาสมาต่อการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันในสุกร ณัฐณิชา ทองสุกใส จำลอง มิตรชาวไทย อำพล กล่อมปัญญา สวรรยา อำพนพิศลย์ มณีนรัตน์ แผ้วปราบเสี้ยน และ ชนาธิป ธรรมการ	32
กลุ่ม E : Engineering (ด้านวิศวกรรมศาสตร์)	
OE-22 การพัฒนาแบบจำลอง Void Fraction สำหรับการไหลแบบสองสถานะในท่อขดเกลียวขนาด ไมโคร วิสสุตา ช่อประเสริฐ ศิระ สายศร และ ศักรินทร์ ชินกุลพิทักษ์	41
OE-45 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มความชื้นของข้าวงอกโดยใช้เครื่องผลิตข้าวงอกด้วยระบบ สเปรย์น้ำ จรัสพงศ์ สุขมงคล และ ธัชพล จุ่งเจริญ	49
OE-82 การพัฒนาเตาแก๊สซีไฟเออร์ชนิดไหลขึ้นสำหรับใช้ในครัวเรือนภายใต้อิทธิพลของความเร็ว อากาศป้อนและความชื้นชีวมวลอัดเม็ด วีรวัฒน์ ตามชู ดิษฐพร ตุงโสธานนท์ และ วรรัชชล วัฒนะ	58

Contents

กลุ่ม E : Engineering (ด้านวิศวกรรมศาสตร์)

OE-83	การทอรีแฟกชันจากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันเพื่อการผลิตถ่านชีวภาพ สุธาเทพ ลือชัย ชมพูนุช กุลเกตุวงศ์ และ วรรัชชล วัฒนะ	69
OE-93	การออกแบบเซนเซอร์วัดแรงแบบวงแหวนแปดเหลี่ยมสำหรับวัดแรงตึงเครียดของเครื่องกัด กนิษฐา เทียนศิริ ดิษฐพร ตุงโสธานนท์ และ ชมพูนุช กุลเกตุวงศ์	79
OE-95	ระบบติดตามอายุการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนโดยใช้เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี ปญญา อุตรนไธ ญัฐพงศ์ รตนเดช รัฐพงษ์ สุวลักษณ์ และ กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์	87
OE-103	สถานีตรวจวัดสภาพอากาศด้วยเทคโนโลยี IoT ศศพร นิลหา จุฑาทิพย์ แบลกสวัสดี ชานันดา เสือชม สิริพิชญาย์ จันทร์นัย พิษณุภา นิลปัจ รัฐพงษ์ สุวลักษณ์ และ กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์	96

กลุ่ม T : Technology (ด้านเทคโนโลยี)

OT-38	การศึกษาปัญหาและแนวทางแก้ไขการใช้งานไม้พาเลทในอุตสาหกรรมขนส่งอย่างยั่งยืน พุทธิพงศ์ เลขาชัยวรกุล ญัฐพิชญา เอี่ยมเจริญโชค และ ปฐมพงษ์ จามรงค์พันธ์	102
OT-57	การจำแนกลักษณะความเครียดจากปัจจัยภายนอกในต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทอง โดยใช้เทคนิควิลิเบิลและเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่อง เจตณัฐรณ์ รอดศิริ กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์ และ พรประพา คงตระกูล	109
OT-104	ระบบจัดการฟอร์มดิจิทัล เสฏฐวุฒิ กลิฐณิเชตชูชัย ศิลา ศิริมาสกุล และ รัตติกร สมบัติแก้ว	119
OT-105	ระบบติดตามงานของสมาชิกในทีม ชัชวาลย์ ขวัญเมือง และ รัตติกร สมบัติแก้ว	130
OT-107	การจำแนกลักษณะความเครียดจากสิ่งไม่มีชีวิตในต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทอง โดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พิชชาพร แก้ววิจิตร กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์ และ พรประพา คงตระกูล	139

Contents National Conference

บทความภาคโปสเตอร์

กลุ่ม A : Agriculture (ด้านเกษตร)

- PA-06 การทดสอบปลูกพญาอินในโรงเรือนระบบเปิดควบคุมการระบายอากาศและความชื้น 150
สัมพัทธ์แบบอัตโนมัติ
สรวิชัย ปานทน ธนาวัฒน์ ทิพย์ชิต วุฒิพล จันทรสระคู และ จารุวรรณ รัตนสกุลธรรม
- PA-28 การศึกษาวัสดุปรับปรุงดินคุณภาพสูงเพื่อเพิ่มคุณภาพดินกลุ่มดินที่ 48 ในพื้นที่ตำบล 155
ท่าตะคร้อ อำเภอหนองหญ้าปล้อง จังหวัดเพชรบุรี
วัชรินทร์ รัตนพันธ์ พิรภัทร อังกนันทน์ ปฏิพัฒน์ ศรีสงคราม และ โอภาส สืบสาย
- PA-36 ความอุดมสมบูรณ์ของดินและความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียน พันธุ์หมอนทอง 160
ที่มีการจัดการธาตุอาหารต่างกันในพื้นที่อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร
นารี พันธุ์จินดาวรรณ ป.ปริญญญา พรหมอักษร และ พรทิวา กัญยวงศ์หา
- PA-62 อิทธิพลของความหนาแน่นเริ่มต้นและชนิดของมูลสัตว์ต่อการเจริญเติบโตของแห่นางใน 169
บ่อปูนซีเมนต์
ธนรรษลวรรณ พลมัน อติรัตน์ พูลสวัสดิ์ ภริตพร ปิ่นเกตุ ณัฐพร ทองประทุม ศรศิริ แสงหล้า
และ ถาวรณ สุบรรณรัตน์

กลุ่ม E : Engineering (ด้านวิศวกรรมศาสตร์)

- PE-60 การทดสอบพัฒนไฟฟ้แบบใบพัดโค้งหลัง ในระบบคัดแยกและทำความสะอาดเครื่องเกี่ยววนด 175
ข้าวไร้ต่อพ่วงหน้ารถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก (14 แรงม้า)
วรุตน์ วิเชียร อภิสิทธิ์ เอียดเอื้อ จุมพล กุลยวน ธนราช สวัสดิผล สกฤ ท่อโนทยาน รณชาติ มั่นศิลป์
และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช
- PE-76 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนการไหลของน้ำในทุเรียนโดยวิธีการกระจายความร้อน 182
เผด็จศึก สุพรรณรัตน์ เจษฎา ไสภรัตน์ และ สุพล ฐิติธนากุล
- PE-84 การศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบการอบแห้งสับปะรดฤดูแล้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงาน 188
แสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า
เทวรัตน์ ศรีอำรรค สุพรรณษา อาสายุทธ ปรีศนา ชำนิเขตการ และ กระวี ศรีอำรรค

กลุ่ม S : Sciences (ด้านวิทยาศาสตร์)

- PS-09 การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบด้วยการเสริมผงจิ้งหรีด 195
ณัฐจริย์ จิระกุล และ อริยา พูลกลาง
- PS-71 การพัฒนาระบบการวัดสนามแม่เหล็กด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi Pico 201
สำหรับระบบการวัดสนามแม่เหล็กแบบราคาประหยัด
พระนาย สุริยาสถาพร บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์ และ ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์

Contents National Conference

กลุ่ม S : Sciences (ด้านวิทยาศาสตร์)

- PS-97 การประเมินฤทธิ์ทางชีวภาพด้านเวชสำอางของเห็ดหลินจือป่าในประเทศไทยที่เจริญบน
วัสดุเพาะแตกต่างกัน
จิรนนท์ ภิรมย์ฤทธิ์ เยาวภา อร่ามศิริรุจิเวทย์ และ ชุรภา วีรภัทรสกุล 209

กลุ่ม T : Technology (ด้านเทคโนโลยี)

- PT-12 การทำนายปริมาณความชื้นของเม็ดอาหารสัตว์ด้วยแบบจำลองการอบแห้งที่หลากหลาย 218
จตุพัฒน์ ไม่แก้ว ธัชพล จุ่งเจริญ นฤบดี ศรีสังข์ ศิริวรรณ ศรีสังข์ ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล และ นิตยา จันกา
- PT-55 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างโปรตีนถั่วเหลืองและกลูเตนข้าวสาลีต่อสมบัติทางกายภาพ 228
ของลูกชิ้นเลียนแบบเนื้อสัตว์จากพืช
ชญชิตา พุ่มตาก้อง และ ประสงค์ ศิริวงศ์ไผ่ชาติ



กำหนดการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ประจำปี 2568
ด้านสารสนเทศ การเกษตร การจัดการ บริหารธุรกิจ วิศวกรรมศาสตร์
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ (IAMBEST 2025)
ในระหว่างวันที่ 30 เมษายน - 2 พฤษภาคม 2568
ณ โรงแรมแกรนด์แปซิฟิกชอปปิงเวิลด์ รีสอร์ทแอนด์สปา อำเภอลำลูกเกด จังหวัดเพชรบุรี

วัน/เวลา	กิจกรรม	
วันพุธที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2568		
16.00 – 18.30 น.	ประชุมผู้ทรงคุณวุฒิ และคณะกรรมการตัดสิน วิทยากร และภาคีเครือข่ายการประชุมวิชาการระดับชาติ และระดับนานาชาติ IAMBEST 2025	
17.00 – 18.30 น.	ติดโปสเตอร์ เพื่อนำเสนอประชุมวิชาการระดับชาติ และระดับนานาชาติ	Foyer 2
วันพฤหัสบดีที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2568		
08.00 – 09.00 น.	ลงทะเบียน Upload ไฟล์นำเสนอบรรยาย และติดโปสเตอร์เพื่อนำเสนอประชุมวิชาการระดับชาติ และระดับนานาชาติ IAMBEST 2025	Foyer 1
09.00 – 09.30 น.	พิธีเปิดการประชุมวิชาการระดับชาติ และระดับนานาชาติ IAMBEST 2025	Petch Siam Ballroom
09.30 – 10.00 น.	ปาฐกถาพิเศษ หัวข้อ AI: Driven Agriculture, Engineering, Business and Food Innovation Transformation โดย รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริเดช บุญแสง	Petch Siam Ballroom
10.00 – 10.15 น.	รับประทานอาหารเช้าและเครื่องดื่ม	
10.15 – 12.00 น.	วิทยากร หัวข้อ AI: Driven Agriculture, Engineering, Business and Food Innovation Transformation โดย รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริเดช บุญแสง	Business Center
10.30 – 12.00 น.	International Conference (Oral Presentation) Session I: Informatics, and Engineering International Conference (Poster Presentation) การประชุมวิชาการ ระดับชาติ (นำเสนอแบบปากเปล่า) กลุ่ม 1 ด้านสารสนเทศ และเทคโนโลยี กลุ่ม 4 ด้านบริหารธุรกิจ สังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์ การประชุมวิชาการ ระดับชาติ (นำเสนอโปสเตอร์) กลุ่ม 1 ด้านเกษตรศาสตร์ กลุ่ม 3 ด้านการจัดการและบริหารธุรกิจ	Petch Chompoo Foyer 2 Petch Amphan Petch Phailin Foyer 2 Foyer 2
12.00 – 13.00 น.	รับประทานอาหารกลางวัน	



กำหนดการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ประจำปี 2568
ด้านสารสนเทศ การเกษตร การจัดการ บริหารธุรกิจ วิศวกรรมศาสตร์
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ (IAMBEST 2025)
ในระหว่างวันที่ 30 เมษายน - 2 พฤษภาคม 2568
ณ โรงแรมแกรนด์แปซิฟิกชอปปิงเฟอริน รีสอร์ทแอนด์สปา อำเภอลำลูกเกด จังหวัดเพชรบุรี

วัน/เวลา กิจกรรม

วันพฤหัสบดีที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2568

13.00 – 14.30 น.	International Conference (Oral Presentation) Session II : Engineering Session IV : Agriculture and Sciences	Petch Chompoo Petch Siam Ballroom
	การประชุมวิชาการ ระดับชาติ (นำเสนอแบบปากเปล่า) กลุ่ม 2 ด้านการจัดการ กลุ่ม 5 ด้านเกษตรศาสตร์ และวิทยาศาสตร์	Petch Amphan Petch Phailin
	การประชุมวิชาการ ระดับชาติ (นำเสนอโปสเตอร์) กลุ่ม 2 ด้านเทคโนโลยี และวิศวกรรมศาสตร์ กลุ่ม 4 ด้านวิทยาศาสตร์	Foyer 2 Foyer 2
14.30 - 14.45 น.	รับประทานอาหารว่างและเครื่องดื่ม International Conference (Oral Presentation)	
14.15 – 15.30 น.	Session V: Management and Social Science & Humanities	Petch Siam Ballroom
14.45 – 17.15 น.	Session III : Engineering	Petch Chompoo
14.15 – 17.30 น.	การประชุมวิชาการ ระดับชาติ (นำเสนอแบบปากเปล่า) กลุ่ม 3 ด้านวิศวกรรมศาสตร์ กลุ่ม 6 ด้านบริหารธุรกิจ	Petch Amphan Petch Phailin
18.30 – 21.00 น.	งานเลี้ยงรับรอง รับประทานอาหารเย็น	Petch Siam Ballroom

วันศุกร์ที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ. 2568

10.00 – 11.30 น.	ประชุมแลกเปลี่ยนเรียนรู้ทางวิชาการเครือข่ายการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ IAMBEST 2025
11.30 – 12.00 น.	ปิดการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ IAMBEST 2025

หมายเหตุ กำหนดการอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม

โปรแกรมการนำเสนอผลงานระดับชาติ ภาคบรรยาย

กลุ่ม 1 ด้านสารสนเทศ และเทคโนโลยี

Petch Amphan

Chairperson	รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ รัตน์มีชัยสกุล	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
	รองศาสตราจารย์ ดร.นารถระพี นาคะวิจันะ	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
	อาจารย์ ดร.ศิวกร สอกจะบก	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
เวลานำเสนอ	รหัส	เรื่อง
10.30 – 10.45	OI-94	อัลกอริทึมการเชื่อมโยงบุคคลโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน อรรถศาสตร์ นาคเทวัญ นารารอ สว่างวงศ์ ฮาบีบ๊ะ สดอหลง และ นภัสร์พี สิริวิจัน
10.45 – 11.00	OT-38	การศึกษาปัญหาและแนวทางแก้ไขการใช้งานไม้พาลาในอุตสาหกรรมขนส่งอย่างยั่งยืน พุทธิพงศ์ เลชะชัยวรกุล ณัฐพิชญา เอี่ยมเจริญโชค และ ปฐมพงษ์ จ้างงค์พันธ์
11.00 – 11.15	OT-57	การจำแนกลักษณะความเครียดจากปัจจัยภายนอกในต้นกล้วยเรียนพันธุ์หมอนทอง โดยใช้เทคนิควิลิเบิลและเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่อง เจตานุสรณ์ รอดศิริ กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์ และ พรประพา คงตระกูล
11.15 – 11.30	OT-104	ระบบจัดการฟอร์มดิจิทัล เสฐธวุฒิ กลัภูมิเชิดชูชัย ศิลา ศิริมาสกุล และ รัตติกร สมบัติแก้ว
11.30 – 11.45	OT-105	ระบบติดตามงานของสมาชิกในทีม ชัชวาลย์ ขวัญเมือง และ รัตติกร สมบัติแก้ว
11.45 – 12.00	OT-107	การจำแนกลักษณะความเครียดจากสิ่งไม่มีชีวิตในต้นกล้วยเรียนพันธุ์หมอนทอง โดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พิชชาพร แก้ววิจิตร กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์ และ พรประพา คงตระกูล
พักรับประทานอาหารกลางวัน		

โปรแกรมการนำเสนอผลงานระดับชาติ ภาคบรรยาย

กลุ่ม 3 ด้านวิศวกรรมศาสตร์

Petch Amphan

Chairperson	รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ อาชีวะพนิช	สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
	รองศาสตราจารย์ ดร.ศิศิโรตม์ เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ กุศล	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
เวลานำเสนอ	รหัส	เรื่อง
15.15 – 15.30	OE-22	การพัฒนาแบบจำลอง Void Fraction สำหรับการไหลแบบสองสถานะในท่อขดเกลียว ขนาดไมโคร <i>วิสสุตา ช่อประเสริฐ ศิระ สายคร และ ศักรินทร์ ชินกุลพิทักษ์</i>
15.30 – 15.45	OE-45	สถานะที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มความชื้นของข้าวอกโดยใช้เครื่องผลิตข้าวอกด้วย ระบบสเปรย์น้ำ <i>จรัสพงศ์ สุขมงคล และ ธัชพล จุ่งเจริญ</i>
15.45 – 16.00	OE-93	การออกแบบเซนเซอร์วัดแรงแบบวงแหวนแปดเหลี่ยมสำหรับวัดแรงตึงเครียดของเครื่องกัด กนิษฐา เทียนศิริ ดิษฐพร ตุงโสธานนท์ และ ชมพูนุช กุลเกตวงศ์
16.00 – 16.15	OE-82	การพัฒนาเตาแก๊สซีฟิเออร์ชนิดไหลขึ้นสำหรับใช้ในครัวเรือนภายใต้อิทธิพลของ ความเร็วอากาศป้อนและความชื้นชีวมวลอัดเม็ด <i>วีรวัฒน์ ตามชู ดิษฐพร ตุงโสธานนท์ และ วรรัชชล วัฒนะ</i>
16.15 – 16.30	OE-83	การทอรีไฟแฟกซ์กันการตกของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันเพื่อการผลิตถ่านชีวภาพ <i>สุธาเทพ ลือชัย ชมพูนุช กุลเกตวงศ์ และ วรรัชชล วัฒนะ</i>
16.30 – 16.45	OE-95	ระบบติดตามอายุการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนโดยใช้เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี <i>ปริญญญา รุติธนไท ณัฐพงศ์ รัตนเดช รัฐพงษ์ สุวลักษณ์ และ กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์</i>
16.45 – 17.00	OE-103	สถานีตรวจวัดสภาพอากาศด้วยเทคโนโลยี IoT <i>ศตพร นิลหา จุฑาทิพย์ แปลกสวัสดิ์ ขานันดา เสือชม สิริพิชฌาย์ จันทน์นัย พิษญาภา นิลปัจ รัฐพงษ์ สุวลักษณ์ และ กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์</i>

โปรแกรมการนำเสนอผลงานระดับชาติ ภาคบรรยาย (ต่อ)

กลุ่ม 5 ด้านเกษตรศาสตร์ และวิทยาศาสตร์

Petch Phailin

Chairperson	รองศาสตราจารย์ ดร.พรประพา คงตระกูล	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรภรณ์ นาคเทวีญ	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนรรษมลวรรณ พลมัน	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
เวลานำเสนอ	รหัส	เรื่อง
13.00 – 13.15	OS-59	คาร์บอนนาโนโพร่งจากต้นกล้วยด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน ดำรงค์ มิ่งขวัญศิริ ฐาปนพงษ์ ดวงตา จุมพล กุลยวน ณัฐพงศ์ รัตนเดช สุธี ชูติไพจิตร และ อภิรักษ์ณ์ เอียดเอื้อ
13.15 – 13.30	OA-05	ปัจจัยที่มีผลต่อการสุกแก่ของเมล็ดข้าวเปลือก วัชรพงษ์ ตามไธสง ศักดิ์ชัย อาษาวั่ง เวียง อารชี ยุทธนา เครือหาญชาญพงศ์ กลวัชร ทิมีนกุล เอกภาพ ป้านภูมิ และ ทิวักร กาลจักร
13.30 – 13.45	OA-44	ประสิทธิภาพของ <i>Bacillus subtilis</i> ในการควบคุมเชื้อราและแบคทีเรียสาเหตุโรคข้าว อัญชลี สวนดอกไม้ และ มัทธนา ต้นชัย
13.45 – 14.00	OA-49	ผลของการใช้วัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อเอชไอวีไวรัสไทป์ 2 ร่วมกับวัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อ เชื้อมัยโคพลาสมาต่อการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันในสุกร ณัฐธนิชา ทองสุกใส จำลอง มิตรชาวไทย อำพล กล่อมปัญหา สวรรยา อำพนพิศลย์ มณีรัตน์ แฝวปราบเสี้ยน และ ชนาธิป ธรรมการ

โปรแกรมการนำเสนอผลงานระดับชาติ ภาคโปสเตอร์

Chairperson	รองศาสตราจารย์ ดร.พรณิภา ยั่วยล	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกพร บุญญะอดิชาติ	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
	อาจารย์ ดร.มนสิชา ตีปะวรรณภา	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
เวลานำเสนอ	รหัส	เรื่อง
10.30 – 10.40	PA-06	การทดสอบปลูกพญาอินในโรงเรือนระบบเปิดควบคุมการระบายอากาศและความชื้นสัมพัทธ์แบบอัตโนมัติ สราวุฒิ ปานทน ธนาวัฒน์ ทิพย์ชิต วุฒิพล จันทรสระคู และ จารุวรรณรัตน์ รัตนสกุลธรรม
10.40 – 10.50	PA-28	การศึกษาวัดปรับปรุงดินคุณภาพสูงเพื่อเพิ่มคุณภาพดินกลุ่มดินที่ 48 ในพื้นที่ตำบลท่าตะคร้อ อำเภอนองหญ้าปล้อง จังหวัดเพชรบุรี วัชรินทร์ รตนพันธ์ พิรภัทร อังกนันท์ ปฎิพัฒน์ ศรีสงคราม และ โอภาส สืบสาย
10.50 – 11.00	PA-36	ความอุดมสมบูรณ์ของดินและความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียน พันธุ์หมอนทองที่มีการจัดการธาตุอาหารต่างกันในอำเภอบะพือ จังหวัดชุมพร นารี พันธุ์จินดาวรรณ ป.ปัญญา พรหมอักษร และ พรทิวา กัญยวงศ์หา
11.00 – 11.10	PA-62	อิทธิพลของความหนาแน่นเริ่มต้นและชนิดของมูลสัตว์ต่อการเจริญเติบโตของแห่นแดงในบ่อปูนซีเมนต์ ธนรรษมลวรรณ พลมันั ธิดารัตน์ พูลสวัสดิ์ ภิรติพร ปิ่นเกตุ ญัฐพร ทองประทุม ศรศิริ แผล่งหล้า และ ภาวรรณ สุพรรณรัตน์
พักรับประทานอาหารกลางวัน		

กลุ่ม 2: ด้านเทคโนโลยี และวิศวกรรมศาสตร์

Chairperson	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรัชชล วัฒนะ	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
	อาจารย์ ดร.รัตติกร สมบัติแก้ว	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
เวลานำเสนอ	รหัส	เรื่อง
13.00 – 13.10	PT-12	การทำนายปริมาณความชื้นของเม็ดอาหารสัตว์ด้วยแบบจำลองการอบแห้งที่หลากหลาย จตุพัฒน์ ไมแก้ว ธัชพล จุ่งเจริญ นฤบดี ศรีสังข์ ศิริวรรณ ศรีสังข์ ชัยวัฒน์ รตนมีชัยสกุล และ นิตยา จันทกา
13.10 – 13.20	PT-55	อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างโปรตีนถั่วเหลืองและกลูเตนข้าวสาลีต่อสมบัติทางกายภาพของลูกชิ้นเลียนแบบเนื้อสัตว์จากพืช ชนัญชิตา พุ่มตาก้อง และ ประสงค์ ศิริวงศ์ไผ่ชาติ
13.20 – 13.30	PE-60	การทดสอบพัดลมไฟฟ้าแบบใบพัดโค้งหลัง ในระบบคัดแยกและทำความสะอาดเครื่องเกี่ยวนาข้าวไร้ต่อพ่วงหน้ารถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก (14 แรงม้า) วรุตน์ วิเชียร อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ จุมพล กุลยวน ธนราช สวัสดิ์ผล สกุล ท่อโนทยาน รณชาติ มั่นศิลป์ และ ญัฐพงศ์ รตนเดช
13.30 – 13.40	PE-76	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนการไหลของน้ำในทุเรียนโดยวิธีการกระจายความร้อน เผด็จศึก สุพรรณรัตน์ เจษฎา ไสภารัตน์ และ สุรพล ฐิติธนากุล

โปรแกรมการนำเสนอผลงานระดับชาติ ภาคโปสเตอร์ (ต่อ)

กลุ่ม 2: ด้านเทคโนโลยี และวิศวกรรมศาสตร์

Chairperson	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอานรรค ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรัชชล วัฒนะ อาจารย์ ดร.รัตติกกร สมบัติแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
เวลานำเสนอ	รหัส	เรื่อง
13.40 – 13.50	PE-84	การศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบการอบแห้งสับปะรดภูแลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า
		เทวรัตน์ ตรีอานรรค สุพรรณษา อสายุทธ ปริศนา ขำนิเขตการ และ กระวี ตรีอานรรค

กลุ่ม 4: ด้านวิทยาศาสตร์

Chairperson	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกพร บุญญะอดิชาติ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุช ภูลเกตุวงศ์ อาจารย์ศิริศักดิ์ แสนสุขกะโต	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
เวลานำเสนอ	รหัส	เรื่อง
13.00 – 13.10	PS-9	การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบด้วยการเสริมผงจิ้งหรีด ณัฐจริย์ จิรัคกุล และ อริยา พูลกลาง
13.10 – 13.20	PS-71	การพัฒนาระบบการวัดสนามแม่เหล็กด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi Pico สำหรับระบบการวัดสนามแม่เหล็กแบบราคาประหยัด พระนาย สุริยาสภาพร บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์ และ ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์
13.20 – 13.30	PS-97	การประเมินฤทธิ์ทางชีวภาพด้านเวชสำอางของเห็ดหลินจือป่าในประเทศไทยที่เจริญบนวัสดุเพาะแตกต่างกัน จิรนนท์ ภิรมย์ฤทธิ์ ยาวภา อร่ามศิริจุฑาเวทย์ และ ชุรภา ธีรภัทรสกุล

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 10

ดร.สราวุธ แซ่เต็ง	นักวิชาการอิสระ
ผศ.ดร.อนงนาฏ ศรีประโชติ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.นเรศ นิเมธ	มหาวิทยาลัยทักษิณ
ดร.ธิดา ทองคำงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผศ.ดร.นรเศรษฐ์ วิชัยพาณิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สินิทธา สุขสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.พุทธิพงษ์ เลขาชัยวรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.อภิรักษ์ เสือเดช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.ดร.กระวี ตรีอำรรค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผศ.ดร.พรชัย ทาระโคตร	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ดร.พิพัฒน์ จันทร์ประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์
ดร.พลวัต ช่อผูก	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.ฐิติรัตน์ ถาวรสุจริตกุล	มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง
ดร.ชรินทร์ ศรีวิฑูรย์	มหาวิทยาลัยแม่โจ้-ชุมพร
อ.พาริส หงษ์สกุล	มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.วลัยลักษณ์ เขียวมีสวน	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
รศ.ดร.นิตยา จันภา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ดร.ชนพงษ์ อารณพิศาล	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ผศ.ดร.นภัสพร นิยะวานนท์	มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
อ.ธนากร พั่งเือง	มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
ผศ.ดร.กฤษณ์พนธ์ พรณรัตน์ชัย	มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
รศ.ดร.ภาคภูมิ ศรีมรินทร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.คมกริช นันทะโรงพงศ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.สมมาส แก้วล้วน	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.สรารัตน์ มนต์ขลัง	มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตสารสนเทศเพชรบุรี
อ. เบญจมาศ แซ่หว่าง	โรงเรียนบ้านเนินทอง
รศ.ดร.ช่อแก้ว อนิลบล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ดวงกมล แต่มช่วย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.พรทิวา กัญญวงศ์หา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.จิราพร อ่อนมั่นคง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ว่าที่ร้อยตรี ดร.กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธุ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.ธัชพล จุ่งเจริญ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.นารถะพี นาคะวัจนะ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.ปัญญา แดงวิไลลักษณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.พรประพา คงตระกูล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.พรรณิภา ย้วยล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.ร่วมจิตร นกเขา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสังข์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

รศ.วชร กาลาสี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.กนกพร บุญญะอดิชาติ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.ชนัดดา ภาวโสทร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.ชมพูนุช กุลเกตุวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.ชุตินันต์ บุญนวล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.ไชยณ ศรีเกตุ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.ดิษฐพร ตุงไธยานนท์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.ปราโมทย์ กุศล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.พัชรภรณ์ นาคเทวัญ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.ไพบุลย์ โพธิ์หวังประสิทธิ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.มนตรี ไชยชาญยุทธ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.รัฐพงษ์ สุวลักษณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.วลัยพร ทองประดับ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.วารุณี ลิ่มมัน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.วิสิทธิ์ เอกวานิช	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.สายชล เลิศสุวรรณ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.สุธีรวัฒน์ พันธุ์มาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.ดร.อดิเรก สุริยะวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.วรัชชล วัฒนะ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ.วัชรินทร์ รัตนพันธ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ดร.กมลวรรณ ชูชีพ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ดร.กัญญ์ชลา กิระศิริวิ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ดร.กิตติ แก้วเขียว	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ดร.จิราพร หาญกลับ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ดร.บิรมินชา พุทธเกิด	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ดร.รัชนิวรรณ แดงวิไลลักษณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ดร.ศักรินทร์ ชินกุลพิทักษ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ดร.ศิวกร สอกจะบก	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ดร.สุภาพร ชุ่มเพ็ญ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ดร.อธิป จันทรสุรีย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
อ.นภัสรพี สิทธิวัจน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
อ.ศิริศักดิ์ แสนสุขกะโต	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
อ.สักรกะพันธ์ คล้ายดอกจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
อ.อรรถศาสตร์ นาคเทวัญ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

ภาคบรรยาย

อัลกอริทึมการเชื่อมโยงบุคคลโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน Linking Individuals Algorithm Using Unsupervised Learning Technique

อรรถศาสตร์ นาคเทวัญ^{1,*} นารารอง สว่างวงศ์² ฮาบีบี๊ะ สดอหลง² และ นภสรพี สิทธิวัฒน์¹
Athasart Narkthewan^{1,*}, Naraon Sawangwong² Habebah Strolong² and Naphasrapee Sittiwatjana¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

²ฝ่ายสนับสนุนงานวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

¹Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

²Supporting Academic Affair, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Athasart Narkthewan, e-mail address: athasart.na@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันพฤติกรรมการดำรงชีวิตของมนุษย์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมหรือสถานการณ์ ดังนั้นการเข้าใช้สถานที่ต่าง ๆ ของคนสังคมจึงเป็นสิ่งที่ต้องติดตามและตรวจสอบ เพื่อการป้องกันและแก้ปัญหาเมื่อเกิดเหตุต่าง ๆ ดังนั้นการรับรู้ถึงการเข้าใช้สถานที่ของบุคคลจึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการตรวจสอบ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาอัลกอริทึมการเชื่อมโยงบุคคลโดยนำเอาเทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่องจักรมาปรับใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะงาน ในการทดลองเริ่มจากสร้างชุดข้อมูลการเข้าใช้บริการสถานที่ต่างๆ ของบุคคลในช่วงเวลาที่เปิดให้บริการ จากนั้นมีการปรับปรุงข้อมูลให้เหมาะสมกับการเรียนรู้โดยใช้เทคนิคทางด้านวิทยาการข้อมูลเพื่อวิเคราะห์จำนวนกลุ่มที่เป็นไปได้ของบุคคลที่เข้าใช้บริการ สำหรับขั้นตอนการจัดกลุ่มเพื่อสร้างการเชื่อมโยงบุคคลได้เลือกใช้ K-Mean ซึ่งเป็นเทคนิคการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน การพัฒนาอัลกอริทึมของงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการเชื่อมโยงบุคคล โดยใช้ชุดข้อมูลการเข้าใช้ห้องของบุคคล 50 คน จำนวน 5 ห้อง เป็นระยะเวลา 15 วัน ผลปรากฏว่าสามารถเชื่อมโยงบุคคลได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำนวนบุคคลที่เข้าใช้ห้องมีผลวิเคราะห์ตรงกันกับการตรวจจากข้อมูลดิบ และการจัดกลุ่มความเชื่อมโยงของบุคคลสามารถทำได้ 2 แบบ คือ การเชื่อมโยงบุคคลที่บอกถึงระดับความสำคัญของการเชื่อมโยง (สูง ปานกลาง และ ไม่มีความเชื่อมโยง) และการเชื่อมโยงบุคคลเฉพาะสถานที่ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการสร้างความเชื่อมโยงบุคคลในการเข้าใช้สถานที่ทั้ง 2 แบบ มีความถูกต้องของการจัดกลุ่ม 97.8% และ 97.2% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาระบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องได้

คำสำคัญ: การเรียนรู้ของเครื่อง, การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน, เค-มีน, การเชื่อมโยงบุคคล

Abstract

Nowadays, human lifestyles have evolved in response to environmental and situational changes. As a result, monitoring and tracking access to various societal locations have become essential for prevention and problem-solving in the event of incidents. Therefore, recognizing and tracking individual access to locations is a crucial tool for surveillance. This research presents the development of a person identification algorithm by leveraging machine learning technology tailored to the specific requirements of the task. In this experiment, the process began with the creation of a dataset capturing individuals' access to various service locations during operational hours. Subsequently, the data was preprocessed to ensure its suitability for the learning process. Data science techniques were employed to analyze the potential number of clusters representing individuals accessing the services. K-Means, an unsupervised learning technique, was chosen for the clustering process to create the individual association. The algorithm developed in this research was tested for linking individuals. A dataset of room usage of 50 individuals across 5 rooms for 15 days was used for processing. The result demonstrated that the algorithm performed effectively. The number of individuals accessing the rooms matched the raw data analysis, and person identification clustering was achieved in two ways: (1) linking individuals based on the level of re-identification significance (high, medium, and no linkage) and (2) linking individuals specific to locations. The experimental results showed that the accuracy of person identification for the two methods was 97.8% and 97.2%, respectively. This indicates that the algorithm developed in this research holds potential for further development and application in related systems.

Keywords: Machine Learning, Unsupervised Learning, K-Mean, Linking Individuals

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบันการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพฤติกรรมการใช้สถานที่ของมนุษย์ มีความสำคัญอย่างมากในการจัดการสถานที่และความปลอดภัย โดยเฉพาะการวิเคราะห์ความเชื่อมโยงของบุคคลในการเข้าใช้สถานที่ เช่น ห้องประชุม ห้องปฏิบัติการ หรือพื้นที่ส่วนกลาง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการ ทั้งในแง่ของการให้ข้อมูลต่อผู้เข้ารับบริการ การประเมินปริมาณในการให้บริการ การตรวจสอบติดตามผู้ใช้บริการ การตรวจสอบย้อนกลับไปในเวลาของการเข้าใช้บริการสถานที่ของบุคคลที่ต้องการติดตาม เพื่อแสดงความเชื่อมโยงกับบุคคลอื่น ๆ ในมิติของช่วงเวลา หรือ Timeline ของการเข้าใช้บริการการใช้สถานที่ และการทำนายการเข้าใช้บริการการใช้สถานที่ของบุคคลตามพฤติกรรมการใช้บริการที่ผ่านมา หรือการคาดการณ์การแพร่กระจายของโรคติดต่อจากบุคคลที่อยู่ในจุดต่าง ๆ ซึ่งจะสามารถสร้างความเชื่อมโยงถึงบุคคลอื่น ๆ ได้

จากการศึกษาและงานวิจัยที่ได้กล่าวมาพบว่า การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) [1] เป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพและถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลช่วยให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้ข้อมูล และสามารถตัดสินใจได้ โดยการเรียนรู้ของเครื่องนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) และ การเรียนรู้แบบมีเสริมกำลัง (Reinforcement Learning) [2] ซึ่งแต่ละประเภทมีความเหมาะสมในการนำไปใช้วิเคราะห์ข้อมูลที่แตกต่างกัน เช่น การเรียนรู้แบบมีผู้สอน [3] ใช้ข้อมูลที่มี label หรือค่าผลลัพธ์ที่ถูกต้อง เพื่อให้โมเดลเรียนรู้ และสามารถทำนายผลลัพธ์ของข้อมูลใหม่ได้ ส่วนการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน [4] ใช้ข้อมูลที่ไม่มี label หรือไม่มีการกำหนดค่าผลลัพธ์ล่วงหน้า มีเป้าหมายหลักคือการค้นหารูปแบบหรือโครงสร้างที่ซ่อนอยู่ในข้อมูล มักนิยมใช้สำหรับการจัดกลุ่มข้อมูล (Clustering) มีเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลที่สำคัญ คือ K-Mean Clustering ซึ่งเป็นหนึ่งในอัลกอริธึมการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนที่นิยมใช้ในการแบ่งกลุ่มข้อมูล โดยอาศัยการคำนวณระยะทางระหว่างจุดข้อมูลเพื่อแบ่งกลุ่ม [5]

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา และวิเคราะห์รูปแบบการเข้าใช้สถานที่ของบุคคลโดยมีข้อมูล บุคคลผู้เข้าใช้สถานที่ วันที่เข้าใช้ ห้องที่เข้าใช้ และเวลาเข้า-ออก โดยข้อมูลการเข้าใช้สถานที่ของบุคคลนี้อาจจะถูกเก็บรวบรวมมาจากระบบต่าง ๆ เช่น ระบบการสแกนเข้าสถานที่ หรือกล้องวงจรปิดที่มีการวิเคราะห์ใบหน้าบุคคล ซึ่งในงานวิจัยนี้จะไม่กล่าวถึง แต่จะใช้ตารางข้อมูลการเข้าใช้สถานที่ของบุคคลเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาในครั้งนี้ เมื่อพิจารณาข้อมูลในชุดนี้พบว่าข้อมูลจะไม่มี Label หรือป้ายกำกับผลลัพธ์ล่วงหน้า ซึ่งต้องการสร้างความเชื่อมโยงบุคคล หรืออีกนัยหนึ่งคือการจัดกลุ่มของบุคคลที่มีความเชื่อมโยงกันในการเข้าใช้สถานที่ ดังนั้นการเรียนรู้ของเครื่องแบบไม่มีผู้สอน โดยใช้อัลกอริธึม K-Means Clustering เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการเข้าใช้สถานที่ของบุคคลจึงมีความเหมาะสมสำหรับการจัดกลุ่มบุคคลเหล่านี้ เนื่องจาก K-Mean มีข้อดีคือ ความเรียบง่ายในการวิเคราะห์ข้อมูล มีประสิทธิภาพในการประมวลผล สามารถจัดการกับข้อมูลจำนวนมากได้ดี แต่ละคลัสเตอร์มีจุดศูนย์กลาง (Centroid) ที่ชัดเจน เข้าใจกลุ่มของข้อมูลได้ง่าย สามารถปรับใช้ได้หลากหลายโดเมน เหมาะกับการประยุกต์ใช้จัดกลุ่มข้อมูล

2. วิธีการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ได้ศึกษาการเรียนรู้ของเครื่องแบบไม่มีผู้สอน เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการจัดกลุ่มบุคคลในการเข้าใช้สถานที่ ในกระบวนการพัฒนาอัลกอริธึมสำหรับการสร้างความเชื่อมโยงบุคคลนี้จึงต้องมีการ รวบรวมข้อมูล เตรียมข้อมูล สำหรับการวิเคราะห์ และการพัฒนาอัลกอริธึมสร้างความเชื่อมโยง

2.1 การรวบรวมข้อมูล

ในขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล ได้กำหนดชุดข้อมูลที่ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาอัลกอริธึมตามการศึกษานี้ โดยในแต่ละชุดข้อมูลการเข้าใช้สถานที่ประกอบด้วยข้อมูลดังนี้ คือ บุคคล (Person ID) วันที่เข้าใช้ (Day) ห้อง (Room) เวลาเข้า (Time in) และเวลาออก (Time out) โดยในการศึกษานี้ได้ทำการสร้างชุดข้อมูลการเข้าใช้ห้องของบุคคลจำนวน 50 คน วันที่เข้าใช้งานจำนวน 15 วัน และห้องทั้งหมดจำนวน 5 ห้อง ได้แก่ Classroom, Research, Library, Co-Working Space และ Lounge ในการสร้างชุดข้อมูลนี้ใช้วิธีการสุ่มบุคคลเข้าห้องต่าง ๆ ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน แต่ละบุคคลสามารถเข้าใช้งานห้องได้หลายห้องในแต่ละวัน ตามลักษณะการใช้งานจริงในชีวิตประจำวัน มีรูปแบบการเก็บรวบรวมข้อมูลในแต่ละรายการ เช่น

Person_ID: 1, Day: 1, Room: Classroom, Time_in: 09:00, Time_out: 12:00

2.2 เตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์

จากข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจะต้องนำข้อมูลเหล่านั้นมาทำการเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ หรือที่เรียกว่า Feature Engineering เพื่อให้ได้ข้อมูลที่พร้อมสำหรับการจัดกลุ่ม ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการแปลงข้อมูลเวลาเข้า-ออก จากเวลาปกติในชีวิตประจำวัน ให้เป็นนาฬิกา โดยเริ่มจาก เวลา 00.00 - 24.00 เป็น 0 - 1,440 โดยใช้สูตรคำนวณตามสมการที่ (1) จากนั้นนำไปแทนที่ Time_in และ Time_out ในตารางข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ความทับซ้อนของช่วงเวลาการใช้งานห้องต่อไป

$$new_time = (H \times 60) + M \quad (1)$$

เมื่อ H คือ ชั่วโมง ในตารางเวลา
 M คือ นาที ในตารางเวลา

จากข้อมูลรายการเข้าใช้งานห้องที่ได้เก็บมาในขั้นตอนก่อนหน้านี้ ในส่วนของข้อมูลเวลา Time_in และ Time_out จะถูกนำมาคำนวณตามสมการที่ (1) และได้ข้อมูลใหม่หลังจากการปรับปรุงข้อมูลดังนี้

Person_ID: 1, Day: 1, Room: Classroom, Time_in: 540, Time_out: 720

ในขั้นตอนการเตรียมข้อมูลถัดมาคือการสร้างเมตริกความเชื่อมโยงระหว่างบุคคลในมิติเวลา โดยการคำนวณเวลาการเข้าใช้ห้องที่ทับซ้อนกัน ตามสมการที่ (2 - 5) **Overlap_start** คือเวลาเข้าห้องช้าที่สุด **Overlap_end** คือ เวลาออกจากห้องที่เร็วที่สุด **Overlap** คือค่าตรรกะบูลีนในการตรวจสอบว่าบุคคลมีเวลาซ้อนทับกันหรือไม่ และ **Overlap_time** คือ ค่าเวลาที่บุคคลเข้าใช้ห้องทับซ้อนกัน

$$Overlap_start = Max(Time_in1, Time_in2) \quad (2)$$

$$Overlap_end = Min(Time_out1, Time_out2) \quad (3)$$

$$Overlap = \begin{cases} True, & Overlap_start < Overlap_end \\ False, & Overlap_start \geq Overlap_end \end{cases} \quad (4)$$

$$Overlap_time = Overlap_end - Overlap_start \quad (5)$$

เมื่อ $Time_in1$ คือ เวลาเข้าห้องของบุคคลที่ 1
 $Time_in2$ คือ เวลาเข้าห้องของบุคคลที่ 2
 $Time_out1$ คือ เวลาออกจากห้องของบุคคลที่ 1
 $Time_out2$ คือ เวลาออกจากห้องของบุคคลที่ 2

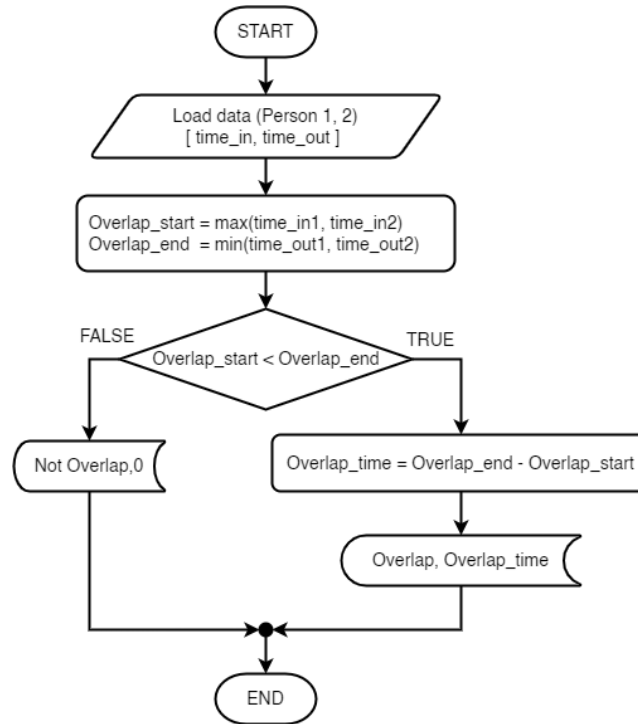
จากสมการในข้างต้นสามารถนำมาสร้างเมตริกความเชื่อมโยงระหว่างบุคคลได้ตามผังงานใน Figure 1 ซึ่งแสดงให้เห็นการเปรียบเทียบข้อมูลการซ้อนทับทางเวลาระหว่าง 2 บุคคล ผลที่ได้จะถูกนำไปใส่ในเมตริกความเชื่อมโยง และข้อมูลพร้อมจะถูกนำไปจัดกลุ่มในลำดับถัดไป

2.3 การจัดกลุ่มข้อมูลการเชื่อมโยงบุคคล

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อดำเนินการเชื่อมโยงบุคคล โดยนำเอาเมตริกความเชื่อมโยงระหว่างบุคคลมาดำเนินการเรียนรู้โดยไม่มีการสอนด้วยเทคนิคของ K-Mean [4] แต่การประมวลผลข้อมูลด้วย K-Mean นั้นมีพารามิเตอร์สำคัญที่ต้องกำหนด คือ k หรือจำนวนกลุ่มที่ต้องการจำแนก ซึ่งพฤติกรรมการใช้ห้องของบุคคลต่าง ๆ มีการเข้าใช้ที่หลากหลาย สามารถเข้าใช้งานห้องได้มากกว่า 1 ห้องใน 1 วัน และการเข้าใช้ห้องเป็นกลุ่มในเชิงพฤติกรรมแสดงว่าบุคคลเหล่านั้นย่อมมีความเชื่อมโยงกันที่เหนียวแน่นกว่าการเข้าใช้ห้องเพียงคนเดียวที่มีผู้ใช้ห้องคนอื่น ๆ ร่วมใช้อยู่ด้วย ในการศึกษาครั้งนี้จึงพัฒนาอัลกอริธึมที่สามารถกำหนดจำนวนกลุ่มการเชื่อมโยงที่ไม่คงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการใช้ห้องในแต่ละวัน

ในการศึกษานี้ได้ใช้ค่า Silhouette score ซึ่งปกติจะใช้สำหรับการทดสอบความแม่นยำของการจัดกลุ่ม [6] สามารถหาได้จากสมการ (6-8) โดยใช้ค่าสูงสุดมากำหนดเป็นจำนวนกลุ่ม หรือค่า k ให้กับ K-Mean ต่อไป

Figure 1 Time series analysis for people overlapping



$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max(a(i), b(i))} \quad (6)$$

$$a(i) = \frac{1}{|C| - 1} \sum_{j \in C, j \neq i} d(i, j) \quad (7)$$

$$b(i) = \min_{C' \neq C} \frac{1}{|C'|} \sum_{j \in C'} d(i, j) \quad (8)$$

เมื่อ $s(i)$ คือ ค่า Silhouette Score สำหรับจุดข้อมูล i มีค่าระหว่าง -1 ถึง 1
 $a(i)$ คือ ระยะทางเฉลี่ยจากจุดข้อมูล i ไปยังจุดข้อมูลอื่นๆ ในคลัสเตอร์เดียวกัน
 $b(i)$ คือ ระยะทางเฉลี่ยจากจุดข้อมูล i ไปยังจุดข้อมูลใน คลัสเตอร์อื่นที่ใกล้ที่สุด
 $|C|$ คือ จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมดในคลัสเตอร์ C
 $d(i, j)$ คือ ระยะทาง (Euclidean distance) ระหว่างจุด i และ j
 C' คือ คลัสเตอร์อื่นใดที่ไม่ใช่คลัสเตอร์ปัจจุบัน C

เมื่อได้ค่า k สำหรับการจัดกลุ่มแล้วจึงนำเอาเมตริกความเชื่อมโยงมาผ่านการบวนการเรียนรู้ K-Mean ซึ่งมี 3 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ การคำนวณระยะห่างระหว่างจุด Centroid กับจุดข้อมูล การกำหนด Cluster ให้กับจุดข้อมูล และการคำนวณจุด Centroid ใหม่ แล้วทำซ้ำกระบวนการเดิมจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงกลุ่ม สมการของ K-Mean แสดงได้ดังสมการที่ (9-11) และอธิบายกระบวนการของ K-Mean ตามผังงานใน Figure 2

$$d(P, Q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2} \quad (9)$$

$$C_k = \arg \min_k d(x_i, \mu_k) \quad (10)$$

$$\mu_k = \frac{1}{|C_k|} \sum_{x_i \in C_k} x_i \quad (11)$$

เมื่อ $d(P, Q)$ คือ ระยะทางแบบยุคลิดระหว่างจุด P และ Q
 p_i คือ ค่าพิกัดที่ i ของ จุด P
 q_i คือ ค่าพิกัดที่ i ของ จุด Q
 n คือ จำนวนมิติของข้อมูล
 k คือ ดัชนีของคลัสเตอร์
 C_k คือ คลัสเตอร์ที่จุดข้อมูล x_i จะถูกจัดเข้าไป
 μ_k คือ จุดศูนย์กลางของคลัสเตอร์
 x_i คือ จุดข้อมูล

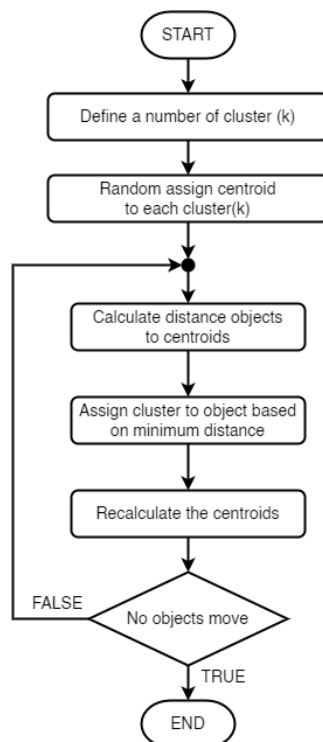


Figure 2 K-Mean algorithm for clustering data

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการจำลองข้อมูลการเข้าใช้ห้องของบุคคลจำนวน 50 คน เป็นเวลา 15 วัน มีห้องที่สามารถเข้าใช้งานได้จำนวน 5 ห้อง ซึ่งได้กำหนดเงื่อนไขของเวลาการเข้าใช้ห้องต่าง ๆ ไว้หลากหลาย ตามลักษณะการใช้งานห้องต่าง ๆ โดยได้ทำการศึกษาทดลองตามวิธีการศึกษาที่ได้กำหนดไว้ และมีผลการทดลองในส่วนต่าง ๆ ดังนี้

3.1 การทดลองเก็บรวบรวมข้อมูลและการปรับปรุงข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์

จากการสร้างชุดข้อมูลจำลองสามารถแสดงลักษณะตัวอย่างข้อมูลเริ่มต้นดัง Table 1 และข้อมูลที่ปรับปรุงเวลาเป็นหน่วยนาที ดัง Table 2 และเมตริกความเชื่อมโยงระหว่างบุคคลดัง Figure 3

Table 1 Example room usage information on Day 1

Person ID	Day	Room	Time_in	Time_out
1	1	Classroom	09:00	12:00
1	1	Research	18:15	19:35
2	1	Library	14:39	16:08
7	1	Co-Working Space	12:51	16:35
8	1	Classroom	09:00	12:00
24	1	Library	13:10	17:46
33	1	Research	17:00	22:40
50	1	Classroom	09:00	12:00
50	1	Research	01:41	05:33

Table 2 Example room usage information on Day 1 after changing time to time-minute

Person ID	Day	Room	Time_in	Time_out
1	1	Classroom	540	720
1	1	Research	1095	1175
2	1	Library	879	968
7	1	Co-Working Space	771	995
8	1	Classroom	540	720
24	1	Library	790	1066
33	1	Research	1020	1360
50	1	Classroom	540	720
50	1	Research	101	333

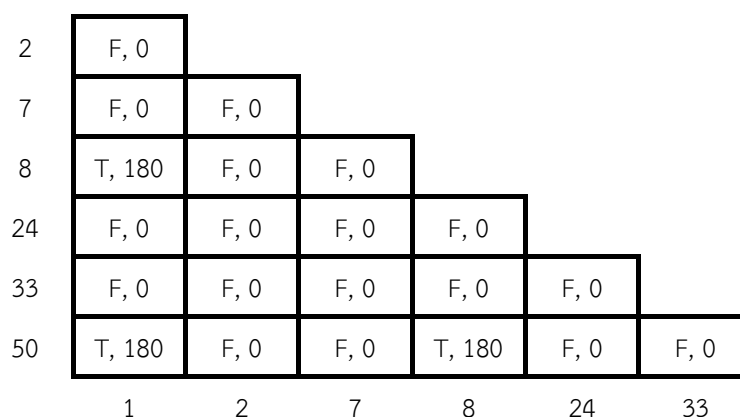


Figure 3 People connection metrics for Classroom on Day 1

3.2 การทดลองจัดกลุ่มข้อมูลการเชื่อมโยงบุคคล

ในส่วนของการศึกษาและการทดลองนี้ได้พัฒนาโปรแกรมตามหลักการที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น ข้อมูลที่ได้เตรียมไว้ถูกบันทึกในรูปแบบของตารางข้อมูล ซึ่งมีข้อมูลทั้งหมดจำนวน 1,995 แถวข้อมูล และในขั้นตอนของการทดลอง มีการทดลองสร้าง

ความเชื่อมโยงบุคคลในวันต่าง ๆ โดยการทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การสร้างความเชื่อมโยงบุคคลในวันที่ที่กำหนด โดยดูความเชื่อมโยงจากทุกห้อง และการสร้างความเชื่อมโยงบุคคลในวันและห้องที่กำหนด

3.2.1 การทดลองสร้างความเชื่อมโยงบุคคลในวันที่กำหนดโดยดูความเชื่อมโยงจากทุกห้อง

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองการสร้างความเชื่อมโยงบุคคลโดยการกำหนดวันที่ต้องการสร้างความเชื่อมโยง โดยพิจารณาจากข้อมูลการเข้าใช้ห้องทั้งหมด และมีการกำหนดค่า Overlap time ของบุคคลสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล โดยกำหนดค่า Overlap time ≥ 30 เนื่องจากเป็นระยะเวลาที่นานพอเพื่อแสดงว่าบุคคลที่อยู่ร่วมกันภายในห้องในช่วงเวลานั้น ๆ จะมีกิจกรรมร่วมกัน แสดงถึงความเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น และได้กำหนดระดับของความเชื่อมโยงเป็น 3 ระดับ (สูง ปานกลาง และ ไม่มีความเชื่อมโยง) ดังนั้นจึงกำหนดค่า $K = 3$

จากผลการทดลองดัง Figure 4 พบว่าบุคคลถูกจับกลุ่ม 3 กลุ่มตามที่ได้กำหนดไว้ และเมื่อพิจารณาข้อมูลผลการจัดกลุ่ม จะพบว่าบุคคลที่ถูกจับให้อยู่ในกลุ่มหรือคลัสเตอร์เดียวกัน จะเป็นกลุ่มก้อนที่ชัดเจน โดยกลุ่มบุคคลที่ถูกจับกลุ่มเข้าด้วยกัน แต่ละกลุ่มมีดังนี้

กลุ่มบุคคลที่มีความเชื่อมโยงสูง: [1 2 3 4 5 6 8 9 10 12 13 14 15 17 19 20 23 24 25 26 28 30 33 34 35 36 37 38 39 40 45 46 48 50]
 กลุ่มบุคคลที่มีความเชื่อมโยงปานกลาง: [11 16 18 21 27 29 31 32 41 43 44 47 49]
 กลุ่มบุคคลที่ไม่มีความเชื่อมโยง: [7 22 42]

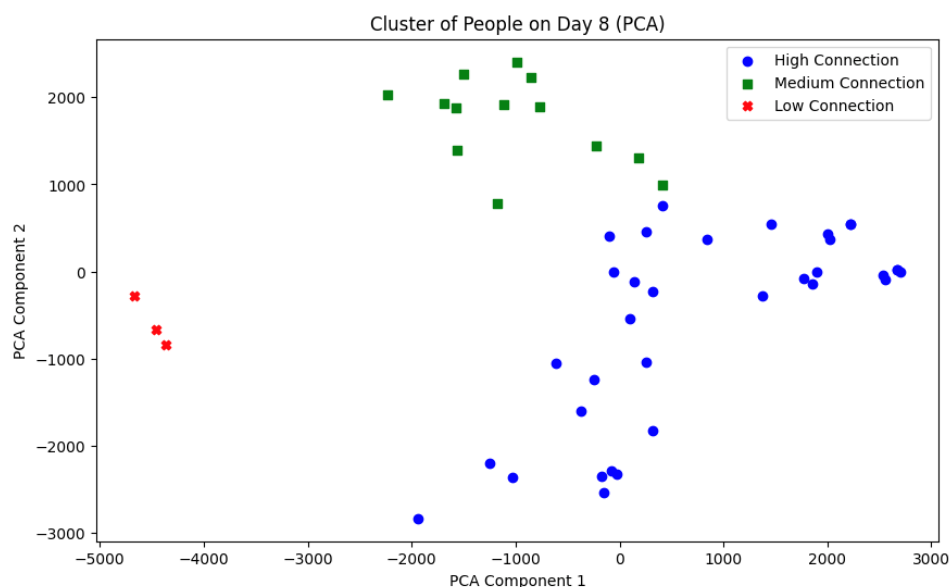


Figure 4 Results of the connecting people in every room on Day 8

3.2.2 การทดลองสร้างความเชื่อมโยงบุคคลในวันและห้องที่กำหนด

การทดลองนี้เป็นการทดลองการสร้างความเชื่อมโยงบุคคลโดยการกำหนดวันและห้องที่ต้องการสร้างความเชื่อมโยง โดยพิจารณาจากข้อมูลการเข้าใช้ห้องนั้น ๆ ตามวันที่กำหนด และมีการกำหนดค่า Overlap time ≥ 30 ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.2.1 และเนื่องจากการทดลองนี้ต้องการสร้างความเชื่อมโยงของบุคคลที่เข้ามาใช้ห้องในวันที่กำหนด ซึ่งไม่สามารถกำหนดจำนวนกลุ่มการเชื่อมโยงที่แน่ชัดได้ การทดลองนี้จึงได้ใช้การหาค่า Silhouette score เพื่อหาค่า K

จากผลการทดลองวิเคราะห์ข้อมูลห้อง Lounge ในวันที่ 7 ได้ผลลัพธ์ดัง Figure 5 ซึ่งผลการทดลองหาค่า Silhouette score จะได้ค่า $K = 4$ ดัง Figure 5(a) เนื่องจากที่ Number of Cluster 4 มีค่าสูงสุดในกราฟ และ Figure 5(b) พบว่าบุคคลถูกจับกลุ่มจำนวน 4 กลุ่มตามค่า K ที่คำนวณได้ โดยกลุ่มบุคคลที่ถูกจับกลุ่มเข้าด้วยกันแต่ละกลุ่มมีดังนี้

กลุ่มที่ 1 (Cluster 0): [13 19 23]
 กลุ่มที่ 2 (Cluster 1): [15 31 44 46]
 กลุ่มที่ 3 (Cluster 2): [11 42 47]
 กลุ่มที่ 4 (Cluster 3): [22 24 32 43 49]

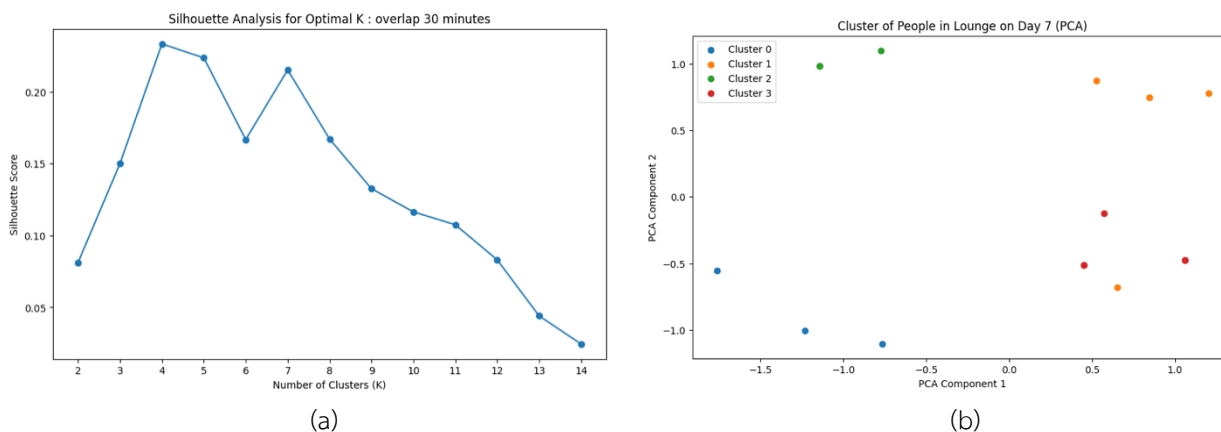


Figure 5 Results of the connecting people in the Lounge room on Day 7

จากผลการทดลองเมื่อนำผลการวิเคราะห์การเชื่อมโยงบุคคลมาตรวจสอบกับข้อมูลดิบในตารางข้อมูล พบว่าอัลกอริธึมที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถระบุความเชื่อมโยงบุคคลที่มีการเข้าใช้ห้องต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง ดัง Figure 6 ที่แสดงความเชื่อมโยงข้อมูลจากการกรอข้อมูลห้อง Lounge ในวันที่ 7 ซึ่งมีผู้เข้าใช้งานจำนวน 15 คน ซึ่งตรงกับการทดลองใน Figure 5 ที่มีผลการเชื่อมโยงบุคคลตรงกัน เมื่อพิจารณาการซ้อนทับของข้อมูลและใช้ระยะเวลาที่ซ้อนทับกันเป็น Feature ที่สำคัญ ในการจัดกลุ่มการเชื่อมโยงพบว่าข้อมูลในตารางมีบุคคลบางคนที่มีเวลาซ้อนทับกันแต่ถูกจัดให้อยู่คนละกลุ่ม เนื่องจากในการจัดกลุ่มจะพิจารณาระยะเวลาในการใช้ห้องร่วมกันเป็นส่วนสำคัญ

Person ID	Date	Room	Time In	Time Out
11	7	Lounge	16:09	17:37
13	7	Lounge	11:05	12:49
15	7	Lounge	12:58	14:46
19	7	Lounge	09:40	11:30
22	7	Lounge	13:53	15:59
23	7	Lounge	12:54	14:06
24	7	Lounge	12:18	15:03
31	7	Lounge	13:25	17:12
32	7	Lounge	13:47	15:01
42	7	Lounge	15:16	17:17
43	7	Lounge	12:11	15:21
44	7	Lounge	14:20	17:39
46	7	Lounge	14:06	17:37
47	7	Lounge	16:21	19:40
49	7	Lounge	13:45	15:38

Figure 6 Sample information of the Lounge room on Day 7

ในการทดสอบความถูกต้องของการจัดกลุ่มความเชื่อมโยงบุคคลตามอัลกอริธึมที่พัฒนานี้ ได้ทำการทดลองวิเคราะห์ข้อมูลสร้างการเชื่อมโยงข้อมูลทั้งหมดจำนวน 10 วัน และทำการตรวจสอบข้อมูลย้อนกลับของข้อมูลแต่ละจุด โดยการคำนวณค่าระยะทางไปยังจุด Centroid ทั้งหมดว่าแต่ละจุดว่าอยู่ในคลัสเตอร์ที่ถูกต้องหรือไม่ และได้ผลลัพธ์ดัง Table 3 ในตารางข้อมูลแสดงให้เห็นว่า ในส่วนของการทดลองสร้างความเชื่อมโยงบุคคลในวันที่กำหนดโดยดูความเชื่อมโยงจากทุกห้อง จะมีบุคคลทั้งหมด

50 คนในทุกวัน และมีความผิดพลาดในการจัดกลุ่มบุคคลผิดกลุ่มสูงสุด 3 คน และมีความเฉลี่ยความผิดพลาดในการจัดกลุ่มอยู่ที่ 1.1 คน และการทดลองสร้างความเชื่อมโยงบุคคลในวันและห้องที่กำหนด พบว่าจำนวนบุคคลที่เข้าใช้แต่ละห้อง ในแต่ละวันมีจำนวนไม่เท่ากัน โดยมีความผิดพลาดในการจัดกลุ่มบุคคลผิดกลุ่มสูงสุด 2 คน และมีความเฉลี่ยความผิดพลาดในการจัดกลุ่มอยู่ที่ 0.5 คน แต่หากคิดเป็นร้อยละของความผิดพลาดจะอยู่ที่ 2.8%

Table 3 Results of clustering error assessment

Day	Connecting people in every room			Connecting people in a room		
	Point of data	Wrong group	% error	Point of data	Wrong group	% error
1	50	0	0.0%	24	0	0.0%
2	50	3	6.0%	17	1	5.8%
3	50	3	6.0%	24	0	0.0%
4	50	0	0.0%	16	0	0.0%
5	50	0	0.0%	19	0	0.0%
6	50	1	2.0%	18	0	0.0%
7	50	0	0.0%	19	2	10.5%
8	50	1	2.0%	17	2	11.7%
9	50	1	2.0%	8	0	0.0%
10	50	2	4.0%	13	0	0.0%
Average	50	1.1	2.2%	18	0.5	2.8%

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการสร้างความเชื่อมโยงบุคคลในการเข้าใช้สถานที่ มีความถูกต้องของการจัดกลุ่มความเชื่อมโยงบุคคลตามวันที่กำหนดและเชื่อมโยงทุกห้อง มีความถูกต้องของการจัดกลุ่ม 97.8% และ 97.2% ตามลำดับ

4. สรุป

จากการศึกษาในครั้งนี้ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างการเชื่อมโยงบุคคลในการเข้าใช้สถานที่ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องแบบไม่มีการสอน แสดงให้เห็นว่าอัลกอริธึมที่พัฒนานี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับการวิเคราะห์การเข้าใช้สถานที่ได้ตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ตั้งไว้ ซึ่งสามารถวิเคราะห์การเชื่อมโยงบุคคลได้แม่นยำ สามารถใช้ติดตามกลุ่มบุคคลที่เข้าใช้สถานที่ได้ และการที่ระบบสามารถจัดกลุ่มได้ตามระดับการเชื่อมโยงสูง ระดับการเชื่อมโยงปานกลาง และไม่มีมีความเชื่อมโยงได้จะสามารถจำกัดบุคคลได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อมีเหตุจำเป็นให้ต้องติดตามบุคคลเหล่านั้น และผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำไปสู่การพัฒนากระบวนการอื่น ๆ ที่สัมพันธ์กัน เช่น การทำนายการใช้สถานที่ การประเมินความเสี่ยงโรคระบาด การตรวจสอบและติดตามบุคคล เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยส่งเสริมส่วนงานวิชาการ ประจำปีงบประมาณ 2565 ในโครงการการพัฒนาระบบคัดกรองและแสดงตนเพื่อเข้าสถานที่ และการวิเคราะห์การเชื่อมโยงบุคคลด้วยปัญญาประดิษฐ์ (สัญญาเลขที่ 2565-02-08-005)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Dol and A. Geetha, "A Learning Transition from Machine Learning to Deep Learning: A Survey," in *2021 International Conference on Emerging Techniques in Computational Intelligence (ICETCI)*, 25-27 Aug. 2021, pp. 89-94, doi: 10.1109/ICETCI51973.2021.9574066.
- [2] N. T. R and R. Gupta, "A Survey on Machine Learning Approaches and Its Techniques," in *2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, 22-23 Feb. 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/SCEECS48394.2020.190.
- [3] R. Saravanan and P. Sujatha, "A State of Art Techniques on Machine Learning Algorithms: A Perspective of Supervised Learning Approaches in Data Classification," in *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, 14-15 June 2018, pp. 945-949, doi: 10.1109/ICCONS.2018.8663155.
- [4] D. N. Sidorova, "Description of Software for Comparative Analysis of Clustering Methods," in *2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, 11-13 Nov. 2022, pp. 1570-1573, doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017038.
- [5] S. U. Masruroh, A. T. Fadilah, K. Hulliyah, A. F. Ramadhan, R. A. Putri, and M. A. Irfan, "Implementation of the K-means Clustering Algorithm for Targeting Ads. Case Study: IBM Watson Analytics Car Insurance Customer Data," in *2023 11th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*, 10-11 Nov. 2023, pp. 1-3, doi: 10.1109/CITSM60085.2023.10455449.
- [6] K. R. Shahapure and C. Nicholas, "Cluster Quality Analysis Using Silhouette Score," in *2020 IEEE 7th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*, 6-9 Oct. 2020, pp. 747-748, doi: 10.1109/DSAA49011.2020.00096.

ปัจจัยที่มีผลต่อการสุกแก่ของเมล็ดข้าวเปลือก Factors affecting the ripening of paddy grains.

วัชรพงษ์ ตามไรสง^{1,*} ศักดิ์ชัย อาษาวัง¹ เวียง อารักษ์¹ ยุทธนา เครือหาญชาญพงศ์² กลวัชร ทิมนกุล¹ เอกภาพ ปานภูมิ¹ และ ทิวักร กาลจักร¹
Watcharapong Tamthaisong^{1,*}, Sakchai Arsawang¹, Weang Arekornchee¹, Yuttana Kreuhanchanpong², Kolawat Timinkul¹,
Ekaphap Panpoom¹ and Tiwakorn kalajuk¹

¹ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น, ขอนแก่น, 40000

²สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม, กรุงเทพมหานคร, 10900

¹Khonkaen Agricultural Engineering Research Center, Khonkaen, 40000

²Agricultural Engineering Research Institute, Bangkok, 10900

*Corresponding author: Watcharapong Tamthaisong, e-mail address: b4809319@hotmail.com Tel: +66-9-5958-5122, Fax: +66-43-255-038

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยและพัฒนาเครื่องมือวัดหรือบ่งชี้ความสุกแก่ของเมล็ดข้าวเปลือก โดยได้ทำการหาปัจจัยเพื่อบ่งชี้ความสุกแก่ของเมล็ดข้าวเปลือก เพื่อตอบปัญหาการทดสอบเครื่องเกี่ยวนวดข้าวในระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่สุกพอดีเพื่อจะได้ลดความผิดพลาดที่เกิดจากคนในการพิจารณาความสุกแก่ของเมล็ดข้าวเปลือก ทำการศึกษาในข้าว 3 พันธุ์ ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ข้าวพันธุ์หอมสุพรรณบุรี และข้าวพันธุ์หอมมะลิ 105 ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวที่นิยมเพาะปลูก เพื่อนำไปหาค่าปัจจัยที่มีผลต่อความสุกแก่ของข้าวและนำไปสร้างสมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Linear Regression) แล้วนำไปสร้างเครื่องมือวัดความสุกแก่ข้าวเมล็ดเปลือกจากปัจจัยบ่งชี้ตามหลักวิชาการ ผลที่ได้คือสำหรับ ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 มีปัจจัยที่บ่งชี้ คือ ความชื้นของข้าวเปลือก (X_1) อัตราส่วนมวลต่อปริมาตร (X_2) สีของเมล็ด (X_3) และได้สมการถดถอยแบบพหุคูณ คือ เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่ของเมล็ดข้าว = $-76.302 - 1.059X_1 + 0.443X_2 + 3.222X_3$ ข้าวพันธุ์หอมสุพรรณบุรี มีปัจจัยที่บ่งชี้ คือ ความชื้นของข้าวเปลือก (x_1) อัตราส่วนมวลต่อปริมาตร (X_2) สีของเมล็ด (X_3) น้ำหนักข้าวแกละเปลือกต่อ 100 เมล็ด (X_4) และ เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่ของเมล็ดข้าว = $122.817 - 5.271X_1 + 0.242X_2 + 2.192X_3 - 13.822X_4$ และขณะที่ข้าวพันธุ์หอมมะลิ 105 มีปัจจัยที่บ่งชี้ คือ ความชื้นของข้าวเปลือก (X_1) อัตราส่วนมวลต่อปริมาตร (X_2) สีของเมล็ด (X_3) ความชื้นข้าวแกละเมล็ด (X_5) ค่าของสีในแกนของ L* (X_6) และ เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่ของเมล็ดข้าว = $381.350 - 3.646X_1 - 0.171X_2 + 1.311X_3 - 2.940X_5 - 1.004X_6$

คำสำคัญ: ความสุกแก่ของเมล็ดข้าวเปลือก, เครื่องเกี่ยวนวดข้าว, เครื่องมือวัด, เมล็ดข้าวเปลือก

Abstract

This research and development project aimed to create a tool for measuring or indicating the maturity level of paddy rice grains. The study focused on identifying key indicators that reflect grain maturity in order to address challenges in evaluating rice harvesting machines at the optimal harvesting stage. The ultimate goal was to reduce human error in determining grain maturity. Three widely cultivated rice varieties were studied: Pathum Thani 1, Hom Suphanburi, and Hom Mali 105. For each variety, relevant physical and chemical factors influencing maturity were identified and used to develop multiple linear regression (MLR) models for predicting grain maturity percentage. For Pathum Thani 1, the significant indicators included paddy moisture content (X_1), mass-to-volume ratio (X_2), and grain color (X_3). The resulting MLR equation Grain Maturity (%) = $-76.302 - 1.059X_1 + 0.443X_2 + 3.222X_3$ For Hom Suphanburi, the indicators were paddy moisture content (X_1), mass-to-volume ratio (X_2), grain color (X_3), and weight of 100 dehusked grains (X_4). The equation Grain Maturity (%) = $122.817 - 5.271X_1 + 0.242X_2 + 2.192X_3 - 13.822X_4$ for Hom Mali 105, the significant factors were paddy moisture content (X_1), mass-to-volume ratio (X_2), grain color (X_3), moisture content of dehusked rice (X_5), and L* color value (X_6). The corresponding MLR equation Grain Maturity (%) = $381.350 - 3.646X_1 - 0.171X_2 + 1.311X_3 - 2.940X_5 - 1.004X_6$ The results demonstrate that it is feasible to use measurable physical and colorimetric properties to estimate rice grain maturity with precision. These models provide the basis for developing a practical tool for maturity assessment during harvest, thus supporting improved mechanized rice harvesting.

Keywords: maturity of paddy grains, rice combine harvester, measuring instruments, paddy

1. บทนำ

เครื่องเกี่ยวนวดข้าวเป็นเครื่องจักรกลทางการเกษตรที่มีความสำคัญต่อวิถีชีวิตชาวนาไทยมาอย่างยาวนาน และมีบริษัทผู้ผลิตจำหน่ายทั้งในประเทศและต่างประเทศหลายบริษัทด้วยกัน แต่ยังคงขาดหน่วยงานที่จะทำการทดสอบและรับรองมาตรฐานเครื่องเกี่ยวนวดข้าว ซึ่งเป็นที่ยอมรับของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) รวมทั้งจากนโยบายของ พล.อ.ประยุทธ์ จันทร์โอชา นายกรัฐมนตรีและรัฐมนตรีว่าการกระทรวงกลาโหม ที่ต้องการยกระดับเครื่องจักรกลทางการเกษตรของไทยให้มีมาตรฐานเป็นที่ยอมรับทั้งในและต่างประเทศ อีกหนึ่งภารกิจของกรมวิชาการเกษตร นอกจากงานวิจัยและพัฒนาด้านพันธุ์พืชแล้ว ยังมีภารกิจด้านงานวิจัย ค้นคว้าและพัฒนาเครื่องจักรกลการเกษตรที่เหมาะสมกับการผลิตพืชเศรษฐกิจต่าง ๆ รวมทั้งยังมีหน้าที่ให้การสนับสนุนด้านวิชาการแก่ผู้ผลิตในการปรับปรุงคุณภาพและมาตรฐานการผลิตเครื่องจักรกลการเกษตรด้วย สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร [1] จึงได้เริ่มดำเนินการก่อตั้งห้องปฏิบัติการทดสอบเครื่องเกี่ยวนวดข้าว ภายใต้มาตรฐาน มอก. 1480-2560 ณ ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น โดยเริ่มดำเนินการตั้งแต่ปี 2562 และเข้าสู่กระบวนการขอเป็นห้องปฏิบัติการทดสอบของ สมอ. มาจนถึงปี 2563 ซึ่งปัจจุบันประสบความสำเร็จได้รับการรับรองให้เป็นห้องปฏิบัติการทดสอบเครื่องเกี่ยวนวดข้าว มาตรฐาน มอก. แห่งแรกของประเทศไทย โดยมี ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร เป็นผู้ตรวจสอบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมประเภทเครื่องเกี่ยวนวดข้าว มอก. 1428-2560 ตามประกาศสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ฉบับที่ 7 (พ.ศ. 2564) [2] ห้องปฏิบัติการทดสอบเครื่องเกี่ยวนวดข้าวมาตรฐาน มอก. 1428-2560 ได้กำหนดรายละเอียดข้าวที่จะใช้ทดสอบต้องมีความสุกแก่ที่เหมาะสม แต่ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะระบุได้ว่าข้าวที่ใช้ในการทดสอบนั้นสุกแก่เหมาะสมหรือไม่ ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อผลการร่วงของเมล็ดข้าวเปลือก โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวที่สุกแก่ไม่ถึงระยะที่เหมาะสมเมล็ดจะค่อนข้างเหนียวทำให้ผลการร่วงลดลง ทำให้การประเมินเปอร์เซ็นต์สูญเสียจากการเกี่ยวนวดมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน [3] ส่งผลดีต่อบริษัทผู้ผลิต แต่ไม่เป็นผลดีต่อผู้บริโภค ซึ่งข้าวที่ใช้ในการทดสอบต้องเป็นข้าวพันธุ์ที่นิยมปลูก เช่น ข้าวหอมมะลิ 105, กข 15, กข 47, ชัยนาท 1, สุพรรณบุรี 1, พิษณุโลก 2 และมีอายุสุกแก่เหมาะสมต่อการเกี่ยวนวด ซึ่งปัจจุบันการกำหนดวันเก็บเกี่ยว เมื่อข้าวเริ่มออกดอกทั้งแปลงออกดอกประมาณ 80% ถือเป็นวันออกดอก [4] จากงานวิจัยนี้จะทำให้ อายุการสุกแก่ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบเครื่องเกี่ยวนวดข้าวที่เป็นกลาง ไม่เกิดการได้เปรียบเสียเปรียบกันต่อบริษัทผู้ผลิต แต่จะเป็นผลดีต่อไร่เกี่ยวนวดข้าวและเกษตรกร [5]

2. วิธีการศึกษา

2.1 การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่บ่งชี้เกี่ยวกับความสุกแก่ของเมล็ดข้าวเปลือก

วิธีการศึกษา

1. ศึกษาข้อมูล ทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในเรื่องการเจริญเติบโตของต้นข้าวโดยเฉพาะช่วงเวลาในการเริ่มออกดอก จนถึงการสุกแก่ของเมล็ดข้าวเปลือกที่ยังติดอยู่บนรวงข้าว ซึ่งจะทำให้การศึกษาข้าว 3 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ศึกษาและเก็บข้อมูลที่สถาบันวิทยาศาสตร์ข้าวแห่งชาติ จ.สุพรรณบุรี ข้าวพันธุ์หอมสุพรรณบุรี ศึกษาและเก็บข้อมูลที่สถาบันวิทยาศาสตร์ข้าวแห่งชาติ จ.สุพรรณบุรี และ ข้าวหอมมะลิ 105 ศึกษาและเก็บข้อมูลที่ ศูนย์วิจัยเมล็ดพันธุ์ข้าวขอนแก่น จ.ขอนแก่น

2. ทำการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่คาดว่าจะมีผลให้สามารถพิจารณาได้ถึงอายุความสุกแก่ของเมล็ดข้าวเปลือกโดยตรง ได้แก่

- ข้าวเจ้าพันธุ์ปทุมธานี 1

การวัดสีของเมล็ดข้าวเปลือก นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าว นำมาทำการวัดโดยเครื่องวัดสี Colorimeter

ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าวมาวัดค่าซึ่ง เป็นเครื่องวัดค่าความชื้น เมล็ดพันธุ์แบบตั้งโต๊ะ สามารถอ่านค่าความชื้นเมล็ดพันธุ์ได้โดยตรง

การหาอะไมโลส ของเมล็ดข้าวเปลือก ทำการหาโดยการส่งตัวอย่างให้ผู้เชี่ยวชาญด้านข้าว ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี

การหามวลต่อปริมาตร นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าวมาวัดค่าซึ่งทำการโรยผ่านเครื่อง bulk density แลนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาอัตราส่วน มวลต่อปริมาตร

น้ำหนักต่อ 100 เมล็ด นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าวมาวัดค่าซึ่ง นับจำนวนเมล็ดข้าว 100 เมล็ดและนำไปชั่งน้ำหนัก

การสะท้อนของคลื่น NIR นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าวมาวัดค่าซึ่งวัดโดย DLP NIRscan Nano Connectors

- ข้าวพันธุ์หอมสุพรรณบุรี

การวัดสีของเมล็ดข้าวเปลือก นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าว นำมาทำการวัดโดยเครื่องวัดสี Colorimeter

ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าวมาวัดค่าซึ่ง เป็นเครื่องวัดค่าความชื้น เมล็ดพันธุ์แบบตั้งโต๊ะ สามารถอ่านค่าความชื้นเมล็ดพันธุ์ได้โดยตรง

การหามวลต่อปริมาตร นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าวมาวัดค่าซึ่งทำการโรยผ่านเครื่อง bulk density แลนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาอัตราส่วน มวลต่อปริมาตร

น้ำหนักต่อ 100 เมล็ด นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าวมาวัดค่าซึ่ง นับจำนวนเมล็ดข้าว 100 เมล็ดและนำไปชั่งน้ำหนัก

น้ำหนักข้าวแคะเปลือกต่อ 100 เมล็ด นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าวและทำการแคะเปลือกของเมล็ดข้าวออกจำนวนเมล็ดข้าว 100 เมล็ดและนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อวัดค่า

- ข้าวหอมมะลิ 105

การวัดสีของเมล็ดข้าวเปลือก นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าว นำมาทำการวัดโดยเครื่องวัดสี Colorimeter

ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าวมาวัดค่าซึ่ง เป็นเครื่องวัดค่าความชื้น เมล็ดพันธุ์แบบตั้งโต๊ะ สามารถอ่านค่าความชื้นเมล็ดพันธุ์ได้โดยตรง

การหามวลต่อปริมาตร นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าวมาวัดค่าซึ่งทำการโรยผ่านเครื่อง bulk density แลนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาอัตราส่วน มวลต่อปริมาตร

น้ำหนักต่อ 100 เมล็ด นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าวมาวัดค่าซึ่ง นับจำนวนเมล็ดข้าว 100 เมล็ดและนำไปชั่งน้ำหนัก

น้ำหนักข้าวแคะเปลือกต่อ 100 เมล็ด นำเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการรูดออกมาจากรวงข้าวและทำการแคะเปลือกของเมล็ดข้าวออกจำนวนเมล็ดข้าว 100 เมล็ดและนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อวัดค่า

ความชื้นของข้าวแคะเมล็ด ทำการแคะเปลือกของเมล็ดข้าว มาวัดค่าซึ่ง เป็นเครื่องวัดค่าความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบตั้งโต๊ะ สามารถอ่านค่าความชื้นเมล็ดพันธุ์ได้โดยตรง

3. วางแผนการทดลองแบบ CRD 9 treatment และจำนวน 4 ซ้ำ เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลตามปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยนำแต่ละปัจจัยมาเทียบกับ ความสูงแก่ของเมล็ดข้าวในแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ความสูงแก่ตามวันอายุหลังการออกดอกจากนักวิชาการ ด้านข้าว

4. นำข้อมูลที่ได้จากค่าปัจจัยต่าง ๆ มาเปรียบเทียบทางสถิติว่ามีความน่าเชื่อถือหรือแตกต่างกันทางสถิติหรือไม่ในแต่ละปัจจัย โดยโปรแกรมทางสถิติ SPSS เป็นสมการเชิงเส้นที่มีตัวแปรอิสระหรือตัวแปร X คือปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความสูงแก่ และกำหนดตัวแปรตามหรือค่า Y เป็นตัวแปรตามคือความสูงแก่ของเมล็ดข้าว ที่เปอร์เซ็นต์ความสูงแก่ โดยการสืบจากนักวิชาการ ด้านข้าวแล้วทำการคัดเลือกปัจจัยที่ค่าของแต่ละปัจจัยไม่แตกต่างกันมากในทางสถิติเพื่อนำไปหาสมการ Multiple Linear Regression

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i + \epsilon$$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ทำการเก็บปัจจัยต่างๆ โดยออกแบบการทดลองที่ใช้ในการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์

ทำการเก็บปัจจัยต่างๆ โดยออกแบบการทดลองที่ใช้ในการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ โดยการสุ่มแยกกลุ่มการทดลองแบบ CRD 9 treatment และจำนวน 4 ซ้ำ ดัง Figure 1 ภาพแสดงการเก็บตัวอย่าง



Figure 1 showing the collection of paddy samples

ทำการเก็บข้อมูลต่างของข้าวทำการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่คาดว่าจะมีผลให้สามารถพิจารณาได้ถึงอายุความสุกแก่ของเมล็ดข้าวเปลือกโดยตรง ได้แก่ พันธุ์ปทุมธานี 1, หอมสุพรรณบุรี, ข้าวหอมมะลิ 105 ซึ่งผลการหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความสุกแก่ของข้าวเปลือกทั้งสามพันธุ์เป็นดังนี้

1. พันธุ์ปทุมธานี ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1.1 การวัดสีของเมล็ดข้าวเปลือก | 1.3 อะไมโลสของเมล็ดข้าวเปลือก | 1.5 น้ำหนักข้าวต่อ 100 เมล็ด |
| 1.2 ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก | 1.4 อัตราส่วนมวลต่อปริมาตร | 1.6 การสะท้อนของคลื่น NCR |

และได้ผลการเก็บข้อมูลของปัจจัยต่างๆ แสดงในรูปแบบกราฟของแต่ละปัจจัยที่ได้ทำการหาค่า ดัง Figure 2

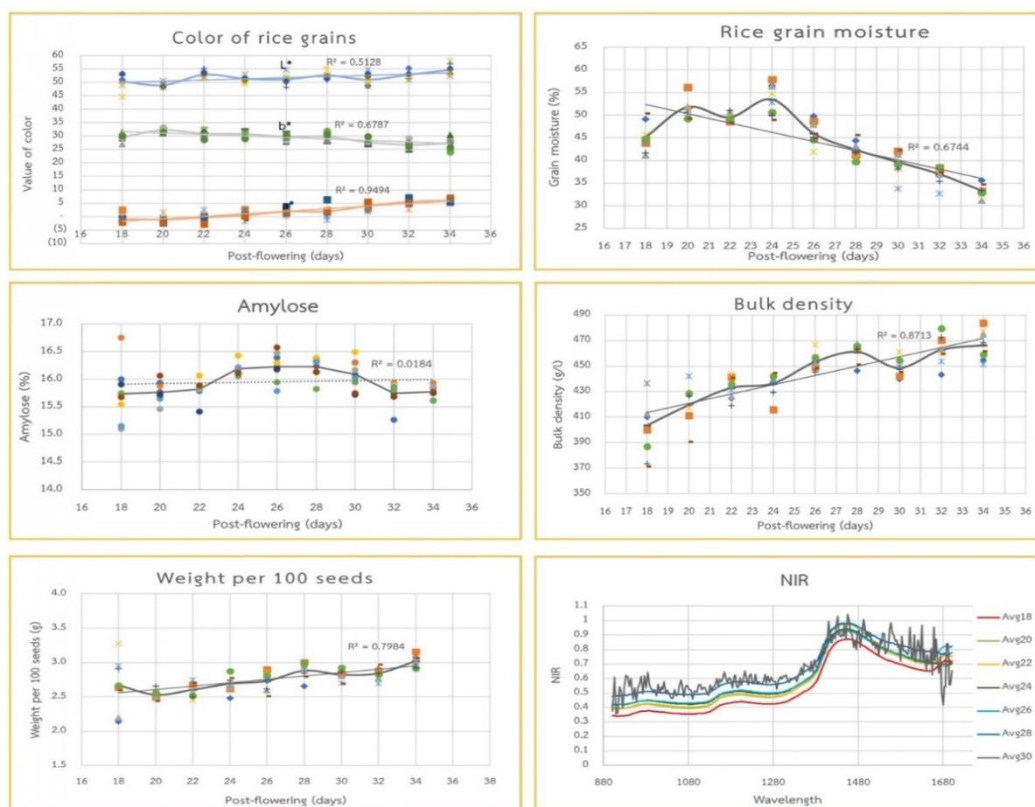


Figure 2 Graph showing relationship between rice maturity factors and days after flowering of Pathum Thani 1

นำข้อมูลที่ได้จากค่าปัจจัยต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับทางสถิติว่ามีความน่าเชื่อถือหรือแตกต่างกันทางสถิติหรือไม่ในแต่ละปัจจัย โดยโปรแกรมทางสถิติ ดัง Table 1

Table 1 Factors and coefficients related to the ripening of paddy grains of Pathum Thani 1 rice variety

		Coefficients ^a				
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		Sig.
		B	Std. Error	Beta	t	
1	(Constant)	-76.302	38.111		-2.002	.049
	ความชื้น	-1.059	.299	-.276	-3.547	.001
	มวลต่อปริมาตร	.443	.079	.398	5.635	.000
	สีของเมล็ด a*	.3.222	.815	.351	3.952	.000

a. Dependent Variable: เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่

ตัวแปรทั้ง 3 ตัว ได้แก่ ความชื้น มวลต่อปริมาตร และค่าสีในแกน a* ล้วนมีนัยสำคัญทางสถิติ (Sig. < 0.05) และมีผลต่อ เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่ของเมล็ดข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในระดับที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะมวลต่อปริมาตรและค่าสีของเมล็ดที่ส่งผลเชิงบวกต่อความสุกแก่ ขณะที่ความชื้นส่งผลในทางลบ

Table 2 Model Summary related to the ripening of paddy grains of Pathum Thani 1 rice variety

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.911 ^a	.829	.822	11.11705

Predictors: (Constant), สีของเมล็ด a*, มวลต่อปริมาตร, ความชื้น

จากการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression) โดยใช้ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความชื้น มวลต่อปริมาตร และค่าสีในแกน a* เป็นตัวแปรอิสระ พบว่าโมเดลมีค่า R เท่ากับ 0.911 แสดงถึงความสัมพันธ์ในระดับสูงระหว่าง ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม (เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่ของเมล็ดข้าว) ค่า R Square เท่ากับ 0.829 หมายความว่า ตัวแปรอิสระ ทั้งสามสามารถอธิบายความแปรปรวนของความสุกแก่ของเมล็ดข้าวได้ร้อยละ 82.9 ขณะที่ค่า Adjusted R Square อยู่ที่ 0.822 ซึ่งเป็นค่าที่ปรับแล้วเพื่อความแม่นยำยิ่งขึ้นในกรณีที่มีหลายตัวแปรอิสระค่า Standard Error of the Estimate เท่ากับ 11.11705 ซึ่งสะท้อนถึงค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยของการพยากรณ์จากโมเดลนี้จากการวิเคราะห์นี้สามารถสรุปได้ว่า โมเดล มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ระดับความสุกแก่ของเมล็ดข้าวได้อย่างเหมาะสมและแม่นยำ

ทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อความสุกแก่ที่ค่าของแต่ละปัจจัยไม่แตกต่างกันในทางสถิติเพื่อนำไปหาสมการ Multiple Linear Regression ค่าสมการ Multiple Linear Regression การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณดังนี้สมการ Multiple Linear Regression ที่ได้คือ Y (เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่ของเมล็ดข้าว) = $-76.302 - 1.059X_1 + 0.443X_2 + 3.222X_3$ ของข้าวพันธุ์ ปทุมธานี 1 และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ

1. ความชื้น (X_1)
2. มวลต่อปริมาตร (X_2)
3. ค่าของสีในแกนของ a* (X_3)



Figure 3 Finding the factors affecting rice grain maturity

2. หอมสุพรรณบุรี

ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก

2.3 น้ำหนักข้าวต่อ 100 เมล็ด

2.5 สีของเมล็ดข้าวเปลือก

2.2 อัตราส่วนมวลต่อปริมาตร

2.4 น้ำหนักข้าวแคะเปลือกต่อ 100 เมล็ด

และได้ผลการเก็บข้อมูลของปัจจัยต่างๆ แสดงในรูปแบบกราฟของแต่ละปัจจัยที่ได้ทำการหาค่า ดัง Figure 4

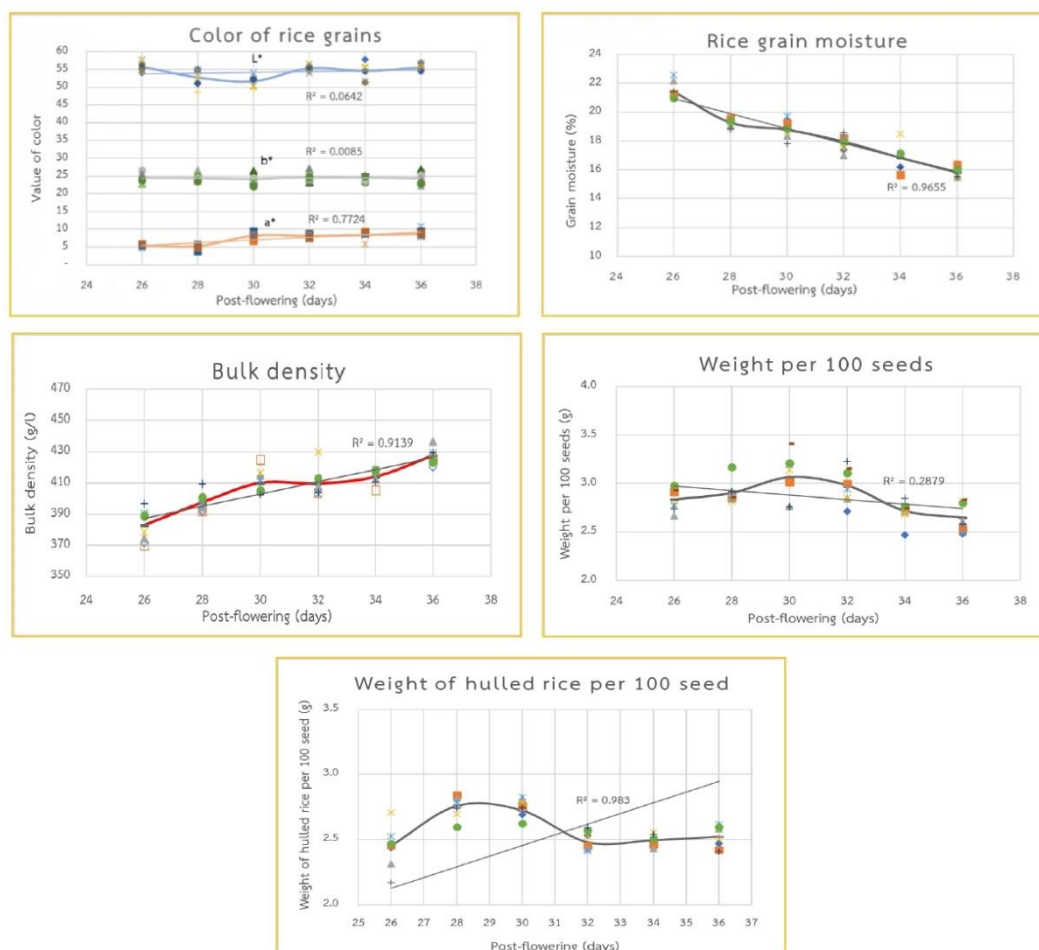


Figure 4 Graph showing relationship between rice maturity factors and days after flowering of Suphanburi Hom

นำข้อมูลที่ได้จากค่าปัจจัยต่าง ๆ มาเปรียบเทียบทางสถิติว่ามีความน่าเชื่อถือหรือแตกต่างกันทางสถิติหรือไม่ในแต่ละปัจจัย โดยโปรแกรมทางสถิติดัง Table 3

Table 3 Factors and coefficients related to the ripening of paddy grains of Suphanburi Hom rice variety

		Coefficients ^a					
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		Sig.	
		B	Std. Error	Beta	t		
1	(Constant)	122.817	42.076		2.919	0.006	
	ความชื้น	-5.71	0.713	-0.579	-7.394	0.000	
	มวลต่อปริมาตร	0.242		0.084	0.219	2.873	0.006
	สีของเมล็ดa*	2.192		0.765	0.208	2.864	0.006
	ข้าวแคะเปลือกต่อ100 เมล็ด	-13.822		4.792	-0.124	-2.884	0.006

a. Dependent Variable: เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่

ตัวแปรทั้งหมดในโมเดลนี้มีนัยสำคัญทางสถิติ (Sig. < 0.05) และสามารถใช้ร่วมกันในการพยากรณ์เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่ของเมล็ดข้าวพันธุ์ หอมสุพรรณบุรี ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะความชื้นซึ่งเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสุกแก่มากที่สุดในการเชิงลบ

Table 4 Model Summary related to the ripening of paddy grains of Suphanburi Hom rice variety

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0.965 ^a	0.931	0.925	4.72322

a. Predictors: (Constant), ข้าวแคะเปลือกต่อ100เมล็ด, มวลต่อปริมาตร, สีของเมล็ดa*, ความชื้น

จากการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression) โดยใช้ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความชื้น มวลต่อปริมาตร และค่าสีในแกน a* เป็นตัวแปรอิสระ พบว่าโมเดลมีค่า R เท่ากับ 0.965 แสดงถึงความสัมพันธ์ในระดับสูงระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม (เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่ของเมล็ดข้าว) ค่า R Square เท่ากับ 0.931 หมายความว่า ตัวแปรอิสระทั้งสามสามารถอธิบายความแปรปรวนของความสุกแก่ของเมล็ดข้าวได้ร้อยละ 93.1 ขณะที่ค่า Adjusted R Square อยู่ที่ 0.925 ซึ่งเป็นค่าที่ปรับแล้วเพื่อความแม่นยำยิ่งขึ้นในกรณีที่มีหลายตัวแปรอิสระค่า Standard Error of the Estimate เท่ากับ 4.72322 ซึ่งสะท้อนถึงค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยของการพยากรณ์จากโมเดลนี้จากการวิเคราะห์นี้สามารถสรุปได้ว่า โมเดลมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ระดับความสุกแก่ของเมล็ดข้าวได้อย่างเหมาะสมและแม่นยำ ทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อความสุกแก่ที่ค่าของแต่ละปัจจัยไม่แตกต่างกันในทางสถิติเพื่อนำไปหาสมการ Multiple Linear Regression ค่าสมการ Multiple Linear Regression การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณดังนั้นสมการ Multiple Linear Regression ที่ได้คือ Y (เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่ของเมล็ดข้าว) = $122.817 - 5.271X_1 + 0.242X_2 + 2.192X_3 - 13.822X_4$

ของข้าวพันธุ์ ข้าวหอมสุพรรณบุรี และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ

1. ความชื้น (X_1)
2. มวลต่อปริมาตร (X_2)
3. ค่าของสีในแกนของ a* (X_3)
4. ข้าวแคะต่อ100เมล็ด (X_4)

3. ข้าวหอมมะลิ 105

ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

- 3.1 ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก
- 3.2 ความชื้นข้าวแคะเมล็ด
- 3.3 อัตราส่วนมวลต่อปริมาตร
- 3.4 น้ำหนักข้าวต่อ 100 เมล็ด
- 3.5 น้ำหนักข้าวแคะเปลือกต่อ 100 เมล็ด
- 3.6 สีของเมล็ดข้าวเปลือก

และได้ผลการเก็บข้อมูลของปัจจัยต่างๆ แสดงในรูปแบบกราฟของแต่ละปัจจัยที่ได้ทำการหาค่า ดัง Figure 5

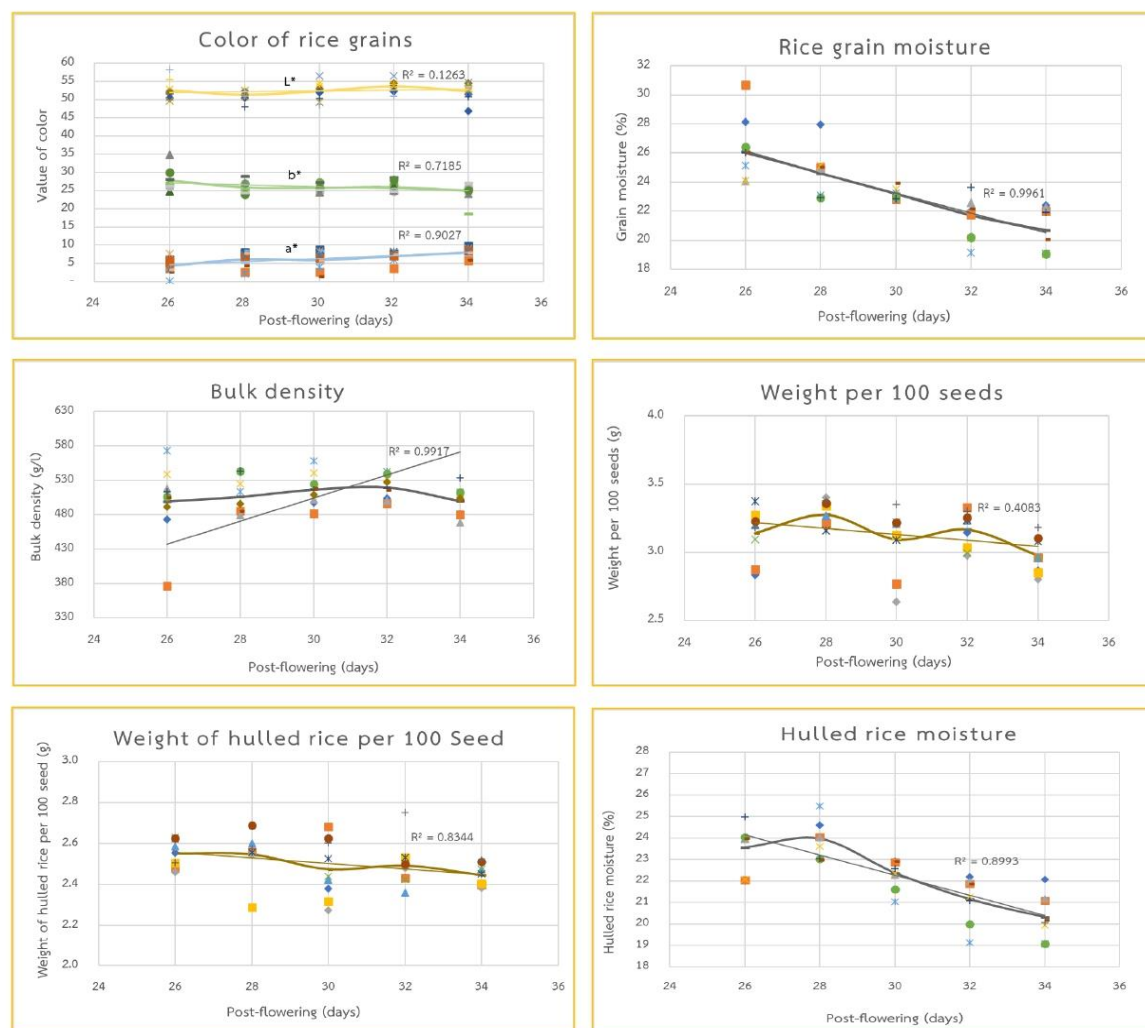


Figure 5 Graph showing relationship between rice maturity factors and days after flowering of Hom Mali 105

นำข้อมูลที่ได้จากค่าปัจจัยต่าง ๆ มาเปรียบเทียบทางสถิติว่ามีความน่าเชื่อถือหรือแตกต่างกันทางสถิติหรือไม่ในแต่ละปัจจัย โดยโปรแกรมทางสถิติ ดัง Table 5

Table 5 Factors and coefficients related to the ripening of paddy grains of Hom Mali 105 rice variety

		Coefficients ^a				
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		Sig.
		B	Std. Error	Beta	t	
1	(Constant)	381.350	34.202		11.150	.000
	ความชื้น	-3.646	.581	-.630	-6.272	.000
	ความชื้นข้าวแคะเมล็ด	-2.940	.766	-.349	-3.838	.000
	มวลต่อปริมาตร	-.171	.039	-.370	-4.402	.000
	สีของเมล็ดa*	-1.004	.413	-.159	-2.430	.020
	สีของเมล็ดb*	1.311	.558	.219	2.351	.024

a. Dependent Variable: เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่

ตัวแปรทั้งหมดมีนัยสำคัญทางสถิติ (Sig. < 0.05) ความชื้นของข้าวเปลือก เป็นปัจจัยที่มีผลมากที่สุดในการลดความสุกแก่ (Beta = -0.630) โมเดลนี้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความสุกแก่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีปัจจัยทั้งด้านกายภาพ (ความชื้น, ความหนาแน่น) และคุณลักษณะสีของเมล็ดเข้ามาร่วมพิจารณา

Table 6 Model Summary related to the ripening of paddy grains of Hom Mali 105 rice variety

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0.921 ^a	0.848	0.828	5.88995

a. Predictors: (Constant), สีของเมล็ดa*, สีของเมล็ดb*, ความชื้นข้าวแคะเมล็ด, มวลต่อปริมาตร, ความชื้น

จากการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression) โดยใช้ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความชื้น มวลต่อปริมาตร และค่าสีในแกน a* เป็นตัวแปรอิสระ พบว่าโมเดลมีค่า R เท่ากับ 0.921 แสดงถึงความสัมพันธ์ในระดับสูงระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม (เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่ของเมล็ดข้าว) ค่า R Square เท่ากับ 0.848 หมายความว่า ตัวแปรอิสระทั้งสามสามารถอธิบายความแปรปรวนของความสุกแก่ของเมล็ดข้าวได้ร้อยละ 84.8 ขณะที่ค่า Adjusted R Square อยู่ที่ 0.828 ซึ่งเป็นค่าที่ปรับแล้วเพื่อความแม่นยำยิ่งขึ้นในกรณีที่มีหลายตัวแปรอิสระค่า Standard Error of the Estimate เท่ากับ 5.88995 ซึ่งสะท้อนถึงค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยของการพยากรณ์จากโมเดลนี้จากผลการวิเคราะห์นี้สามารถสรุปได้ว่า โมเดลมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ระดับความสุกแก่ของเมล็ดข้าวได้อย่างเหมาะสมและแม่นยำ

ทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อความสุกแก่ที่ค่าของแต่ละปัจจัยไม่แตกต่างกันมากในทางสถิติเพื่อนำไปหาสมการ Multiple Linear Regression คำสมการ Multiple Linear Regression การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณดังนี้สมการ Multiple Linear Regression ที่ได้คือ Y (เปอร์เซ็นต์ความสุกแก่ของเมล็ดข้าว) = $381.350 - 3.646X_1 - 2.940X_2 - 0.171X_3 - 1.004X_4 + 1.311X_5$ ของข้าวพันธุ์ ข้าวหอมมะลิ105 และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ

1. ความชื้น (X_1)
2. ความชื้นข้าวแคะเมล็ด(X_2)
3. มวลต่อปริมาตร(X_3)
4. ค่าของสีในแกนของ a*(X_4)
5. ค่าของสีในแกนของ L*(X_5)

จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อความสุกแก่ของเมล็ดข้าวในแต่ละพันธุ์นั้นหาได้โดยใช้ข้อมูลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผล เช่น ความชื้น, มวลต่อปริมาตร, และค่าของสีต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในกระบวนการวัดความสุกแก่ของเมล็ดข้าวได้ปัจจัยที่มีผล : ในแต่ละสมการจะมีปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความสุกแก่ของเมล็ดข้าว ซึ่งมีการใช้ตัวแปรที่ต่างกัน เช่น ความชื้น (X_1), มวลต่อปริมาตร (X_2), ค่าของสีในแกน a^* (X_3), และปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในแต่ละพันธุ์ข้าว ในส่วนของสมการสมการ Multiple Linear Regression แต่ละพันธุ์ ขึ้นอยู่กับค่าของค่าสัมประสิทธิ์ (coefficients) ที่จะเพิ่มหรือลดผลกระทบของความสุกแก่ของเมล็ดข้าว ถ้าค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบ (เช่น X_1 , X_4) จะหมายถึงว่าปัจจัยนั้นๆ จะลดเปอร์เซ็นต์ความสุกแก่เมื่อเพิ่มขึ้นถ้าค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก (เช่น X_2 , X_3) จะหมายถึงว่าปัจจัยนั้นๆ จะเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความสุกแก่เมื่อเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปัจจัยที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง จึงทำให้มีปัจจัยเพิ่มขึ้น

4. สรุป

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสุกแก่ของเมล็ดข้าวเปลือกในข้าว 3 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ข้าวหอมสุพรรณบุรี และข้าวหอมมะลิ 105 เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression) พบว่าข้าวแต่ละพันธุ์มีปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับความสุกแก่แตกต่างกัน สำหรับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความชื้นของเมล็ดข้าว (X_1) มวลต่อปริมาตร (X_2) และค่าของสีในแกนของ a^* (X_3) ซึ่งสมการที่ได้คือ $Y = -76.302 - 1.059X_1 + 0.443X_2 + 3.222X_3$ สำหรับข้าวหอมสุพรรณบุรี ปัจจัยที่มีผล ได้แก่ ความชื้นของเมล็ดข้าว (X_1) มวลต่อปริมาตร (X_2) ค่าสีในแกนของ a^* (X_3) และน้ำหนักของข้าวที่กะเทาะเปลือกแล้วต่อ 100 เมล็ด (X_4) โดยสมการคือ $Y = 122.817 - 5.271X_1 + 0.242X_2 + 2.192X_3 - 13.822X_4$ ส่วนข้าวหอมมะลิ 105 มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ ความชื้นของเมล็ดข้าว (X_1) ความชื้นของข้าวที่กะเทาะเปลือกแล้ว (X_5) มวลต่อปริมาตร (X_2) ค่าสีในแกนของ a^* (X_3) และค่าสีในแกนของ L^* (X_6) โดยสมการที่ได้คือ $Y = 381.350 - 3.646X_1 - 2.940X_5 - 0.171X_2 - 1.004X_6 + 1.311X_3$ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าทางกายภาพและคุณลักษณะของสีของเมล็ดข้าวสามารถนำมาใช้เป็นปัจจัยทำนายระดับความสุกแก่ของข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นเครื่องมือวัดความสุกแก่ของเมล็ดข้าวในภาคสนามได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ที่สนับสนุน เจ้าหน้าที่สถานที่ในการสร้างต้นแบบและทดสอบเก็บข้อมูลเบื้องต้น ขอขอบคุณกรมการข้าว ที่สนับสนุน เจ้าหน้าที่ สถานที่ในการเก็บข้อมูล รวมทั้งแปลงที่ใช้เก็บข้อมูล

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมวิชาการเกษตร 2553. สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร
- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2560. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. เครื่องเกี่ยวนวดข้าว มอก.1428-2560. เอกสารสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. ราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศและงานทั่วไป เล่ม 136 ตอนพิเศษ 185 ง (24 ก.ค.62) หน้า 77
- [3] วินิต ชินสุวรรณ, ปิณัย ทองสวัสดิ์วงศ์, อนุชิต ฉ่ำสิงห์ และ ชนธัช หยกอุบล, 2542. การประเมินความสูญเสียจากเครื่องเกี่ยวนวดข้าว เพื่อจัดหาข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการบริหารจัดการและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต
- [4] ธวัชวิทย์ ขวัญแก้ว, 2558 การพัฒนาและการสุกแก่ของเมล็ดพันธุ์และตำแหน่งรวงต่อคุณภาพ
- [5] กรมการข้าว. 2567. องค์ความรู้เรื่องข้าว เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://newwebs2.ricethailand.go.th/webmain/rkb3/> (เข้าถึงเมื่อ 1 ธันวาคม 2567).

ประสิทธิภาพของ *Bacillus subtilis* ในการควบคุมเชื้อราและแบคทีเรียสาเหตุโรคข้าว The effectiveness of *Bacillus subtilis* to control of fungal and bacterial pathogens causing rice diseases

อัญชลี สวนดอกไม้¹ และ มัทธนา ตันชัย^{1,*}

Anchulee Suandokmai¹ and Mattana Tunchai^{1,*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ

¹Department of Plant Production Technology, School of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

*Corresponding author: Mattana Tunchai, e-mail address: mattana.tu@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

โรคข้าวส่งผลกระทบต่อทั้งปริมาณผลผลิตและคุณภาพของข้าว ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากแบคทีเรียและเชื้อรา เช่น โรคขอบใบแห้ง (bacterial leaf blight) และโรคใบขีดโปรงแสง (bacterial leaf streak) เกิดจากแบคทีเรีย *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* และ *X. oryzae* pv. *oryzicola* ตามลำดับ และเชื้อราสาเหตุของโรคข้าว *Curvularia* sp., *Bipolaris* sp. และ *Pyricularia oryzae* ก่อโรคเมล็ดด่าง โรคใบจุดสีน้ำตาล และโรคใบไหม้ข้าว ตามลำดับ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกแบคทีเรียปฏิปักษ์ต่อเชื้อสาเหตุโรคข้าว โดยทำการแยกเชื้อจากดินบริเวณรอบรากข้าว แล้วทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อสาเหตุโรคข้าวด้วยวิธี dual culture ในสภาพห้องปฏิบัติการ พบว่าไอโซเลท SPK_B3 มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อสาเหตุโรค *X. oryzae* pv. *oryzae* และ *X. oryzae* pv. *oryzicola* โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณยับยั้งเท่ากับ 31.83 mm และ 21.58 mm ตามลำดับ เมื่อทดสอบกับเชื้อราสาเหตุโรคข้าว 3 ชนิด ได้แก่ *Curvularia* sp., *Bipolaris* sp. และ *P. oryzae* พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราอยู่ที่ 74.21%, 74.05 % และ 54.69 % ตามลำดับ จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า ไอโซเลท SPK_B3 เป็นแบคทีเรียแกรมบวก และทำการระบุชนิดของแบคทีเรียปฏิปักษ์ด้วยเทคนิคทางชีวโมเลกุล โดยเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมจากยีน 16S rDNA พบว่าสามารถจัดจำแนกไอโซเลท SPK_B3 เป็นแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า *Bacillus subtilis* SPK_B3 ที่แยกและคัดเลือกได้มีประสิทธิภาพในการเป็นปฏิปักษ์ต่อเชื้อสาเหตุโรคในข้าว ทั้งแบคทีเรียและเชื้อราสาเหตุโรค ซึ่งแสดงถึงศักยภาพในการนำไปใช้ควบคุมโรคในข้าวด้วยวิธีชีวภาพ

คำสำคัญ: โรคในข้าว, โรคขอบใบแห้ง, แบคทีเรียปฏิปักษ์, การควบคุมโรคพืชด้วยวิธีชีวภาพ

Abstract

Rice diseases contribute to significant reductions in rice yield and quality which caused by both bacterial and fungal pathogens. Bacterial leaf blight and bacterial leaf streak are caused by *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* and *X. oryzae* pv. *oryzicola*, respectively. Furthermore, fungal pathogens such as *Curvularia* sp., *Bipolaris* sp., and *Pyricularia oryzae* are responsible for seed discoloration, brown spot disease, and blast disease, respectively. The objective of this study is to select antagonistic bacteria against rice pathogens by isolating rhizosphere bacteria from rice plants and evaluating their efficacy in inhibiting rice pathogens using the dual-culture method under laboratory conditions. Among the isolates, SPK_B3 demonstrated strong inhibitory effects against *X. oryzae* pv. *oryzae* and *X. oryzae* pv. *oryzicola*, with inhibition zone diameters of 31.83 mm and 21.58 mm, respectively. Additionally, SPK_B3 effectively suppressed three rice fungal pathogens, *Curvularia* sp., *Bipolaris* sp., and *P. oryzae*, with inhibition percentages of 74.21%, 74.05% and 54.69%, respectively. Morphological characterization revealed that the isolate SPK_B3 is a Gram-positive bacterium. Molecular techniques were used to identify the antagonistic bacterium by comparing nucleotide sequences and analyzing the genetic relationship using the 16S rDNA gene. It was found that the isolate SPK_B3 can be classified as *Bacillus subtilis*. These findings indicate that *B. subtilis* SPK_B3 exhibits strong antagonistic activity against a wide range of both bacterial and fungal rice pathogens, emphasizing its potential as a biological control agent for rice disease management.

Keywords: Rice disease, Bacterial leaf blight, Antagonistic bacteria, Biological control

1. บทนำ

ข้าว (*Oryza sativa* L.) หนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ เป็นธัญพืชอาหารหลักที่บริโภคกันทั่วโลก โดยเฉพาะในเอเชีย แอฟริกา และลาตินอเมริกา [1] โรคในข้าวทำให้เกิดความเสียหายทั้งทางผลผลิตและคุณภาพ โรคขอบใบแห้ง (Bacterial leaf blight หรือ BLB) ของข้าวที่เกิดจากเชื้อแบคทีเรีย *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* และ *X. oryzae* pv. *oryzicola* แบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคใบขีดโปร่งแสง (Bacterial Leaf Streak หรือ BLS) ในข้าว ทั้งสองโรคนี้นับเป็นโรคที่สำคัญของข้าวที่เกิดจากแบคทีเรีย ซึ่งสร้างความเสียหายทางเศรษฐกิจต่อการผลิตข้าวทั่วโลก เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียสาเหตุโรคสามารถแพร่ระบาดได้อย่างรวดเร็วโดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีสภาพอากาศชื้นและมีฝนตกบ่อยครั้ง สามารถเข้าทำลายต้นข้าวได้ทุกระยะการเจริญเติบโต ตั้งแต่ระยะกล้า แตกกอ ออกรวง รวมถึงสามารถถ่ายทอดทางเมล็ดพันธุ์ได้ [2] โรคใบไหม้ (Rice blast disease) ซึ่งเกิดจากเชื้อรา *Pyricularia oryzae*, โรคใบจุดสีน้ำตาล (Brown spot disease) ที่เกิดจากเชื้อรา *Bipolaris oryzae*, และโรคเมล็ดด่าง (Seed discoloration disease) ที่เกิดจากเชื้อรา *Curvularia* sp. ล้วนเป็นโรคที่เกิดขึ้นทุกปี โดยมีความรุนแรงของโรคตั้งแต่ระดับที่รุนแรงน้อยจนถึงระดับที่รุนแรงมากในหลายพื้นที่ที่ปลูกข้าว [3] การใช้สารเคมีควบคุมโรคข้าวจึงมีบทบาทสำคัญเนื่องจากการใช้งานที่สะดวก รวดเร็ว และได้ผลลัพธ์ที่ดี อย่างไรก็ตามมีผลข้างเคียงที่ไม่สามารถมองข้ามได้จากการใช้สารเคมี เช่น การตกค้างของสารเคมี ความเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และการต้านทานของศัตรูพืช ซึ่งจะทำให้ไม่สอดคล้องกับข้อกำหนดในการทำเกษตรที่ยั่งยืน [4] ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการที่ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้ตัวควบคุมทางชีวภาพ (Biological control) ซึ่งจัดเป็นแนวทางหนึ่งที่มีความยั่งยืนและมีความเหมาะสมในการจัดการโรคพืช และถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีแนวโน้มที่ดีในการป้องกันและควบคุมโรคข้าว [5]

การควบคุมโรคพืชทางชีวภาพ คือการใช้จุลินทรีย์หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ มายับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อสาเหตุโรค หรือการป้องกันพืชจากการติดเชื้อ ดังเช่นการใช้ *Bacillus* sp. แบคทีเรียที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งบางสปีชีส์ของ *Bacillus* สามารถยับยั้งการแพร่ระบาดของเชื้อก่อโรคได้ โดยมีกลไกการทำงานที่หลากหลาย อาทิเช่น การผลิตสารที่ยับยั้งการเติบโตของเชื้อก่อโรค การแข่งขันเพื่อแย่งพื้นที่และสารอาหาร การผลิตสารที่สามารถยับยั้งเอนไซม์ที่เชื้อก่อโรคผลิตขึ้น เป็นต้น กลไกเหล่านี้ทำให้ *Bacillus* sp. สามารถทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมโรคทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพในทางการเกษตร [6]

แบคทีเรียปฏิปักษ์ (Antagonistic bacteria) ที่ใช้บ่อยที่สุดคือจีส *Bacillus* ซึ่งเป็นสกุลที่โดดเด่น ถูกนำไปใช้เป็นสารควบคุมทางชีวภาพในการผลิตพืชหลากหลายชนิด เนื่องจากมีประสิทธิภาพดีและมีความสามารถปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมต่างๆ ได้ [7] *Bacillus* sp. เป็นแบคทีเรียที่เจริญได้ในสภาพที่มีออกซิเจน (aerobic) หรือในสภาพที่มีออกซิเจนต่ำ (facultative anaerobic) รูปร่างเป็นแท่ง สร้างเอนโดสปอร์ที่ทำให้ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม [8] มีรายงานว่า *B. subtilis*, *B. cereus*, *B. pumilus*, *B. amyloliquefaciens*, *B. firmus*, *B. megaterium*, *B. safensis* และ *B. velezensis* มีประสิทธิภาพเป็นปฏิปักษ์ต่อเชื้อก่อโรคพืช ได้แก่ แบคทีเรีย เชื้อรา และไส้เดือนฝอย [9, 10] การศึกษาของ Wu et al. [11] รายงานว่า *B. amyloliquefaciens* FZB42 สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชและควบคุมเชื้อโรคพืช ซึ่งมีประสิทธิภาพยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสาเหตุโรคข้าว *X. oryzae* pv. *oryzae* และ *X. oryzae* pv. *oryzicola* โดยผลิตสาร difficidin และ bacilysin ขณะที่ Leelasuphakul et al. [12] พบว่า *B. subtilis* NSRS 89-2 สามารถยับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อราสาเหตุโรคใบไหม้ข้าว *Pyricularia grisea* นอกจากนี้ Chiangsin et al. [13] รายงาน *B. subtilis* ที่แยกได้จากเมล็ดข้าวสามารถยับยั้งการเจริญของเส้นใย *Bipolaris oryzae* เชื้อราสาเหตุโรคใบจุดสีน้ำตาลของข้าว อีกทั้งแบคทีเรีย *B. subtilis* BAS114 ที่แยกได้จากดินสามารถยับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อรา *Curvularia lunata* สาเหตุโรคเมล็ดด่างข้าว โดยทำให้เส้นใยมีลักษณะผิดปกติไป [14] การได้มาซึ่งแบคทีเรียปฏิปักษ์ที่มีประสิทธิภาพสูงและกว้างต่อหลายเชื้อสาเหตุโรคนั้นจึงมีความสำคัญในการนำไปใช้ควบคุมโรคพืชโดยวิธีชีวภาพ ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการแยกเชื้อแบคทีเรียจากดินบริเวณรอบรากพืชและคัดเลือกแบคทีเรียปฏิปักษ์ที่มีประสิทธิภาพยับยั้ง *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* และ *X. oryzae* pv. *oryzicola* รวมถึงนำไปทดสอบความเป็นปฏิปักษ์ต่อเชื้อราสาเหตุโรคข้าว *Curvularia* sp., *Bipolaris* sp. และ *Pyricularia oryzae* ในสภาวะห้องปฏิบัติการ

2. วิธีการศึกษา

2.1 เชื้อสาเหตุโรคข้าว

เชื้อแบคทีเรีย *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* สายพันธุ์ DOA-BCC2568 สาเหตุโรคขอบใบแห้ง และ *X. oryzae* pv. *oryzicola* สายพันธุ์ DOA-BCC2562 สาเหตุโรคใบขีดโปร่งแสง ได้รับความอนุเคราะห์จากกลุ่มงานแบคทีเรียวิทยา สำนักวิจัยและอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร บางเขน เชื้อราสาเหตุโรคข้าว *Curvularia* sp., *Bipolaris* sp. และ *Pyricularia*

oryzae ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการโรคพืชวิทยา คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2.2 การเก็บตัวอย่างดิน และคัดเลือกแบคทีเรียปฏิปักษ์

ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินจากแปลงข้าวใน จังหวัดกรุงเทพฯ และสมุทรปราการ โดยสุ่มเก็บตัวอย่างดินบริเวณรอบรากข้าวที่ความลึก 0 – 15 cm จำนวน 3 จุด จุดละ 100 g การแยกเชื้อแบคทีเรียจากดิน โดยนำดินบริเวณรอบรากข้าวมาทำการแยกเชื้อด้วยวิธี soil dilution plating บนอาหาร nutrient agar (NA) โดยนำตัวอย่างดินจำนวน 1 g ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีน้ำกลั่นฆ่าเชื้อ 9 ml นำไปเขย่าให้ดินกระจายตัว จากนั้นทำการเจือจางสารแขวนลอยตัวอย่างให้มีความเจือจางที่ 10^{-4} - 10^{-6} เท่า จากนั้นดูดสารแขวนลอยปริมาตร 0.1 ml ไปเกลี่ย (spread) ให้ทั่วบนหน้าอาหาร NA แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 28 °C เป็นเวลา 24 - 48 ชั่วโมง แยกแบคทีเรียให้บริสุทธิ์ด้วยเทคนิค single colony isolation บนอาหาร NA เพื่อนำไปทดสอบยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *X. oryzae* pv. *oryzae* และ *X. oryzae* pv. *oryzicola*

2.3 การคัดเลือกแบคทีเรียไอโซเลทที่มีประสิทธิภาพสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* และ *X. oryzae* pv. *oryzicola*

นำเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากดินมาทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียสาเหตุโรคข้าว ด้วยวิธี paper disc diffusion โดยเลี้ยงเชื้อสาเหตุโรค *X. oryzae* pv. *oryzae* และ *X. oryzae* pv. *oryzicola* ในอาหาร nutrient glucose broth (NGB) ปริมาตร 20 ml เลี้ยงเชื้อแบคทีเรียไอโซเลท SPK_B3 ในอาหาร nutrient broth (NB) ปริมาตร 20 ml เขย่าเชื้อด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ปรับค่าความขุ่นเซลล์แขวนลอยแบคทีเรียสาเหตุโรคและแบคทีเรียไอโซเลท SPK_B3 ด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ค่า $OD_{600} = 1.0$ และ ค่า $OD_{600} = 0.2$ ตามลำดับ จากนั้นหยดสารแขวนลอยแบคทีเรียไอโซเลท SPK_B3 ลงบนกระดาษกรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ปริมาตร 5 μ l จากนั้นนำไปวางบนหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ NGA ที่เกลี่ยเชื้อแบคทีเรียสาเหตุโรค แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 28 °C เป็นเวลา 48 - 76 ชั่วโมง ทำการบันทึกผลยับยั้งการเจริญของเชื้อก่อโรค โดยวัดขนาด clear zone ของแบคทีเรียที่ทดสอบ

2.4 ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานของเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์

นำเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์ที่คัดเลือกได้มาศึกษาลักษณะทางสัณฐานโดยการย้อมสีแกรม เริ่มจากนำเชื้อแต่ละไอโซเลท สเมียร์บนสไลด์ และนำผ่านไฟ 1 - 5 วินาที จากนั้นหยดสาร Crystal violet ลงให้ทั่วมรอยสเมียร์ ทิ้งไว้ 30 วินาที ล้างออกด้วยน้ำกลั่น หยดสารละลายไอโอดีน ทิ้งไว้ 30 วินาที ล้างออกด้วยน้ำกลั่น และล้างด้วย 95% Alcohol ประมาณ 10 - 20 วินาที แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น จากนั้นหยดด้วยสาร Safranin ทิ้งไว้ 30 วินาที และล้างออกด้วยน้ำกลั่นจากนั้นวางสไลด์ไว้ให้แห้งสนิท หรือซับด้วยกระดาษทิชชูให้แห้ง จากนั้นตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Light microscope) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

2.5 การจัดจำแนกและระบุชนิดของแบคทีเรียปฏิปักษ์โดยเทคนิคทางชีวโมเลกุล

นำเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์เลี้ยงบนอาหาร NA บ่มที่อุณหภูมิ 28 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเชื้อโคลนเดี่ยวใส่หลอดไมโครทิวขนาด 1.5 ml ที่ใส่น้ำผ่านการฆ่าเชื้อปริมาตร 150 ml ต้มที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที นำส่วนใสไปใช้เป็นแม่แบบในการเพิ่มปริมาณยีน 16S RNA ด้วยเทคนิค polymerase chain reaction (PCR) โดยส่วนผสมของปฏิกิริยา PCR ในหลอดไมโครทิวขนาด 0.2 ml ประกอบด้วย 10X Taq buffer ปริมาตร 5 μ l, Taq DNA polymerase (SMO BIO[®], Taiwan) ปริมาตร 0.25 μ l, 10 mM dNTPs ปริมาตร 1 μ l, 10 μ M primer 27F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') และ 1492R (5'-GGTTACCTGTACGACTT -3') ปริมาตร 1 μ l ต่อไพรเมอร์ และ DNA แม่แบบ ปริมาตร 1 μ l ปริมาตรรวมทั้งหมด 50 μ l จากนั้นเพิ่มปริมาณสารพันธุกรรมตามขั้นตอนดังนี้

Initial denaturation	อุณหภูมิ 95°C นาน 2 นาที
Denaturation	อุณหภูมิ 95°C นาน 30 วินาที
Annealing	อุณหภูมิ 50°C นาน 30 วินาที
Extension	อุณหภูมิ 72°C นาน 1 นาที 30 วินาที

ในขั้นตอน Denaturation ถึง Extension วนซ้ำ 35 รอบ และ final extension อุณหภูมิ 72 °C นาน 5 นาที จากนั้นตรวจสอบผลิตภัณฑ์ PCR ด้วยเทคนิค gel electrophoresis ใช้ 0.8% agarose gel ในสารละลายบัฟเฟอร์ 1X TAE แสดงแถบ DNA บนเครื่อง UV transilluminator จากนั้นส่งวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์โดยบริษัท MacroGen Inc. (ประเทศเกาหลีใต้) นำข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบกับลำดับนิวคลีโอไทด์และความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมของแบคทีเรียจากฐานข้อมูล National Center for Biotechnology Information (NCBI) ด้วยโปรแกรม nucleotide BLAST และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมจาก phylogenetic tree โดยใช้ maximum likelihood ที่ค่า bootstrap 1,000 ครั้ง ด้วยโปรแกรม MEGA 11.0

2.6 การทดสอบประสิทธิภาพยับยั้งการเจริญของเชื้อรา

ทดสอบการยับยั้งเชื้อรา *Curvularia* sp., *Bipolaris* sp. และ *Pyricularia oryzae* สาเหตุโรคข้าวด้วยวิธี dual culture method โดยตัดบริเวณปลายเส้นใยของเชื้อราสาเหตุโรค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm วางบนอาหารเลี้ยงเชื้อ potato dextrose agar (PDA) ห่างจากขอบจานอาหารเลี้ยงเชื้อ 2 cm จากนั้นขีดเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์ห่างจากเชื้อราสาเหตุโรค 3 cm และวางเชื้อสาเหตุโรคแต่น้ำกลั่นขีดแทนเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์เป็นตัวควบคุม จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน บันทึกผลการทดลองโดยคำนวณเปอร์เซ็นต์การยับยั้งของอัตราการเจริญของเส้นใย (percent inhibition rate growth, PIRG) ดังนี้ [15]

$$\text{PIRG} = \left(\frac{R1-R2}{R1} \right) \times 100$$

โดยที่ R1 คือ รัศมีโคโลนีเชื้อราสาเหตุโรค (ชุดควบคุม)

R2 คือ รัศมีโคโลนีเชื้อราสาเหตุเมื่อเลี้ยงร่วมกับเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์

บันทึกลักษณะเส้นใยของเชื้อราสาเหตุโรค โดยการตรวจดูใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า เปรียบเทียบระหว่างเส้นใยที่เจริญในชุดควบคุม กับเส้นใยที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การแยกและคัดเลือกแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสาเหตุโรคขอบใบแห้งและโรคใบขีดโปรงแสง

จากการศึกษาแบคทีเรียที่แยกได้จากดินบริเวณรอบรากข้าว ซึ่งเก็บตัวอย่างมาจากสมุทรปราการ ด้วยวิธี dilution plating method สามารถคัดเลือกแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อแบคทีเรียสาเหตุโรคขอบใบแห้ง และใบขีดโปรงแสงได้ คือ ไอโซเลต SPK_B3 ซึ่งแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *X. oryzae* pv. *oryzae* และ *X. oryzae* pv. *oryzicola* มากที่สุดเมื่อเทียบกับชุดควบคุม โดยที่ *X. oryzae* pv. *oryzae* มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณยับยั้งเท่ากับ 31.83 ± 0.58 mm (Figure 1A) และ *X. oryzae* pv. *oryzicola* มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณยับยั้งเท่ากับ 21.58 ± 4.16 mm (Figure 1B) จากรายงานของ Zhou et al. [16] ที่ทำการคัดเลือกจุลินทรีย์สำหรับการควบคุมโรคของข้าว พบเชื้อแบคทีเรีย *B. velezensis* BR-01 มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเชื้อสาเหตุโรค *X. oryzae* pv. *oryzae* และ *X. oryzae* pv. *oryzicola* รายงานของ Cheng et al. [17] ทดสอบเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* MJMP2 ที่แยกได้จากผักตบชวตามธรรมชาติของเกาหลีสามารถควบคุม *X. oryzae* pv. *oryzae* และการทดลองของ Djatmiko et al. [18] แยกเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* จากมันฝรั่ง พบว่ามี 3 ไอโซเลตที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *X. oryzae* pv. *oryzae* ได้ การทดลองแยกเชื้อจากดินบริเวณรากข้าว และแบคทีเรียเอนโดไฟต์ที่แยกจากเนื้อเยื่อของรากข้าวพบเชื้อในสกุล *Streptomyces* ที่สามารถควบคุมเชื้อ *X. oryzae* pv. *oryzicola* [19]

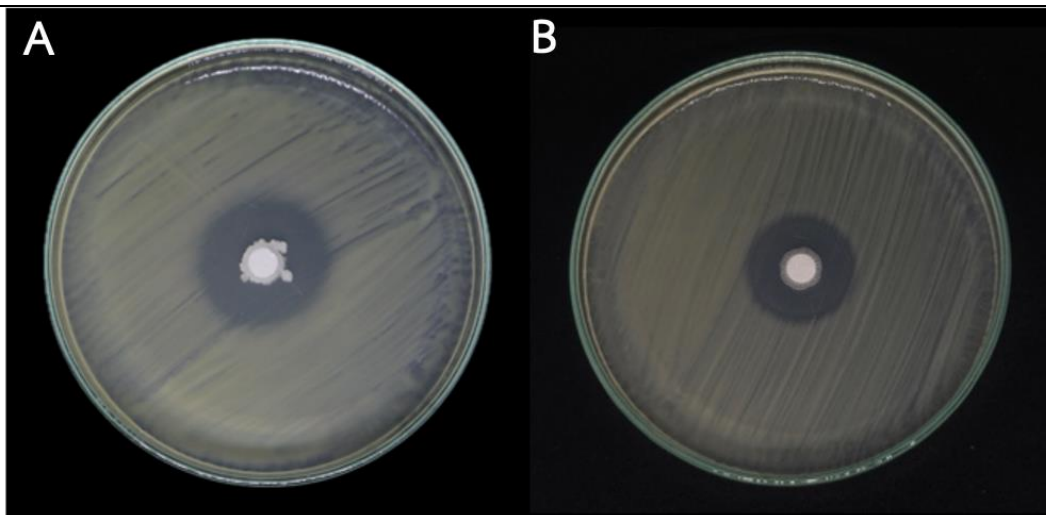


Figure 1 Antagonistic activity of isolated bacterium SPK_B3 against *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* (A) and *X. oryzae* pv. *oryzicola* (B) on NGA medium using dual culture method under 28 °C incubation for 48 hours.

3.2 ศึกษาลักษณะพื้นฐานของแบคทีเรียไอโซเลท SPK_B3

ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานโดยเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียไอโซเลท SPK_B3 บนอาหาร NA เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการย้อมสีแกรม พบว่าไอโซเลท SPK_B3 มีลักษณะโคโลนีกลม ขอบหยักเล็กน้อย และมีสีขาวขุ่น เซลล์ติดสีม่วง เป็นแบคทีเรียแกรมบวก มีรูปร่างเป็นท่อน (bacilli) (Figure 2)

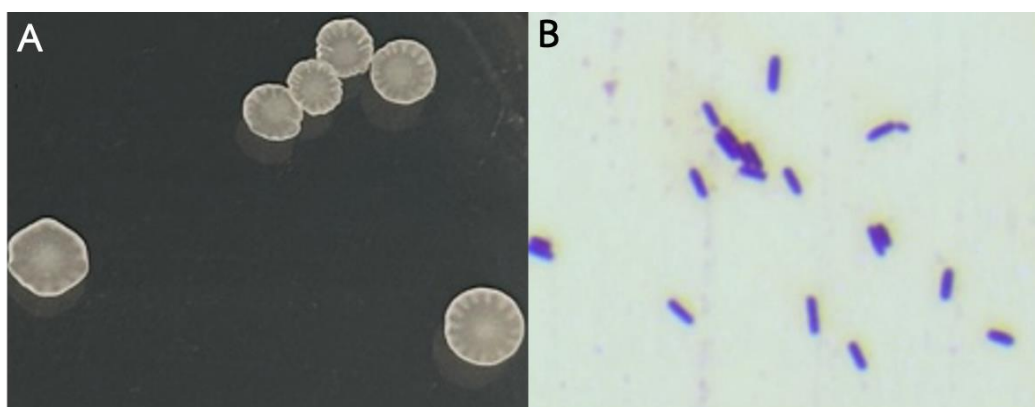


Figure 2 Morphology of the bacterial antagonistic strain SPK_B3 on NA medium cultivated under 28°C for 24 hours (A) and Gram staining under the microscope at a total magnification of 1000 (B).

3.3 การจัดจำแนกและระบุชนิดของแบคทีเรียโดยเทคนิคทางชีวโมเลกุล

นำผลิตภัณฑ์ PCR ขนาดประมาณ 1,500 คู่เบส ที่ได้จากการเพิ่มปริมาณยีน 16S rDNA ของไอโซเลท SPK_B3 ไปหาลำดับนิวคลีโอไทด์ ผลจากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์จากฐานข้อมูล GenBank NCBI ด้วยโปรแกรม blastn และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมของแบคทีเรียจาก phylogenetic tree ด้วยวิธี maximum likelihood ที่ค่า bootstrap ทั้งหมด 1,000 ครั้ง บริเวณตำแหน่งยีน 16S rDNA พบว่าแบคทีเรียไอโซเลท SPK_B3 มีความใกล้เคียงกับ *Bacillus subtilis* (Figure 3) มีรายงานว่าแบคทีเรียในสกุล *Bacillus* ได้แก่ *B. amyloliquefaciens*, *B. subtilis* และ *B. pumilus* สามารถลดการเกิดโรคหรือความรุนแรงของโรคพืชได้ [20]

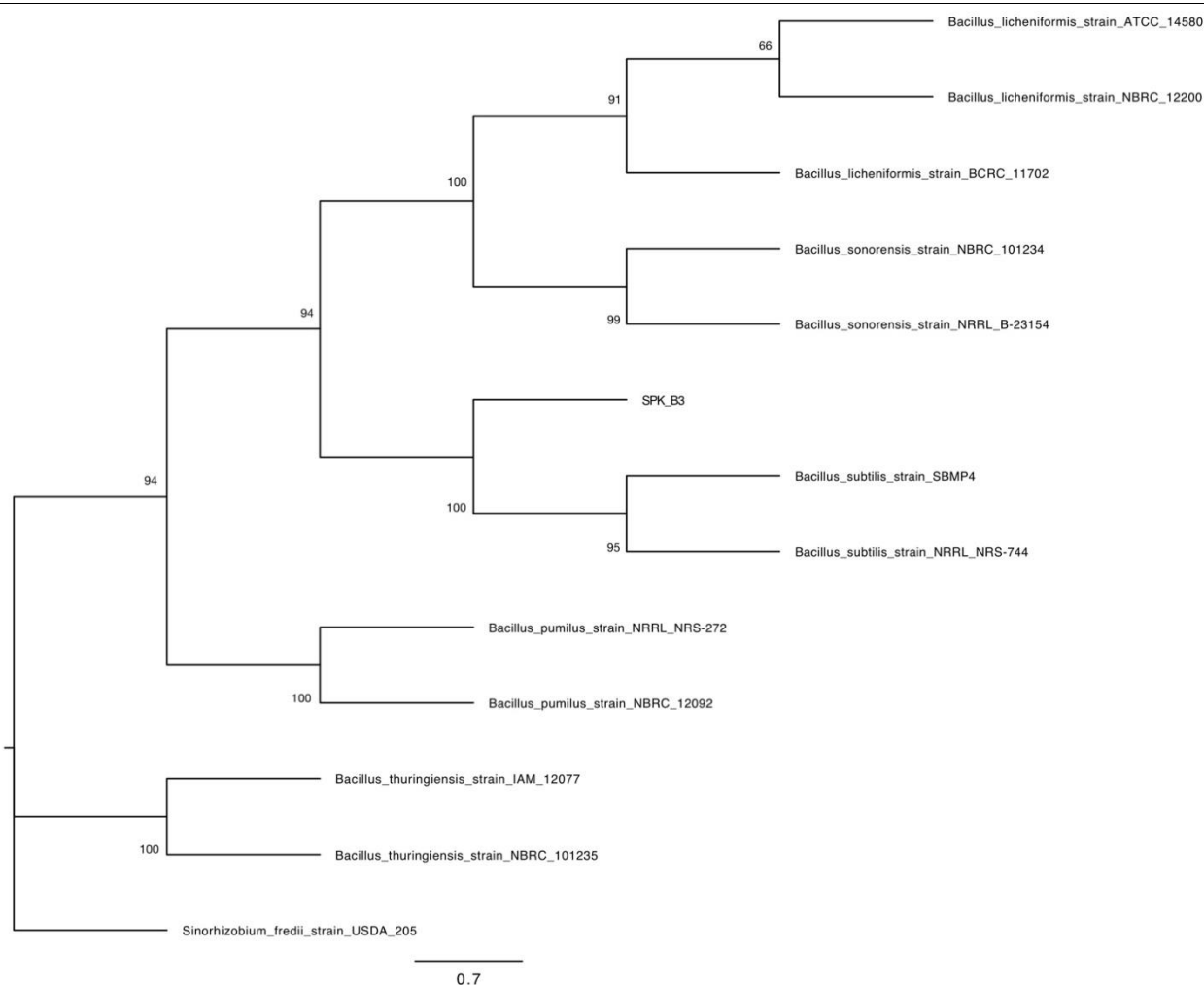


Figure 3 Phylogenetic tree based on 16S rDNA gene sequences of isolate SPK_B3 and related bacteria strains in the NCBI database established by the maximum likelihood method. The numbers at the branches indicate the confidence level calculated by bootstrap analysis (1000). The scale bar shows the evolutionary distance between species.

3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของ *Bacillus subtilis* SPK_B3 ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราสาเหตุโรคข้าว

จากการทดสอบประสิทธิภาพเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* SPK_B3 ในการยับยั้งการเจริญของ *Curvularia* sp., *Bipolaris* sp. และ *Pyricularia oryzae* เชื้อราสาเหตุโรคข้าวด้วยวิธี dual culture บนอาหาร PDA เป็นเวลา 7 วัน พบว่า SPK_B3 สามารถยับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อราได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งมากกว่า 50 % (Table 1) ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อรา *Curvularia* sp. อยู่ที่ 74.21% (Figure 4A) รองลงมาคือเชื้อรา *Bipolaris* sp. มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้ง 74.05 % (Figure 4B) และ *P. oryzae* มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้ง 54.69 % (Figure 4C) เมื่อนำเส้นใยของเชื้อราทั้ง 3 ไอโซเลท บริเวณที่เป็นแนวยับยั้งการเจริญของเส้นใยไปตรวจใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่า เส้นใยเชื้อรามีลักษณะบวมพอง เส้นใยเสียสภาพจากเดิมและหักงอ (Figure 5A - 5C) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (Figure 5D - 5F) สอดคล้องกับรายงาน Rajer et al. [21] ที่ได้ทำการคัดเลือกเชื้อแบคทีเรีย 141 ไอโซเลท โดยมีเชื้อแบคทีเรีย *B. velezensis* FA12, FA26 และ FZB42 ที่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคในข้าว *Scelotinia sclerotiorum* และ *Rhizoctonia solani* การทดสอบยับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อราด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* GB519 โดยใช้เชื้อราสาเหตุโรคข้าว 9 ชนิด คือ *Magnaporthe oryzae*, *Ustilaginoidea virens*, *Fusarium graminearum*, *F. moniliforme*, *F. oxysporum*, และ *R. solani* โดยมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งมากกว่า 55.0 % [22] และรายงานของ Rais et al. [23] ทดสอบเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus* sp. ที่แยกจากดินบริเวณรอบรากข้าวต่อเชื้อรา *P. oryzae* พบว่า *Bacillus* sp. สามารถยับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อราได้ 30-65% มีรายงานของ Ashwini and Srividya [24] พบว่าเชื้อ *B. subtilis* สามารถยับยั้งการเจริญของ

เส้นใยเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ทำให้เส้นใย มีลักษณะบวมพอง เส้นใยแตกหักและหยิกงอ Barrows-Broadus and Kerr [25] รายงานว่าเชื้อแบคทีเรีย *Arthrobacter* sp. ที่แยกได้จากดินสามารถยับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อรา *F. moniliforme* ทำให้เส้นใยเชื้อรามีลักษณะบวมและบิดเบี้ยว

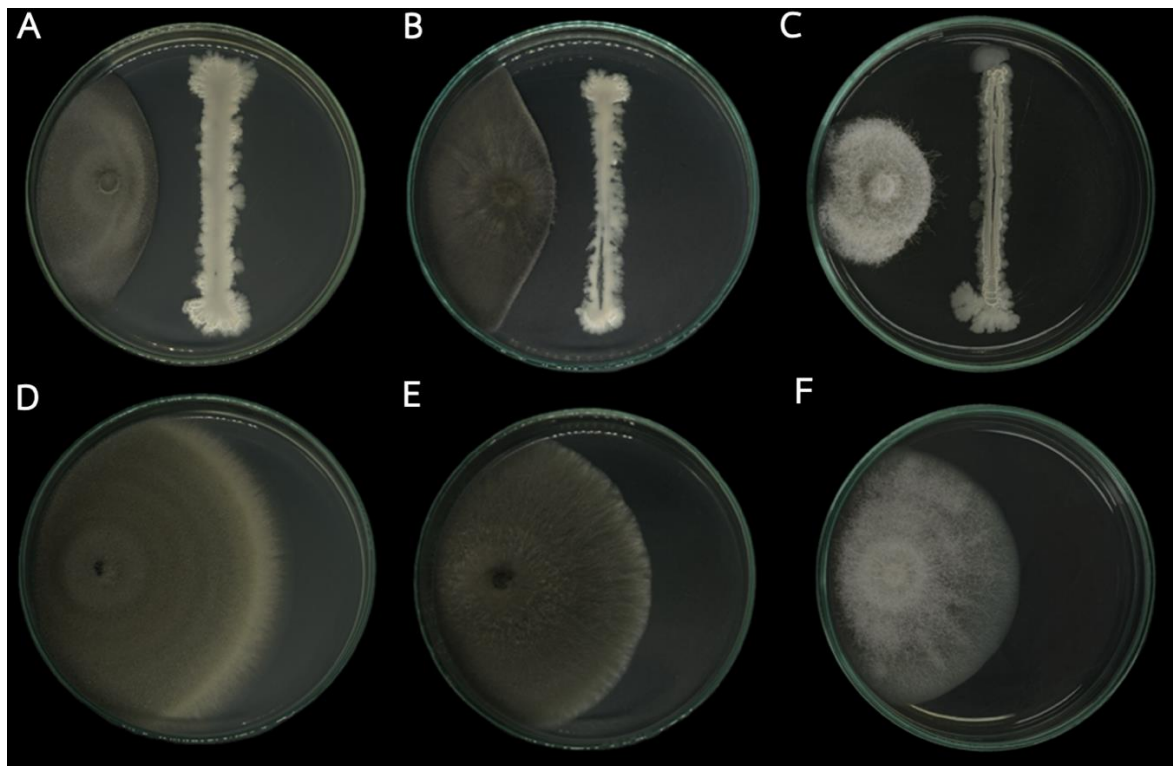


Figure 4 Dual culture assay of *Curvularia* sp. (A), *Bipolaris* sp. (B), and *P. oryzae* (C), with *Bacillus subtilis* SPK_B3 and without SPK_B3 (D, E, F: control). Photographs were taken after incubating on PDA medium for 7 days.

Table 1 Percentage inhibition radial growth of *Curvularia* sp., *Bipolaris* sp., and *P. oryzae* by *Bacillus subtilis* SPK_B3 at 7 days dual culture on PDA medium.

Isolate	Colony radian zone (cm.)			Percent inhibition radial growth (%)		
	<i>Curvularia</i> sp.	<i>Bipolaris</i> sp.	<i>P. oryzae</i>	<i>Curvularia</i> sp.	<i>Bipolaris</i> sp.	<i>P. oryzae</i>
SPK_B3	1.37 ± 0.06	1.13 ± 0.15	1.47 ± 0.15	74.21 ± 1.01	74.05 ± 3.42	54.69 ± 1.81
Control	5.30 ± 0.17	4.37 ± 0.06	3.23 ± 0.25	0.00	0.00	0.00

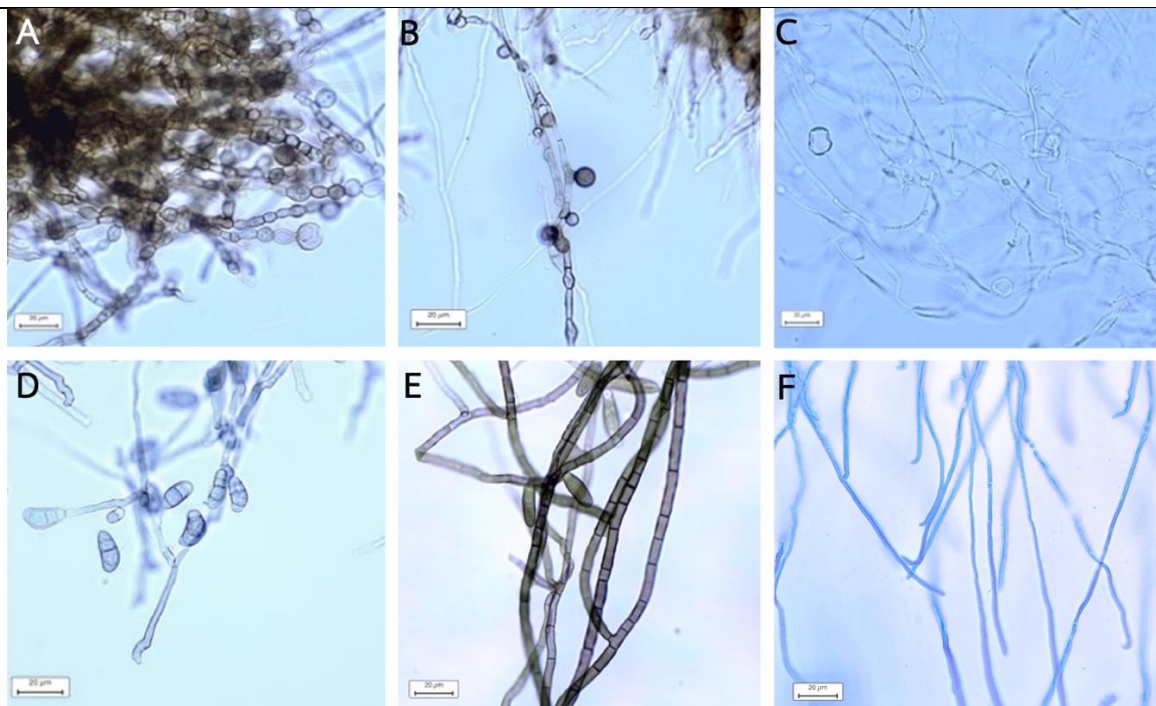


Figure 5 Light microscopic observations of *Curvularia* sp. (A), *Bipolaris* sp. (B), and *P. oryzae* (C) at the inhibition zone by *Bacillus subtilis* SPK_B3 compared with the control of *Curvularia* sp. (D), *Bipolaris* sp. (E), and *P. oryzae* (F) normal mycelium under light microscopic observations at a total magnification of 400.

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการแยกและคัดเลือกแบคทีเรียปฏิชีวนะจากดินบริเวณรอบรากข้าว ด้วยวิธี dual culture พบว่ามีแบคทีเรียไอโซเลท SPK_B3 ที่แยกได้จากดินบริเวณรอบรากของข้าวที่เก็บมาจากจังหวัดสมุทรปราการ มีประสิทธิภาพยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *X. oryzae* pv. *oryzae* สาเหตุของโรคขอบใบแห้งในข้าว ซึ่งแสดงโซนยับยั้ง 31.83 ± 0.58 mm และเชื้อแบคทีเรีย *X. oryzae* pv. *oryzicola* สาเหตุของโรคใบขีดโปร่งแสงในข้าว มีโซนยับยั้ง 21.58 ± 4.16 mm และมีประสิทธิภาพยับยั้งการเจริญเส้นใยของเชื้อรา *Curvularia* sp., *Bipolaris* sp. และ *P. oryzae* สาเหตุโรคข้าว มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งที่ 74.21%, 74.05 % และ 54.69 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรีย SPK_B3 มีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อสาเหตุโรคในข้าว ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานเป็นแบคทีเรียแกรมบวก และจัดจำแนกชนิดแบคทีเรียด้วยเทคนิคทางชีวโมเลกุล จัดจำแนกได้เป็น *Bacillus subtilis* ในอนาคตควรมีการศึกษาคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ที่ผลิตโดย *B. subtilis* SPK_B3 เพิ่มเติมเพื่อทำความเข้าใจกลไกการทำงานของสารเหล่านั้น รวมถึงศึกษาการนำแบคทีเรีย SPK_B3 ไปใช้ควบคุมเชื้อสาเหตุโรคข้าวในระดับโรงเรือนและแปลงปลูกต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร ที่อนุเคราะห์เชื้อแบคทีเรีย *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* strain DOA-BCC2568 สาเหตุโรคขอบใบแห้ง และ *X. oryzae* pv. *oryzicola* strain DOA-BCC2562 สาเหตุโรคใบขีดโปร่งแสง ให้ นอกจากนี้ขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ การศึกษานี้ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สัญญาเลขที่ 2566-02-04-012)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tariq, R., Ji, Z., Wang, C., Tang, Y., Zou, L., Sun, H., Chen, G. and Zhao, K. 2019. RNA-Seq analysis of gene expression changes triggered by *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* in a susceptible rice genotype. *Rice Science*. 12(44): 1-14.
- [2] Wonni, I., Cottyn, b., Determerman, L., Dao, S., Ouedraogo, L., Sarra, S., Tekete, C., Poussier, S., Corral, R., Triplett, L., Koita, O., Koebnik, R., Leach, J., Szurek, B., Maes, M. and Verdier, V. 2014. Analysis of *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzicola* population in mali and burkina faso reveals a high level of genetic and pathogenic diversity. *Phytopathology*. 104(5): 520-531.
- [3] Nayak, S. K., Nayak, S. and Mishra, B. B. 2017. Antimycotic role of soil *Bacillus* sp. against rice pathogens: a biocontrol prospective. *Microbial Biotechnology*. 29-60.
- [4] Jepson, P. C., Murray, K., Bach, O., Bonilla, M. A. and Neumeister, L. 2020. Selection of pesticides to reduce human and environmental health risks: a global guideline and minimum pesticides list. *The Lancet Planetary Health*. 4: 56-63.
- [5] Ab Rahman, S. F. S., Singh, E., Pieterse, C. M. J. and Schenk, P. M. 2018. Emerging microbial biocontrol strategies for plant pathogens. *Plant Science*. 267: 102-111.
- [6] Wang, H., Wen, K., Zhao, X., Wang, X., Li, A. and Hong, H. 2009. The inhibitory activity of endophytic *Bacillus* sp. strain CHM1 against plant pathogenic fungi and its plant growth-promoting effect. *Crop Protection*. 29: 634-639.
- [7] Doni, F., Suhaimi, N. S. M., Mispan, M. S., Fathurrahman, F., Marzuki, B. M. and Kusmoro, J. 2022. Microbial contributions for rice production: from conventional crop management to the use of 'omics' technologies. *Frontiers in Microbiology*. 23: 737.
- [8] Rabbee, M. F. and Baek, K. H. 2020. Antimicrobial activities of lipopeptides and polyketides of *Bacillus velezensis* for agricultural applications. *Molecules*. 25: 4973.
- [9] Lopes, R., Tsui, S., Goncalves, P. and de Queiroz, M. V. 2018. A look into a multifunctional toolbox: endophytic *Bacillus* species provide broad and underexploited benefits for plants. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 34: 94.
- [10] Chakraborty, M., Mahmud, N. U., Ullah, C., Rahman, M. and Islam, T. 2021. Biological and biorational management of blast diseases in cereals caused by *Magnaporthe oryzae*. *Critical Reviews in Biotechnology*. 41: 994-1022.
- [11] Wu, L., Wu, H., Chen, L., Yu, X., Borriss, R. and Gao, X. 2015. Difficidin and bacilysin from *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 have antibacterial activity against *Xanthomonas oryzae* rice pathogens. *Scientific Reports*. 5: 12975.
- [12] Leelasuphakul, W., Sivanunsakul, P. and Phongpaichit, S. 2006. Purification, characterization and synergistic activity of -1,3-glucanase and antibiotic extract from an antagonistic *Bacillus subtilis* NSRS 89-24 against rice blast and sheath blight. *Enzyme and Microbial Technology*. 38: 990-997.
- [13] Chiangsin, R., Kesee, C. and Sangchote, S. 2018. Biological control of *Bipolaris oryzae* with *Bacillus subtilis* and the development of a formulation for rice seed treatment. *Thai Journal of Agricultural Science*. 51(3): 139-151.
- [14] Saechow, S., Thammasittirong, A. and Thammasittirong, S.N. 2016. In vitro inhibitory effect of *Bacillus subtilis* BAS114 against *Curvularia lunata*. *Advances in Environmental Biology*. 10(1): 176-183.
- [15] Kabir, L., W. K. Sang., S.K. Yun and S.L. Youn. 2012. Application of *Rhizobacteria* for plant growth promotion effect and biocontrol of anthracnose caused by *Colletotrichum acutatum* on pepper. *Mycobiology*. 40: 244-251.

-
- [16] Zhou, J., Xie, Y., Liao, Y., Li, X., Li, Y., Li, S., Ma, X., Lei, S., Lin, F. Jiang, W, and He, Y-Q. 2022. Characterization of a *Bacillus velezensis* strain isolated from *Bolbostemmatis Rhizoma* displaying strong antagonistic activities against a variety of rice pathogens. *Frontiers in Microbiology*. 13: 983781.
- [17] Cheng, L., Jaiswal, K. S., Yang, S. H. and Suh, J. 2016. Endophytic *Bacillus subtilis* MJMP2 from kimchi inhibits *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*, the pathogen of Rice bacterial blight disease. *Journal of Applied Biological Chemistry*. 59(2). 149-54.
- [18] Djatmiko, H. A., Kurniawan, D. W. and Prihatiningsih, N. 2022. Potential of *Bacillus subtilis* potato isolate as biocontrol agent of *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* and candidate for nanosuspension formula. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*. 23(7): 3313-3317.
- [19] Hata, E.M., Sijam, K., Ahmad, Z.A.M., Yusof, M. T. and Azman, N.A. 2015. In vitro antimicrobial assay of actinomycetes in rice against *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzicola* and as potential plant growth promoter. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 58(6): 821-832.
- [20] Kloepper, J.W., Ryu, C. and Zhang, S. 2004. Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp. *Phytopathology*. 94: 1259-1266.
- [21] Rajer, F.U., Samma, M.K., Ali, Q., Rajer, W.A., Wu, H., Raza, W., Xie, Y., Tahir, H. A. S. and Gao, X. 2022. *Bacillus* spp.-mediated growth promotion of rice seedlings and suppression of bacterial blight disease under greenhouse conditions. *Pathogens*. 11: 1251.
- [22] Zhu, F., Wang, J., Jia, Y., Tian, C., Zhao, D., Wu, X., Liu, Y., Wang, D., Qi, S., Liu, X., Li, L., Jiang, Z. and Li, Y. 2021. *Bacillus subtilis* GB519 promotes rice growth and reduces the damages caused by rice blast fungus *Magnaporthe oryzae*. *PhytoFrontiers*. 1(4): 330-338.
- [23] Rais, A., Shakeel, M and Hafeez, F.Y. 2016. Plant growth promoting rhizobacteria suppress blast disease caused by *Pyricularia oryzae* and increase grain yield of rice. *Biocontrol Science and Technology*. 61: 769-780.
- [24] Ashwini, N. and Srividya, S. 2013. Potentiality of *Bacillus subtilis* as biocontrol agent for management of anthracnose disease of chilli caused by *Colletotrichum gloeosporioides* OGC1. *Biotech*. 4: 127-136.
- [25] Barrows-Broaddu, J. and KERR, T. K. 1981. Inhibition of *Fusarium moniliforme* var. *subglutinans*, the causal agent of pine pitch canker, by the soil bacterium *Arthrobacter* sp. *Canadian Journal of Microbiology*. 27: 20-27.

ผลของการใช้วัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อเซอร์โคไวรัสไทป์ 2 ร่วมกับวัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อไมycoplasma ต่อการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันในสุกร

Effect of combination vaccines against Porcine Circovirus type 2 and
Mycoplasma hyopneumoniae on immune responses in pigs

ณัฐณิชา ทองสุกใส¹, จำลอง มิตรชาอไทย², อัมพล กล่อมปัญญา³, สวรรยา อัมพนพิศย์⁴

มนิรัตน์ แผ้วปราบเสี้ยน¹ และ ชนาธิป ธรรมการ^{1,*}

Nattanicha Thongsuksai¹, Jamlong Mitchaothai², Ampon Klompanya³, Sawanya Umphonphison⁴,

Maneerat Paewprabsian¹ and Chanathip Thammakarn^{1,*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

²สำนักงานบริหารหลักสูตรสหวิทยาการเทคโนโลยีการเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

³คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

⁴ภาควิชาเภสัชวิทยา คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล 2 ถนนวังหลัง เขตบางกอกน้อย กทม. 10700

¹Department of Animal Production Technology and Fisheries, School of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1 Chalokkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520.

²Office of Administrative Interdisciplinary Programs on Agricultural Technology, School of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1 Chalokkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520.

³School of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1 Chalokkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520.

⁴Department of Pharmacology, Faculty of Medicine Siriraj Hospital, Mahidol University, 2 Wanglang Road, Bangkok-Noi, Bangkok 10700, Thailand.

*Corresponding author: Chanathip Thammakarn, e-mail address: Chanathip.th@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการใช้วัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อเซอร์โคไวรัสไทป์ 2 (PCV2) ร่วมกับวัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อไมycoplasma ในการกระตุ้นการสร้างภูมิคุ้มกันของสุกร โดยทำการศึกษาในสุกรที่ได้รับวัคซีน 3 ชนิด ได้แก่ วัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อ PCV2 ชนิดซับยูนิตที่มี ORF2 antigen 1.0-3.75 RP./ml (วัคซีน A), ORF2 antigen ไม่น้อยกว่า 200 Units (วัคซีน B) และวัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อ *Mycoplasma hyopneumoniae* (MH) ที่มีแอนติเจนไม่น้อยกว่า 1 RP/ml (วัคซีน C) โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized; CRD) ทำการฉีดวัคซีนเข้ากล้ามเนื้อให้แก่สุกรอายุ 4 สัปดาห์ จำนวน 4 กลุ่ม กลุ่มละ 6 ตัว ได้แก่ กลุ่มที่ 1: ได้รับวัคซีน A และ C แบบผสมวัคซีนก่อนฉีด กลุ่มที่ 2: ได้รับวัคซีน B และ C แบบฉีดพร้อมกันแต่แยกตำแหน่งฉีด กลุ่มที่ 3: ได้รับวัคซีน B และ C แบบผสมวัคซีนก่อนฉีด และกลุ่มที่ 4: ได้รับ Phosphate buffered saline ทำการเก็บเลือดสุกรก่อนเริ่มการทดลองและที่อายุ 6, 8, 12 และ 16 สัปดาห์ เพื่อตรวจหา ระดับภูมิคุ้มกันต่อเชื้อ PCV2 และ MH ด้วยวิธี Enzyme-Linked Immunosorbent Assay และ Polymerase Chain Reaction ผลการศึกษาพบว่าสุกรทุกกลุ่มที่ได้รับวัคซีนมีการตอบสนองของภูมิคุ้มกันต่อเชื้อ PCV2 ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่มีเพียงสุกร กลุ่มที่ 3 เท่านั้นที่ตรวจไม่พบเชื้อ PCV2 ในกระแสเลือด สำหรับภูมิคุ้มกันต่อเชื้อ MH สุกรทุกกลุ่มมีการตอบสนองได้ไม่ดี ดังนั้น หากมีความจำเป็นต้องทำวัคซีนทั้ง 2 ชนิดนี้ร่วมกัน การเลือกใช้วัคซีน B ร่วมกับวัคซีน C แบบผสมรวมกันจึงเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุด

คำสำคัญ: เซอร์โคไวรัสไทป์ 2, โรคติดเชื้อไมycoplasma, ภูมิคุ้มกัน, สุกร

Abstract

This study aims to evaluate the efficacy of using the Porcine Circovirus Type 2 (PCV2) vaccine together with the *Mycoplasma* infection vaccine in stimulating immune responses in pigs. The study was conducted on pigs vaccinated with three types of vaccines, including subunit PCV2 vaccine containing ORF2 antigen at 1.0 - 3.75 RP/ml (vaccine A). A subunit PCV2 vaccine containing ORF2 antigen at no less than 200 Units (vaccine B). A *Mycoplasma hyopneumoniae* (MH) vaccine containing antigen at no less than 1 RP/ml (vaccine C).

The experiment was arranged in a Completely Randomize Design (CRD) with vaccines administered intramuscularly to pigs at 4 weeks of age, divided into four groups of six pigs each. Group 1: received vaccine A and C, mixed before injection. Group 2: received vaccine B and C, injected simultaneously but at separate injection sites. Group 3: received vaccine B and C, mixed before injection. Group 4: received phosphate-buffered

saline as a control. Blood samples were collected before the experiment and at 6, 8, 12, and 16 weeks of age to determine immune responses against PCV2 and MH using the Enzyme-Linked Immunosorbent Assay (ELISA) and Polymerase Chain Reaction (PCR) methods. The results showed that all vaccinated groups exhibited similar immune responses to PCV2, with no significant differences. However, only pigs in Group 3 had no detectable PCV2 in their bloodstream. Regarding MH immunity, all groups showed poor immune responses. Therefore, if both vaccines need to be administered together, the best option is to use Vaccine B combined with Vaccine C in a mixed formulation.

Keywords: PCV2, Mycoplasma infection, Immunity, Pig

1. บทนำ

โรคติดเชื้อเซอร์โคไวรัสไทป์ 2 (Porcine circovirus type 2; PCV2) และโรคติดเชื้อไมโคพลาสมา (*Mycoplasma hyopneumoniae*; MH) เป็นโรค 2 ชนิดที่พบได้บ่อยในอุตสาหกรรมสุกรในปัจจุบัน โดย PCV2 ถูกระบุว่าเป็นสาเหตุของกลุ่มอาการที่ก่อให้เกิดความเสียหายของสุกรหลังหย่านม (Post-weaning Multisystemic Wasting Syndrome; PMWS) และโรคติดเชื้อในระบบทางเดินหายใจซับซ้อน (Porcine Respiratory Disease Complex; PRDC) จะทำให้สุกรมีอาการสูญเสียน้ำหนักอย่างรุนแรงในช่วงอายุระหว่าง 7-16 สัปดาห์ [1] PMWS จะแสดงอาการป่วยอย่างชัดเจน คือ มีลักษณะทรุดโทรม ผอม ขนหยาบ แคระแกร็น ไอ หายใจลำบาก ซึม เบื่ออาหาร และจะรุนแรงขึ้นเมื่อมีการติดเชื้อแทรกซ้อน อาทิเช่น *Mycoplasma hyopneumoniae* ส่งผลให้อัตราการป่วยและตายสูงกว่า 80% [2] ในส่วน PRDC มักเกิดจากสาเหตุหลายปัจจัยร่วมกัน ทั้งไวรัส แบคทีเรีย สิ่งแวดล้อมและการจัดการ สุกรโตช้าและไม่สม่ำเสมอ อัตราการตายและการคัดทิ้งเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการให้อาหารลดลง จำนวนวันเลี้ยงเพิ่มขึ้น โดยมีรายงานว่า PRDC สามารถทำให้อัตราการป่วยถึง 70% โดยอัตราการตายระหว่าง 4-6% [3-5] PCV2 เป็นเชื้อดีเอ็นเอไวรัสไม่มีเปลือกหุ้มขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเฉลี่ย 17 นาโนเมตร อยู่ใน Family *Circoviridae* และ Genus *Circovirus* และพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1997 ในฝูงสุกรประเทศแคนาดา [6] สำหรับประเทศไทยมีการพบปัญหาจากโรค PCV2 ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1999 ซึ่งยืนยันโดยการตรวจทางอาการป่วยทางพยาธิวิทยา จุลพยาธิวิทยา การตรวจทาง Electron microscope พบอนุภาคของไวรัสที่มีขนาด 17 นาโนเมตร [7] ในส่วนของโรคติดเชื้อ MH นั้น สามารถเรียกอีกชื่อได้ว่าโรคเอ็นซูติกนิวโมเนีย (Enzootic pneumonia; EP) เกิดจากเชื้อแบคทีเรีย *M. hyopneumoniae* ที่เป็นแบคทีเรียแกรมลบ (Gram negative) มีลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยว ไม่มีผนังเซลล์ ขนาด 300-900 นาโนเมตร ซึ่งเกาะอยู่บนพื้นผิวด้านนอกของเยื่อเซลล์ขนอ่อนของระบบทางเดินหายใจของสุกร ทำให้เกิดความเสียหายของเยื่อเซลล์ขนอ่อน ส่งผลให้สุกรติดเชื้อแทรกซ้อนต่างๆ ในระบบทางเดินหายใจได้ง่ายขึ้น [8] สุกรที่เป็นโรคนี้นักมีอาการไอลึก หายใจลำบาก ไม่กินอาหาร มีอาการไข้สูงถึง 105-107 องศาฟาเรนไฮต์ อีกทั้งสุกรจะมีอาการหอบ อัตราการเจริญเติบโตที่ไม่ดี และจะส่งผลรุนแรงมากขึ้นหากมีการติดเชื้อร่วมกับเชื้ออื่นๆ [9] เนื่องจากความแพร่หลายของ PCV2 และ MH ที่ก่อให้เกิดความสูญเสียทางด้านเศรษฐกิจในอุตสาหกรรมเลี้ยงสุกรทั่วโลกรวมทั้งประเทศไทย การฉีดวัคซีนได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการป้องกันโรค เป็นผลทำให้เกิดการผลิตวัคซีนทางการค้าหลายชนิด ซึ่งวัคซีนทางการค้าแต่ละชนิดนั้นก็จะมีประสิทธิภาพในการควบคุมและป้องกันโรคที่แตกต่างกัน โดยการให้วัคซีนดังกล่าวนี้สามารถกระทำได้ตามคำแนะนำของผู้ผลิต พบว่าการให้วัคซีนนั้นสามารถให้ควบคู่กันหรือพร้อมกันได้ เพื่อช่วยลดระยะเวลาให้การให้วัคซีน ลดต้นทุนค่าใช้จ่าย แรงงาน และผลกระทบต่อตัวสัตว์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการใช้วัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อเซอร์โคไวรัสไทป์ 2 พร้อมกับวัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อไมโคพลาสมาด้วยวิธีการต่างชนิดกันเพื่อกระตุ้นการสร้างภูมิคุ้มกันของสุกรเพื่อเป็นแนวทางในการกระตุ้นภูมิคุ้มกันที่เหมาะสมเพื่อควบคุมการเกิดโรคในสุกรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมสัตว์ทดลองและการให้วัคซีน

ลูกสุกรขุนสามสายพันธุ์ (Duroc jersey x Large white x Landrace) อายุ 4 สัปดาห์ น้ำหนักตัวเริ่มต้นเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน จำนวน 24 ตัว แบ่งเป็น 4 กลุ่มการทดลอง กลุ่มละ 6 ตัว โดยทำการสุ่มตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely

Randomized Design; CRD) เลี้ยงภายในโรงเรือนปิด (Evaporative Cooling System) โดยใช้ลักษณะคอกเป็นคอกขังรวม ได้รับน้ำแบบไม่จำกัดผ่านระบบกักน้ำหมูและเลี้ยงด้วยอาหารสัตว์เชิงพาณิชย์

ทำการเก็บเลือดสุกรเป็นรายตัวในแต่ละกลุ่มการทดลองที่อายุ 4 สัปดาห์ จากนั้นทำการฉีดวัคซีนให้กับลูกสุกรทั้ง 4 กลุ่มการทดลอง โดยวัคซีนที่ใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 3 วัคซีน ได้แก่ วัคซีน A : วัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อเซอร์โคไวรัสไทป์ 2 ชนิดซับยูนิต (IngelvacCircoFLEX; Boehringer Ingelheim Vetmedica, Inc.; USA) ส่วนประกอบใน 1 ml. ประกอบด้วย Porcine Circovirus type 2 ORF2 1.0-3.75 RP. วัคซีน B : วัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อเซอร์โคไวรัสไทป์ 2 ชนิดซับยูนิต (PRO-VAC CIRCOMASTER ONE-SHOT; Komipharm International Co. Ltd.; Korea) ส่วนประกอบใน 1 ml. ประกอบด้วย Porcine Circovirus type2 ORF2 protein antigen ไม่น้อยกว่า 200 Units วัคซีน C : วัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อมัคโคพลาสมา (IngelvacMycoFLEX; Boehringer Ingelheim Vetmedica, Inc.; USA) ส่วนประกอบใน 1 ml. ประกอบด้วยแบคทีเรีย *M. hyopneumoniae* ที่มีโปรตีนแอนติเจนไม่น้อยกว่า 1.0 RP. และกลุ่มควบคุมจะฉีดด้วยสารละลายเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate Buffered Saline; PBS) ดัง Table 1 และเก็บเลือดสุกรเป็นรายตัวในแต่ละกลุ่มทดลองที่อายุ 6, 8, 12 และ 16 สัปดาห์

Table 1 Experimental groups, vaccine types and vaccination methods

Group	Vaccine types	Dosage (mL.)	Methods of administration
1	A + C	2	Mix the vaccine before injection
2	B + C	2	Separate injections of 1 ml each type
3	B + C	2	Mix the vaccine before injection
4	PBS	1	Direct injection

การทดลองนี้ได้รับการอนุญาตให้ดำเนินการโดยคณะกรรมการกำกับดูแลการดำเนินการต่อสัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่หนังสือรับรอง ACUC-KMITL-RES/2023/008 และดำเนินงานวิจัย ณ ศูนย์วิจัยและนวัตกรรมด้านการเลี้ยงสัตว์ ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2.2 การบันทึกข้อมูลการตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ

การบันทึกข้อมูลเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวัคซีน โดยทำการเก็บเลือดสุกรเป็นรายตัวในแต่ละกลุ่มทดลองที่อายุ 4, 6, 8, 12 และ 16 สัปดาห์ โดยเลือดสุกรที่ได้จากการเก็บในแต่ละสัปดาห์นั้น จะถูกปั่นเหวี่ยงให้ตกตะกอนด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็ว 6,500×g เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นซีรัมจะถูกดูดเก็บในหลอดทดลอง และเก็บตัวอย่าง Swab เยื่อเมือกจากโพรงจมูกสุกร ที่อายุ 8 สัปดาห์ด้วย Sterile Cotton Swab บรรจุใน Centrifuge Tube จัดเก็บในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อเตรียมใช้ในการตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) และ Polymerase chain reaction (PCR) ต่อไป เพื่อใช้ในการตรวจระดับภูมิคุ้มกันจากการได้รับวัคซีน โดยจะแบ่งตรวจระดับภูมิคุ้มกันด้วยชุดตรวจ ELISA สำเร็จรูปทางการค้าออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชุดตรวจ Porcine Circovirus type 2 Antibody test kit (Bio-Chek; UK) โดยปฏิบัติตามคู่มือการปฏิบัติการ วิธีการ และลำดับขั้นตอนในการปฏิบัติงานตามคำแนะนำของชุดตรวจดังนี้ (1) นำ Plate ที่ใช้ในการทดลองออกจากตู้ทำความเย็น เพื่อปรับสภาพให้อยู่ในอุณหภูมิห้อง ประมาณ 27 องศาเซลเซียส (2) นำ Negative control ปริมาณ 100 µl ใส่ลงไปใน Plate ช่อง A1 และ B1 และนำ Positive control ปริมาณ 100 µl ใส่ลงไปใน Plate ช่อง C1 และ D1 โดยไม่ต้องเจือจาง (3) ทำการเจือจางตัวอย่างซีรัมที่ต้องการตรวจในแต่ละหลุมด้วย Sample diluent reagent ที่อัตราส่วน 1:50 (5 : 245 µl) นำไปผสมให้เข้ากันด้วย Microplate mixer ประมาณ 30-60 วินาที เคลือบปิดแผ่นพลาสติกแรปแล้วบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที (4) เตรียม Wash buffer โดยนำ ผง PBS-T ที่ให้มากับชุดตรวจ 1 ซอง ใส่ในน้ำบริสุทธิ์ Type 1

ปริมาณ 1 ลิตร และผสมให้เข้ากัน (5) แกะแผ่นเคลือบพลาสติกแรป เทสารออกจากหลุม และทำการล้างด้วย Wash buffer ปริมาณ 350 μ l ต่อหลุม จำนวน 4 ครั้ง ด้วย Microplate washer (6) เติม Conjugate ปริมาณหลุมละ 100 μ l ให้ครบทุกหลุม การทดลอง ปิดเคลือบด้วยแผ่นพลาสติกแรป และทำการบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที (7) เตรียม Substrate reagent โดยนำเม็ด pNPP ที่ให้มากับชุดตรวจ 1 เม็ด ละลายใน Substrate buffer ของชุดตรวจ ในปริมาณ 5.5 มล. ผสมกันจนกระทั่ง ละลายหมด (8) ทำวิธีการเดิมซ้ำตามข้อที่ (5) (9) เติม Substrate reagent ปริมาณหลุมละ 100 μ l ให้ครบทุกหลุมการทดลอง ปิดเคลือบด้วยแผ่นพลาสติกแรป และทำการบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที (10) เติม Stop solution ปริมาณหลุมละ 100 μ l ให้ครบทุกหลุมการทดลอง (11) นำไปอ่านผลภายใน 30 นาที ด้วย Microplate reader ที่ความยาวคลื่น 405 nm. และชุดตรวจ *Mycoplasma hyopneumoniae* Antibody test kit (IDEXX; USA) โดยจะปฏิบัติตามคู่มือการปฏิบัติการ วิธีการ และ ลำดับขั้นตอนในการปฏิบัติงานตามคำแนะนำของชุดตรวจดังนี้ (1) นำ Plate ที่ใช้ในการทดลองออกจากตู้ทำความเย็น เพื่อปรับ สภาพให้อยู่ในอุณหภูมิห้อง ประมาณ 27 องศาเซลเซียส (2) นำ Negative control ปริมาณ 100 μ l ใส่ลงไปใน Plate ช่อง A1 และ B1 และนำ Positive control ปริมาณ 100 μ l ใส่ลงไปใน Plate ช่อง C1 และ D1 โดยไม่ต้องเจือจาง (3) ทำการเจือจาง ตัวอย่างซีรัมที่ต้องการตรวจในแต่ละหลุมด้วย Sample diluent reagent ที่อัตราส่วน 1:40 (10 : 390 μ l) และนำมาใช้ปริมาณ 100 μ l ผสมให้เข้ากันด้วย Microplate mixer ประมาณ 60 วินาที เคลือบปิดแผ่นพลาสติกแรปแล้วบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที (4) เตรียม Wash solution โดยนำ Wash ที่ให้มากับชุดตรวจปริมาณ 100 ml. ใส่ในน้ำบริสุทธิ์ Type 1 ปริมาณ 900 ml. และผสมให้เข้ากัน (5) แกะแผ่นเคลือบพลาสติกแรป เทสารออกจากหลุม และทำการล้างด้วย Wash buffer ปริมาณ 350 μ l ต่อหลุม จำนวน 4 ครั้ง ด้วย Microplate washer (6) เติม Conjugate ปริมาณหลุมละ 100 μ l ให้ครบทุกหลุมการทดลอง ปิดเคลือบด้วยแผ่นพลาสติกแรป และทำการบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที (7) ทำวิธีการเดิมซ้ำตามข้อที่ (5) (8) เติม TMB substrate ปริมาณหลุมละ 100 μ l ให้ครบทุกหลุมการทดลอง ปิดเคลือบด้วยแผ่นพลาสติกแรป และทำการบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 นาที (9) เติม Stop solution ปริมาณหลุมละ 100 μ l ให้ครบทุกหลุมการทดลอง (10) นำไปอ่านผลภายใน 30 นาที ด้วย Microplate reader ที่ความยาวคลื่น 650 nm. เมื่อเสร็จตามขั้นตอนการปฏิบัติดังกล่าวจะได้ค่าการดูดกลืนแสง (Optical density: OD) นำค่า OD ที่ได้มาคำนวณหาค่า S/P ratio เพื่อดูค่าปริมาณแอนติบอดีจากตัวอย่างซีรัม ซึ่งมีสูตรคำนวณดังนี้

$$S/P \text{ ratio} = \frac{\text{ค่า OD ของตัวอย่าง} - \text{ค่าเฉลี่ยของ Negative control}}{\text{ค่าเฉลี่ยของ Positive control} - \text{ค่าเฉลี่ยของ Negative control}}$$

โดยที่การแสดงผลปริมาณแอนติบอดีที่ได้ของ PCV2 นั้นหากมีค่า S/P ratio ที่ 0.49 หรือน้อยกว่า แสดงว่ามีปริมาณ แอนติบอดีอยู่ในช่วง Negative และหากมีค่า S/P ratio ที่ 0.50 หรือมากกว่า แสดงว่ามีปริมาณแอนติบอดีอยู่ในช่วง Positive ในส่วนของ MH เปรียบเทียบค่า S/P ratio โดยหากมีค่า S/P ratio ที่ 0.30 หรือน้อยกว่า แสดงว่ามีปริมาณแอนติบอดีอยู่ในช่วง Negative และหากมีค่า S/P ratio ที่ 0.40 หรือมากกว่า แสดงว่ามีปริมาณแอนติบอดีอยู่ในช่วง Positive

จากนั้นนำตัวอย่างซีรัมของลูกสุกรทุกตัวมาสกัด DNA ตรวจสอบหาเชื้อ PCV2 ด้วย Conventional PCR อ่านผลโดยวิธี Gel electrophoresis เพื่อตรวจสอบดูทั้งปริมาณและขนาด Primers ที่เลือกใช้สำหรับขยายยีน PCV2 ได้แก่ Forward primer PCV2-f1 (5'-CCA TGC CCT GAA TTT CCA TA-3') และ Reverse primer PCV2-r1 (5'-ACA GCG CAC TTC TTT CGT TT-3') [10] นำตัวอย่างทั้งหมดใส่ลงในเครื่อง Thermal cycler และทำการตั้งค่าเครื่อง โดยกำหนดการทำปฏิกิริยา PCR จำนวน 40 รอบ โดยในแต่ละรอบของปฏิกิริยากำหนดอุณหภูมิและเวลาดังนี้ Denaturation ที่อุณหภูมิ 94 องศาเซลเซียส นาน 30 วินาที Annealing ที่อุณหภูมิ 61 องศาเซลเซียส นาน 30 วินาที และ Extension ที่อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที จากนั้น เตรียมเจล Agarose 2 % สำหรับขบวนการ Electrophoresis โดยการเตรียมผง Agarose 0.40 กรัม ผสมกับ 1% TBE ปริมาณ 20 ml. หยดสีเขียวดีเอ็นเอ (Neogreen) ปริมาณ 1 μ l ลงในเจล Agarose ที่ละลายแล้ว และเทเจลลงใน Comb block ให้ทั่ว รอให้เจลที่ได้แข็งตัวประมาณ 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง และนำ Gel comb ออก นำแผ่นเจลที่ได้วางลงในอุปกรณ์สำหรับทำ

Electrophoresis โดยให้ส่วนที่ใส่ตัวอย่างอยู่ทางซ้ายลบบ จากนั้นเท Buffer ให้ท่วมเจลขึ้นมาเล็กน้อย หยด DNA Loading buffer ปริมาณ 1 μ l และตัวอย่างปริมาณ 4 μ l บนพาราฟิล์มผสมให้เข้ากัน ปลอยตัวอย่างที่ผสมเข้ากันลงในแต่ละหลุมเจลที่เตรียมไว้ โดยหลุมแรกจะเป็น Hyperladder 3 μ l เมื่อใส่ตัวอย่างครบทุกหลุมแล้ว ตั้งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้แยกขนาด DNA ที่ 100 โวลต์ ตั้งเวลาที่ 35 นาที นำเจลที่ได้ไปถ่ายรูปรูปโดยใช้เครื่อง FluoroBox จากนั้นหน้าจอจะปรากฏ Band ของ DNA ขึ้น และทำการบันทึกภาพทำการเปรียบเทียบแถบ Band ของ DNA ถ้าหากแถบ Band ขึ้นที่ 802 bp จะพบว่าเป็น Positive ถ้าไม่ขึ้นแถบ Band พบว่าเป็น Negative [11]

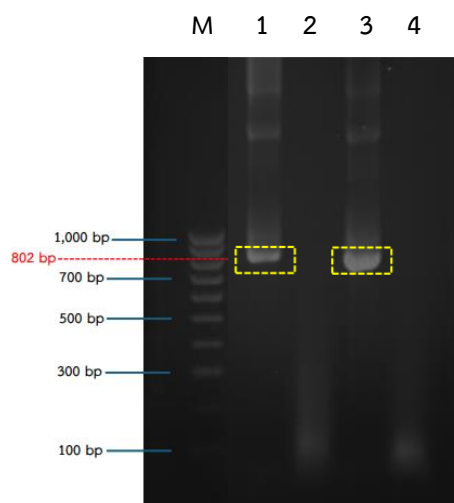


Figure 1 Examples of electrophoretic profile of specific amplicons form PCV2 DNA. Lane M: 100 – 1,000 bp ladder, Lane 1 PCV2 positive control number 1, Lane 2: PCV2 negative control number 1, Lane 3 PCV2 positive control number 2 and Lane 4: PCV2 negative control number 2.

ตัวอย่าง Swab เยื่อเมือกจากโพรงจมูกสุรนามาตรวจสอบแยกเชื้อระหว่าง *M. hyopneumoniae* และ *M. hyorhinis* ด้วยวิธี multiplex PCR โดยใช้ Primers คู่ที่ 1 ได้แก่ Forward primer MhpF-1 (5'- ACT AGA TAG GAA ATG CTC TAG -3') และ Reverse primer MhpR-2 (5' – ATA CTA CTC AGG CGG ATC ATT TAA C -3') และคู่ที่ 2 ได้แก่ Forward primer MhpF-3 (5'- GTA GTC AAG CAA GAG GAT GT -3') และ Reverse primer MhpR-4 (5' – GCT GGA GTT ATT ATA CCA GGA -3') นำตัวอย่างทั้งหมดใส่ลงในเครื่อง Thermal cycler และทำการตั้งค่าเครื่อง โดยกำหนดการทำปฏิกิริยา PCR จำนวน 35 รอบ โดยในแต่ละรอบของปฏิกิริยากำหนดอุณหภูมิและเวลาดังนี้ Denaturation ที่อุณหภูมิ 94 องศาเซลเซียส นาน 30 วินาที Annealing ที่อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที และ Extension ที่อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที จากนั้นเตรียมเจล Agarose 1.5 % สำหรับขบวนการ Electrophoresis โดยการเตรียมผง Agarose 0.60 กรัม ผสมกับ 1% TBE ปริมาณ 40 ml. หยดสีย้อมดีเอ็นเอ (Neogreen) ปริมาณ 2 μ l ลงในเจล Agarose ที่ละลายแล้ว และเทเจลลงใน Comb block ให้ทั่ว รอให้เจลที่ได้อุ่นประมาณ 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง และนำ Gel comb ออก นำแผ่นเจลที่ได้วางลงในอุปกรณ์สำหรับทำ Electrophoresis โดยให้ส่วนที่ใส่ตัวอย่างอยู่ทางซ้ายลบบ จากนั้นเท Buffer ให้ท่วมเจลขึ้นมาเล็กน้อย หยด DNA Loading buffer ปริมาณ 2 μ l และตัวอย่างปริมาณ 8 μ l บนพาราฟิล์มผสมให้เข้ากัน ปลอยตัวอย่างที่ผสมเข้ากันลงในแต่ละหลุมเจลที่เตรียมไว้ โดยหลุมแรกจะเป็น Hyperladder 5 μ l เมื่อใส่ตัวอย่างครบทุกหลุมแล้ว ตั้งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้แยกขนาด DNA ที่ 100 โวลต์ ตั้งเวลาที่ 25-30 นาที นำเจลที่ได้ไปถ่ายรูปรูปโดยใช้เครื่อง FluoroBox จากนั้นหน้าจอจะปรากฏ Band ของ DNA ขึ้น และทำการบันทึกภาพ ทำการเปรียบเทียบแถบ Band ของ DNA ถ้าหากแถบ Band ขึ้นที่ 430 bp จะพบว่าเป็น Positive ถ้าไม่ขึ้นแถบ Band พบว่าเป็น Negative ของเชื้อ *M. hyopneumoniae* และถ้าหากแถบ Band ขึ้นที่ 346 bp จะพบว่าเป็น Positive ถ้าไม่ขึ้นแถบ Band พบว่าเป็น Negative ของเชื้อ *M. hyorhinis* [12]

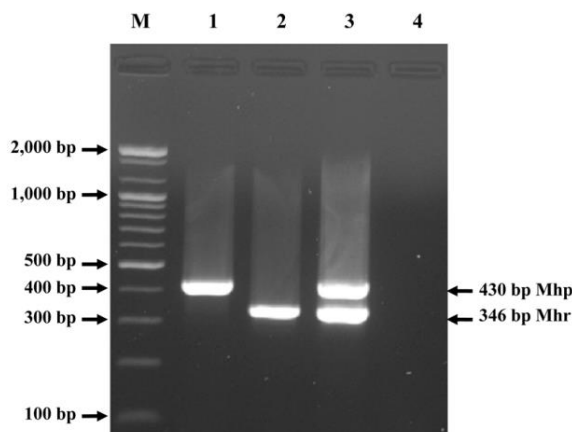


Figure 2 Examples of electrophoretic profile of specific amplicons form 16s RNA (*M. hyopneumoniae*) and the p37 gene (*M. hyorhinis*) Lane M: 100 – 1,000 bp ladder, Lane 1 Mhp J ATCC 25934, Lane 2: Mhr ATCC27717, Lane 3: Mhp J ATCC 25934 and Mhr ATCC 27717, Lane 4: Negative control. [12]

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการศึกษาระดับภูมิคุ้มกันต่อ PCV2 และ MH คือค่า S/P ratio นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบวัดซ้ำ (Repeated Measure) และทดสอบ Pairwise comparison ด้วยโปรแกรม SPSS เพื่อหาความแตกต่างของภูมิคุ้มกันที่เกิดขึ้นจากการทำวัคซีนด้วยวิธีที่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของกลุ่มการทดลองด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลการประเมินประสิทธิภาพของระดับภูมิคุ้มกัน

ผลการศึกษาพบว่าระดับภูมิคุ้มกันต่อเชื้อ PCV2 โดยนำแต่ละกลุ่มทดลองมาเปรียบเทียบกัน พบว่าก่อนเริ่มการทดลองที่อายุ 4 สัปดาห์ สุกรทั้ง 4 กลุ่ม มีระดับปริมาณแอนติบอดีต่อเชื้อ PCV2 ดังนี้ กลุ่มที่ 1 มีค่า S/P ratio 0.793 ± 0.07 กลุ่มที่ 2 มีค่า S/P ratio 0.964 ± 0.16 กลุ่มที่ 3 มีค่า S/P ratio 0.854 ± 0.26 และกลุ่มที่ 4 มีค่า S/P ratio 0.679 ± 0.13 ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่ทั้ง 4 กลุ่มมีค่าเฉลี่ยของ S/P ratio ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 0.50 จึงแสดงว่ามีปริมาณแอนติบอดีอยู่ในช่วง Positive ซึ่งทำให้เห็นว่าลูกสุกรทั้ง 4 กลุ่ม ได้รับการถ่ายทอดแอนติบอดีจากแม่ในระดับที่สูง (Maternal immunity) ซึ่งมีโอกาสในการหักล้างกันของแอนติบอดีและวัคซีนได้ [13] เมื่อสุกรอายุ 6 สัปดาห์ (2 สัปดาห์หลังฉีดวัคซีน) สุกรมีระดับแอนติบอดีต่อเชื้อ PCV2 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยพบว่ากลุ่มที่ 3 มีระดับ S/P ratio สูงที่สุดคือ 1.254 ± 0.44 แตกต่างกับกลุ่มอื่นๆ รองลงมาคือกลุ่มที่ 2 มีค่า S/P ratio เท่ากับ 0.628 ± 0.15 ซึ่งไม่แตกต่างกับกลุ่มที่ 1 มีค่า S/P ratio เท่ากับ 0.522 ± 0.13 และกลุ่มที่ 1 ก็ไม่แตกต่างกับกลุ่มที่ 4 มีค่า S/P ratio เท่ากับ 0.298 ± 0.05 เมื่อสุกรอายุ 8 สัปดาห์ (4 สัปดาห์หลังฉีดวัคซีน) สุกรมีระดับแอนติบอดีต่อเชื้อ PCV2 ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยกลุ่มที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่า S/P ratio เรียงกันดังต่อไปนี้ 1.051 ± 0.25 , 0.886 ± 0.26 , 1.090 ± 0.30 และ 0.869 ± 0.35 ซึ่งแสดงให้เห็นว่านอกจากสุกรได้รับภูมิคุ้มกันจากแม่แล้วยังสามารถสร้างภูมิคุ้มกันขึ้นได้เอง (Specific immunity) [14] เมื่อสุกรอายุ 12 สัปดาห์ (8 สัปดาห์หลังฉีดวัคซีน) สุกรมีระดับแอนติบอดีต่อเชื้อ PCV2 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยพบว่าสุกรกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีค่า S/P ratio เรียงกันดังต่อไปนี้ 1.534 ± 0.14 , 1.438 ± 0.14 และ 1.408 ± 0.08 ซึ่งแตกต่างกับกลุ่มที่ 4 มีค่า S/P ratio เท่ากับ 1.241 ± 0.16 และเมื่อสุกรอายุ 16 สัปดาห์ (12 สัปดาห์หลังฉีดวัคซีน) สุกรมีระดับแอนติบอดีต่อเชื้อ PCV2 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยพบว่ากลุ่มที่ 1 มีค่า S/P ratio สูงที่สุด คือ 1.812 ± 0.09 ซึ่งไม่แตกต่างกับกลุ่มที่ 2 มีค่า S/P ratio เท่ากับ 1.550 ± 0.14 แต่แตกต่างกับกลุ่ม 3 และ 4 โดยที่กลุ่ม 2 มีค่า S/P ratio ไม่แตกต่างกับกลุ่ม 3 มีค่า S/P ratio เท่ากับ 1.401 ± 0.20 และกลุ่ม 3 มีค่า S/P ratio ไม่แตกต่างกับกลุ่ม 4 ที่ 1.223 ± 0.41 ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่าสุกรกลุ่มที่ 1, 2, และ 3 ในทุกช่วงอายุพบระดับแอนติบอดีต่อเชื้อ PCV2 ยกเว้นกลุ่มที่ 4 ที่อายุ 6 สัปดาห์ มีค่าเฉลี่ยของ S/P ratio ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.49 จึงแสดงว่ามี

ปริมาณแอนติบอดีอยู่ในช่วง Negative และกลับมามีแอนติบอดีที่สูงที่อายุ 8, 12 และ 16 สัปดาห์ อาจเป็นเพราะเกิดการติดเชื้อ PCV2 ต้องไปพิจารณาเกี่ยวกับการตรวจ Conventional PCR

โดยทั่วไปแล้วระดับภูมิคุ้มกันที่เกิดขึ้นจากการทำวัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อ PCV2 นั้นจะมีค่า S/P ratio อยู่ในช่วง 0.5-2.3 ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าระดับภูมิคุ้มกันที่เกิดขึ้นจากการทดลองครั้งนี้จะอยู่ในช่วงดังกล่าว แต่ก็มีความเป็นไปได้ที่อาจจะพบภาวะการติดเชื้อในกระแสเลือดได้เช่นกัน [15]

Table 2 Efficacy of immune response to PCV2 vaccine (Mean $\pm$ SD)

Age	S/P ratio				P-Value
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	
4 Weeks	0.793 $\pm$ 0.07	0.964 $\pm$ 0.16	0.854 $\pm$ 0.26	0.679 $\pm$ 0.13	0.059
6 Weeks	0.522 $\pm$ 0.13 ^{bc}	0.628 $\pm$ 0.15 ^b	1.254 $\pm$ 0.44 ^a	0.298 $\pm$ 0.05 ^c	<0.001
8 Weeks	1.051 $\pm$ 0.25	0.886 $\pm$ 0.26	1.090 $\pm$ 0.30	0.869 $\pm$ 0.35	0.466
12 Weeks	1.534 $\pm$ 0.14 ^a	1.438 $\pm$ 0.14 ^a	1.408 $\pm$ 0.08 ^a	1.241 $\pm$ 0.16 ^b	0.008
16 Weeks	1.812 $\pm$ 0.09 ^a	1.550 $\pm$ 0.14 ^{ab}	1.401 $\pm$ 0.20 ^{bc}	1.223 $\pm$ 0.41 ^c	0.004

a,b,c Significantly different (P $\leq$ 0.05) in the same row

จากการศึกษาระดับภูมิคุ้มกันต่อเชื้อ MH โดยนำแต่ละกลุ่มทดลองมาเปรียบเทียบกับ พบว่าก่อนเริ่มการทดลองที่อายุ 4 สัปดาห์ สุ่มทั้ง 4 กลุ่ม มีระดับปริมาณแอนติบอดีต่อเชื้อ MH แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P < 0.05) ดังนี้ กลุ่มที่ 1 และ 2 มีค่า S/P ratio 0.805 $\pm$ 0.05 และ 0.700 $\pm$ 0.13 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกับกลุ่มที่ 3 และ 4 มีค่า S/P ratio 0.357 $\pm$ 0.14 และ 0.278 $\pm$ 0.05 ตามลำดับ เมื่อสุ่มอายุ 6 สัปดาห์ (2 สัปดาห์หลังฉีดวัคซีน) สุ่มมีระดับแอนติบอดีต่อเชื้อ MH แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P < 0.05) โดยกลุ่มที่ 1 และ 2 มีค่า S/P ratio 0.292 $\pm$ 0.03 และ 0.361 $\pm$ 0.17 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกับกลุ่มที่ 3 และ 4 มีค่า S/P ratio 0.070 $\pm$ 0.07 และ 0.129 $\pm$ 0.02 ตามลำดับ เมื่อสุ่มอายุ 8 สัปดาห์ (4 สัปดาห์หลังฉีดวัคซีน) สุ่มมีระดับแอนติบอดีต่อเชื้อ MH แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P < 0.05) โดยกลุ่มที่ 1 และ 2 มีค่า S/P ratio 0.187 $\pm$ 0.05 และ 0.202 $\pm$ 0.09 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกับกลุ่มที่ 3 และ 4 มีค่า S/P ratio 0.034 $\pm$ 0.03 และ 0.071 $\pm$ 0.04 ตามลำดับ เมื่อสุ่มอายุ 12 สัปดาห์ (8 สัปดาห์หลังฉีดวัคซีน) สุ่มมีระดับแอนติบอดีต่อเชื้อ MH แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P < 0.05) โดยกลุ่มที่ 1 มีค่า S/P ratio 0.236 $\pm$ 0.16 ซึ่งแตกต่างกับกลุ่มที่ 2, 3 และ 4 เรียงลำดับดังนี้ 0.091 $\pm$ 0.03, 0.091 $\pm$ 0.05 และ 0.067 $\pm$ 0.04 และเมื่อสุ่มอายุ 16 สัปดาห์ (12 สัปดาห์หลังฉีดวัคซีน) สุ่มมีระดับแอนติบอดีต่อเชื้อ PCV2 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P < 0.05) โดยกลุ่มที่ 1 และ 3 มีค่า S/P ratio 0.536 $\pm$ 0.11 และ 0.579 $\pm$ 0.15 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกับกลุ่มที่ 2 และ 4 มีค่า S/P 0.285 $\pm$ 0.21 และ 0.092 $\pm$ 0.02 ตามลำดับ

Table 3 Efficacy of immune response to MH vaccine (Mean $\pm$ SD)

Age	S/P ratio				P-Value
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	
4 Weeks	0.805 $\pm$ 0.05 ^a	0.700 $\pm$ 0.13 ^a	0.357 $\pm$ 0.14 ^b	0.278 $\pm$ 0.05 ^b	<0.001
6 Weeks	0.292 $\pm$ 0.03 ^a	0.361 $\pm$ 0.17 ^a	0.070 $\pm$ 0.07 ^b	0.129 $\pm$ 0.02 ^b	<0.001
8 Weeks	0.187 $\pm$ 0.05 ^a	0.202 $\pm$ 0.09 ^a	0.034 $\pm$ 0.03 ^b	0.071 $\pm$ 0.04 ^b	<0.001
12 Weeks	0.236 $\pm$ 0.16 ^a	0.091 $\pm$ 0.03 ^b	0.091 $\pm$ 0.05 ^b	0.067 $\pm$ 0.04 ^b	0.013
16 Weeks	0.536 $\pm$ 0.11 ^a	0.285 $\pm$ 0.21 ^b	0.579 $\pm$ 0.15 ^a	0.092 $\pm$ 0.02 ^b	<0.001

a,b,c Significantly different (P $\leq$ 0.05) in the same row

เมื่อนำระดับภูมิคุ้มกันต่อเชื้อ PCV2 และ MH ของแต่ละกลุ่มมาเปรียบเทียบกันพบว่าทุกกลุ่มในการทดลองสามารถกระตุ้นภูมิคุ้มกันต่อเชื้อ PCV2 ไปในทิศทางเดียวกัน แต่ในทางกลับกันไม่สามารถกระตุ้นภูมิคุ้มกันต่อเชื้อ MH ได้ มีเพียงกลุ่มที่ 2 ที่ยังคงส่งผลต่อภูมิคุ้มกันอยู่บ้าง แต่อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ย S/P ratio ในทุกกลุ่มทดลองมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.30 แสดงว่ามีปริมาณแอนติบอดีอยู่ในช่วง Negative

3.2 ผลการศึกษาโดยวิธี PCR

จากการนำดีเอ็นเอของลูกสุกรจำนวน 24 ตัว มาตรวจสอบหาเชื้อ PCV2 ด้วยวิธีการ Conventional PCR ก่อนเริ่มการทดลองที่อายุ 4 สัปดาห์ เพื่อยืนยันว่าลูกสุกรปลอดเชื้อตั้งแต่เริ่มการทดลอง โดยนำดีเอ็นเอไปเพิ่มจำนวนด้วยปฏิกิริยาลูกโซ่ และตรวจสอบผลผ่านเจลอิเล็กโตรโฟรีซิส เมื่อเทียบกับ Marker 100 bp, PCV2 positive control และ Negative control ในช่วงลำดับที่ 802 bp. พบว่าสุกรไม่มีการติดเชื้อ PCV2 แต่เมื่อสุกรอายุ 6 สัปดาห์ ในกลุ่มที่ 1 และ 4 อย่างละ 1 ตัว ตรวจพบภาวะการติดเชื้อในกระแสเลือด (Viremia) ต่อมาเมื่อสุกรอายุ 8 และ 12 สัปดาห์ สุกรในกลุ่มที่ 2 ตรวจพบการติดเชื้อในกระแสเลือดจำนวน 1 ตัว และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่อายุ 16 สัปดาห์ ตรวจไม่พบการติดเชื้อในทุกกลุ่มการทดลอง

ในส่วนของตัวอย่าง Swab เยื่อเมือกจากโพรงจมูกสุกรที่อายุ 8 สัปดาห์ นำดีเอ็นเอไปเพิ่มจำนวนด้วยปฏิกิริยาลูกโซ่ และตรวจสอบผลผ่านเจลอิเล็กโตรโฟรีซิส เมื่อเทียบกับ Marker 100 bp, MH positive control และ Negative control ในช่วงลำดับที่ 430 และ 346 bp. พบว่าตรวจไม่พบหาเชื้อ *M. hyopneumoniae* และ *M. hyorhinis* ในทุกกลุ่มการทดลอง

Table 4 Number of samples showing positive results for PCV2

Age	Number of positive results			
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4
4 Weeks	0/0	0/0	0/0	0/0
6 Weeks	1/6	0/0	0/0	1/6
8 Weeks	0/0	1/6	0/0	0/0
12 Weeks	0/0	1/6	0/0	0/0
16 Weeks	0/0	0/0	0/0	0/0

4. สรุป

การกระตุ้นภูมิคุ้มกันต่อเชื้อ PCV2 การตอบสนองส่วนใหญ่เป็นผลมาจากภาวะ Viremia ยกเว้นกลุ่มที่ 3 (วัคซีน B ได้แก่ PRO-VAC CIRCOMASTER ONE-SHOT ร่วมกับ วัคซีน C ได้แก่ IngelvacMycoFLEX ผสมวัคซีนก่อนฉีด 2 mL.) การทำวัคซีนป้องกันโรคติดเชื้อเอชไอวีไวรัสไทป์ 2 ร่วมกับโรคติดเชื้อมัยโคพลาสมาให้ผลต่อการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันไม่ดี หากมีความจำเป็นต้องทำวัคซีนร่วมกัน อาจพิจารณาเลือกชนิดและวิธีการทำวัคซีนตามแบบกลุ่ม 2 และกลุ่ม 3 ขึ้นอยู่กับภาวะการระบาดของโรคติดเชื้อเอชไอวีไวรัสไทป์ 2 และโรคติดเชื้อมัยโคพลาสมาของแต่ละฟาร์ม

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท ยูเนี่ยนกรีนฟาร์ จำกัด สำหรับการสนับสนุนงบประมาณในการวิจัย ขอขอบคุณนางสาวณชนก ไวยสุตรา นางสาวอุตมลักษณ์ สวนการณ และเจ้าหน้าที่ของศูนย์วิจัยและนวัตกรรมด้านการเลี้ยงสัตว์ ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และการประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Witvliet, M., Holtslag, H., Nell, T., Segers, R., and Fachinger, V. 2015. Efficacy and safety of a combined Porcine Circovirus and *Mycoplasma hyopneumoniae* vaccine in finishing pigs. *Trials in Vaccinology* 4: 43-49.
- [2] Morilla, A., Yoon, K.J., Zimmerman, J.J. and Harms, P.A. 2002. In *Trends in Emerging Viral Infections of Swine: Postweaning Multisystemic Wasting Syndrome and Porcine Circovirus: A United States Perspective*. Iowa State Press. 291-295.
- [3] Chae, C. 2004. Postweaning multisystemic wasting syndrome: a review of aetiology, diagnosis and pathology. *The Veterinary Journal* 168: 41-49.
- [4] Chae, C. 2005. A review of porcine circovirus 2-associated syndromes and diseases. *The Veterinary Journal* 169: 326-36.
- [5] 18 Week Wall กำแพงการเจริญเติบโตของสุกร. บริษัท อินเทคค์ ฟีด จำกัด. เข้าถึงได้จาก :
เว็บไซต์ <https://www.inteqcglobal.com/innovation/detail/สัตว์บก/สุกร/ข่าวสาร/30/43> (เข้าถึงเมื่อ 12 กุมภาพันธ์ 2568).
- [6] Tischer, I., Gelderblom, H., Vettermann, W. and Koch, M.A. 1982. A very small porcine virus with circular single-stranded DNA. *Nature*. 295: 64-66.
- [7] รชฏ ดันติเลิศเจริญ, วิจิตร เกียรติพัฒนสกุล และรุ่งโรจน์ ธนาวงษ์นุเวช. 2542. รายงานการตรวจพบการติดเชื้อ Circovirus ในสุกรในประเทศไทย. *เวชสารสัตวแพทย์*. 29(3): 73-83.
- [8] Maes, D., Segales, J., Meyns, T., Sibila, M., Pieters M. and Haesebrouck, F. 2008. Control of *Mycoplasma hyopneumoniae* infections in pigs. *Veterinary Microbiology* 126: 297-309.
- [9] Rottem, S. 2003. Interaction of mycoplasma with host cell. *Physiological Review* 83: 417-432.
- [10] Jittimane, S., Na Ayudhya, S.N., Kedkovid, R., Teankum K. and Thanawongnuwech, B. 2011. Genetic Characterization and Phylogenetic Analysis of Porcine Circovirus Type 2 in Thai Pigs with Porcine Circovirus Associated Diseases (PCVAD) during 2007-2010. *Thai Journal of Veterinary Medicine*. 41(2): 163-169.
- [11] Takahagi, Y., Nishiyama, Y., Toki, S., Yonekita, T., Morimatsu, F., and Murakami, H. 2008. Genotypic Change of Porcine Circovirus Type 2 on Japanese Pig Farms as Revealed by Restriction Fragment Length Polymorphism Analysis. *Journal of Veterinary Medical Science*. 70(6): 603-6.
- [12] Barate, A.K., Lee, H.Y., Jeong, H.W., Truong, L.Q., Joo, H.G. and Hahn, T.W. 2021. An improved multiplex PCR for diagnosis and differentiation of *Mycoplasma hyopneumoniae* and *Mycoplasma hyorhinis*. *Korean J Vet Res* 52(1): 39-43.
- [13] Boixaderas, N.M., Moreno, L.G., Sibila, M. and Segalés, J. 2022. Impact of maternally derived immunity on immune responses elicited by piglet early vaccination against the most common pathogens involved in porcine respiratory disease complex. *Porcine Health Management*. 8:11.
- [14] Vargas, C.V., Taylor, L.P., Foss, D.L., Godbee, T.K., Philip, R. and Bandrick, M. 2021. Cellular and humoral immunity following vaccination with two different PCV2 vaccines (containing PCV2a or PCV2a/PCV2b) and challenge with virulent PCV2d. *Vaccine*. Vol.39(39): 5615-5625.
- [15] Thammakarn, C., Umphonphison, S., Kaewhom, P., Srikijsamwat, K. 2022. Seroprevalence of porcine circovirus type 2 in domestic pigs of Thailand: two decades after nationwide vaccines application. *Advances in Animal and Veterinary Sciences* 10(12): 2602-2608.

การพัฒนาแบบจำลอง Void Fraction สำหรับการไหลแบบสองสถานะในท่อขดเกลียวขนาดเล็ก Development of a Void Fraction Model for Two-Phase Flow in a Helical Microtube

วิสสุตา ช่อประเสริฐ¹, ศิระ สายสร^{1,*} และ ศักรินทร์ ชินกุลพิทักษ์¹
Vissuta Chorprasert¹, Sira Saisorn^{1,*} and Sakkarin Chingulpitak¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

¹Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

*Corresponding author: Sira Saisorn, e-mail address: sira.sa@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาค่า Void fraction ของการไหลแบบ Annular flow ภายในท่อขดเกลียวขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm โดยขดเกลียวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ระยะพิทช์ 20 mm และมุมเอียงของท่อ 10° การทดลองดำเนินการในช่วงความเร็วเฟสของแก๊ส 0.86–12.86 m/s และของน้ำ 0.01–0.19 m/s งานวิจัยนี้นำค่า Void fraction ที่ได้จากการไหลขึ้นในแนวตั้งมาวิเคราะห์และพัฒนาสมการเพื่อใช้ทำนายค่า Void fraction ของการไหลแบบ Annular flow ในอีกสองทิศทาง ได้แก่ การไหลลงแนวตั้งและการไหลในแนวนอน โดยทำการวิเคราะห์ค่าดังกล่าวจากภาพที่ได้จากการทดลอง เมื่อนำสมการที่พัฒนาไปใช้ทำนายค่า Void fraction สำหรับการไหลลงแนวตั้งและการไหลในแนวนอน แล้วเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลทดลองบางส่วน พบว่าค่า Mean Absolute Error (MAE) มีค่าต่ำมาก ซึ่งหมายความว่าสมการที่พัฒนาจากการไหลขึ้นในแนวตั้งสามารถนำมาใช้ทำนายค่า Void fraction สำหรับการไหลในอีกสองทิศทางได้อย่างแม่นยำ ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ได้กับการไหลที่มีทิศทางแตกต่างกัน ซึ่งเป็นประโยชน์ในการศึกษาการไหลของไหลสองเฟสในท่อขดเกลียวขนาดเล็ก และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับระบบไหลขนาดเล็กได้อย่างแม่นยำ

คำสำคัญ: Two phase flow, Void fraction, Helical tube

Abstract

This research studies the void fraction in annular flow inside a helical microtube with an inner diameter of 1 mm. The helical coil has a diameter of 50 mm, a pitch of 20 mm, and an inclination angle of 10°. The experiment was conducted with gas superficial velocities ranging from 0.86 to 12.86 m/s and water superficial velocities ranging from 0.01 to 0.19 m/s. In this study, the void fraction obtained from upward vertical flow was analyzed and used to develop an equation for predicting the void fraction in two other flow directions: downward vertical flow and horizontal flow. The analysis was performed using images from the experiment. The developed equation was then used to predict the void fraction in these two directions. The predicted values were compared with experimental data, and the results showed that the Mean Absolute Error (MAE) was very low. This indicates that the equation developed from upward vertical flow can accurately predict the void fraction in the other two flow directions. The findings of this research show that the developed equation can be applied to different flow directions. This is useful for studying two-phase flow in helical microtubes. The results can also be applied to various systems involving small-scale fluid flow, helping improve efficiency in related applications.

Keywords: Two phase flow, Void fraction, Helical tube

1. บทนำ

Void fraction คือ พารามิเตอร์แบบไร้หน่วยที่แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นในการไหลแบบสองสถานะต่อปริมาตรรวมทั้งหมดในการไหลภายในท่อ Void fraction เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่ได้รับความสนใจในการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะเนื่องจาก Void fraction ช่วยให้นักวิจัยสามารถวิเคราะห์การไหลแบบสองสถานะที่เกิดขึ้นในท่อได้ดียิ่งขึ้น

ในปัจจุบันที่อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนได้รับความสนใจในการพัฒนาให้มีขนาดที่เล็กกะทัดรัดแต่มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่สวนทางกันนั้น การวิเคราะห์พฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้นในระบบของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะช่วยให้การพัฒนามีความเป็นไปได้มากขึ้น ค่า Void fraction มีผลกระทบต่อแรงดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นในการไหลภายในท่อซึ่งมีความสำคัญในการออกแบบท่อที่จะใช้ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และยังสามารถศึกษารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในท่อ ดังนั้นการคำนวณค่า Void fraction จะช่วยให้นักวิจัยสามารถวิเคราะห์และทำนายแรงดันในระบบ รูปแบบการไหล และอัตราการถ่ายเทความร้อน เพื่อศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้เป็นไปตามความต้องการในปัจจุบันได้ดียิ่งขึ้น

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายท่านที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อและศึกษาเกี่ยวกับ Void fraction ที่เกิดขึ้น สำหรับในท่อตรง Saisorn et al. [1], [2], [3] ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลในท่อตรงขนาดไมโครทั้งในแนวตั้งและแนวนอน ในส่วนของการศึกษาเกี่ยวกับ Void fraction ที่เกิดขึ้นในท่อพบว่าความสอดคล้องมีทั้ง Void fraction ที่สอดคล้องกับแบบจำลองแบบ Homogeneous model และ Armand-type correlation

สำหรับในท่อขดเกลียว Zhu et al. [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการไหลแบบสองสถานะในท่อขดเกลียวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 16 mm และ 25 mm มีเส้นผ่านศูนย์กลางของขดเกลียว 0.2 m, 0.4 m และ 0.8 m ในงานนี้ทางนักวิจัยได้ศึกษารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อขดเกลียวเพื่อสร้างแผนที่รูปแบบการไหล โดยใช้เซ็นเซอร์หัวคูในการเก็บข้อมูลรูปแบบการไหล ในแผนที่รูปแบบการไหลจากงานวิจัยนี้ ทางนักวิจัยได้ใช้ Void fraction เป็นส่วนหนึ่งในการแยกแยะประเภทของรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น Xia et al. [5] ได้ทำการศึกษาโมเดลสำหรับการทำนายค่า Void fraction ที่เกิดขึ้นภายในที่ขดเกลียวที่มีลักษณะเป็นท่อสี่เหลี่ยม โดยใช้วิธี QCV (Quick-Closing Valve) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการหาค่า Void fraction สำหรับท่อขนาดปกติ นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาโมเดลสำหรับการทำนายค่า Void fraction ที่ค่าต่ำกว่า 0.5 ซึ่งได้รับผลการทำนายได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

เมื่อการศึกษาเกี่ยวกับท่อขดเกลียวที่มีขนาดเล็กเริ่มได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้น Pietrzak and Placzek [6] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการทำนายค่า Void fraction ในการไหลแบบสองสถานะในช่องทางขนาดเล็ก โดยมีการวิเคราะห์ข้อมูลของการไหลแบบสองสถานะมากมาย จากการวิเคราะห์ข้อมูลทำให้สามารถระบุวิธีการคำนวณที่แม่นยำ ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้มีประสิทธิภาพในการคำนวณ Void fraction ในช่องทางขนาดเล็ก Breitenmoser et al. [7] ได้ทำการศึกษา Void fraction โดยใช้ท่อขดเกลียวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ 12.57 mm โดยใช้เทคนิคการเอ็กซ์เรย์ในการสังเกตค่า Void fraction และได้นำค่า Void fraction มาใช้ในการแยกแยะประเภทของรูปแบบการไหลต่างๆที่เกิดขึ้นภายในท่อขดเกลียว

เมื่อการพัฒนาความก้าวหน้ามากขึ้นการศึกษาเกี่ยวกับท่อขดเกลียวขนาดไมโครจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก Saisorn et al. [8] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการไหลแบบสองสถานะในท่อขดเกลียวขนาดไมโครที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.87 mm เส้นผ่านศูนย์กลางขดเกลียว 50 mm ซึ่งทางนักวิจัยได้พัฒนาแผนที่รูปแบบการไหลจากการสังเกตรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อขดเกลียวขนาดไมโคร ในส่วนของการศึกษา Void fraction พบว่าค่าที่ได้สัมพันธ์กับ Drift flux model และยังได้มีการพัฒนาสมการสำหรับการทำนายค่า Void fraction ในท่อขดเกลียวขนาดไมโครที่เข้ากันได้กับข้อมูลที่จากการทดลอง Abedini et al. [9] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหาค่า Void fraction ในการไหลแบบสองสถานะในท่อตรงขนาดไมโครที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.5 mm ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการเสนอวิธีวัดค่า Void fraction แบบใหม่โดยการใช้กระแสไฟฟ้าในการตรวจสอบความต้านทานของของเหลวและพบว่าวิธีใหม่นี้ได้นำเสนอเป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำสูง Saisorn et al. [10] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการไหลในท่อขดเกลียวขนาดไมโครที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.87 mm เส้นผ่านศูนย์กลางขดเกลียว 50 mm ในงานนี้นักวิจัยได้ทำการตรวจสอบโมเดลสำหรับ Void fraction ซึ่งมีความเข้ากันได้กับ Drift flux model นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบข้อมูล Void fraction ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับข้อมูล Void fraction ที่ได้จากสมการการทำนายของนักวิจัยท่านอื่นอีกด้วย

จากงานวิจัยของนักวิจัยที่ผ่านพบว่าการศึกษาค่า Void fraction ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากและได้มีการพัฒนาสมการสำหรับการทำนายค่า Void fraction ออกมามากมาย แต่สมการการทำนายค่า Void fraction สำหรับท่อขดเกลียวขนาด

ไมโครยังมีอยู่น้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับสมการการหาค่า Void fraction ในท่อขดเกลียวขนาดไมโครที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1 mm

2. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองการไหลแบบสองสถานะของน้ำและอากาศโดยไม่มีการให้ความร้อนในท่อขดเกลียว ในการทดลองนี้ท่อขดเกลียวที่ใช้เป็นท่อเทปลอน โดยใช้ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm เส้นผ่านศูนย์กลางขดเกลียว 50 mm ระยะพิทช์ 20 mm และมีมุมเอียงของท่อ 10° การทดลองจะดำเนินอยู่ในช่วงความเร็วเฟสของแก๊ส 0.86 m/s -12.86 m/s ช่วงความเร็วเฟสของน้ำ 0.01 m/s -0.19 m/s

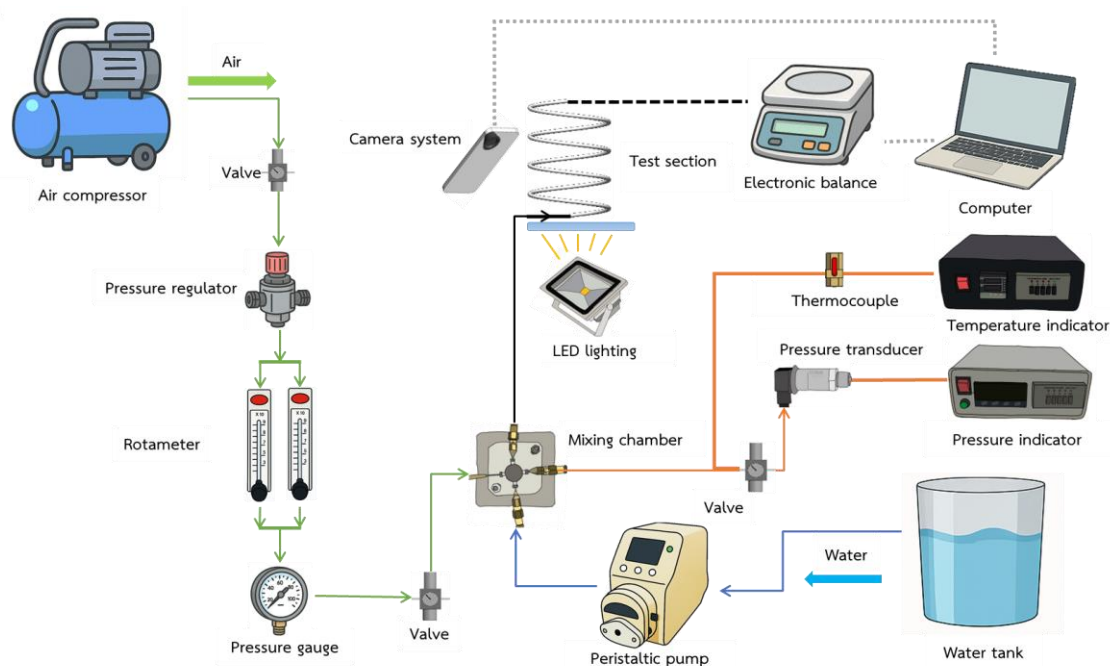


Figure 1 Schematic diagram

ในการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักคือน้ำและอากาศ ในส่วนของอากาศจะเริ่มที่ปั๊มลม โดยอากาศจะไหลผ่าน pressure regulator เพื่อปรับแรงดันในระบบให้คงที่และทำหน้าที่เป็นตัวกรองอากาศที่กรองเศษฝุ่นก่อนเข้าสู่ระบบ หลังจากนั้นอากาศจะส่งผ่านโรตاميเตอร์ซึ่งใช้สำหรับกำหนดอัตราการไหลก่อนจะไหลไปยังห้องผสม ในส่วนของน้ำจะเริ่มที่ถังน้ำ น้ำจะถูกส่งมายังห้องผสมผ่านทางปั๊มน้ำแบบเพอร์ิสเตอร์ติก ซึ่งเป็นปั๊มดูดจ่ายแบบรีดท่อทำให้การจ่ายน้ำเป็นไปอย่างราบรื่นมากขึ้น หลังจากน้ำและอากาศได้รับการผสมกันที่ห้องผสมจะถูกส่งต่อไปยังส่วนของท่อขดเกลียวและปล่อยสู่ภายนอก โดยสามารถดูรูปที่ 1 ซึ่งเป็นแผนภาพการทำงานของระบบเพื่อให้เข้าใจมากยิ่งขึ้น

ในส่วนของการบันทึกข้อมูลการทดลองภาพรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อขดเกลียวขนาดไมโครจะถูกบันทึกด้วยกล้องโทรศัพท์ที่มีการติดตั้งเลนส์สำหรับซูมเพื่อให้ได้ภาพที่ชัดมากยิ่งขึ้น โดยในการบันทึกภาพจะบันทึกภาพทั้งหมด 50 ภาพ และคลิป์วิดีโอยาว 10 s สำหรับ 1 เงื่อนไขการทดลอง มีช่วงการถ่ายภาพอยู่ที่ 20 mm ก่อนจะนำมาแยกประเภทของรูปแบบการไหล โดยกำหนดให้รูปแบบการไหลที่มีมากที่สุดเป็นรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในเงื่อนไขนั้นๆ

ในการนำภาพไปวิเคราะห์ค่า Void fraction ผ่านซอฟต์แวร์เขียนแบบ 3 มิติ จะคัดรูปภาพมา 3-5 ภาพต่อ 1 เงื่อนไข เพื่อหาปริมาตรของอากาศ และนำค่าปริมาตรของอากาศมาคำนวณเป็นค่า Void fraction แล้วบันทึกลงในตารางบันทึกผลการทดลอง

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การตรวจสอบโมเดล

สำหรับสมการที่ใช้ในการทำนาย Void fraction สามารถแบ่งได้เป็น 2 โมเดลหลัก คือ Homogeneous model และ Separated model โดยการตรวจสอบความเข้ากันได้กับ Homogeneous model นั้น จะตรวจสอบโดยการพล็อตกราฟระหว่าง “Volumetric quality” และ “Void fraction” ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจากการพล็อตกราฟ พบว่า Void fraction ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไม่สามารถเข้ากันได้กับ Homogeneous model เพื่อเป็นการยืนยันจึงได้ทำการตรวจสอบโดยการพล็อตกราฟระหว่าง “Mass quality” และ “Slip ratio” ซึ่งจากการพล็อตกราฟพบว่า ค่าความเร็วเฟสระหว่างน้ำและอากาศมีค่าสูงมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่สามารถใช้สมการการทำนาย Void fraction แบบ Homogeneous model ได้

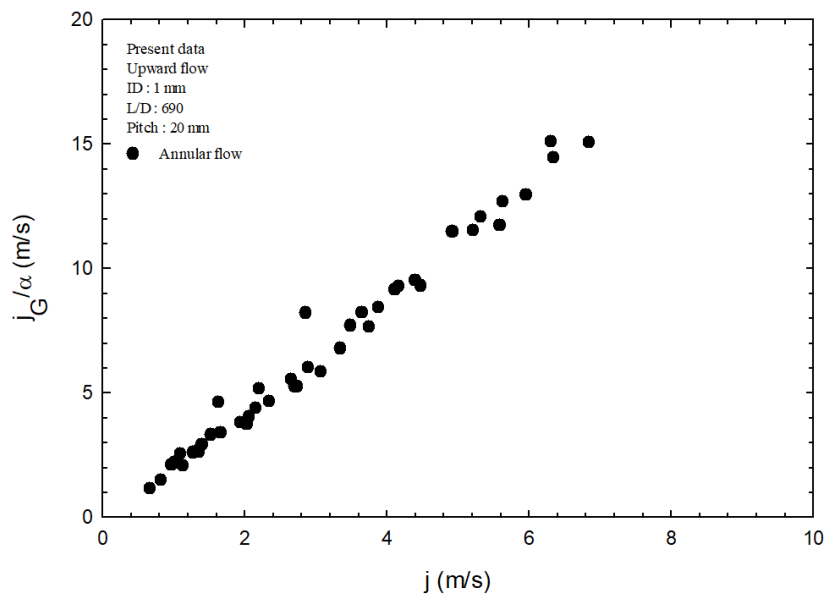


Figure 2 Void fraction data from vertical upward flow

การตรวจสอบความเข้ากันได้ของค่า Void fraction ที่มีต่อสมการการทำนายแบบ Drift flux model ซึ่งเป็นหนึ่งในสมการการทำนายแบบ Separated model สามารถทำได้ด้วยการพล็อตกราฟระหว่าง “ความเร็วรวมของการไหลสองเฟส (j)” และ “อัตราส่วนของความเร็วเฟสของแก๊สและ Void fraction (j/α)” ดังรูปที่ 2 พบว่ากราฟที่ได้มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง ดังนั้น Void fraction ในงานวิจัยนี้มีความเข้ากันได้กับสมการการทำนายแบบ Drift flux model ซึ่งจากการพล็อตกราฟในรูปที่ 2 นี้ ทำให้เราสามารถสร้างสมการการทำนายค่า Void fraction สำหรับรูปแบบการไหลแบบ Annular flow 1 สมการคือ

$$\alpha_{Annular} = \frac{j_G}{-0.1623 + 2.2137j} \quad (1)$$

3.2 การนำสมการมาใช้ในการทำนายค่า

จากการตรวจสอบโมเดลสำหรับสมการการทำนายค่า Void fraction ข้างต้น ทำให้ได้สมการสำหรับการทำนายค่า Void fraction ของการไหลแบบ Annular flow ในท่อขดเกลียวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 1 mm ที่มีทิศทางการไหลในแนวตั้งจากล่างขึ้นบน

จากการพล็อตกราฟ Force regime map (Figure 3, 4 5) ทำให้ทราบว่า การไหลทั้ง 3 ทิศทางที่ทดลองนั้นได้รับอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงน้อยมาก ดังนั้นการเปลี่ยนทิศทางการไหลจะไม่ส่งผลต่อค่า Void fraction ที่เกิดขึ้น จากข้อมูล Force

regime map นี้ หมายความว่าสมการการทำนาย Void fraction สำหรับการไหลแบบ Annular flow ที่ได้จากทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้งนั้น สามารถนำมาทำนายค่า Void fraction สำหรับการไหลแบบ Annular flow ในทิศทางการไหลอีก 2 ทิศทางได้ เพื่อเป็นการตรวจสอบจึงได้นำสมการข้างต้นมาทำนาย Void fraction ในอีก 2 ทิศทางและพล็อตออกมาเป็นกราฟที่แสดงในรูปที่ 6 และ รูปที่ 7

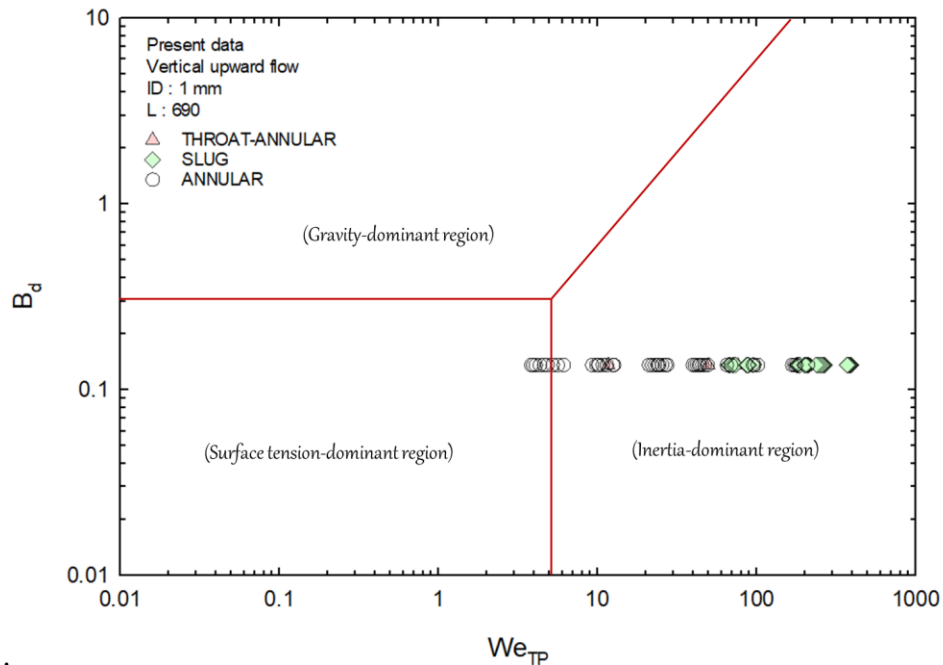


Figure 3 Force regime map from vertical upward flow

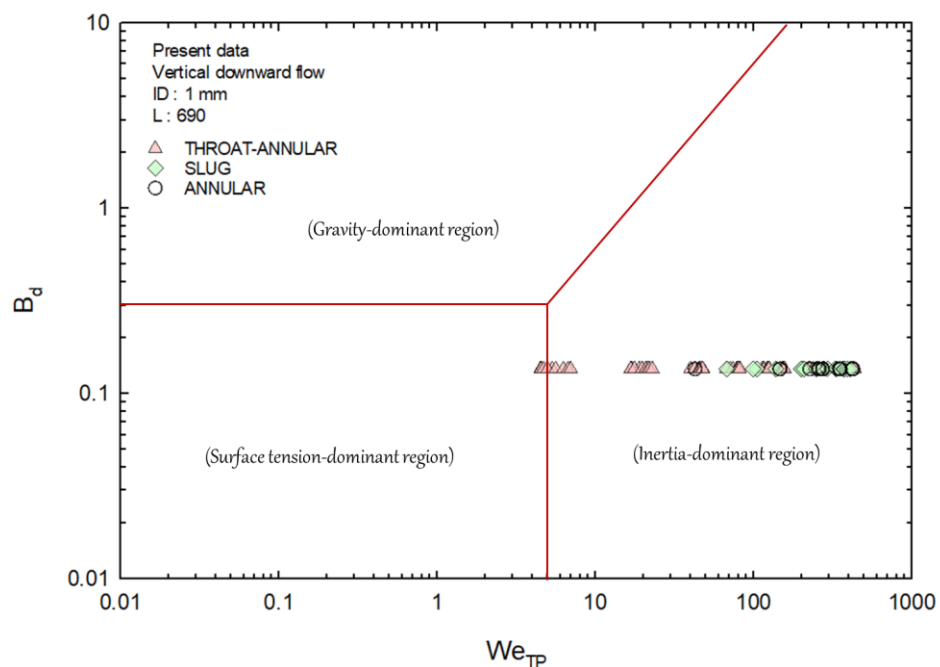


Figure 4 Force regime map from vertical downward flow

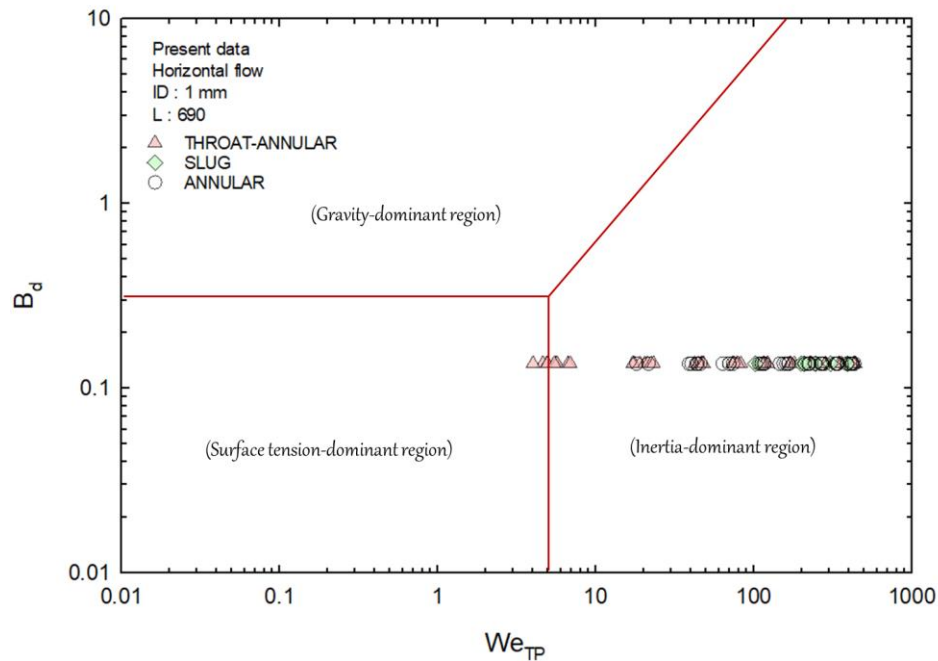


Figure 5 Force regime map from horizontal flow

จากกราฟที่ได้ในรูปที่ 6 และ 7 พบว่า สมการสำหรับการทำนายค่า Void fraction ของการไหลแบบ Annular flow ที่ได้จากการไหลขึ้นในแนวตั้งนั้น เมื่อนำมาทำนายค่า Void fraction สำหรับการไหลแบบ Annular flow ในอีก 2 ทิศทางแล้ว แสดงผลความเข้ากันได้ค่อนข้างสูง และมีค่า Mean absolute error ค่อนข้างต่ำมาก ซึ่งหมายความว่าสมการที่ได้มานั้นสามารถทำนายค่า Void fraction สำหรับการไหลแบบ Annular flow ในท่อขดเกลียวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 1 mm ในอีก 2 ทิศทางได้

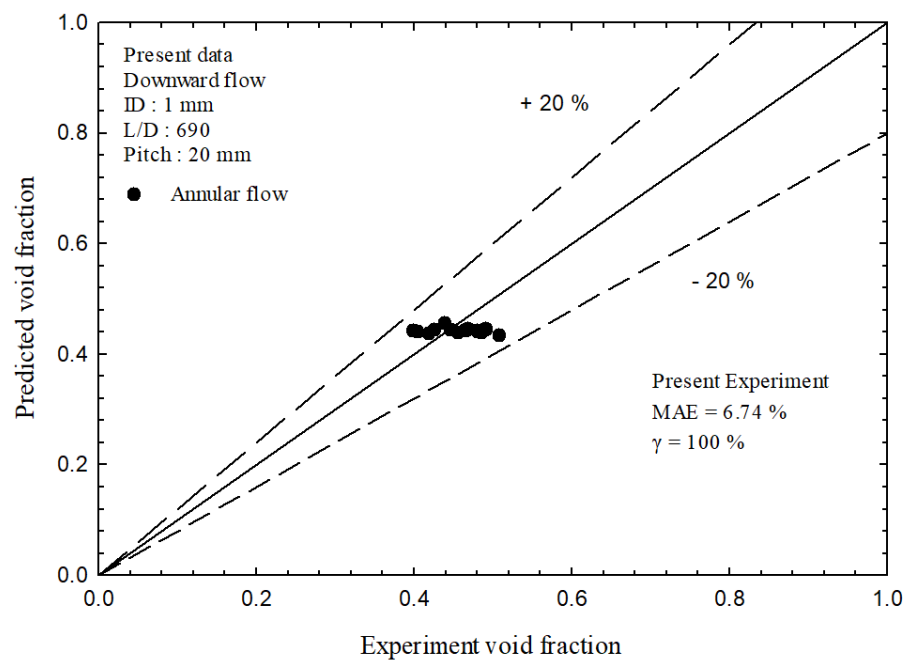


Figure 6 Void fraction data from vertical downward flow

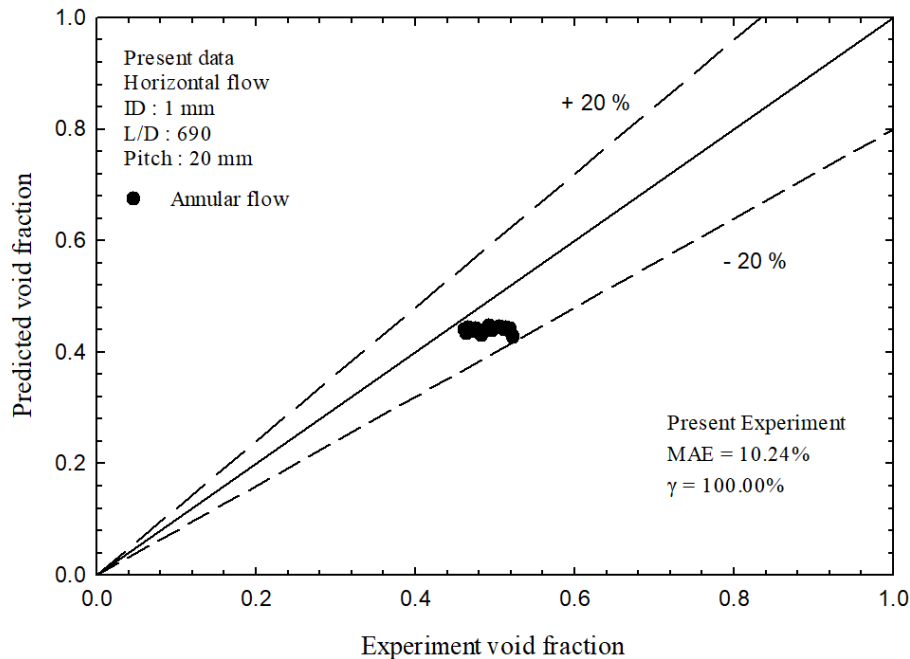


Figure 7 Void fraction data from horizontal flow

4. สรุป

จากการวิเคราะห์และพัฒนาสมการสำหรับการทำนายค่า Void fraction ของการไหลแบบ Annular flow ในท่อขนาดเล็กขนาดไมโครที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 1 มิลลิเมตร ที่มาจากการไหลในแนวตั้งโดยมีทิศทางการไหลจากล่างขึ้นบน พบว่าสมการที่ได้มานั้นสามารถนำมาทำนายค่า Void fraction สำหรับการไหลแบบ Annular flow ในท่อขนาดเล็กขนาดไมโครที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 1 mm ที่มาจากอีก 2 ทิศทาง คือ ทิศทางการไหลในแนวตั้งที่มีการไหลจากบนลงล่าง และทิศทางการไหลแบบแนวนอน โดยที่มีค่า MAE น้อยกว่า 20 % ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสมการที่ได้รับการพัฒนามานี้สามารถทำนายผลได้อย่างแม่นยำ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร และคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการสนับสนุนในการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Saisorn, S., & Wongwises, S. 2008. Flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air–water flow in a horizontal circular micro-channel. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 32(3): 748-760.
- [2] Saisorn, S., & Wongwises, S. 2010. The effects of channel diameter on flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air–water flow in circular micro-channels. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 34(4): 454-462.
- [3] Saisorn, S., & Wongwises, S. 2015. Adiabatic two-phase gas–liquid flow behaviors during upward flow in a vertical circular micro-channel. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 69: 158-168.
- [4] Zhu, H., Li, Z., Yang, X., Zhu, G., Tu, J., and Jiang, S. 2017. Flow regime identification for upward two-phase flow in helically coiled tubes. *Chem. Eng. J.* 308: 606-618
- [5] Xia, G., Cai, B., Cheng, L., Wang, Z., and Jia, Y. 2018. Experimental study and modelling of average void fraction of gas-liquid two-phase flow in a helically coiled rectangular channel. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 94: 9-22.

-
- [6] Pietrzak, M., & Płaczek, M. 2019. Void fraction predictive methods in two-phase flow across a small diameter channel. *Int. J. Multiph. Flow.* 121.
- [7] Breitenmoser, D., Manera, A., Prasser, H.-M., Adams, R., & Petrov, V. 2021. High-resolution high-speed void fraction measurements in helically coiled tubes using X-ray radiography. *Nucl. Eng. Des.* 373.
- [8] Saisorn, S., Benjawun, P., Suriyawong, A., Asirvatham, L. G., Mondal, P. K., and Wongwises, S. 2023. Two-phase flow structures in a helically coiled microchannel: An experimental investigation. *Phys. Fluids.* 35(10): 102012.
- [9] Abedini, A., Nouri Borujerdi, A., Najafi, M., and Noghrehabadi, A. 2024. Experimental void fraction measurement approach of small channel two-phase flow. *Measurement: Sensors.* 36.
- [10] Saisorn, S., Benjawun, P., Suriyawong, A., & Wongwises, S. 2025. Experimental investigation on flow pattern and void fraction for two-phase gas-liquid upflow in a vertical helically coiled micro-channel. *Int. J. Therm. Fluid.* 26.

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มความชื้นของข้าวงอกโดยใช้เครื่องผลิตข้าวงอกด้วยระบบสเปรย์น้ำ Optimization for the moisture content enhancement of germinated rice using the germinated rice production machine with a water spray system

จรัสพงศ์ สุขมงคล¹ และ ธัชพล จุ่งเจริญ^{1,*}

Jaraspong Sookmongkol¹ and Thatchapol Chungcharoen^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

¹Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Thatchapol Chungcharoen, e-mail address: thatchapol.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

กระบวนการที่สำคัญในการผลิตข้าวงอกคือการเพิ่มความชื้นให้กับข้าวเปลือกจนมีความชื้นประมาณ 30% ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ช่วยกระตุ้นกระบวนการงอกของข้าวเปลือก การศึกษานี้ได้ใช้เครื่องผลิตข้าวงอกด้วยระบบสเปรย์น้ำเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเพิ่มความชื้นของข้าวงอกโดยใช้ปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการสเปรย์น้ำ อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุน โดยใช้ระเบียบวิธีการตอบสนองพื้นผิว (Response Surface Methodology, RSM – Box-Behnken Design, BBD) จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเพิ่มความชื้นของข้าวงอกโดยใช้เครื่องผลิตข้าวงอกด้วยระบบสเปรย์น้ำ คือ อัตราการสเปรย์น้ำ 8 ลิตร/นาที อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ 40 องศาเซลเซียส และ ความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุน 10 รอบ/นาที ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเพิ่มความชื้นมีความชื้น ถึง 30% (w.b.) เร็วที่สุด ใช้เวลาในการสเปรย์น้ำ 2 ชั่วโมง โดยมีค่า ($R^2 = 98.18\%$) ซึ่งบ่งชี้ว่าข้อมูลที่ทำนายโดยใช้ Response Surface Methodology มีความสอดคล้องและมีความเหมาะสมของแบบจำลอง

คำสำคัญ: ข้าวงอก, การเพิ่มความชื้น, เครื่องผลิตข้าวงอกด้วยระบบสเปรย์น้ำ, วิธีการพื้นผิวดตอบสนอง, การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

Abstract

An important process in the production of germinated rice is to increase the moisture content of the paddy to approximately 30% moisture content, which is considered an important process to stimulate the germination process of paddy. This study used a germinated rice production machine with a water spray system to find the optimal conditions for the germinated rice moisture-increasing process using three factors : water spray rate, water temperature used for spraying, and rotation speed of the rotating screen by using the Response Surface Methodology (RSM – Box-Behnken Design, BBD). From the study, it was found that the optimal conditions for increasing the moisture content of germinated rice using a germinated rice production machine with a water spray system were a water spray rate of 8 liters per minute, a spray water temperature of 40°C, and a rotating sieve speed of 10 revolutions per minute. Under these conditions, the moisture content increased to 30% (w.b.) within 2 hours. The coefficient of determination ($R^2 = 98.18\%$) indicated that the data predicted by the Response Surface Methodology were consistent and well-fitted to the model.

Keywords: Germinated rice, Moisture content enhancement, Germinated rice production machine with a water spray system, Response surface methodology, Box-Behnken design.

1. บทนำ

ข้าวกล้องงอกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูงและเป็นทางเลือกที่ดีต่อสุขภาพ โดยเฉพาะในกลุ่มผู้บริโภคที่ต้องการเพิ่มคุณค่าทางอาหาร ในข้าวกล้องงอกประกอบด้วยสารอาหารมากมาย โดยเฉพาะ GABA ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่ผลิตจากกระบวนการ Decarboxylation ของกรดกลูตามิก [1] โดยสาร GABA จะเกิดขึ้นจากการงอกบริเวณจมูกข้าว ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาท (Neurotransmitter) ในระบบประสาทส่วนกลาง [2, 3] ช่วยให้สมองเกิดการผ่อนคลาย และยังช่วยลดความเสี่ยงจากโรคต่าง ๆ เช่น โรคหัวใจ เบาหวาน และยังช่วยยับยั้งการขยายตัวของ

เซลล์มะเร็ง [4] อีกทั้งยังสามารถเพิ่มมูลค่าได้สูงกว่าข้าวกล้องธรรมดา โดยทั่วไปกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการแช่น้ำ (Soaking process) กระบวนการนึ่ง (Steaming process) และกระบวนการอบแห้ง (Drying process) กระบวนการแช่น้ำจะช่วยเพิ่มความชื้นและกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือก โดยมีอุณหภูมิของน้ำและระยะเวลาในการแช่ข้าวเปลือก เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความชื้นและความสามารถในการงอกของข้าวเปลือก [5] อย่างไรก็ตามการแช่น้ำมักใช้เวลานาน ซึ่งโดยปกติแล้วจะนิยมนำข้าวมาแช่เป็นระยะเวลา 24-60 ชั่วโมง [6] และอาจมีปัญหาการสะสมของเชื้อจุลินทรีย์ที่อาจทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้ [7] ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้ผู้บริโภคยังไม่นิยมบริโภคข้าวกล้องงอกเท่าที่ควร [6] โดยงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงกระบวนการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องผลิตข้าวงอกด้วยระบบสเปรย์น้ำ ที่ได้พัฒนามาจากกระบวนการแช่ ซึ่งเป็นการพัฒนาที่ช่วยลดปัญหาในกระบวนการเพิ่มความชื้น และทำให้การเพิ่มความชื้นทำได้ง่ายมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ปัจจุบันในกระบวนการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือกได้มีการนำเครื่องผลิตข้าวงอกด้วยระบบสเปรย์น้ำมาใช้แทนการแช่น้ำ ซึ่งระบบนี้ช่วยลดการสะสมของเชื้อจุลินทรีย์ที่อาจทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้แล้วการใช้เครื่องผลิตข้าวงอกด้วยระบบสเปรย์น้ำแทนการแช่น้ำยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของข้าวได้ในระยะยาว โดยตัวเครื่องสามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำและปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการได้ ซึ่งช่วยให้ข้าวได้รับความชื้นที่เหมาะสม อีกทั้งยังสามารถกระจายน้ำได้อย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้ข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็วกว่าการแช่น้ำแบบดั้งเดิม โดยทั่วไปแล้วมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือก ได้แก่ อัตราการสเปรย์น้ำ อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ [8] และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุน ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นล้วนส่งผลต่อการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือก โดยอัตราการสเปรย์น้ำมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความชื้น เนื่องจากเมื่อปริมาณน้ำที่สเปรย์มากขึ้น ส่งผลให้ข้าวเปลือกสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้อัตราการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น [9] นอกจากนี้ ความชื้นของข้าวเปลือกยังเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ เพราะเมื่ออุณหภูมิในการสเปรย์สูงขึ้น ข้าวเปลือกจะดูดซับน้ำได้ดีขึ้น ส่งผลให้ความชื้นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [9] ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ยังไม่มีผลการศึกษาหาความสัมพันธ์และสภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อความชื้นในขั้นตอนการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือก

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเพิ่มความชื้นโดยใช้เครื่องผลิตข้าวงอกด้วยระบบสเปรย์น้ำ อัตราการสเปรย์น้ำ อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุน โดยใช้ระเบียบวิธีการตอบสนองพื้นผิว (Response Surface Methodology ,RSM) เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้วจะทำการหาระยะเวลาในการทำให้ข้าวเปลือกได้ความชื้น 30% (w.b.) โดยนำไปเทียบกับความชื้นที่ได้จากกระบวนการเพิ่มความชื้นด้วยการแช่น้ำ

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

เมล็ดข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลอง คือ ข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่ได้รับจากศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวราชบุรี จังหวัดราชบุรี ซึ่งมีค่าปริมาณอมิโลส 15-19% ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกอยู่ที่ $13 \pm 1\%$ (d.b.) ซึ่งเป็นข้าวที่สามารถลงปลูกได้ทั้งฤดูนาปีและนาปรัง



(a)



(b)

Figure 1 Germinated rice production machine with water spray system

Figure 1 แสดงเครื่องผลิตข้าวอกด้วยระบบสเปรย์น้ำ โดย Figure 1a เป็นเครื่องผลิตข้าวอกที่สามารถเพิ่มความชื้นของข้าวอกด้วยการสเปรย์น้ำ ภายในเครื่องผลิตข้าวอกด้วยระบบสเปรย์น้ำ ประกอบด้วยตะแกรงหมุนทรงกระบอกที่สามารถบรรจุข้าวเปลือกได้ 2 กิโลกรัม แสดงดัง Figure 1b ภายในตะแกรงหมุนประกอบด้วยคลีปที่ช่วยในการทำให้ข้าวกับน้ำที่สเปรย์คลุกเคล้าเข้ากันอย่างทั่วถึง เพื่อให้ข้าวได้รับความชื้นอย่างสม่ำเสมอ และเครื่องผลิตข้าวอกด้วยระบบสเปรย์น้ำสามารถตั้งค่าอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ อัตราการสเปรย์น้ำ และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุนได้ตามต้องการ เพื่อสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ

2.2 การออกแบบการทดลอง

Table 1 แสดงการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมซึ่งส่งผลต่อความชื้นของข้าวเปลือกในขั้นตอนการเพิ่มความชื้น โดยการทดลองนี้พิจารณาจาก 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการสเปรย์น้ำ อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุน การออกแบบการทดลองนี้ใช้แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken Design) โดยใช้โปรแกรม Minitab 19 ซึ่งทำให้ได้จำนวนเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 15 เงื่อนไข

การวิเคราะห์ด้วยวิธีการ RSM (Response Surface Methodology) เป็นชุดของเทคนิคทางคณิตศาสตร์และสถิติที่มีประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาที่มีตัวแปรหลายตัว ซึ่งมีอิทธิพลต่อการตอบสนอง โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรเหล่านั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการเพิ่มความชื้นให้กับข้าวเปลือกในกระบวนการนี้ [10]

Table 1 Levels of variables used in this study.

Variable descriptions	Code	Unit	Levels	
			Low (-1)	High (+1)
Water spray rate	X ₁	l/min	5	9
Water temperature	X ₂	°C	30	40
Rotation speed	X ₃	RPM	10	15

2.3 วิธีการทดลอง

2.3.1 การเพิ่มความชื้นด้วยเครื่องผลิตข้าวอกด้วยระบบสเปรย์น้ำ

ในกระบวนการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือก นำเมล็ดข้าวเปลือกสายพันธุ์ปทุมธานี 1 จำนวน 500 กรัม ใส่ลงไปในเครื่องผลิตข้าวอก ด้วยระบบสเปรย์น้ำ ทำการทดลองการเพิ่มความชื้นตาม 15 เงื่อนไขที่ได้จากการออกแบบการทดลองรูปแบบ (BBD) ดัง Table 2 โดยจะทำการสเปรย์น้ำเป็นเวลา 1 นาที หลังจากสเปรย์น้ำเสร็จ จะทำการพักการสเปรย์น้ำเป็นระยะเวลา 30 นาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเพิ่มความชื้น [11] ในระหว่างที่พักการสเปรย์น้ำตะแกรงจะหยุดหมุนและตะแกรงจะหมุนอีกครั้งเมื่อทำการสเปรย์น้ำในรอบถัดไป โดยแต่ละเงื่อนไขจะทำการสเปรย์น้ำ 2 ครั้ง เมื่อทำการทดลองเสร็จในแต่ละเงื่อนไขจะสุ่มข้าวเปลือกจำนวน 150 กรัม เพื่อไปหาความชื้น จากนั้นทำการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิที่ใช้ในการสเปรย์น้ำ อัตราการสเปรย์น้ำ และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุน หลังจากนั้นนำผลการทดลองที่ได้จากการทดลอง 15 เงื่อนไขใส่ในโปรแกรม Minitab 19 เพื่อสร้างสมการ ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมในการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือก แล้วทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลที่ได้จากสมการความสัมพันธ์และหาค่าความคลาดเคลื่อน หลังจากนั้นทำการทดลองเงื่อนไขที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ โดยทำการเพิ่มจำนวนรอบในการสเปรย์น้ำเพื่อหาจำนวนครั้งที่ใช้ในการสเปรย์น้ำ ปริมาณน้ำที่ใช้ และระยะเวลาในการเพิ่มความชื้นถึง 30% (w.b.) พร้อมบันทึกผล

2.3.2 การหาปริมาณน้ำและระยะเวลาในการเพิ่มความชื้นที่ 30% (w.b.) ด้วยวิธีการแช่น้ำ

การเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือกด้วยวิธีการแช่น้ำจะใช้เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเพิ่มความชื้นโดยใช้เครื่องผลิตข้าวอกด้วยระบบสเปรย์น้ำโดยการผลิตข้าวอกโดยวิธีแช่น้ำจะนำเมล็ดข้าวเปลือกสายพันธุ์ปทุมธานี 1 จำนวน 500 กรัมมาใส่เครื่อง Water - bath ที่บรรจุน้ำ 7 ลิตร โดยอุณหภูมิของน้ำที่ใช้คือ 40 องศาเซลเซียส และทำการเปลี่ยนน้ำทุก 4 ชั่วโมงเพื่อลดการสะสมของจุลินทรีย์ พร้อมทั้งทำการบันทึกผลปริมาณน้ำและระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มความชื้น

2.4 การหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

การหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยคำนวณความชื้นมาตรฐานเปียก ดังสมการที่ 1

$$M_w = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

w = น้ำหนักของข้าวเปลือกก่อนกระบวนการอบ

d = น้ำหนักของข้าวเปลือกหลังจากกระบวนการอบ

M_w = ความชื้นมาตรฐานเปียก, % (w.b.)

2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น [12] ดำเนินการจากข้อมูลที่รวบรวมโดย Box-Behnken Design สำหรับการตอบสนอง (ปริมาณความชื้น) อัตราการสเปรย์น้ำ อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุน ปริมาณความชื้นถูกปรับให้เป็นสมการพหุนามลำดับที่สองซึ่งรวมถึงผลกระทบของพจน์เชิงเส้น พจน์กำลังสอง และเงื่อนไขปฏิสัมพันธ์ต่อการตอบสนอง ค่าการตอบสนองแสดงโดยสมการกำลังสองพหุนามตามที่แสดงในสมการที่ 2

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_1 x_1 + \sum_{i=1}^k \beta_2 x_2 + \sum \sum_{i < j} + \varepsilon \quad (2)$$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ปริมาณความชื้น

Table 2 แสดงลำดับผลการทดลองด้วยระเบียบวิธีการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (BBD) และแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบโดยใช้ RSM ดังสมการที่ 3 โดยสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือกที่ส่งผล คือ อัตราการสเปรย์น้ำ 8 ลิตร/นาที่ อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ 40 องศาเซลเซียส และ ความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุน 10 รอบ/นาที่ ซึ่งจะส่งผลให้มีปริมาณความชื้นสูงที่สุด โดยผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) พบว่ามีค่าเท่ากับ 98.18% แสดงให้เห็นว่า 98.18% ของความแปรผันทั้งหมดในประสิทธิภาพการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือก หากค่า Lack-of-fit มากกว่า 0.05 และค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จะแสดงให้เห็นว่าสมการพหุนามมีความเหมาะสมและสามารถนำไปใช้ในการทำนายได้ โดยที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ ดังที่แสดงใน Table 3 และสมการที่ 3

$$Y = 6.50 + 2.356(X_1) + 0.2495(X_2) + 0.599(X_3) - 0.1428(X_1) * X_1 - 0.01520(X_2) * X_3 \quad (3)$$

เมื่อ

X_1 = อัตราการสเปรย์น้ำ (ลิตรต่อนาที่)

X_2 = อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ (องศาเซลเซียส)

X_3 = ความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุน (รอบต่อนาที่)

Table 2 The design experiment matrix based on Box-Behnken Design (BBD)

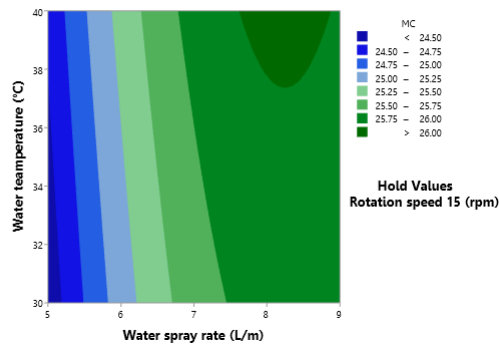
Run	Variable			Response, Y
	X ₁	X ₂	X ₃	
1	5	30	12.5	23.96
2	9	30	12.5	25.52
3	5	40	12.5	24.46
4	9	40	12.5	25.88
5	5	35	10	24.28
6	9	35	10	25.50
7	5	35	15	24.40
8	9	35	15	25.91
9	7	30	10	24.82
10	7	40	10	25.96
11	7	30	15	25.60
12	7	40	15	25.98
13	7	35	12.5	25.56
14	7	35	12.5	25.48
15	7	35	12.5	25.52

Table 3 ANOVA for model regression for increased moisture content

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	6.36736	1.27347	97.12	0
Linear	3	5.00468	1.66823	127.22	0
X1	1	4.07551	4.07551	310.81	0
X2	1	0.70805	0.70805	54	0
X3	1	0.22111	0.22111	16.86	0.003
Square	1	1.21829	1.21829	92.91	0
X1* X1	1	1.21829	1.21829	92.91	0
2-Way Interaction	1	0.1444	0.1444	11.01	0.009
X2* X3	1	0.1444	0.1444	11.01	0.009
Error	9	0.11801	0.01311		
Lack-of-Fit	7	0.11481	0.0164	10.25	0.092
Pure Error	2	0.0032	0.0016		
Total	14	6.48537			

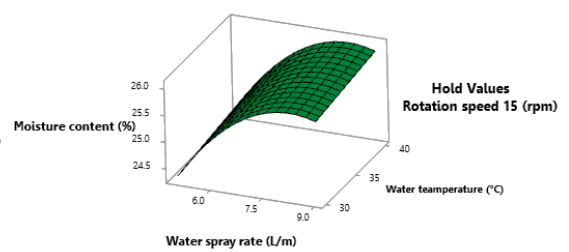
$R^2 = 98.18\%$, R^2 (Adj) = 97.17% R^2 (Pred) = 92.61%

Contour Plot of MC vs Water spray rate (L/m), Water temperature (°C)



(a)

Surface Plot of MC vs Water spray rate (L/m), Water temperature (°C)

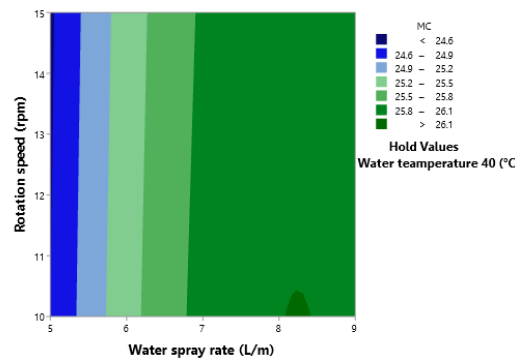


(b)

Figure 2 Response diagram and response surface graph between spray rate and water temperature

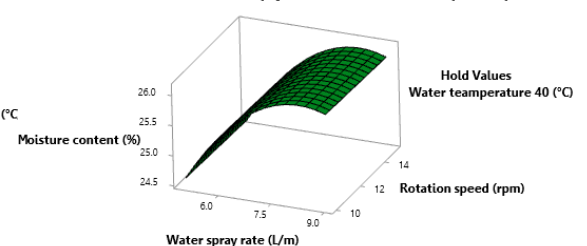
Figure 2 แสดงแผนภาพตอบสนองและกราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างอัตราสเปรย์น้ำ และอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ ต่อประสิทธิภาพในการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือก โดยมีความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุนในการหมุนที่ 15 รอบ/นาที การทดลองพบว่าที่บริเวณของพื้นที่สีเขียวเข้มนั้นมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการเพิ่มความชื้นมากที่สุดแสดงดัง Figure 2a การเพิ่มขึ้นของความชื้นจะเห็นได้ว่ามีลักษณะการเพิ่มขึ้นตามอัตราสเปรย์น้ำและอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ใช้แสดงดัง Figure 2b

Contour Plot of MC vs Water spray rate (L/m), Rotation speed (rpm)



a)

Surface Plot of MC vs Water spray rate (L/m), Rotation speed (rpm)



b)

Figure 3 Response diagram and response surface graph between spray rate and rotation Speed

Figure 3 แสดงแผนภาพตอบสนองและกราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างอัตราสเปรย์น้ำ และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเพิ่มความชื้น โดยมีอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มความชื้นสูงสุด พบว่าในบริเวณที่มีสีเขียวเข้มเป็นจุดที่มีความชื้นมากที่สุดแสดงดัง Figure 3a โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในช่วงอัตราสเปรย์น้ำ 7-9 ลิตร/นาที และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุนที่ 10 รอบ/นาที แต่ไม่สามารถส่งผลได้มากกว่าในช่วงอัตราสเปรย์น้ำที่ 8 ลิตร/นาที ซึ่งเป็นจุดที่มีความชื้นมากที่สุด แสดง Figure 3b

3.2 ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขการเพิ่มความชื้นที่เหมาะสม

ในการศึกษานี้ได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความชื้น โดยใช้ปัจจัยดังนี้ อัตราการสเปรย์น้ำ อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุนของทั้ง 15 เงื่อนไขดัง Table 2 ได้ทำการทดลองจากเครื่องผลิตข้าวอกด้วยระบบสเปรย์น้ำ โดยจะได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดจากการออกแบบ นำมาทดลองเพื่อดูว่าค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายดัง Table 4 เห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความชื้นเท่ากับ 0.23% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขที่ได้จากการทดลองมีความแม่นยำและสามารถนำไปใช้ในงานได้

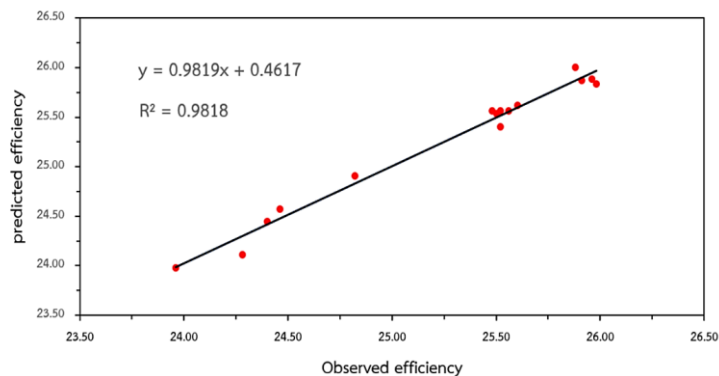


Figure 4 Predicted values against observed values

Figure 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือกที่ได้ จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายมีลักษณะความสัมพันธ์กับผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายลักษณะเชิงเส้นตรง บ่งบอกถึงสมการที่ใช้ในการทำนายมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยกับการทดลองจริง

Table 4 Comparison of experimental values with values obtained by running the program

	Water spray rate (L/m)	Water temperature (°C)	Rotation speed (rpm)	Moisture content (%)
Prediction from RSM	8	40	10	26.10
Observation	8	40	10	26.04

3.3 การหาความชื้นของข้าวเปลือกที่ 30% (w.b.)

จากการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการสเปรย์น้ำ อัตราการสเปรย์น้ำและความเร็วรอบในการหมุนของตะแกรงหมุน โดยใช้วิธีพินิจตอบสอง (BBD) แสดงดัง Table 2 ได้ทำการสเปรย์น้ำตามเงื่อนไข ที่ได้จากสถานะที่เหมาะสม เพื่อทดลองการเพิ่มความชื้นในข้าวเปลือก ให้ได้ความชื้นที่ 30% (w.b.) ในระหว่างการทดลอง พบว่าการเพิ่มจำนวนรอบการสเปรย์น้ำมีผลทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากการทดลองพบว่า การสเปรย์น้ำจำนวน 4 ครั้ง สามารถเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึง 30.02% (w.b.) แสดงดัง Table 5

Table 5 Moisture content based on the number of spray rounds

Number of rounds	Water spray rate (L/m)	Water temperature (°C)	Rotation speed (rpm)	Moisture content (%)
1	8	40	10	26.04
2	8	40	10	27.28
3	8	40	10	28.43
4	8	40	10	30.02
5	8	40	10	30.29

Table 6 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำและระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือกให้ถึง 30% (w.b.) โดยเปรียบเทียบผลการทดลองในครั้งนี้กับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ เพื่อให้เห็นความแตกต่างของแต่ละวิธี ทั้งในแง่ของปริมาณน้ำที่ใช้ และระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มความชื้นให้ถึง 30% (w.b.) แทนอักษร A B และ C โดยมีเงื่อนไขที่แตกต่างกัน จากเงื่อนไข A ใช้วิธีการเพิ่มความชื้นด้วยการแช่น้ำ 7 ลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยทำการเปลี่ยนน้ำทุก 4 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการเพิ่มความชื้นให้ถึง 30% (w.b.) อยู่ที่ 16 ชั่วโมงและใช้น้ำทั้งหมด 28 ลิตร เงื่อนไข B ใช้อัตราการสเปรย์น้ำ 7 ลิตร/นาที่ อุณหภูมิ น้ำที่ใช้ในการสเปรย์ 30 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุนในการหมุน 15 รอบ/นาที่ ใช้เวลาในการสเปรย์

เพิ่มความชื้น 4 ชั่วโมง ใช้น้ำทั้งหมด 56 ลิตร ใช้การสเปรย์น้ำ 8 ครั้ง [11] และเงื่อนไข C ใช้ อัตราการสเปรย์ 7 ลิตร/นาที่ อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ 40 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุนในการหมุน 15 รอบ/นาที่ ใช้เวลาในการสเปรย์ 2 ชั่วโมง 30 นาที ใช้การสเปรย์น้ำ 5 ครั้ง [9] จากงานวิจัยก่อนหน้านี้เห็นได้ว่าการเพิ่มความชื้นให้ถึง 30 % (w.b) ใช้ปริมาณน้ำและระยะเวลามากกว่าเงื่อนไขที่ได้ จากสมการในงานวิจัยนี้ (แทนอักษร D) โดยเงื่อนไขนี้ใช้ คือ อัตราการสเปรย์ 8 ลิตร/นาที่ อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ 40 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุน 10 รอบ/นาที่ ใช้เวลาในการสเปรย์เพิ่มความชื้น 2 ชั่วโมง ใช้น้ำทั้งหมด 32 ลิตร จากการทดลองพบว่า การสเปรย์น้ำ 4 ครั้ง สามารถทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นถึง 30% (w.b.) แสดงดัง Table 6 นอกจากนี้แล้ว เงื่อนไข D แสดงให้เห็นว่าปัจจัยเหล่านี้ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มความชื้นสูงสุด ที่ได้จาก Response Surface Methodology ส่งผลเงื่อนไข D เป็นเงื่อนไขในการเพิ่มความชื้นที่เร็วที่สุด

Table 6 Optimum conditions of total water content and total time for increase of moisture content

Conditions	Water temperature (°C) / Soaking	Water spray rate (L/m)	Water temperature (°C) / Spray	Rotation speed (rpm)	Moisture content (%)	Total time (h)	Total water content (L)
A	40	-	-	-	32.00	16	28
B	-	7	30	15	30.49	4	56
C	-	7	40	15	30.03	2.5	36
D	-	8	40	10	30.02	2	32

4. สรุป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเพิ่มความชื้นโดยใช้เครื่องผลิตข้าวอกด้วยระบบสเปรย์น้ำ โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ (BBD) โดยพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อค่าความชื้น 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการสเปรย์น้ำ อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการสเปรย์ และความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุน จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความชื้น คือ อัตราการสเปรย์น้ำ 8 ลิตร/นาที่ อุณหภูมิที่ใช้ในการสเปรย์น้ำ 40 องศาเซลเซียสและความเร็วรอบในการหมุนตะแกรงหมุน 10 รอบ/นาที่ จากการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการความสัมพันธ์และค่าที่ได้จากการทดสอบพบว่าความชื้นมีความคลาดเคลื่อนเพียง 0.23% ซึ่งบ่งบอกว่าสามารถนำเงื่อนไขนี้ไปใช้ในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมได้ โดยสมการดังกล่าว มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 98.18% ซึ่งใช้ในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือกที่ 30% (w.b.) โดยนำเงื่อนไขที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสมมาทำการทดลอง จากการทดลองพบว่า การเพิ่มจำนวนรอบในการสเปรย์น้ำส่งผลให้ความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น โดยทำการสเปรย์น้ำเป็นจำนวน 4 ครั้ง ใช้ปริมาณน้ำทั้งหมด 32 ลิตร และใช้ระยะเวลาในการสเปรย์น้ำ 2 ชั่วโมง สามารถทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นถึง 30.02% (w.b.) เมื่อเทียบกับการเพิ่มความชื้นด้วยวิธีการแช่น้ำแล้ว สามารถลดระยะเวลาในการเพิ่มความชื้นได้ 14 ชั่วโมง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Toyoshima H., Ohtsubo K., Okadome H., Tsukahara K., Komatsuzaki N. and Kohno T. 2004. Germinated brown rice with good safety and cooking property, process for producing the same, and processed food therefrom. US. Patent, Vol 6, pp. 685-979.
- [2] Sarasa S. B., Mahen R., Thankappan B, Seita D. R. F. and Angayarkanni J. 2019. A Brief Review on the Non-protein Amino Acid, Gamma-amino Butyrid (GABA). Springer Science Media, pp. 534-544.
- [3] Hayat A., Jahangir T. M., Khuhawar M. Y., Alamgir M., Hussain Z., Haq F. U. and Musharraf S. G. 2015. HPLC determination of gamma amino butyric Amines (BAs) in controlled, germinated, and fermented brown rice by pre-column derivation. Journal of Cereal Science, pp. 56-62.

- [4] กรกฎ เพ็ชรหัสณโยธิน สุธนเสถียรยานนท์ และธิดา อมร. 2561. นวัตกรรมการผลิต ข้าวกล้องงอกให้สารกาบาสูง. สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา, กรุงเทพมหานคร.
- [5] อุไรวรรณ วัฒนกุล, วัฒนา วัฒนกุล และชุตินุช สุจริต. 2556. ผลของอุณหภูมิในการแช่อก และหุงต้มต่อปริมาณไทอะมีน, GABA, สารต้านอนุมูลอิสระ ในข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอกนึ่งสังขยดพืพล. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตรตรัง, ตรัง.
- [6] Chngcharoen T., Prachayawarakorn S., Tungtrakul P. and Soponronnarit S. 2015. Effect of germination time and drying temperature on drying Characteristics and quality of germinated paddy. Food and Bioproducts Processing, pp. 707-716.
- [7] Zhang Q., Xiang J., Zhang L., Zhu X., Evers J., Werf W. V. D., Duan L. 2014. Optimizing soaking and germination conditions to improve gamma-Aminobutyric acid content in japonica and indica germinated brown rice. Journal of Function Foods IO, pp. 283-291.
- [8] Shafiekhani S., Wilson S. A. and Atungulu G. 2018. Impacts of storage temperature and rice moisture content on color characteristics of rice from fields with different disease management practices. Journal of stored products research, 78, 89-97.
- [9] จักติณณ์ มากนคร และคณะ. 2563. เงื่อนไขที่เหมาะสมในรูปแบบการงอกและการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวจากเครื่องผลิตข้าวงอกด้วยระบบสเปรย์น้ำ. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมศาสตรสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตอุดมศักดิ์, ชุมพร.
- [10] Behera S.K., Meena H., Chakraborty S. and Meikap B.C. 2018. Application of response surface methodology (RSM) for optimization of leaching parameters for ash reduction from low-grade coal. Journal of Mining Science and Technology. pp. 621-629.
- [11] ปรมัตถ์ บุญศรีและคณะ. 2563. การออกแบบและสร้างเครื่องเพาะข้าวงอกด้วยระบบสเปรย์น้ำ. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมศาสตรสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตอุดมศักดิ์, ชุมพร.
- [12] Leroy T, Ribeyre F, Bertrand B, Charmetant P, Dufour M, Montagnon C, Marraccini P and Pot D 2006. Genetics in coffee quality Braz. J. Plant Physiol. 18 229-242.

การพัฒนาเตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขึ้นสำหรับใช้ในครัวเรือนภายใต้อิทธิพลของความเร็วอากาศป้อนและ
ความชื้นชีวมวลอัดเม็ดDevelopment of an Updraft Gasifier for Household Use Under the Influence of Airflow
Rate and Pelletized Biomass Moisture Contentวีรวัฒน์ ตามชู¹ ดิษฐพร ตุงโสธานนท์¹ และ วรราชชล วัฒนนะ^{1,*}Weerawat Tamchoo¹, Dithaporn Thungsotanon¹ and Wassachol Wattana^{1,*}¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร¹Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

*Corresponding author: Wassachol Wattana, e-mail address: Wassachol.wat@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และศึกษาประสิทธิภาพของเตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขึ้น (Updraft Gasifier) สำหรับใช้ในครัวเรือน โดยใช้ชีวมวลอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบของความเร็วอากาศป้อนและความชื้นของชีวมวลอัดเม็ดต่ออุณหภูมิเปลวไฟและประสิทธิภาพการทำงานของเตา การทดลองดำเนินการโดยใช้ชีวมวลอัดเม็ดจากไม้ยางพาราที่มีความชื้น 3 ระดับ (4%, 6% และ 8% w.b.) และความเร็วอากาศป้อน 3 ระดับ (7.4, 9.4 และ 11.4 m/s) ประสิทธิภาพของเตาถูกวิเคราะห์โดยใช้ Water Boiling Test (WBT) และวัดค่าตัวแปรสำคัญ ได้แก่ อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel Consumption Rate; FCR), อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Gasification Rate; SGR) และอัตราการเผาไหม้ (Combustion Zone Rate; CZR) ผลการทดลองพบว่า ความเร็วอากาศป้อนที่สูงขึ้นช่วยให้การลุกไหม้เกิดขึ้นเร็วขึ้นและอุณหภูมิเปลวไฟเพิ่มขึ้นสำหรับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำ (4-6% w.b.) อย่างไรก็ตาม สำหรับชีวมวลที่มีความชื้นสูง (8%) พบว่า ที่ความเร็วอากาศป้อนสูง (11.4 m/s) การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และให้ค่า SGR และ CZR ต่ำที่สุด แสดงถึงข้อจำกัดของเตาต่อเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง นอกจากนี้ ค่า SGR และ CZR สูงสุดพบที่เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีความชื้น 4% w.b. และความเร็วอากาศป้อน 11.4 m/s ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เตาแก๊สซิไฟเออร์ต้นแบบมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำและความเร็วอากาศป้อนสูง จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขึ้นที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการใช้งานในครัวเรือน โดยเหมาะสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีความชื้นต่ำ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มระบบอุ่นอากาศหรือการควบคุมความเร็วอากาศแบบไดนามิกอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเตาสำหรับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงได้

คำสำคัญ: แก๊สซิไฟเออร์แบบไหลขึ้น, ชีวมวลอัดเม็ด, อุณหภูมิเปลวไฟ

Abstract

This study aims to design, construct, and evaluate the performance of an updraft gasifier for household use, utilizing pelletized biomass as fuel. The effects of airflow rate and biomass moisture content on flame temperature and gasifier performance were investigated. The experiment was conducted using pelletized biomass from para-rubber wood with three moisture levels (4%, 6%, and 8% w.b.) and three airflow rates (7.4, 9.4, and 11.4 m/s). The gasifier's performance was analyzed using the Water Boiling Test (WBT), and key parameters such as Fuel Consumption Rate (FCR), Specific Gasification Rate (SGR), and Combustion Zone Rate (CZR) were measured. The results showed that higher airflow rates enhanced combustion and increased flame temperature when using biomass with low moisture content (4–6% w.b.). However, for biomass with high moisture content (8%), combustion was incomplete at the highest airflow rate (11.4 m/s), resulting in the lowest SGR and CZR values, indicating limitations in handling high-moisture fuels. Additionally, the highest SGR and CZR values were observed at 4% w.b. moisture content and 11.4 m/s airflow rate, suggesting that the updraft gasifier prototype achieved optimal performance with low-moisture biomass and high airflow rates. This study concludes that the developed updraft gasifier has potential for household applications, particularly when using low-moisture pelletized biomass. However, improvements such as preheating the intake air or implementing dynamic airflow control may enhance the gasifier's performance when using high-moisture fuels.

Keywords: Updraft Gasifier, Biomass Pellet, Gasification Efficiency

1. บทนำ

ในปัจจุบัน พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติ ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป มีแนวโน้มราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ต้นทุนด้านพลังงานของภาคอุตสาหกรรม โรงงาน และครัวเรือนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อน ด้วยเหตุนี้ การค้นคว้า วิจัย และพัฒนาพลังงานทดแทนที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล จึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะพลังงานชีวมวลซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ประเทศไทยในฐานะประเทศเกษตรกรรมมีศักยภาพในการใช้พลังงานชีวมวลในรูปแบบของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ซึ่งมีข้อดีด้านความสะดวกในการขนส่งและควบคุมปริมาณการใช้ได้ง่าย

กระบวนการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานมีหลายวิธี ได้แก่ การเผาไหม้โดยตรง (Combustion) การผลิตแก๊ส (Gasification) และการหมัก (Fermentation) ซึ่งแต่ละกระบวนการมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษากระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล (Gasification Process) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ให้ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงที่ต่ำลง ลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อนของอินทรีย์สารในเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นแก๊ส โดยใช้อากาศในปริมาณที่ต่ำกว่าที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์ประมาณร้อยละ 30 โดยเกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 600-1500 °C และผลิตแก๊สที่มีค่าความร้อนต่ำถึงปานกลาง ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องผลิตแก๊สและเงื่อนไขการทำงาน

ปัจจุบัน เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลมีหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถจำแนกตามลักษณะการไหลของอากาศภายในเตา แก๊สซิไฟเออร์ออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ 1) เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขึ้น (Updraft Gasifier) 2) เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลลง (Downdraft Gasifier) 3) เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขวาง (Crossdraft Gasifier) และ 4) เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิด Inverted Downdraft โดยแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขึ้น เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในครัวเรือน เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ให้ประสิทธิภาพการทำงานสูง และลดปัญหาเถ้าหลอมภายในเตา มีงานวิจัยหลายฉบับได้ศึกษาการพัฒนาเตาแก๊สซิไฟเออร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดย Sharma และคณะ [1] ได้ศึกษาผลของชนิดชีวมวลและอัตราการป้อนอากาศต่ออุณหภูมิเปลวไฟในเตาแก๊สซิไฟเออร์ พบว่าความชื้นของชีวมวลเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) และประสิทธิภาพของเตา นอกจากนี้ Xiao และคณะ [2] ได้วิเคราะห์การใช้เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขึ้นและพบว่าการออกแบบช่องอากาศป้อนมีผลอย่างมากต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเตา นอกจากนี้งานวิจัยของ Patel และคณะ [3] ศึกษาอิทธิพลของความชื้นของชีวมวลต่อองค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าเมื่อความชื้นของชีวมวลเพิ่มขึ้น ปริมาณไฮโดรเจน (H₂) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในแก๊สเชื้อเพลิงลดลง ขณะที่ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานของแก๊สลดลง รวมถึง Mukunda และคณะ [4] ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเตาแก๊สซิไฟเออร์โดยใช้วิธี Water Boiling Test (WBT) เช่นเดียวกับการศึกษานี้ โดยผลการทดลองพบว่า การควบคุมอัตราการไหลของอากาศป้อนให้เหมาะสมช่วยเพิ่มค่าพลังงานความร้อนของแก๊สที่ได้ และช่วยลดการปล่อยแก๊สมลพิษ

ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขึ้นสำหรับใช้ในครัวเรือน โดยใช้ชีวมวลอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง พร้อมทั้งทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเตาโดยใช้วิธี WBT และทำการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟตลอดระยะเวลาในการทำงานของเตา เพื่อประเมินศักยภาพในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในครัวเรือน และพัฒนาเตาแก๊สซิไฟเออร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานในระดับครัวเรือนต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 การออกแบบ

กระบวนการออกแบบเตาแก๊สซิไฟเออร์ให้มีประสิทธิภาพของการทำงานตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการนำไปใช้งาน จากการได้วิเคราะห์ที่เป็นปัจจัยภายนอกและปัจจัยภายในที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการออกแบบ ดังนี้

2.1.1 กำหนดแนวคิดในการออกแบบเตาแก๊สเชื้อเพลิง

ในปัจจุบันเตาแก๊สซีไฟเออร์มีหลายรูปแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกแบบที่เหมาะสมกับการใช้งานในระดับครัวเรือน มีขนาดเล็กถึงปานกลาง มีช่องทางออกของแก๊สอยู่ด้านบนเพื่อง่ายต่อการนำไปใช้ แก๊สเชื้อเพลิงให้ค่าความร้อนสูง มีปริมาณเถ้าและต้นทุนการผลิตต่ำ

2.1.2 กำหนดประเภทของเตาแก๊สเชื้อเพลิงและองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาเตาแก๊สซีไฟเออร์ชนิดไหลขึ้นเป็นเตาแก๊สซีไฟเออร์ที่มีลักษณะการใช้งานที่ไม่ซับซ้อนกล่าวคือ การป้อนเชื้อเพลิงทำได้ง่ายกว่าเตาแก๊สซีไฟเออร์ชนิดอื่น ห้องเผาไหม้มีขนาดเล็ก วัสดุอุปกรณ์หาได้ง่ายและสามารถประกอบเตาแก๊สซีไฟเออร์ได้โดยไม่มีความซับซ้อน

2.1.3 กำหนดประเภทและปริมาณของชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงชีวมวลที่เลือกใช้คือ เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด เป็นเชื้อเพลิงที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมากที่สุด โดยใช้ปริมาณ 3 kg ต่อครั้งการทดสอบ

2.1.4 คำนวณขนาดของเตาแก๊สซีไฟเออร์

การออกแบบการพัฒนาเตาแก๊สซีไฟเออร์สำหรับใช้ในครัวเรือนโดยใช้ชีวมวลอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง โดยหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้แบบทรงกลมได้จากสมการ (1) หรือ (2) [5]

$$D = \sqrt{\frac{4FCR}{\pi SGC}} \quad (1)$$

หรือ

$$D = \left(\frac{1.27FCR}{SGR} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้ตัวแปร FCR หรือ Fuel Consumption Rate คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/h) โดยกำหนดให้เตาสามารถใช้กับเชื้อเพลิงปริมาณ 3 kg/h และ SGR หรือ Specific Gasification Rate คือ อัตราการสันเป็ลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/m²-hr) ประมาณ 150 kg/m²-hr [5] ทำให้สามารถคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางได้ 0.16 m หรือ 16 cm และเช่นเดียวกันสามารถคำนวณค่าความสูงของเตาได้ดังความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ (3)

$$H = \frac{SGR \times T}{\rho_a} \quad (3)$$

เมื่อกำหนดให้ตัวแปร T คือ เวลาที่ใช้ (h) โดยกำหนดเวลาในการใช้งานเตา 0.8 h และ ρ_a คือ ความหนาแน่นของชีวมวลอัดเม็ด (kg/m³) ประมาณ 600 kg/m³ ทำให้สามารถคำนวณความสูงของห้องเผาไหม้ได้ความสูงของห้องเผาไหม้มีค่า 0.2 m

2.2 เตาแก๊สซีไฟเออร์ จากแนวคิดและขนาดที่คำนวณได้นำมาใช้ในการกระบวนการผลิตเตาแก๊สซีไฟเออร์ชนิดไหลขึ้นที่นิยมสร้างในปัจจุบันคือเตาแก๊สเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กมาก ที่ใช้วิธีการเติมชีวมวลแบบเป็นครั้งที่ทำงาน ซึ่งนำมาใช้งานในระดับครัวเรือนมีส่วนประกอบ ดังแสดงใน Figure 1 ดังนี้ 1-ขาวางเตาแก๊สซีไฟเออร์ฐานกลม ใช้สำหรับวางภาชนะในการทำอาหาร 2-หัวเตาแก๊สซีไฟเออร์ เป็นช่องที่ปล่อยแก๊สชีวมวลออกเพื่อนำไปใช้งาน 3-บอลวาล์ว ใช้ในการควบคุมการเปิด-ปิด การปล่อยแก๊สชีวมวล 4-บังลมเตาแก๊สซีไฟเออร์ ช่วยกันลมและป้องกันอันตรายจากเปลวไฟ 5-ขาตั้งเตาแก๊สซีไฟเออร์ ใช้สำหรับรองขาวางเตาแก๊สฐานกลม 6-ช่องเติมเชื้อเพลิงชีวมวล 7-ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล 8-ช่องป้อนอากาศเข้า 9-พัดลม DC 12 โวลต์ ใช้ในการป้อนอากาศเข้า 10-ช่องดักเถ้าออกจากเตาแก๊สซีไฟเออร์

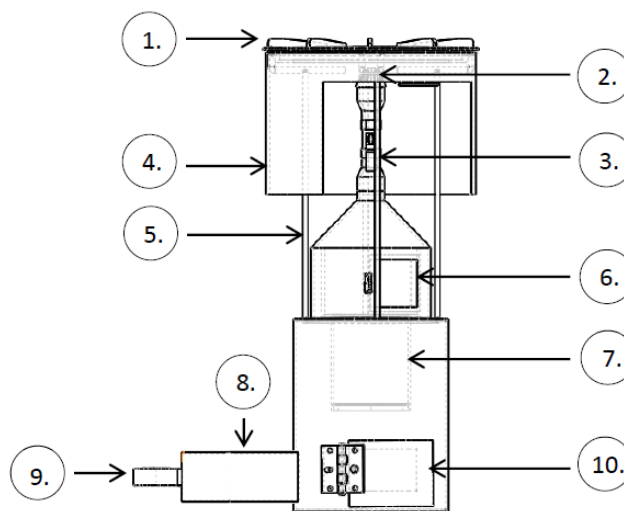


Figure 1 Schematic of biomass gasifier for household use

โดยชีวมวลที่นำมาใช้กับเตาแก๊สซิไฟเออร์นี้คือชีวมวลอัดเม็ดจากไม้ยางพารา ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ ให้ค่าความร้อนสูง สามารถควบคุมปริมาณการใช้ได้ง่ายเพราะมีขนาดที่เท่ากันมีน้ำหนักที่ค่อนข้างแน่นอน มีประสิทธิภาพของอัตราการเผาไหม้มากกว่าร้อยละ 80 ของเตาเผา ความชื้นของชีวมวลต่ำกว่าร้อยละ 10 และให้ปริมาณเถ้าต่ำ โดยใช้ไม้ยางพาราอัดเม็ดจากบริษัท ไบโอมัส พิวเอล เพลเลท จำกัด แสดงดัง Figure 2



Figure 2 Biomass pellet from para-rubber wood

2.3 การทดสอบการทำงานของเตาแก๊สซิไฟเออร์

ทำการทดสอบการทำงานของเตาแก๊สซิไฟเออร์ โดยใช้ชีวมวลอัดเม็ดที่มีความชื้น 4 6 และ 8%w.b. ที่ความเร็วอากาศป้อน 3 ระดับ ได้แก่ 7.4, 9.4 และ 11.4 m/s วิธีการทดสอบการใช้งานเตาแก๊สซิไฟเออร์ โดยหาประสิทธิภาพการทำงานของเตาแก๊สซิไฟเออร์ วิเคราะห์หัตถิพลของความชื้นของชีวมวลอัดเม็ดซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้และความเร็วอากาศป้อนที่มีต่ออุณหภูมิเปลวไฟ เมื่อพิจารณาว่าอุณหภูมิเปลวไฟมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเกิดเป็นแก๊สเชื้อเพลิง ดังนั้นในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเตาแก๊สซิไฟเออร์จึงพิจารณาจากอุณหภูมิเปลวไฟ และระยะเวลาที่แก๊สเชื้อเพลิงติดเป็นเปลวไฟและเปลวไฟดับลง โดยการทดสอบแบบ WBT [6] มีขั้นตอนการทดลองดังนี้ ในการทดสอบแต่ละครั้งใช้ชีวมวลอัดเม็ดปริมาณ 3 kg ต้มน้ำปริมาณ 3 kg ต้มน้ำตามวิธีการทดสอบแบบ WBT โดยมีการติดตั้ง Thermocouple Type K ไว้ 3 ตำแหน่งบริเวณขาของเตาแก๊สในระยที่แบ่งเท่าๆ กัน โดยให้ห่างจากด้านล่างของหม้อประมาณ 5 cm ต้มน้ำตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนเดือด และต้มต่อไปอีก

5 นาที จากนั้นนำน้ำที่เหลือไปชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า และปล่อยให้ไฟจากเตาแก๊สซีฟเอร์ดับหรือเผาไหม้เชื้อเพลิงจนหมด ในส่วนของการวัดความเร็วอากาศป้อนวัดที่ตำแหน่งที่ 8 จาก Figure 1 โดยใช้ hot wire anemometer

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

การทดสอบความสามารถในการทำงานของเตาแก๊สซีฟเอร์ ทำการทดลองที่ความเร็วอากาศป้อน 3 ระดับได้แก่ 7.4, 9.4 และ 11.4 m/s ตามลำดับ และทดสอบการทำงานกับชีวมวลอัดเม็ดจากไม้ยางพาราที่มีความชื้น 3 ระดับ ได้แก่ 4, 6 และ 8%w.b. โดยทดสอบตามแบบ WBT และได้บันทึกอุณหภูมิของเปลวไฟ จากสามตำแหน่ง และมีการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง จากนั้นนำผลการทดลองมาหาค่าเฉลี่ย โดยผลการทดลองได้บันทึกค่าอุณหภูมิเปลวไฟตามระยะเวลาตั้งแต่เริ่มจุดไฟจนกระทั่งไฟมอดดับ โดยในการศึกษานี้ต้องการศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศป้อน และความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ซึ่งผลการศึกษาแสดงในหัวข้อต่อไป

3.1 อิทธิพลของความเร็วอากาศป้อนที่มีต่ออุณหภูมิเปลวไฟ

อุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จากการลุกไหม้จากเตาแก๊สซีฟเอร์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีความชื้นทั้ง 3 ระดับที่ความเร็วอากาศป้อนเท่ากับ 7.4 9.4 และ 11.4 m/s แสดงใน Figure 3 ถึง 5 จากผลการทดลองพบว่า ความเร็วอากาศป้อนมีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อกระบวนการลุกไหม้และอุณหภูมิเปลวไฟของเตาแก๊สซีฟเอร์

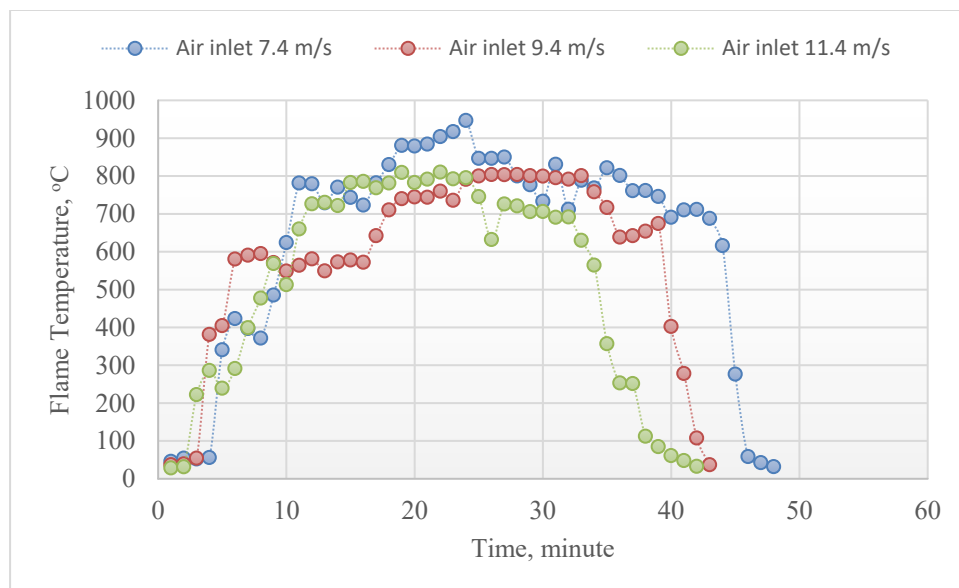


Figure 3 Flame temperature at biomass pellet moisture content 4% for 3 levels of air feeding velocity

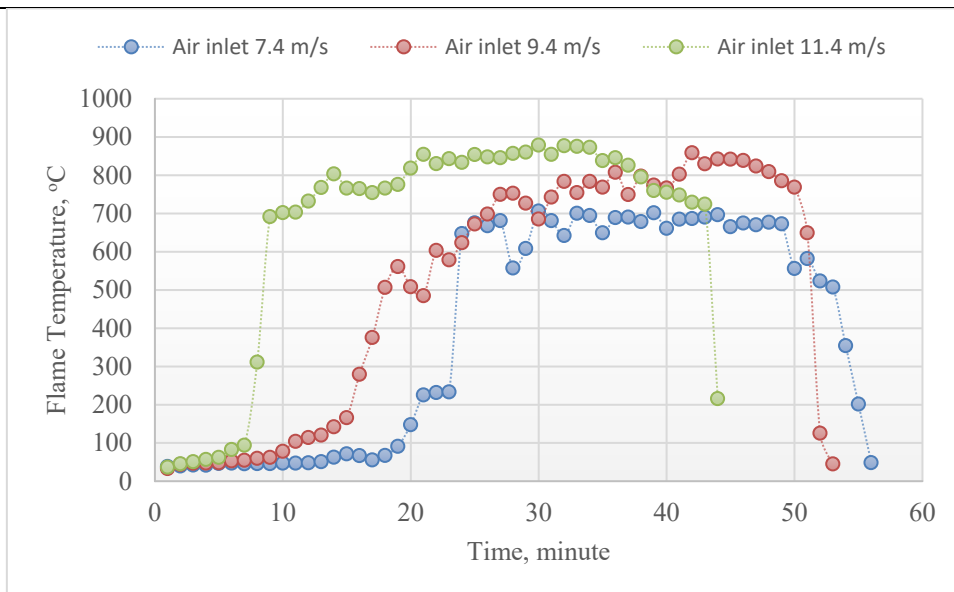


Figure 4 Flame temperature at biomass pellet moisture content 6% for 3 levels of air feeding velocity

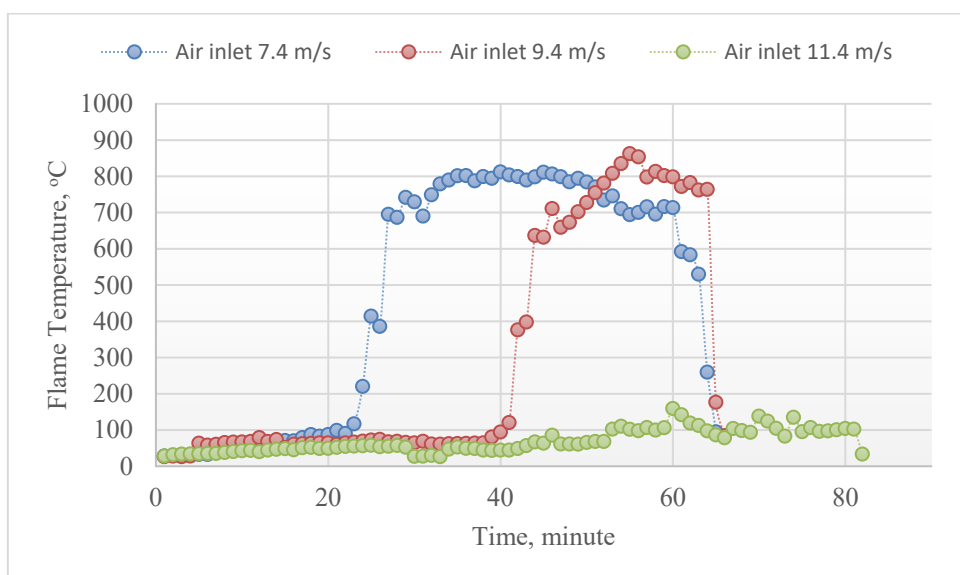


Figure 5 Flame temperature at biomass pellet moisture content 8% for 3 levels of air feeding velocity

จาก Figure 3 พบว่า เมื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีความชื้น 4%w.b. อุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จากทั้งสามระดับของความเร็วอากาศป้อน ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อพิจารณาระยะเวลาการติดไฟพบว่า ที่ความเร็วอากาศป้อนต่ำกว่า จะใช้เวลาลุกไหม้นานกว่า ซึ่งสอดคล้องกับหลักการที่ว่าเมื่ออากาศป้อนต่ำ ปฏิกริยาการเผาไหม้อาจเกิดช้าลงเนื่องจากมีออกซิเจนน้อยกว่าทำให้การจุดติดไฟของเชื้อเพลิงช้าลงตามไปด้วย โดยอุณหภูมิสูงสุดที่ได้คือ 946.5°C เมื่อความเร็วอากาศป้อนเท่ากับ 7.4 m/s แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเปลวไฟโดยรวมพบว่า การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกันในทุกะดับของความเร็วอากาศป้อน ซึ่งอาจบ่งชี้ว่า ชีวมวลที่มีความชื้นต่ำสามารถเผาไหม้ได้ดีอยู่แล้ว แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอากาศป้อนก็ตาม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการทดลองที่แสดงใน Figure 4 พบว่าเมื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีความชื้น 6% ความเร็วอากาศป้อนที่ 11.4 m/s ให้การลุกไหม้ที่เร็วที่สุดและให้ อุณหภูมิเปลวไฟสูงที่สุดอย่างเห็นได้ชัด โดยมีอุณหภูมิ 878.9°C รองลงมาคือที่ความเร็วอากาศป้อน 9.4 m/s และ 7.4 m/s ตามลำดับ ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงอยู่ในระดับปานกลาง (6%w.b.) การเพิ่มความเร็วอากาศช่วยเสริมการเผาไหม้ ทำให้เกิดการลุกไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเปลวไฟเพิ่มขึ้น

แต่เมื่อใช้ชีวมวลอัดเม็ดที่มีความชื้น 8% w. b. ซึ่งแสดงผลการทดลองใน Figure 5 พบว่าความเร็วอากาศป้อนที่ 11.4 m/s ทำให้เกิดการลุกไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งแตกต่างจากกรณีของความชื้น 6%w.b. สาเหตุหลักเกิดจาก ความชื้นที่สูงขึ้นทำให้

พลังงานบางส่วนถูกใช้ในการระเหยน้ำ แทนที่จะนำไปใช้ในการสลายตัวเชิงความร้อนของชีวมวล ทำให้ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นลดลง นอกจากนี้ อากาศที่ถูกป้อนเข้ามาในปริมาณมากอาจทำให้เกิดการเจือจางของแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้น ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นลดลง ส่งผลให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ นอกจากนั้นพบว่า ในกรณีที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีความชื้น 8% w.b. ที่ระดับความเร็วอากาศป้อน 7.4 m/s ให้ผลการเผาไหม้ที่ดีกว่าความเร็วอากาศป้อนที่ 9.4 m/s กล่าวคือมีการลุกไหม้เร็วกว่าและติดไฟได้นานกว่า โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 862.4°C ซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจนกับการลุกไหม้ในกรณีที่ความเร็วอากาศป้อน 11.4 m/s ดังที่กล่าวไปข้างต้น ปรากฏการณ์นี้อาจอธิบายได้ว่า การใช้ความเร็วอากาศที่สูงเกินไปในสภาวะที่มีความชื้นสูง อาจทำให้เกิดการระบายความร้อนเร็วเกินไป ส่งผลให้เชื้อเพลิงไม่สามารถให้พลังงานได้อย่างเต็มที่ ซึ่งพบว่าผลการศึกษานี้สอดคล้องการศึกษาของ Chaiwong และคณะ [7] ที่ได้รายงานว่าการป้อนอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงในเตาแก๊สซิฟิเคอร์ โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอากาศ อุณหภูมิภายในเตาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้ความเร็วอากาศป้อนที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญ โดยสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นสูง อาจจำเป็นต้องใช้ความเร็วอากาศที่ต่ำลงเพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 อิทธิพลของความชื้นของชีวมวลอัดเม็ดที่มีต่ออุณหภูมิเปลวไฟ

อุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จากการลุกไหม้จากเตาแก๊สซิฟิเคอร์ ที่ระดับความเร็วอากาศป้อนเท่ากับ 7.4 9.4 และ 11.4 m/s เมื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีความชื้นทั้ง 3 ระดับที่ 4 6 และ 8% w.b. แสดงใน Figure 6 ถึง 8 จากผลการทดลองพบว่า ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมีผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการลุกไหม้และอุณหภูมิเปลวไฟของเตาแก๊สซิฟิเคอร์

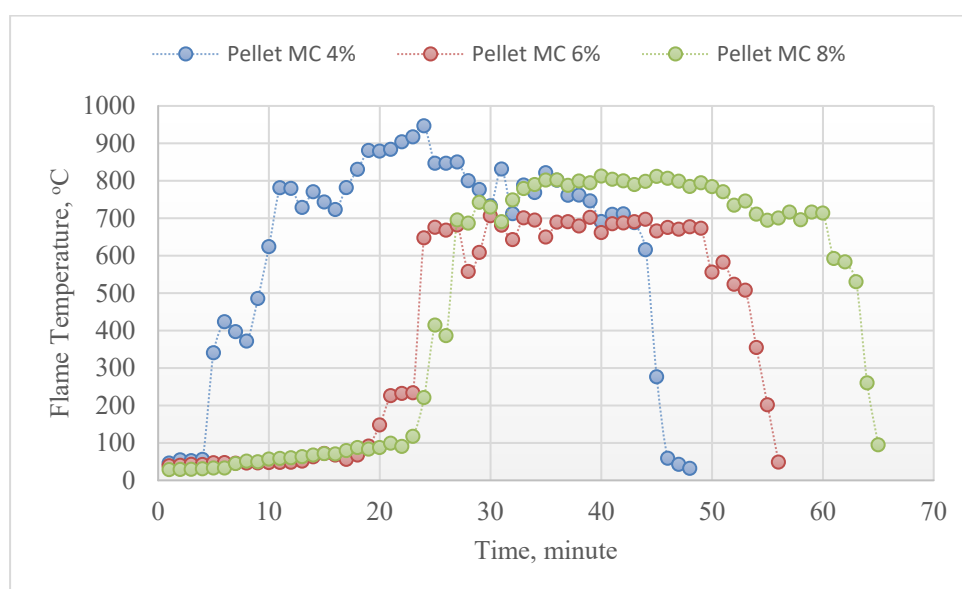


Figure 6 Flame temperature at air feeding velocity 7.4 m/s for 3 levels of biomass pellet moisture content.

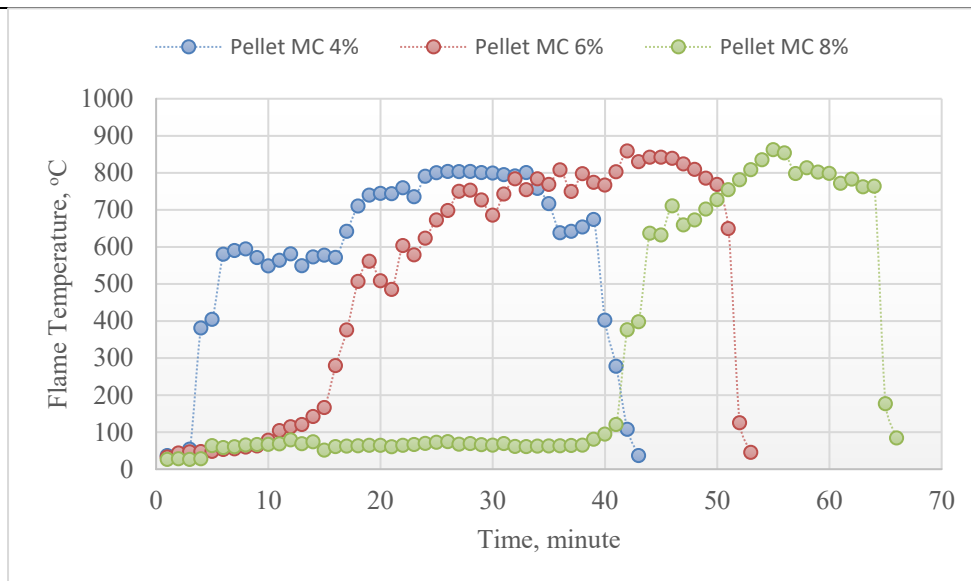


Figure 7 Flame temperature at air feeding velocity 9.4 m/s for 3 levels of biomass pellet moisture content.

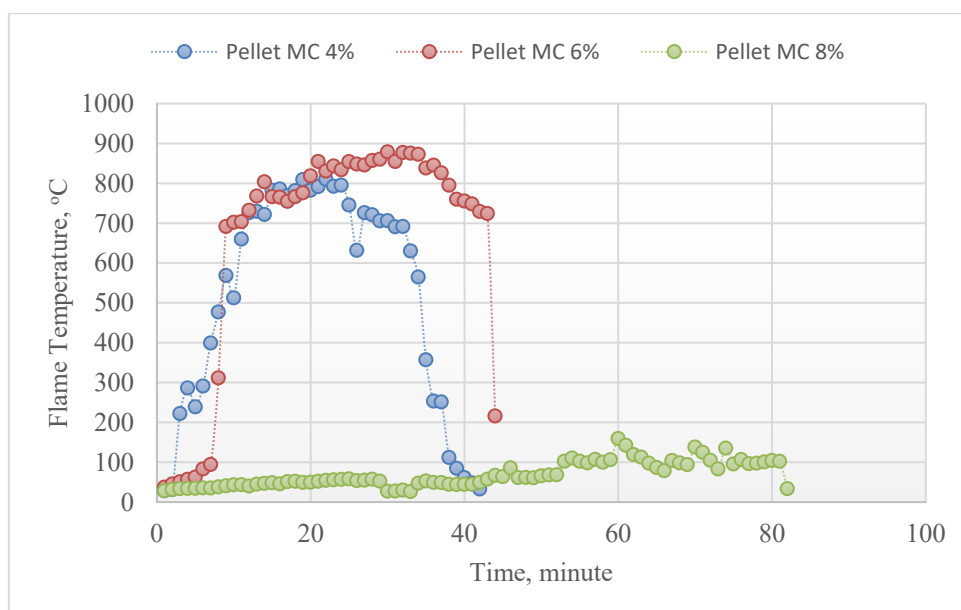


Figure 8 Flame temperature at air feeding velocity 11.4 m/s for 3 levels of biomass pellet moisture content.

จาก Figure 6 พบว่าเมื่อใช้ชีวมวลอัดเม็ดที่มีความชื้นต่ำที่สุด (4%w.b.) เชื้อเพลิงจะลุกไหม้เร็วที่สุดและให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงที่สุด เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงกว่า อย่างไรก็ตามอุณหภูมิเปลวไฟของเชื้อเพลิงที่มีความชื้น 4%w.b. มีความผันผวนสูง ซึ่งความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิเปลวไฟเมื่อใช้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำ (4%w.b.) อาจเกิดจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความชื้นที่สูงขึ้นพบว่าที่ความชื้น 6%w.b. และ 8%w.b. การเผาไหม้มีแนวโน้มที่จะเสถียรมากกว่า แต่ให้ค่าอุณหภูมิเปลวไฟที่ต่ำกว่า โดยลำดับของอุณหภูมิเปลวไฟจากสูงไปต่ำคือ 4% > 8% > 6%w.b. โดยอุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดเท่ากับ 946.5°C ที่ความชื้นของเชื้อเพลิง 4%w.b.

แต่เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศป้อนเป็น 9.4 m/s ซึ่งได้ผลการทดลองดัง Figure 7 นั้นพบว่าเชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำที่สุด (4%w.b.) ยังคงเป็นเชื้อเพลิงที่ลุกไหม้เร็วที่สุด และอัตราการลุกไหม้จะลดลงเมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิเปลวไฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่แตกต่างจากที่พบในระดับความเร็วอากาศป้อนต่ำ อาจเป็นผลจากการที่ความชื้นที่สูงขึ้นสามารถช่วยลดการเกิดการเผาไหม้ที่รุนแรงเกินไป ทำให้เกิดการกระจายพลังงานความร้อนที่สม่ำเสมอมากขึ้น ที่ระดับความชื้นสูงสุด (8%w.b.) แม้ว่าอุณหภูมิเปลวไฟจะสูงขึ้น โดยสูงถึง 862.4°C แต่กลับให้ระยะเวลาในการลุกไหม้ที่สั้นที่สุด ซึ่งอาจเกิดจากการที่พลังงานจำนวนมากถูกใช้ในการระเหยน้ำ ส่งผลให้เชื้อเพลิงหมดเร็วกว่ากรณีที่มีความชื้นต่ำกว่า

และเมื่อปรับให้ความเร็วอากาศป้อนมีค่าสูงสุด 11.4 m/s จาก Figure 8 พบว่าพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีความชื้น 4%w.b. และ 6%w.b. ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยเฉพาะในด้านของความเร็วในการลุกไหม้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอุณหภูมิเปลวไฟและระยะเวลาในการลุกไหม้ พบว่าเชื้อเพลิงที่มีความชื้น 6%w.b. ให้อุณหภูมิเปลวไฟที่สูงกว่า โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 878.9°C และติดไฟได้นานกว่าเชื้อเพลิงที่มีความชื้น 4%w.b. สำหรับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงสุด (8%w.b.) การลุกไหม้เกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์และไม่มีการลุกไหม้ที่เด่นชัด ซึ่งอาจเกิดจากการที่ปริมาณความชื้นที่สูงเกินไปผนวกกับความเร็วอากาศป้อนที่สูง ส่งผลให้พลังงานความร้อนถูกใช้ไปในการระเหยน้ำมากกว่าที่จะนำไปใช้ในการสลายตัวของชีวมวล และมีการระบายความร้อนอย่างรวดเร็วเกินไปเนื่องจากความเร็วอากาศป้อนที่สูง หรืออาจกล่าวได้ว่าการลุกไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง (8%w.b.) โดยเฉพาะที่ความเร็วอากาศป้อนสูงสุด (11.4 m/s) อาจเป็นเพราะอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงทำให้ความร้อนที่จำเป็นสำหรับการสลายตัวของชีวมวลถูกระบายออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้กระบวนการไพโรไลซิสเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ ซึ่งผลการศึกษานี้มีแนวโน้มการศึกษาเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Khamkhong และคณะ [8] ซึ่งพบว่าความชื้นของชีวมวลมีผลต่อประสิทธิภาพการเกิดแก๊สเชื้อเพลิง โดยความชื้นที่สูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการเกิดแก๊สลดลง

3.3 ประสิทธิภาพการทำงานของเตาแก๊สซิฟิเคชัน

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเตาแก๊สซิฟิเคชันนั้นสามารถดูได้จากค่า อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง, FCR อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ, SGR และอัตราการเผาไหม้ (Combustion Zone Rate; CZR) จากการทดสอบแบบ WBT แสดงดัง Table 1

Table 1 Analysis of biomass gasifier performance.

Biomass pellet moisture content (%wb.)	Air feeding velocity (m/s)	FCR (kg/h)	SGR (kg/m ² -h)	CZR (m/h)
4	7.4	4.06	64.33	0.27
	9.4	4.29	67.86	0.29
	11.4	4.58	72.52	0.31
6	7.4	3.14	49.66	0.21
	9.4	3.36	53.17	0.22
	11.4	4.18	72.84	0.28
8	7.4	2.86	45.22	0.19
	9.4	2.39	37.77	0.16
	11.4	2.23	35.37	0.15

จาก Table 1 ซึ่งแสดงค่าประสิทธิภาพการทำงานของเตาแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าเมื่อความเร็วอากาศป้อนเพิ่มขึ้น ค่า FCR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกระดับความชื้นของเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามที่ความชื้น 8% ค่า FCR มีแนวโน้มลดลง โดยที่ 11.4 m/s ค่า FCR ต่ำสุดอยู่ที่ 2.23 kg/h สาเหตุของแนวโน้มนี้อาจเกิดจากการที่เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อระเหยน้ำ ส่งผลให้กระบวนการไพโรไลซิสและการเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดขึ้นได้น้อยลง ส่วนค่า SGR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วอากาศป้อน

เพิ่มขึ้น แต่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และที่ความชื้น 8%w.b. ค่า SGR ลดลงอย่างมาก โดยที่ 11.4 m/s มีค่าเพียง 35.37 kg/m²·h แนวโน้มนี้แสดงให้เห็นว่าเตาแก๊สซิฟิเคชันมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นแก๊สสูงสุดเมื่อใช้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำ (4%w.b.) และความเร็วอากาศป้อนสูง ในขณะที่เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงมีประสิทธิภาพลดลงอย่างมาก และเมื่อพิจารณาค่า CZR พบว่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศป้อน แต่ลดลงเมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และที่ความชื้น 8%w.b. ค่า CZR ลดลงอย่างชัดเจน โดยที่ 11.4 m/s มีค่าเพียง 0.15 m/h ซึ่งค่าที่ลดลงแสดงให้เห็นว่าเมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น กระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นได้ยากขึ้น และส่งผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานลดลง

เมื่อพิจารณาภาพโดยรวมพบว่า การเพิ่มความเร็วจานอากาศป้อนมีแนวโน้มทำให้ค่า FCR, SGR และ CZR เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าเตาได้มีการใช้เชื้อเพลิงและผลิตแก๊สในอัตราที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงสูงขึ้น ผลของความเร็วอากาศป้อนที่มากขึ้นไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ แต่กลับทำให้ค่าต่างๆ ลดลง แสดงให้เห็นว่าความเร็วอากาศที่สูงอาจไม่สามารถแก้ปัญหาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงได้ เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง ต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการระเหยน้ำก่อนที่จะสามารถเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ ทำให้ค่า FCR, SGR และ CZR ลดลง และสำหรับเชื้อเพลิงที่มีความชื้น 4%w.b. และ 6%w.b. เตามีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี แต่สำหรับความชื้น 8%w.b. ประสิทธิภาพลดลงอย่างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเตาแก๊สซิฟิเคชันที่ออกแบบมานี้ เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำมากกว่า

4. สรุป

การศึกษานี้มุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของความเร็วอากาศป้อน (7.4, 9.4 และ 11.4 m/s) และ ความชื้นของชีวมวลอัดเม็ด (4, 6 และ 8%w.b.) ที่มีต่ออุณหภูมิเปลวไฟและประสิทธิภาพการทำงานของเตาแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลขึ้น โดยใช้ WBT ในการประเมินผลการดำเนินงานของเตา พบว่าการเพิ่มความเร็วจานอากาศป้อนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาได้ในระดับหนึ่ง แต่จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำ (4-6%w.b.) สำหรับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง (8%w.b.) แม้ว่าจะเพิ่มความเร็วจานอากาศป้อน แต่ประสิทธิภาพก็ยังลดลง เนื่องจากพลังงานจำนวนมากถูกใช้ในการระเหยน้ำ จากผลการทดลองที่ได้จากการศึกษานี้พบว่าที่ความเร็วอากาศป้อนที่ 7.4 เมตรต่อวินาที และความชื้นชีวมวลอัดเม็ด 4%w.b. เหมาะแก่การนำไปใช้กับเตาแก๊สซิฟิเคชันสำหรับใช้ในครัวเรือนโดยใช้ไม้ยางพาราอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง โดยมีอุณหภูมิของเปลวไฟสูงสุดถึง 946.5°C เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบนี้นี้เหมาะกับการใช้งานร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีความชื้นต่ำ และอาจต้องมีการพัฒนาต่อไปเพื่อให้รองรับการใช้งานกับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร เขตอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ที่สนับสนุนอุปกรณ์ในการทดลอง พื้นที่การทดลอง และสาธารณูปโภคต่างๆ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sharma, A., Kumar, P., & Gupta, R. (2020). "Effect of Biomass Type and Airflow Rate on Flame Temperature in Gasifier Stoves." *Renewable Energy Journal*, 145, 1203-1212.
- [2] Xiao, H., Li, Y., & Wang, X. (2019). "Optimization of Updraft Gasifier Airflow for Efficient Biomass Gasification." *Energy Conversion and Management*, 178, 587-599.
- [3] Patel, D., Joshi, R., & Mehta, K. (2018). "Influence of Biomass Moisture on Syngas Composition in Gasification Process." *Biomass and Bioenergy*, 112, 78-86.
- [4] Mukunda, H. S., Dasappa, S., & Paul, P. J. (2017). "Performance Evaluation of Gasifier Stoves Using Water Boiling Test (WBT)." *Applied Energy*, 195, 315-324.
- [5] วรณัฐ แจ้งสว่าง. 2556. เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่1. พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ.2537. โรงพิมพ์ บริษัท แดเน็กซ์ อินเทอร์เน็ตปอร์เซชั่นจำกัด. กรุงเทพมหานคร.

-
- [6] วิโรจน์ ไชยสมทิพย์, สมศักดิ์ ตั้งวิไล และอภินันต์ เสริมสิริตระกูล. 2557. การสร้างเตาแก๊สซีฟเออร์ควบคู่กับเตาชีวมวลระดับครัวเรือน. ปรินญาณิพนธ์หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.
- [7] Chaiwong, K., Wichan, N., Santaweek, A., Chaisomtip, W., Tungwilai, S., & Sermsirikul, A. (2015). การวิเคราะห์สมรรถนะของเตาแก๊สซีฟเออร์ควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพระดับครัวเรือน. *Engineering Journal of Chiang Mai University*, 24(1), 100-109.
- [8] Khamkhong, K., & Chomphoo, S. (2011). การประเมินสมรรถนะของเครื่องแก๊สซีฟเออร์แบบไหลลงเพื่อผลิตเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร. *Proceedings of the 8th TREC Conference*

การทอรีแฟคชันกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันเพื่อการผลิตถ่านชีวภาพ Torrefaction of Sewage Sludge from Palm Oil Industries for Biochar Production

สุธาเทพ ลือชัย¹ ชมพูนุช กุลเกตวงศ์¹ และ วรราชชล วัฒนนะ^{1,*}

Suthathep Leuchai¹, Chompoonud Kulketwong¹ and Wassachol Wattana^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

¹Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

*Corresponding author: Wassachol Wattana, e-mail address: Wassachol.wat@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction) เพื่อผลิตถ่านชีวภาพที่มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับเป็นถ่านชีวภาพ การทดลองใช้กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม 3 แห่งในจังหวัดชุมพร เริ่มจากการลดความชื้นของกากตะกอนโดยการตากแดดเป็นเวลา 3-7 วัน จนมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 15-20 %w.b. จากนั้นทำการคัดแยกขนาดเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1 mm, 4 mm และ 8 mm ก่อนนำไปผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ความดัน 1 บาร์ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 200, 250, 300 และ 350 °C อัตราการไหลของไนโตรเจน 10 ลิตร/ชั่วโมง เป็นเวลา 15 นาที และดำเนินการทอรีแฟคชันเป็นเวลา 45 นาที ผลการวิเคราะห์พบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยลดความชื้นและปริมาณสารระเหย แต่เพิ่มปริมาณซีเถ้า ขนาดอนุภาคของกากตะกอนมีผลต่อการกระจายความร้อนและอัตราการสลายตัวของสารอินทรีย์ โดยอนุภาคขนาดเล็ก (1 mm) มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ส่งผลให้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่าที่อุณหภูมิ 200 °C ถ่านชีวภาพที่ได้มีสมบัติที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้เป็นถ่านชีวภาพ เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ค่าความร้อนสูง และมีปริมาณซีเถ้าต่ำกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทอรีแฟคชันสามารถปรับปรุงสมบัติของกากตะกอนน้ำเสียให้เป็นถ่านชีวภาพได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลชนิดอื่น ถ่านชีวภาพที่ได้ยังคงมีปริมาณซีเถ้าสูง ซึ่งอาจเป็นปัจจัยจำกัดในการนำไปใช้งาน ดังนั้น ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพของถ่านชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสีย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมและลดของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม

คำสำคัญ: กากตะกอนน้ำเสีย, การทอรีแฟคชัน, องค์ประกอบโดยประมาณ

Abstract

This study aims to enhance the value of palm oil mill wastewater sludge through torrefaction to produce biochar with suitable properties for use as a biofuel. Wastewater sludge from three palm oil mills in Chumphon province was used in the experiment. The process began with sun-drying the sludge for 3-7 days until the initial moisture content reached 15-20% w.b. The dried sludge was then sieved into three particle sizes: 1 mm, 4 mm, and 8 mm. Torrefaction was performed under a nitrogen atmosphere at a pressure of 1 bar, with controlled temperatures of 200, 250, 300, and 350°C. The nitrogen flow rate was set at 10 L/h for 15 minutes, and the torrefaction process was conducted for 45 minutes. The results showed that higher torrefaction temperatures led to lower moisture and volatile matter content but increased ash content. The particle size affected heat distribution and the decomposition rate of organic matter. Smaller particles (1 mm) exhibited better heat transfer, resulting in higher fixed carbon content and heating values. However, it was found that at 200°C, the produced biochar had the most favorable properties for use as a biofuel, with high fixed carbon content, high heating value, and lower ash content compared to higher temperatures. This study demonstrates that torrefaction can improve the properties of wastewater sludge for biofuel applications. However, when compared to other biomass fuels, the resulting biochar still has a relatively high ash content, which may limit its practical applications. Further research should focus on improving biochar quality to enhance its industrial usability and reduce waste from the palm oil production process.

Keywords: Sewage Sludge, Torrefaction Process, Proximate Analysis

1. บทนำ

อุตสาหกรรมอาหารเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักที่ขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทย โดยอาศัยการแปรรูปวัตถุดิบทางการเกษตรเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม [1] อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมเหล่านี้ยังสร้างของเสียที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ในจังหวัดชุมพร ซึ่งเป็นแหล่งเพาะปลูกปาล์มน้ำมันเพื่อนำไปแปรรูปในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มส่งผลให้เกิดกากตะกอนจากน้ำเสีย ซึ่งเป็นของเสียที่กำจัดได้ยาก และมักถูกนำไปฝังกลบหรือทิ้งลงแหล่งน้ำ กากตะกอนเหล่านี้อาจปนเปื้อนโลหะหนัก สารพิษ และสารไดออกซิน ซึ่งก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ [2] แม้ว่ามีความพยายามในการนำกากตะกอนมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตร แต่การใช้โดยตรงอาจเสี่ยงต่อการแพร่กระจายของเชื้อโรคสู่พืชผล [3] เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวและเพิ่มมูลค่าให้กับกากตะกอนน้ำเสีย งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำกากตะกอนจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มมาผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction) ซึ่งเป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลด้วยความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 200–350°C ในสภาวะไร้ออกซิเจน กระบวนการนี้ช่วยปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของชีวมวล เช่น ลดความชื้น เพิ่มสัดส่วนคาร์บอน และเพิ่มค่าความร้อน ซึ่งส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพดีขึ้นและสามารถใช้เป็นถ่านชีวภาพได้ [4]

กากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปปาล์มน้ำมัน โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ และแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพหรือเชื้อเพลิงชีวมวลได้ [5] อย่างไรก็ตามของเสียเหล่านี้ยังมีโลหะหนักและสารประกอบที่เป็นพิษ เช่น โครเมียม ตะกั่ว และสารไดออกซิน ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพหากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม [3] กระบวนการทอรีแฟคชันเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่ชีวมวลภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิระหว่าง 200–350°C ซึ่งช่วยลดความชื้น และเพิ่มค่าพลังงานของวัสดุ โดย Medic และคณะ [4] พบว่าการทอรีแฟคชันสามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงตัว และลดปริมาณสารระเหย ส่งผลให้ถ่านชีวภาพที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหิน [5] นอกจากนี้งานวิจัยของ Wannapeera และคณะ [6] ยังชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลโดยตรงต่อปริมาณเชื้อเพลิงและค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลที่ใช้ ดังนั้น การกำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกากตะกอนน้ำเสียจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของถ่านชีวภาพ การศึกษาโดย Akinpelumi และคณะ [3] ได้เปรียบเทียบสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียกับเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทอื่น ๆ เช่น กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว และไม้ยางพารา พบว่ากากตะกอนน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันมีค่าความร้อนสูงขึ้น แต่ยังมีปริมาณเชื้อเพลิงสูงกว่าชีวมวลประเภทอื่น ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน

การศึกษานี้จึงใช้กากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มจำนวน 3 บริษัทในจังหวัดชุมพร มาทำการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 200, 250, 300 และ 350 °C เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่ได้มีการทดสอบเบื้องต้นมาแล้วได้ลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพ และทำการศึกษากำหนดให้กากตะกอนน้ำเสียมีขนาด 1.4 และ 8 mm จากนั้นนำมาศึกษาสมบัติของถ่านชีวภาพที่ได้ โดยวิเคราะห์ค่าความร้อน ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว เพื่อตรวจสอบศักยภาพของถ่านชีวภาพในการเป็นแหล่งพลังงานทดแทน ซึ่งสามารถนำไปใช้ในครัวเรือนและอุตสาหกรรมต่อไป นอกจากนี้ ยังเป็นแนวทางในการลดปัญหาของเสียอุตสาหกรรม และส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากของเสียเพื่อสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมในอนาคต

2. วิธีการศึกษา

2.1 เตาปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการทอรีแฟคชัน

การผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นจำเป็นต้องใช้เตาปฏิกรณ์ที่สามารถให้ปริมาณความร้อนที่มีทำให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้กับกระบวนการทอรีแฟคชัน เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในปัจจุบันจะเป็นเตาปฏิกรณ์ ที่เป็นระบบปิดที่ไร้ซึ่งก๊าซออกซิเจน สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการได้ ดังนั้นการศึกษานี้สร้างเตาปฏิกรณ์และองค์ประกอบอื่นที่จำเป็น เพื่อให้ในการทอรีแฟคชันดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้ 1-ก๊าซไนโตรเจนใช้เป็นก๊าซตัวพาและไล่อากาศออกจากเตา 2-ตู้ควบคุม 3-จอแสดงอุณหภูมิ (Temperature display) ใช้แสดงค่าอุณหภูมิที่ได้จากเซนเซอร์ 4-โรตามิเตอร์ (Rotameter) ใช้ควบคุมการไหลของก๊าซไนโตรเจน 5-Pressure regulator ใช้ปรับความดันของไนโตรเจนไหลให้ไหลผ่านเข้าทางด้านล่างของตัวเตา 6-เตาปฏิกรณ์ (Reactor) เป็นเตาชั้นในมีหน้าที่บรรจุตัวอย่างในบรรยากาศไนโตรเจน และได้รับความร้อนจากเตาชั้นนอกที่หุ้มอยู่ 7-เตาชั้นนอกเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่เตาชั้นในโดยใช้ขดลวดความร้อนและ

ผิวนอกหุ้มฉนวนในการป้องกันความร้อนไม่ให้ความร้อนสูญเสียออกสู่บรรยากาศมากเกินไปฉนวนกันความร้อนมีสองชนิดคือ อิฐมวลเบาและใยแก้ว 8-เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple type K) ใช้วัดอุณหภูมิภายในเตา

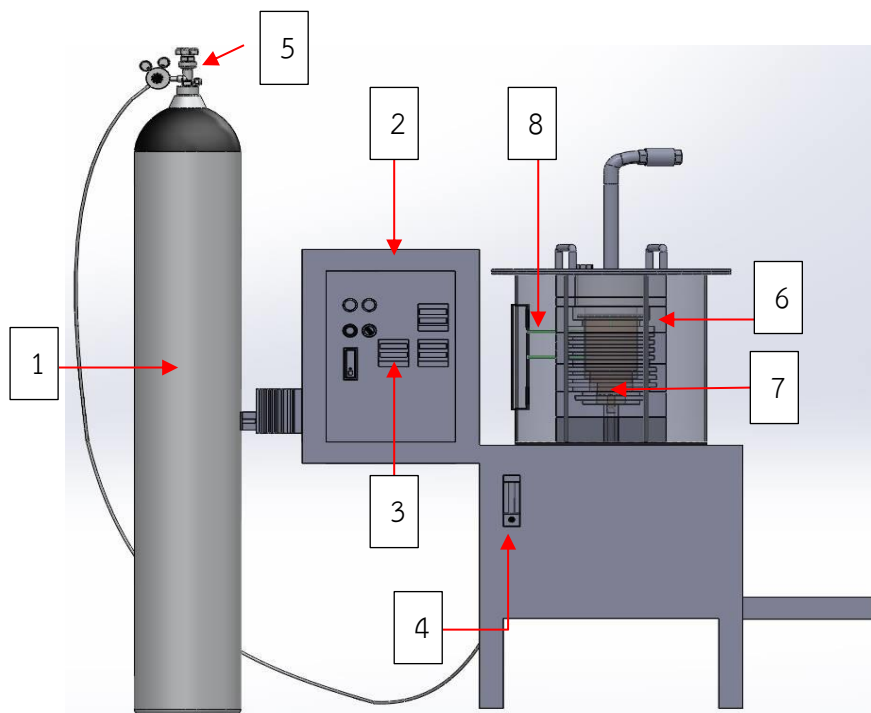


Figure 1 Schematic of torrefaction reactor and components

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

1. นำกากตะกอนน้ำเสียที่ได้จัดเตรียมไว้มาหาค่าความชื้นเริ่มต้น โดยนำตัวอย่างกากตะกอนน้ำเสียมาชั่งน้ำหนักก่อน และนำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกจากตู้อบและชั่งน้ำหนักอีกครั้งตามมาตรฐาน ASTM D3172

2. ทำการลดความชื้นของกากตะกอนน้ำเสียให้มีค่าความชื้นในช่วง 15-20 %w.b. โดยใช้วิธีการตากแดดประมาณ 3-7 วัน เพื่อลดความชื้น กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มทั้งสามบริษัทจะมีค่าความชื้นเริ่มต้นอยู่ในที่ 80-100 %w.b. ลักษณะทางกายภาพของกากตะกอนน้ำเสียจะแบ่งเป็นสองลักษณะเป็นน้ำและเป็นก้อน ซึ่งบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 3 ตากลดความชื้นประมาณ 2-3 วัน บริษัทที่ 2 ตากลดความชื้น 5-7 วัน (ในการตากลดความชื้นก็จะขึ้นอยู่กับปริมาณของแดดแต่ละวัน)

3. แยกขนาดของวัตถุดิบด้วย เครื่องแยกคัดแยกขนาดของอนุภาคด้วยตะแกรงร่อนแต่ละขนาด (Shieve shaker) รุ่น A5 200 เพื่อแยกขนาดของอนุภาคตัวอย่างกากตะกอนน้ำเสียให้ได้ขนาด 1 mm, 4 mm และ 8 mm

4. เตรียมตัวอย่างกากตะกอนน้ำเสียทั้งสามขนาดคือ 1 mm, 4 mm และ 8 mm โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างกากตะกอนน้ำเสียปริมาณ 3 กรัมด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลสำหรับนำไปผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันต่อไป

5. จัดเก็บตัวอย่างกากตะกอนน้ำเสีย โดยแยกขนาดและแยกบริษัทเก็บไว้ในถุงซิปล็อคและแช่ไว้ในตู้เย็นเพื่อรักษาความชื้นของถ่านชีวภาพไว้ เพื่อนำไปทำการทอรีแฟคชันต่อไป

2.2.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองการผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการทอรีแฟคชันกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม โดยใช้เตาที่สร้างขึ้นมาดังแสดงดังใน Figure 1 เป็นอุปกรณ์หลักและใช้อุณหภูมิสำหรับการทอรีแฟคชันที่ 200, 250, 300 และ 350 °C

1. เปิดฝาเตาปฏิกรณ์นำอากาศก่อนน้ำเสียทั้งสามขนาดคือขนาด 1 mm 4 mm และ 8 mm ที่มีน้ำหนักแต่ละขนาด 3 กรัม ใส่ลงภายในเตาและปิดฝาเตาปฏิกรณ์
2. เปิดวาล์วปล่อยก๊าซไนโตรเจนโดยปรับความดันให้ได้ 1 bar และปรับอัตราการไหลเป็น 10 ลิตร/ชั่วโมง ที่ โดยใช้ Rotameter และเปิดเป็นระยะเวลา 15 นาทีเพื่อไล่อากาศออกจากเตาปฏิกรณ์
3. ตั้งอุณหภูมิที่ต้องการใช้ในการทดลองโดยใช้ Temperature controller
4. กดปุ่มเริ่มการทำงานที่ตู้ควบคุม
5. เมื่ออุณหภูมิถึงช่วงที่กำหนดทำการจับเวลา 45 นาที แล้วทำการบันทึกผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์โดยจะบันทึกผลการกระจายตัวของอุณหภูมิทุกๆ 5 นาที จนถึง 45 นาที
6. กดปุ่มหยุดทำงานที่ตู้ควบคุมเพื่อหยุดการทำงานของขดลวดให้ความร้อน (Heater)
7. รอให้อุณหภูมิภายในเตาตกลงซึ่งใช้เวลาประมาณ 5 ถึง 8 ชั่วโมงแล้วจึงเปิดฝาเตาปฏิกรณ์แล้วนำผลิตภัณฑ์ผ่านชีวภาพออกมา
8. นำตัวอย่างออกมาวิเคราะห์ผล

2.3 วิธีการทดสอบสมบัติของถ่านชีวภาพ

1. การหาค่าความชื้น ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3173 โดยตัวอย่างจะถูกเผาให้ความร้อนคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 104 ถึง 110 °C เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกจากตัวอย่างปริมาณความชื้นของตัวอย่างที่ลดลง
2. การหาค่าความร้อนสูง ค่าความร้อนของตัวอย่างสามารถวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 4809 โดยการเผาตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอนใน Bomb calorimeter (C1, IKA) ค่าความร้อนที่ได้รับจาก Bomb calorimeter คือค่าความร้อนสูง (HHV) โดยเป็นปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยอากาศ (Combustion) ของชีวมวลแต่ละชนิด โดยทั่วไปค่าความร้อนจะแสดงในรูปของปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักหรือหนึ่งหน่วยปริมาตร
3. การหาปริมาณซีเถ้า ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3174 โดยที่ตัวอย่างจะถูกเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วคำนวณหาปริมาณเถ้าจากน้ำหนักตัวอย่างที่เหลืออยู่ภายหลังการเผาเสร็จสิ้น
4. การหาปริมาณสารระเหย ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3175 โดยตัวอย่างจะถูกเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 ± 20 °C เป็นเวลา 7 นาที แล้วคำนวณปริมาณสารระเหยจากน้ำหนักตัวอย่างที่ลดลง
5. การหาปริมาณคาร์บอนคงตัว ทำการคำนวณหาปริมาณคาร์บอนคงตัวได้จากมาตรฐาน ASTM D3176 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว (\%)} = 100 - (\% \text{ ความชื้น} + \% \text{ เถ้า} + \% \text{ สารระเหย}) \quad (1)$$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

จากการนำเอาอากาศก่อนน้ำเสียจากโรงงานปาล์มน้ำมัน 3 บริษัท ภายในจังหวัดชุมพร มาผ่านกระบวนการทอรีแฟกชัน โดยศึกษาอิทธิพลของขนาดของอากาศก่อน 1 4 และ 8 mm และอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟกชัน 200, 250, 300 และ 350 °C โดยเก็บผลการทดลองจาก 3 ตัวอย่างและนำมาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำผลที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟกชันมาวิเคราะห์สมบัติทางด้านเชื้อเพลิง ดังนี้

3.1 ปริมาณความชื้น

จากผลการทดลองที่แสดงใน Figure 2 พบว่าปริมาณความชื้นของถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟกชันมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของกระบวนการทอรีแฟกชันที่ช่วยกำจัดความชื้นในวัสดุชีวมวล อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ขนาดของอากาศก่อนไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความชื้นสุดท้ายของถ่านชีวภาพ อย่างไรก็ตามพบว่ากรณีของ Company C ขนาด 1 mm ให้ค่าความชื้นที่แตกต่างจากแนวโน้มปกติ ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างทางกายภาพของอากาศก่อน ที่อาจมีความพรุนสูงกว่า ส่งผลให้สูญเสียความชื้นได้ง่ายกว่าอากาศก่อนจากโรงงานอื่นหรือระยะเวลาการตากแดดที่นานกว่า หรือสภาพอากาศที่แตกต่างกันระหว่างแหล่งที่มา ทำให้ถ่านชีวภาพมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่ากรณีอื่น ๆ รวมทั้งขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า (1 mm) มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงกว่า ทำให้การถ่ายเทความชื้นมีประสิทธิภาพ

สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 350°C พบว่าปริมาณความชื้นของ Company C ขนาด 1 mm กลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการดูดซับความชื้นกลับคืนของโครงสร้างที่มีรูพรุนสูง หลังจากกระบวนการเย็นตัว หรือองค์ประกอบอินทรีย์ที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เอื้อต่อการกักเก็บความชื้น

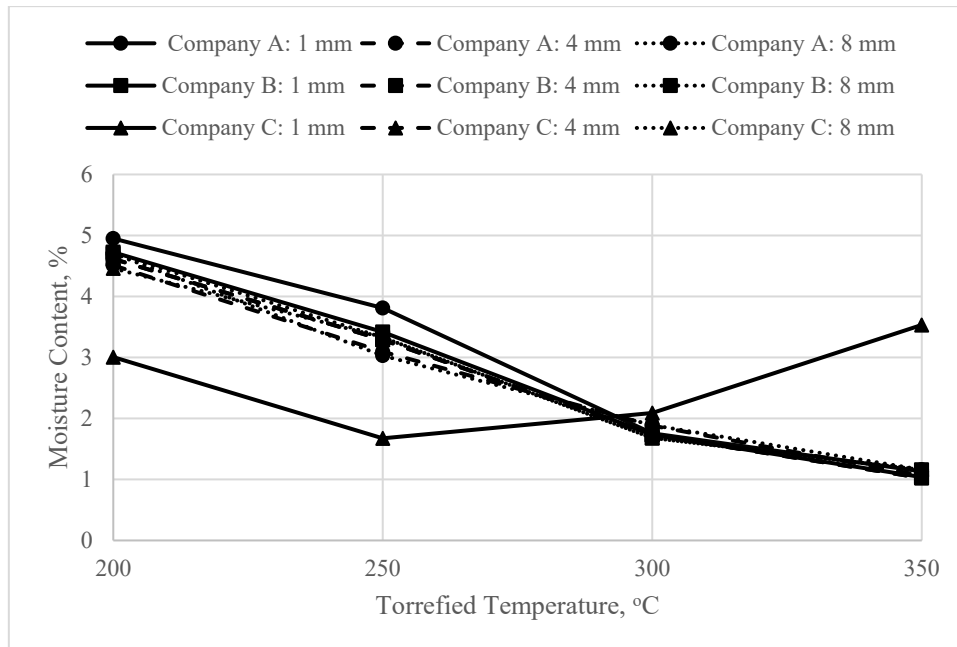


Figure 2 Moisture content of torrefied sewage sludge from three companies at different particle sizes.

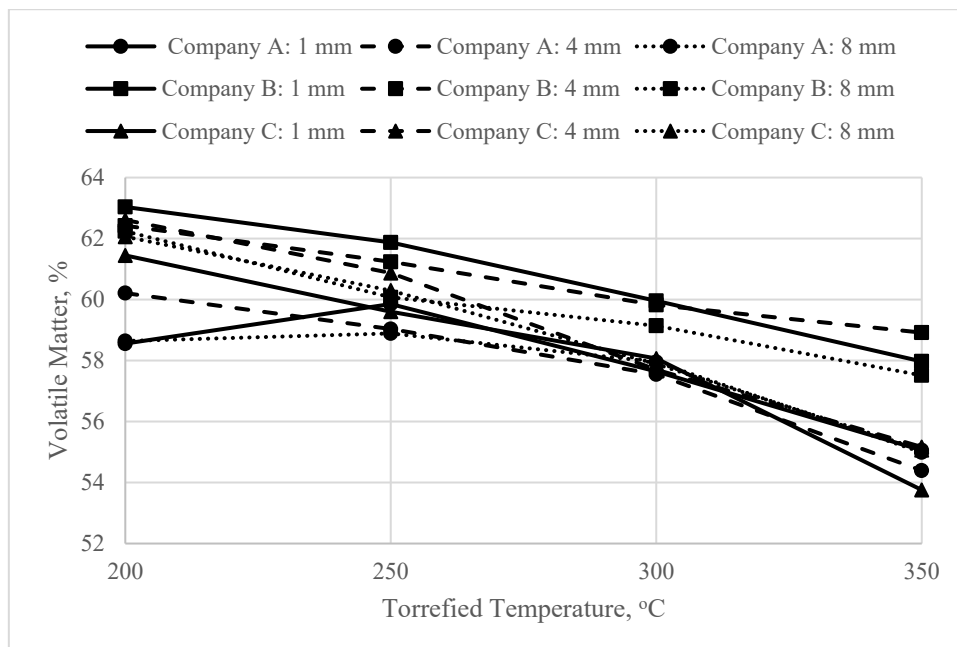


Figure 3 Volatile matter of torrefied sewage sludge from three companies at different particle sizes.

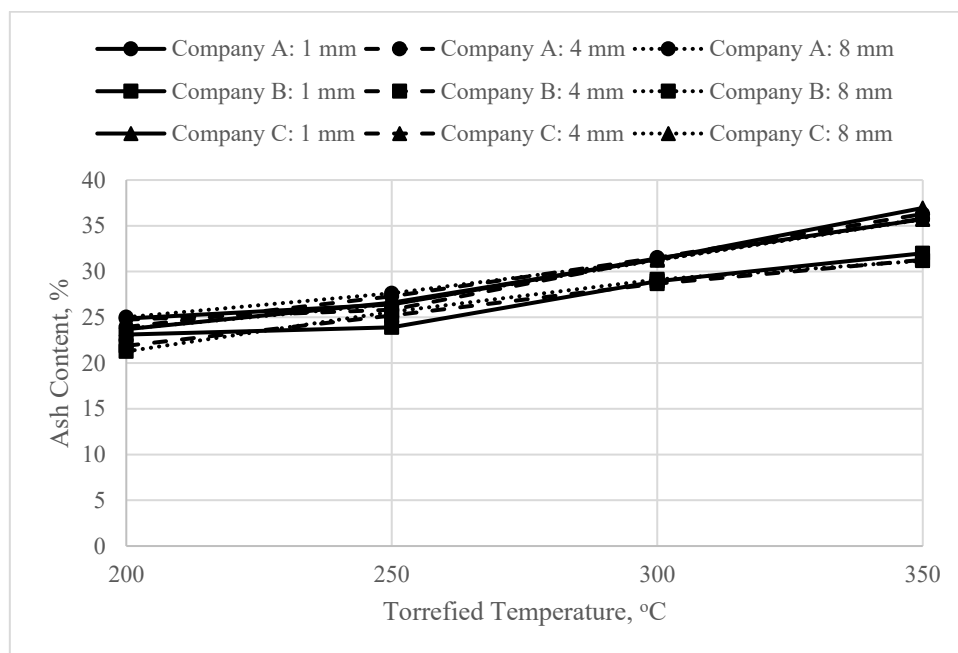
3.2 ปริมาณสารระเหย

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณสารระเหยลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นดังแสดงใน Figure 3 ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการไพโรไลซิสที่ทำให้สารอินทรีย์ที่ระเหยง่ายถูกกำจัดออกไป ขนาดอนุภาคของกากตะกอนมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในระหว่างกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยพบว่าอนุภาคขนาดเล็ก (1 mm) มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น ส่งผลให้การสลายตัวของสารระเหย

เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และรวดเร็ว ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่กว่า (4 mm และ 8 mm) มีแนวโน้มทำให้กระบวนการทอรีแฟคชันเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนไปยังแกนกลางของอนุภาคทำได้ยากขึ้น แม้ว่าภาพรวมจะแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารระเหยลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และแหล่งที่มาของกากตะกอนที่แตกต่างกันพบว่าแนวโน้มอาจแตกต่างกัน ซึ่งอาจเป็นผลจากองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันของวัตถุดิบตั้งต้น

3.3 ปริมาณเถ้า

สำหรับปริมาณเถ้าที่ได้นั้นจากผลการทดลองที่แสดงใน Figure 4 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่เหลือทิ้งไว้เฉพาะองค์ประกอบอินทรีย์ อย่างไรก็ตามอิทธิพลของขนาดกากตะกอนและแหล่งที่มาของกากตะกอนมีผลต่อปริมาณเถ้าได้น้อยกว่าอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชัน



รูปที่ 4 Ash content of torrefied sewage sludge from three companies at different particle sizes.

3.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ในส่วนของปริมาณคาร์บอนคงตัวพบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสังเกตได้จากผลการทดลองที่แสดงใน Figure 5 ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารระเหย กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สารระเหยลดลง ทำให้คาร์บอนคงตัวลดลงไปด้วย เช่นเดียวกับปริมาณเถ้า พบว่าอิทธิพลของขนาดกากตะกอนและแหล่งที่มาของกากตะกอนมีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวน้อยกว่าอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชัน

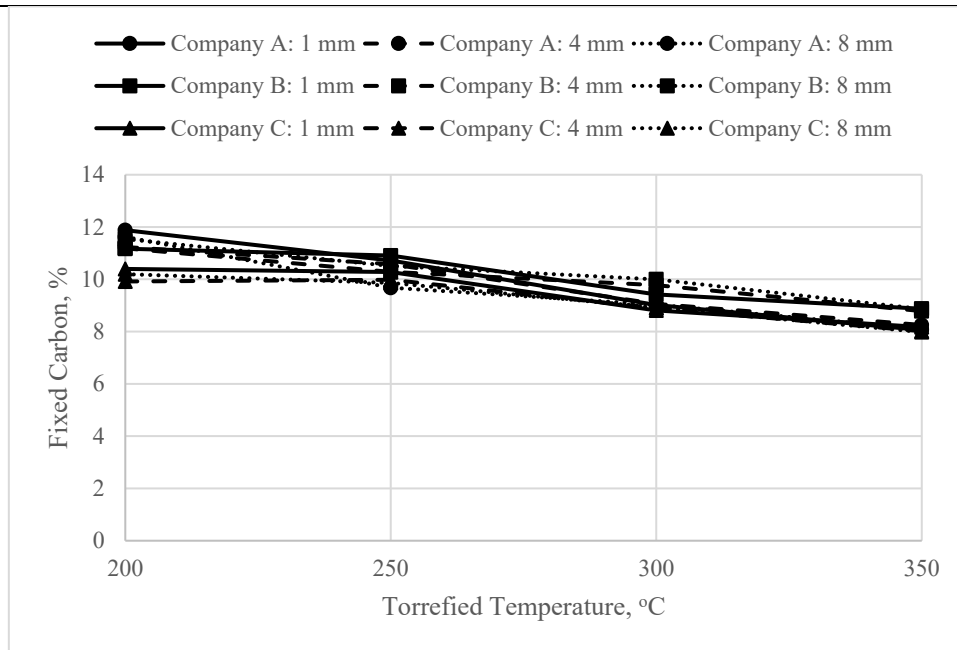


Figure 5 Fixed carbon of torrefied sewage sludge from three companies at different particle sizes.

3.5 ค่าความร้อนสูง

สำหรับสมบัติทางด้านศักยภาพทางด้านพลังงาน พิจารณาจากค่าความร้อนสูงซึ่งแสดงใน Figure 6 พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณคาร์บอนคงตัวลดลงและปริมาณสารระเหยเพิ่มขึ้น และจากปริมาณคาร์บอนคงตัวที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทอรรีฟเคชันเพิ่มขึ้น (ดังแสดงใน Figure 5) จึงทำให้ค่าพลังงานของถ่านชีวภาพลดลงในกระบวนการที่อุณหภูมิสูงขึ้น อิทธิพลของ ขนาดกากตะกอนและแหล่งที่มาของกากตะกอนมีผลต่อค่าความร้อนน้อยกว่าอุณหภูมิของกระบวนการ ซึ่งหมายความว่า การเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้

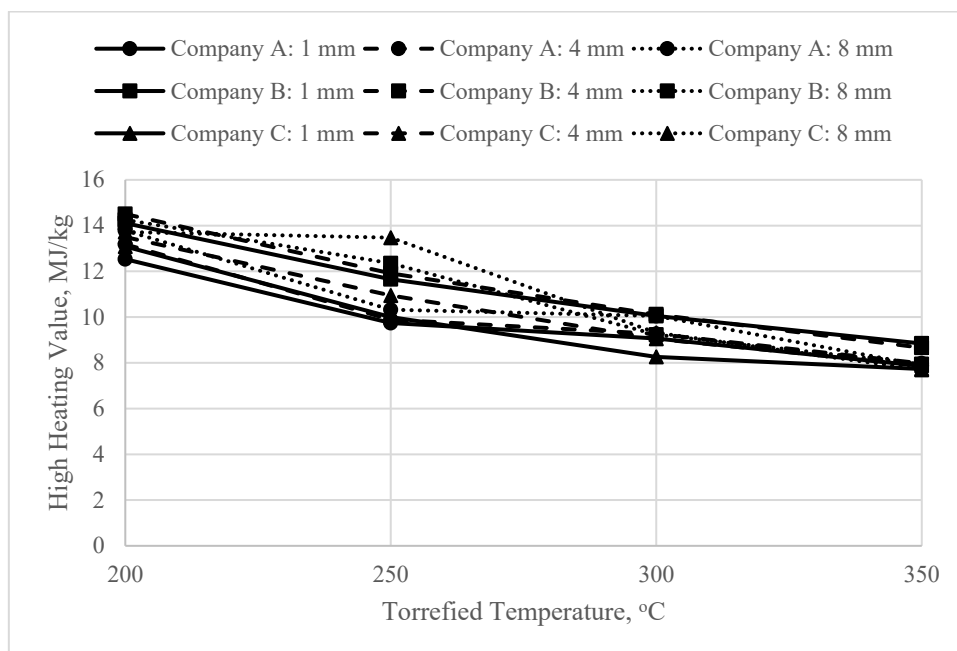


Figure 6 Higher Heating Value of torrefied sewage sludge from 3 companies at different particle sizes.

3.6 การเปรียบเทียบคุณภาพของถ่านชีวภาพ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำกากตะกอนน้ำเสียที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มาเปรียบเทียบกับสมบัติเบื้องต้นของถ่านชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียกับสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ภายในประเทศไทยดัง Table 1 เพื่อบ่งบอกความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มที่นำมาผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันและไม่ได้ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันมาใช้เป็นเชื้อเพลิงว่าสามารถนำไปใช้ประโยชน์จริง

Table 1 Proximate analysis and Higher Heating Value (HHV) of non-torrefied and torrefied sewage sludge from oil palm industries compare with biomass fuel in Thailand. [7-9]

Samples	Proximate Analysis as Received				HHV (MJ/kg)
	Moisture Content (%)	Ash content (%)	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)	
Oil palm kernel shell	13.00	1.30	64.55	21.05	21.223
Para-wood	3.94	4.54	16.00	73.52	29.012
Coconut shell	4.23	1.43	76.00	18.22	20.202
Oil palm trunk	48.80	1.20	38.70	11.70	7.500
Oil palm fiber	31.80	6.40	48.60	13.20	11.800
Wood	24.00	0.50	80.00	10.00	16.000
Sawdust	12.30	0.80	70.50	16.40	18.000
Non-torrefied sewage sludge					
Company 1	15.00-20.00	30.00 - 31.00	50.00	5.00-5.50	9.50-10.25
Company 2	15.00-20.00	26.00- 28.00	49.00 -51.00	5.90	10.15-12.50
Company 3	15.00-20.00	29.00- 31.00	46.00-45.00	5.20-5.40	9.12-11.20
Torrefied sewage sludge					
Company 1	1.00-5.00	24.00- 36.00	55.00-60.00	8.00-12.00	7.500 -14.000
Company 2	1.00-5.00	21.00- 32.00	57.00-62.00	8.50-11.00	8.500 -14.500
Company 3	1.00-5.00	23.00- 37.00	53.00-65.00	8.00-10.00	7.500-13.000

เมื่อพิจารณาจาก Table 1 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบสมบัติเบื้องต้นของถ่านชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียกับเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในประเทศไทย พบว่ากากตะกอนน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันมีค่าความชื้นต่ำกว่าชีวมวลประเภทอื่น ทำให้สามารถเก็บรักษาได้ง่ายกว่า ปริมาณซัลเฟอร์สูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทอื่น ซึ่งอาจเป็นอุปสรรคต่อการใช้งาน เนื่องจากทำให้เกิดของเสียจากการเผาไหม้มากขึ้น ปริมาณสารระเหยอยู่ในระดับปานกลาง ไม่สูงและไม่ต่ำจนเกินไป ปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำกว่าชีวมวลประเภทอื่น ซึ่งส่งผลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้ ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียยังต่ำกว่าชีวมวลทั่วไป เช่น กะลาปาล์มและไม้ยางพารา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพที่ได้ยังมีข้อจำกัดบางประการในการนำไปใช้งาน

4. สรุป

การศึกษานี้มุ่งเน้นการทอร์รีแฟคชันกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ โดยกำหนดขนาดตัวอย่างที่ใช้ทดลองเป็น 1 mm, 4 mm และ 8 mm ภายใต้อุณหภูมิการทอร์รีแฟคชันที่ 200, 250, 300 และ 350 °C ความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างอยู่ในช่วง 15-20 %w.b. จากการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพที่ได้ สามารถสรุปผลได้ดังนี้ จากการศึกษาพบว่า การนำกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานปาล์มน้ำมันมาผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันสามารถปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้เหมาะสมกับการเป็นถ่านชีวภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทอื่น พบว่าค่าความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ มีความสามารถในการเป็นเชื้อเพลิง แต่ค่าพลังงานยังต่ำกว่าชีวมวลทั่วไป ปริมาณซัลเฟอร์สูง อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ ดังนั้น หากต้องการพัฒนาให้กากตะกอนน้ำเสียเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงขึ้น ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ การปรับปรุงกระบวนการทอร์รีแฟคชัน หรือการผสมกับชีวมวลชนิดอื่น เพื่อเพิ่มค่าพลังงานและลดข้อจำกัดของวัสดุที่ได้ จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทอร์รีแฟคชันกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันเพื่อให้ได้ถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพสูงคือ 200 °C เนื่องจากให้ค่าความร้อนสูงสุด ปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ และมีปริมาณสารระเหยและคาร์บอนคงตัวที่เหมาะสมต่อการเป็นถ่านชีวภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร เขตอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ที่สนับสนุนอุปกรณ์ในการทดลอง พื้นที่การทดลอง และสาธารณูปโภคต่างๆ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Industrial Economics. (2021). *Industrial economic situation and trends in Thailand 2021*. Ministry of Industry, Thailand.
- [2] Usman, M., Razzaq, R., Khan, M. I., & Naqvi, S. R. (2023). Environmental impact of palm oil mill effluent (POME) and its potential for bioenergy production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 413, 137512.
- [3] Akinpelumi, K., Oboirien, B., & Engelbrecht, A. (2021). Torrefaction of biomass and waste materials: A comprehensive review. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101681.
- [4] Medic, D., Darr, M., Shah, A., Potter, B., & Zimmerman, J. (2012). Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. *Fuel*, 91(1), 147–154.
- [5] Yuliansyah, A., et al. (2019). Utilization of palm oil mill effluent sludge as biofertilizer and biomass fuel. *Energy Procedia*, 158, 182-187. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.182>
- [6] Wannapeera, J., Fungtammasan, B., & Worasuwannarak, N. (2011). Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 92(1), 99-105.
- [7] ปาจารย์ เตียวสุวรรณ. (2557). การศึกษาและออกแบบผลิตภัณฑ์ของตกแต่งตุ๊กตกลิ่นและความชื้นสำหรับใช้ภายในคอนโดมิเนียม โดยใช้คุณสมบัติของถ่านไม้. *ปริญาศิลปมหาบัณฑิต. ภาควิชาการออกแบบผลิตภัณฑ์, มหาวิทยาลัยศิลปากร*, 11-19.

-
- [8] นันทวุฒิ กังฉิน และ ธนาตล สันติธรรม. (2558). การเพิ่มค่าความร้อนให้ถ่านซีได้อย่างพารา. *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 6.
- [9] นาทยา เจริญสุข และ ธนฤต ภัทรเกษวิทย์. 2558. การออกแบบระบบการหมุนเวียนความร้อนที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ในกระบวนการรีดักชันสำหรับเตาแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง. *ปริญญานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล*

การออกแบบเซนเซอร์วัดแรงแบบวงแหวนแปดเหลี่ยมสำหรับวัดแรงตัดเฉือนของเครื่องกัด Design of the Octagonal Ring Force Sensor for Measuring Cutting Forces in Milling Machine

กนิษฐา เทียนศิริ¹ ดิษฐพร ตุงโสธานนท์¹ และ ชมพูนุช กุลเกตุวงศ์^{1,*}
Kanidtha Tieansiri¹, Dithaporn Thungsotanon¹ and Chompoonud Kulketwong^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

¹Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Chompoonud Kulketwong, e-mail address: chompoonud.ku@kmit.ac.th

บทคัดย่อ

แรงตัดเฉือนเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญในการประเมินการปรับแต่งวัสดุเพื่อใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน ลดการสึกหรอของเครื่องมือตัด และลดระยะเวลาการทำงาน บทความนี้นำเสนอวิธีการออกแบบเครื่องมือวัดแรงปฏิกิริยาชนิดวงแหวนแปดเหลี่ยมที่สามารถตรวจสอบแรงขณะกัดชิ้นงานได้ทั้งสามแกน ในตอนเริ่มต้นของการออกแบบได้ทำการประเมินมิติและตำแหน่งติดตั้งบนพื้นผิวของวงแหวนแปดเหลี่ยมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่าย เพื่อให้ได้รูปทรงของวัสดุอีลาสติคที่เหมาะสมก่อนนำไปขึ้นรูปและติดตั้งสเตรจเกจ หลังจากนั้นจึงนำทรานสดิวเซอร์ไปสอบเทียบแบบสถิตกับโหลดเซลล์มาตรฐาน พบว่าเซนเซอร์มีสภาพความเป็นเชิงเส้นสูงและค่าความผิดพลาดต่ำ สามารถวัดแรงทั้ง 3 แนวแกน (F_x , F_y และ F_z) ได้ถูกต้อง โดยวัดแรงตามทิศทาง F_x และ F_y ได้ ในช่วง 10-100 kg และ F_z ในช่วง 20-200 kg และแรง F_y และ F_z มีความผิดพลาดสัมพัทธ์ไม่เกิน 1% ส่วนค่าความไม่เป็นเชิงเส้นในแนวแกน x, y และ z มีค่า 1.20, 0.39 และ 0.37% ตามลำดับ ค่าฮิสเทรีซิสตามแกน x, y และ z อยู่ที่ 2.64, 0.74 และ 0.55 % ตามลำดับ และค่าการตอบสนองในแนวแกนอื่นมีค่าน้อยกว่า 0.06%

คำสำคัญ: เครื่องมือตัด, วัสดุอีลาสติค, สเตรจเกจ, วงแหวนแปดเหลี่ยม

Abstract

Shear force is a key variable in evaluating material customization to enhance operational efficiency, reduce the cutting tool wear, and decrease operation time. This article presents the design of an octagonal ring-type reaction force measuring instrument capable of detecting forces during the milling process in all three axes. Initially, the dimensions and installation positions on the surface of the octagonal ring were evaluated using a simple finite element method to determine the appropriate elastic material shape before forming and mounting strain gauges. The transducer was then calibrated statically against a standard load cell. The sensor exhibited high linearity and low error values, accurately measuring forces along all three axes (F_x , F_y , and F_z). The forces in the F_x and F_y directions were measurable in the range of 10-100 kg, while in the F_z direction within 20-200 kg, with relative errors of force F_y and F_z not exceeding 1%. The non-linearity errors for the x, y, and z axes were 1.20, 0.39, and 0.37%, respectively. Hysteresis errors for the x, y, and z axes were 2.64, 0.74, and 0.55%, respectively, and cross-sensitivity errors were less than 0.06%.

Keywords: Cutting tool, Elastic material, Strain gauges, Octagonal ring

1. บทนำ

ในกระบวนการตัดเฉือนโลหะเพื่อผลิตชิ้นส่วนที่มีความแม่นยำสูง ต้องอาศัยการควบคุมและติดตามพฤติกรรมของเครื่องมือตัดอย่างใกล้ชิด [1] แรงตัดเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตทั้งด้านต้นทุน ความเรียบของผิวชิ้นงาน และการสึกหรอของเครื่องมือตัด [1-2] ด้วยเหตุนี้การวัดแรงตัดเฉือนที่ถูกต้องแม่นยำจึงสำคัญอย่างยิ่งต่อการประเมินโอกาสเกิดความเสียหายและการสึกหรอของเครื่องมือ รวมถึงการควบคุมการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรและปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวชิ้นงาน [2] ซึ่งการในการติดตามสถานะของกระบวนการตัดเฉือนนั้นจำเป็นต้องวัดทั้งแรงตัดเฉือนและแรงบิดที่เกิดขึ้น [3] โดยข้อมูลแรงตัดที่ถูกตรวจสอบภายใต้ระบบพิกัดฉากสามมิตินั้นสามารถนำมาใช้ประเมินความสามารถในการตัดเฉือนของวัสดุชิ้นงานได้ รวมถึงใช้คาดการณ์ลักษณะและระยะเวลาการแตกหักและสึกกร่อนของเครื่องมือ อีกทั้งยังใช้ในการ

ควบคุมการสั่นสะเทือนของเครื่องตัด โดยถ้ากำหนดตัวแปรการตัดให้เหมาะสมกับแต่ละสถานการณ์จะส่งผลให้กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานมีประสิทธิภาพที่ดี คุณภาพพื้นผิวที่ได้ก็จะดีตามไปด้วยและก่อให้เกิดประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการผลิตสูงขึ้น [2] ซึ่งการหาปัจจัยในขั้นตอนการกัดชิ้นงานโดยทั่วไปมักนิยมใช้แผ่นวัดแรงปฏิกิริยา (Force platform) หรือไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) สำหรับเป็นเครื่องมือเพื่อวัดแรงตัดเฉือนของเครื่องกัด [1]

แผ่นวัดแรงมีหลากหลายรูปร่างและรูปทรงโดยออกแบบและสร้างขึ้นด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน [4-6] อุปกรณ์เหล่านี้สามารถช่วยให้วิศวกรประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือตัดโดยวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดเฉือนชิ้นงานได้ [1] นอกจากนี้แผ่นวัดแรงยังมีการนำเซนเซอร์วัดแรงเชิงกลต่างๆ อาทิเช่น เซนเซอร์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) สเตรนเกจวัดค่าความเครียด (Strain Gauge) และการวัดค่าด้วยการตรวจจับสนามแม่เหล็กนำแสงชนิดแบร็กเกรตติ้ง (Fiber Bragg Grating, FBG) แผ่นวัดแรงที่สร้างขึ้นจากหลักการเพียโซอิเล็กทริกนิยมใช้ในการวัดค่าแรงตัดแบบไดนามิกที่มีความถี่สูงขณะทำการตัดเฉือนโลหะ และ Robert Transchel et al. [6] ได้นำเครื่องมือนี้มาใช้วัดแรงตัดระหว่างที่สปินเดิลหมุนมากกว่า 100,000 rpm ในขณะที่แผ่นวัดแรงชนิดสเตรนเกจอาศัยหลักการการเปลี่ยนรูปของโลหะในช่วงอีลาสติกแล้วแปลงค่าเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีวัดที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายและยาวนาน ทั้งนี้ตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจรวมถึงรูปทรงและชนิดของวัสดุอีลาสติกจะมีผลอย่างมากต่อการตรวจวัดค่าและความถูกต้องแม่นยำ การวัดค่าในระบบที่กัดฉากด้วยการใช้สเตรนเกจติดตั้งบนผิวของวัสดุยึดหุ่นชนิดวงแหวนทรงกลมเป็นรูปแบบอย่างง่ายที่พบเห็นได้ทั่วไปและมีใช้งานกันมาอย่างยาวนาน เครื่องมือนี้สามารถตรวจวัดแรงที่เกิดขึ้นได้ทั้งแนวตั้งและแนวระดับตามทิศทางที่ตัดขวางกับรูของวงแหวนทรงกลม แต่ในทางกลับกันอุปกรณ์นี้ก็มีความเสี่ยงในด้านความแข็งแรงและการจับยึดตัววงแหวนที่ยากทำให้ความถูกต้องในการวัดค่าลดลงและเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีนักวิจัยหลายท่าน [7-9] ได้พัฒนาและดัดแปลงรูปทรงของวงแหวนทรงกลมให้มีมุมมากขึ้นจนเป็นรูปทรงแปดเหลี่ยม แม้ว่าการปรับเปลี่ยนรูปทรงของวงแหวนจะสามารถช่วยแก้ปัญหที่เกิดขึ้นได้แต่กลับส่งผลให้ค่าความไวลดลง ดังนั้นการนำวงแหวนแปดเหลี่ยมไปประยุกต์ใช้จึงจำเป็นต้องออกแบบให้เหมาะสมกับแต่ละลักษณะของงาน ซึ่งต้องคำนึงถึงขนาดความกว้าง ความยาว ความหนาของวงแหวน รวมทั้งขนาดของแผ่นจับยึดวงแหวนแปดเหลี่ยมและตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด โดยการประมาณค่าด้วยการคำนวณและไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อให้ได้มุมที่เหมาะสมต่อการติดตั้งสเตรนเกจบนวงแหวนแปดเหลี่ยมสำหรับวัดแรงในแนวตั้งและแนวนอน จากงานวิจัย [10] พบว่ามุมการติดตั้งสเตรนเกจของวงแหวนชนิดแปดเหลี่ยมกรณีวัดแรงในแนวตั้งจะอยู่ที่ 90° - 105° และแรงแนวนอนอยู่ที่ 34° - 50° รวมถึงยังสามารถพัฒนาและดัดแปลงวงแหวนแปดเหลี่ยมสองชุดวางตั้งฉากซึ่งกันและกันเพื่อวัดแรงตัดในลักษณะ 3 ทิศทางพร้อมกันได้โดยมีค่าการรบกวนในแนวแกนอื่นที่ต่ำ [7] และหากต้องการนำวงแหวนแปดเหลี่ยมนี้ไปใช้วัดแรงในบริเวณที่มีสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [11] ก็สามารถทำได้เพียงปรับเปลี่ยนจากสเตรนเกจวัดความต้านทานไฟฟ้าเป็นเซ็นเซอร์ความเครียดพื้นผิว (Fiber Bragg Grating) ด้วยเหตุนี้การออกแบบแผ่นวัดแรงให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมกับการวัดแรงตัดเฉือนขณะกัดชิ้นงานจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการคาดการณ์การสึกหรอของเครื่องมือ ควบคุมการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกล และปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวชิ้นงาน โดยในบทความนี้จะนำเสนอเทคนิคในการออกแบบ การสร้างและการปรับเทียบวงแหวนวัดแรงแบบแปดเหลี่ยมเพื่อประยุกต์ใช้ในการวัดแรงตัดเฉือนของเครื่องกัด

2. วิธีดำเนินการ

2.1 การออกแบบวงแหวนแปดเหลี่ยม

วัสดุที่แสดงพฤติกรรมแบบอีลาสติกสามารถนำมาประยุกต์สำหรับสร้างเป็นเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงทางกลได้ โดยหลักการวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นจะอาศัยแผ่นวัสดุที่มีขนาดบางและมีคุณสมบัติต้านทานความผันแปรตามการยืดหรือหดตัวของวัสดุ โดยทั่วไปเรียกว่าสเตรนเกจ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ สเตรนเกจแบบฟอยล์ สเตรนเกจแบบลวดต้านทาน และสเตรนเกจแบบฟิล์มบาง นอกจากนี้ยังมีการวัดค่าสเตรนในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแสงเพื่อตรวจวัดการเสียรูปซึ่งเหมาะกับงานวัดที่ต้องการความแม่นยำสูงและพื้นที่ใช้งานมีสัญญาณรบกวนมาก โดยในบทความฉบับนี้ได้เลือกใช้สเตรนเกจแบบฟอยล์มาใช้ในการดำเนินงานวิจัย

ในลำดับแรกของการออกแบบวงแหวนแปดเหลี่ยมได้ทดลองหาแรงสูงสุดขณะเจาะแท่งชิ้นงานเหล็กเหนียว ASTM A36 ในแนวตั้งลงถึงระดับความลึก 20 mm ด้วยดอกสว่านขนาด 8 mm และดอกเอ็นมิลแบบ 4 ปาก ขนาด 12 mm บนเครื่องกัด (PAO FONG รุ่น PF-6S) โดยกำหนดให้ความเร็วรอบการหมุนของสปินเดิลขณะทำการทดสอบอยู่ที่ 650 rpm อัตราการป้อนของเครื่องกัด 0.15 mm/rev พบว่าแรงสูงสุดของการเจาะด้วยดอกสว่านและดอกกัดทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 263 kg ต่อมาจึงนำแรงสูงสุดที่ได้จากการทดลองมาเป็นตัวกำหนดเงื่อนไขสำหรับออกแบบขนาดและมิติของวงแหวนวัดแรงแบบ

แปดเหลี่ยม โดยตั้งสมมติฐานให้แรงที่ใช้ในทิศทาง F_x F_y และ F_z เป็นเงื่อนไขของการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากันและให้ค่าפקเตอร์ความปลอดภัยของการออกแบบอยู่ที่ 2 ซึ่งจะได้แรงที่ใช้ในการออกแบบอยู่ที่ 500 kg โดยจำลองให้วัสดุอีลาสติกรูปทรงวงแหวนแปดเหลี่ยมที่ออกแบบไว้รับภาระกระทำแบบสถิตย์ดังแสดงใน Figure 1 (a)-(c) ด้วยการใส่โหลดในแต่ละทิศทางแยกออกจากกันเพื่อพิจารณาหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมในการติดตั้งสเตรนเกจสำหรับวัดแรงตดเค้นของเครื่องกัด โดยวัสดุที่เลือกใช้ในการสร้างเครื่องมือวัดคืออลูมิเนียม 7075 เนื่องจากมีความเป็นอีลาสติกสูงและมีค่า Yield strain อยู่ที่ประมาณ $7,000 \mu\epsilon$

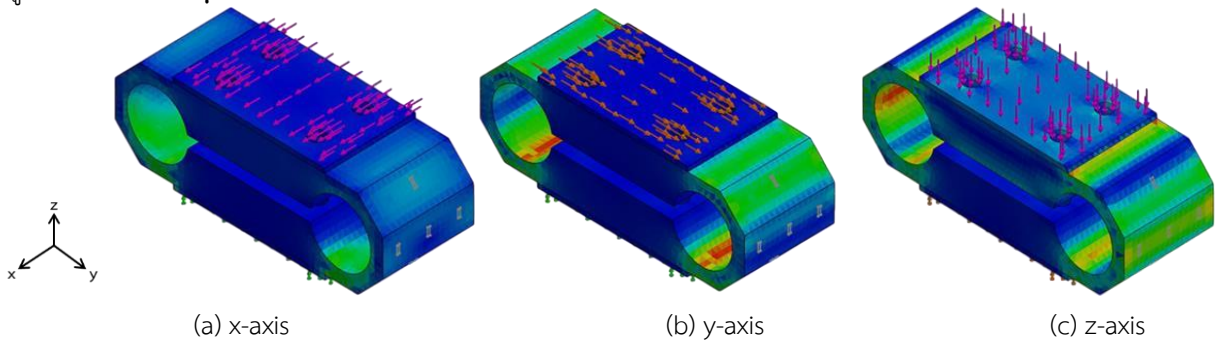


Figure 1 Simulation of forces in various directions to determine the optimal size of an elastic material

จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มิติความกว้าง ความยาวและความสูงของวงแหวนแปดเหลี่ยมเท่ากับ 50, 176 และ 62 mm ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดอื่นๆ ตาม Figure 2 ในส่วนตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจพบว่ามีพิกัดใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ [10, 12-13] ซึ่งใน Figure 3 แสดงตำแหน่งสเตรนโหนดและผลของความเครียดที่จุดติดตั้งดัง Table 1 ทั้งนี้ค่าสเตรนที่ได้มีค่าไม่เกิน 10% ของ Yield strain ดังนั้นเครื่องมือนี้จึงมีความแข็งแรงและมั่นคงเพียงพอต่อการนำมาใช้วัดแรงไดนามิกส์ เนื่องจากสามารถหลีกเลี่ยงตำแหน่งของความถี่ที่มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของวงแหวนแปดเหลี่ยมได้ และโดยทั่วไปไดนามิเตอร์ควรมีความถี่ธรรมชาติอย่างน้อย 4 เท่าของความถี่การสั่นสะเทือนของเครื่องมือกล [14]

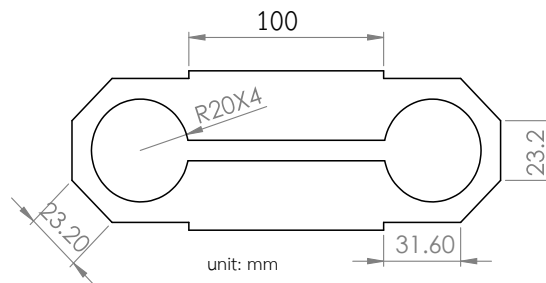


Figure 2 Dimension of octagonal ring

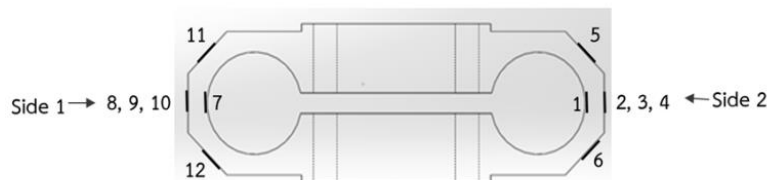


Figure 3 Strain node for strain gauge installation

Table 1 Strain value at the strain gauge installation

Strain node	strain values at the node locations ($\mu\epsilon$)		
	x-axis	y-axis	z-axis
1, 7			576.95 $\pm$ 1.45
2, 8	419.4 $\pm$ 1.4		
3, 9			419.4 $\pm$ 1.4
4, 10	576.95 $\pm$ 1.45		
5, 11		588.75 $\pm$ 0.15	
6, 12		566.4 $\pm$ 0.1	

2.2 ทรานสดิวเซอร์วงแหวนแปดเหลี่ยม

ในขั้นตอนการสร้างวงแหวนอลูมิเนียมแบบแปดเหลี่ยมจะดำเนินการด้วยการตัดกลึงจนได้ชิ้นงานดังแสดงใน Figure 4 ในส่วนการติดตั้งเกจวัดความเครียดได้เลือกใช้สเตรนเกจ Tokyo Measuring Instruments Lab รุ่น FLA-5-11-1JC ที่มีค่าความต้านทาน $120\pm 0.5\Omega$ เกจแพกเตอร์ $2.11\pm 1\%$ มาติดที่ตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้จำนวน 12 จุด โดยต้องดำเนินการอย่างระมัดระวังตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต จากนั้นจึงนำสเตรนเกจมาต่อเข้าด้วยกันเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์ จำนวน 3 วงจร ซึ่งวงจรดังกล่าวจะถูกแยกออกจากกันตามทิศทางของแรง F_x , F_y และ F_z ที่ต้องการวัด ดังรายละเอียดที่ระบุไว้ใน Table 1

**Figure 4** Octagonal ring transducer

จากนั้นวงจรวีทสโตนบริดจ์จะถูกกระตุ้นให้ทำงานด้วยไฟฟ้ากระแสตรงด้วยแรงดันป้อนเข้าอยู่ที่ 5 VDC ส่วนสัญญาณขาออกที่ได้จะมีขนาดเล็กในระดับ mV จึงต้องถูกขยายสัญญาณให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น 1,000 เท่า ด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณ INA 128 แบบ SOIC และติดตั้งเป็นชุดเดียวกันกับเซนเซอร์วัดแรงเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก สัญญาณไฟฟ้าหลังจากถูกขยายแล้วจะนำเข้าสู่อุปกรณ์แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (NI-6210) โดยรับสัญญาณผ่านสาย USB เข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกผล ควบคุมอุปกรณ์การทำงานและประมวลผลร่วมกับโปรแกรม LabVIEW 2014

2.3 การปรับเทียบและการประเมินผล

ในการสอบเทียบแบบสถิติได้แบ่งวิธีการปรับเทียบออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การสอบเทียบในแนวตั้งหรือตามแกน z โดยใช้ชุดทดลองดัง Figure 5(a) มือหมุนแบบสกรูเกลียวทำหน้าที่สร้างแรงกดและภาระกระทำที่ได้ถูกวัดค่าผ่านโหลดเซลล์มาตรฐานชนิด S-type ขนาด 300 kg ที่มีความคลาดเคลื่อนรวม $\pm 0.02\%$ F.S. ทำการสอบเทียบแผ่นวัดแรงด้วยการเพิ่มและลดโหลดในช่วง 0-200 kg โดยแบ่งช่วงมวลออกเป็น 0-10, 10-30, 30-80 และ 80-200 kg ปรับเพิ่มและลดมวลด้วยการใช้โหลดเซลล์มาตรฐานในการวัดค่าครั้งละ 2, 5, 10 และ 20 kg ตามลำดับ ส่วนการทดสอบในแนวระดับ (แกน x และ y) ตาม Figure 5(b) ภาระกระทำแบบสถิติจะถูกสร้างขึ้นด้วยหมุนสกรูเกลียวที่ต่อเชื่อมกับโหลดเซลล์มาตรฐานชนิด S-type ขนาด 150 kg ทำการทดสอบในช่วง 0-100 kg โดยแบ่งโหลดออกเป็น 0-4, 4-10, 10-40 และ 40-100 kg ปรับเพิ่มและลดค่าโดยวัดด้วยโหลดเซลล์มาตรฐานครั้งละ 1, 2, 5 และ 10 kg ตามลำดับ

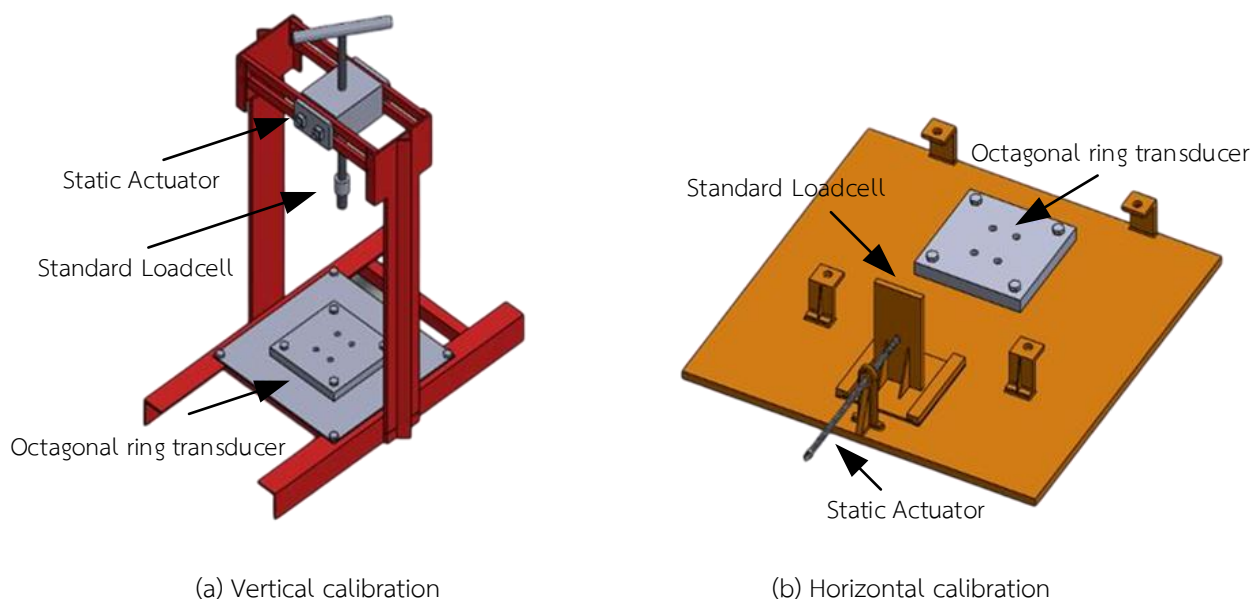


Figure 5 Experimental setup for calibrating an octagonal ring transducer

แรงดันไฟฟ้าขาออกของแผ่นวัดแรงที่ประกอบขึ้นจากวงแหวนแปดเหลี่ยมและภาระกระทำถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์เพื่อวิเคราะห์หาสัมพันธเชิงเส้นของความชัน (m) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ส่วนคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของไดนามิเตอร์ได้แก่อิสเทอรีซิส (Hysteresis error) ความคลาดเคลื่อนไม่เชิงเส้น (non-linearity error) ดังแสดงในสมการที่ (1) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อโหลดเซลล์ได้ทำการสร้างตอบสนองต่อแรงกระทำในทิศทางที่ไม่ต้องการวัดค่า (Cross-sensitivity error) ดังแสดงในสมการที่ (2) จะถูกคำนวณเพื่อหาสัดส่วนของข้อผิดพลาดของการวัดในแต่ละช่วงรวมถึงความแตกต่างจากค่าที่แท้จริง ในส่วนของข้อผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative error) ดังแสดงในสมการที่ (3) จะถูกวิเคราะห์เพื่อประเมินคุณสมบัติของทรานสดิวเซอร์และเป็นตัวกำหนดช่วงหรือขีดจำกัดการใช้งานที่เหมาะสมของเซนเซอร์

$$\text{non - linearity error} = \frac{N}{M_{\max} - M_0} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่

Non-linearity error	= ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักที่วัดได้กับน้ำหนักมาตรฐาน (%)
N	= ค่าความแตกต่างของชุดข้อมูล (kg)
$M_{\max}$	= ค่าสูงสุดหลังการวัด (kg)
M_0	= ค่าเริ่มต้นก่อนการวัด (kg)

$$\text{cross - sensitivity error} = \left| \frac{m_2}{m_1} \right| \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่

Cross-sensitivity error	= ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการรบกวนของน้ำหนักในแกนรอง (%)
m_1	= ค่าความชันที่ได้จากเส้นแนวโน้มแกนหลัก (ไร้หน่วย)
m_2	= ค่าความชันที่ได้จากเส้นแนวโน้มแกนรอง (ไร้หน่วย)

$$\text{relative error} = \frac{\text{measured value} - \text{true value}}{\text{true value}} \times 100\% \quad (3)$$

โดยที่

relative error	= ข้อผิดพลาดสัมพัทธ์ (%)
measured value	= ค่าที่วัดได้จากวงแหวนวัดแรงแปดเหลี่ยมในทิศทางที่พิจารณา (kg)
true value	= ค่าที่วัดได้จากโหลดเซลล์มาตรฐานในทิศทางที่พิจารณา (kg)

3. ผลการทดลองวิจารณ์

ค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรระหว่างภาระกระทำที่โหลดเซลล์มาตรฐานวัดค่าได้และแรงดันไฟฟ้าขาออกจากการสอบเทียบแบบสถิติศาสตร์ในทุกแนวแกนของทรานสดิวเซอร์จะถูกนำไปปรับเส้นโค้งเพื่อหาความชัน (m) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ดังแสดงใน Table 2 พบว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองสมการถดถอยเชิงเส้นสามารถคาดการณ์ได้อย่างแม่นยำเนื่องจากมีค่าเข้าใกล้ 1 ส่งผลให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัดได้ ส่วนค่าความชันที่ได้จากการสอบเทียบจะถูกนำไปคูณกับค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่แสดงผลในคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แสดงในรูปแบบของมวลที่ตรวจวัดได้จากแผ่นวัดแรง

ทำการสอบเทียบทั้งหมดซ้ำอีกครั้งและนำข้อมูลที่ได้อ่านค่าความสัมพันธ์ของมวลที่วัดได้โดยโหลดเซลล์มาตรฐานและมวลที่อ่านได้จากทรานสดิวเซอร์ที่ได้สร้างขึ้นมาดังแสดงใน Figure 6 จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ของมวลในแนวแกน x, y และ z ที่สอบเทียบตามแนวดิ่งซึ่งหากพิจารณาแต่ละเส้นกราฟจะพบว่าความชันของเส้นกราฟแนวแกน z มีค่าสูงกว่าในแนวแกนอื่นเนื่องจากถูกกระตุ้นจากแรงกระทำภายนอกในทิศทาง z นั้นเอง ส่วนแรงในแนวแกนอื่นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากผลของการรบกวนจากแนวแกน z และผลการสอบเทียบแนวระดับที่แกน x และ y จะคล้ายคลึงกันกับการปรับเทียบตามแนวดิ่ง และเมื่อพิจารณาฮิสเทอรีซิส ความคลาดเคลื่อนไม่เป็นเชิงเส้น และ Cross-sensitivity error ใน Table 2 พบว่ามีค่าไม่เกิน 1% ในทุกแนวแกนของการทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ [7, 9] โดยค่าความผิดพลาดตามแกน z และ y จะมีค่าต่ำกว่าในแนวแกน x เนื่องจากข้อจำกัดของลักษณะรูปทรงของวัสดุอีลาสติคและตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจที่ใช้ร่วมกันกับบริเวณพื้นที่วัดแรงตามแกน z ซึ่งนักวิจัยหลายท่าน [7, 12] ได้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้โดยการติดตั้งวงแหวนแปดเหลี่ยมจำนวนหลายตัว [8]

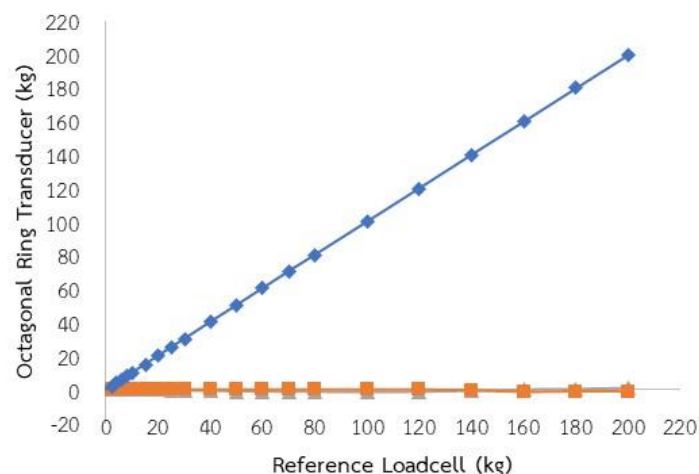


Figure 6 Force relationship between the reference load cell and the fabricated load cell

ความผิดพลาดสัมพัทธ์ของมวลที่ทรานสดิวเซอร์อ่านค่าได้ในแต่ละแกนจะถูกวิเคราะห์เพื่อประเมินขอบเขตและพิกัดมวลแท้จริงของแผ่นวัดแรงที่สามารถใช้วัดค่าได้ โดยความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เกิดขึ้นได้นั้นควรค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ Figure 7 เป็นความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละแนวแกนของเซ็นเซอร์ที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งพบว่าความคลาดเคลื่อนจะเกิดขึ้นสูงในทุกทิศทางที่มวลของแผ่นวัดแรงอ่านค่าได้น้อยกว่า 10 kg และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อภาระกระทำเพิ่มขึ้น การที่ค่าความคลาดเคลื่อนสูงมากในตอนต้นอาจมีสาเหตุมาจากค่าสเตรนต่ำเกินไป ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยออกแบบให้วัสดุอีลาสติคมีการตอบสนองต่อความยืดหยุ่นมากขึ้นเช่นปรับเปลี่ยนขนาด รูปทรงและวัสดุที่ใช้ และรวมถึงเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสำหรับป้อนเข้าวงจรวัดโวลต์ไดโอด (ไม่ควรเกิน 10 VDC) หรือเปลี่ยนชนิดของสเตรนเกจ จากการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของแผ่นวัดแรงพบว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดของแกน x ไม่เกิน 2% และมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 1% เมื่อทดสอบในช่วง 10-100 kg ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นี้ควรปรับปรุงแก้ไขให้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากขึ้น ส่วนความคลาดเคลื่อนตามแกน y และ z มีค่าไม่เกิน 1% เกิดขึ้นในช่วงมวล 10-100 และ 20-200 kg ตามลำดับ

Table 2 Results of the calibration of the octagonal ring transducer

Parameters	only one direction of static load is applied (kg)		
	z-axis	x-axis	y-axis
Slope (m)	56.005	69.377	58.911
R ²	0.999	0.970	0.998
Hysteresis error (%)	0.525	2.643	0.736
Non-linearity error (%)	0.372	1.199	0.387
Cross-sensitivity error (%)	x-axis	0.004	0.037
	y-axis	0.005	0.030
	z-axis	0.060	0.042

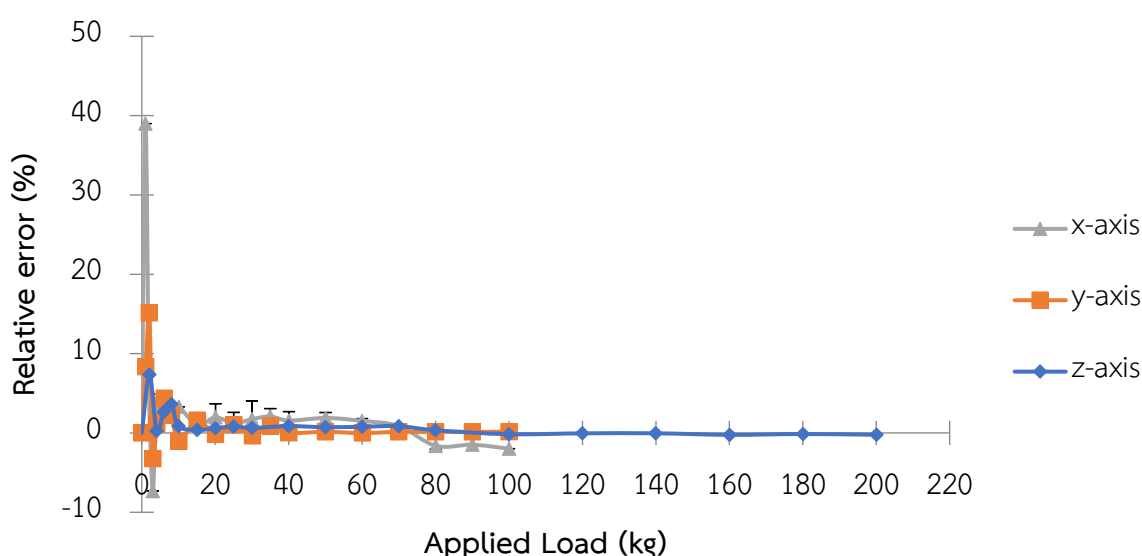


Figure 7 Relative error of transducer

4. สรุป

ทรานสดิวเซอร์วัดแรงแบบวงแหวนแปดเหลี่ยมที่ออกแบบและสร้างเพื่อใช้กับการวัดค่าแรงตัดเฉือนของเครื่องกัดสามารถวัดแรงได้ทั้ง 3 แกน โดยมีความเป็นเชิงเส้นสูง ค่าความผิดพลาดต่ำ เมื่อพิจารณาความผิดพลาดสัมพัทธ์พบว่าแผ่นวัดแรงนี้สามารถตรวจจับแรงตามแกน y และ z ได้แม่นยำกว่าแรงตามแกน x ซึ่งถ้าต้องการนำเครื่องมือนี้ไปใช้งานควรเลือกวัดค่าในช่วงที่มีความผิดพลาดไม่เกิน 1 % และควรนำทดสอบขณะกีดชิ้นงานเพื่อพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่นๆ เพิ่มเติม งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการออกแบบเครื่องมือวัดแรงตัดเฉือนที่แม่นยำจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ถึงสาเหตุและปัญหาที่เกิดขึ้นขณะกีดชิ้นรูปชิ้นงานและนำไปสู่กระบวนการออกแบบวิธีปฏิบัติงาน การควบคุมการสึกหรอของเครื่องมือตัดและการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวชิ้นงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการผลิตให้สูงขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sousa, V. F., Silva, F. J., Fecheira, J. S., Lopes, H. M., Martinho, R. P., Casais, R. B., and Ferreira, L. P. 2020. Cutting forces assessment in CNC machining processes: a critical review. *Sensors*. 20(16): 4536. DOI:10.3390/s20164536.
- [2] Liang, Q., Zhang, D., Wu, W., and Zou, K. 2016. Methods and research for multi-component cutting force sensing devices and approaches in machining. *Sensors*. 16(11): 1926. DOI:10.3390/s16111926
- [3] Zhao, Y., Zhao, Y., and Ge, X. 2018. The development of a triaxial cutting force sensor based on a MEMS strain gauge. *Micromachines*. 9(1): 30. DOI:10.3390/mi9010030
- [4] Rubeo, M. A., and Schmitz, T. L. 2016. Milling force modeling: a comparison of two approaches. *Procedia Manuf.* 5: 90-105.
- [5] Totis, G., Adams, O., Sortino, M., Veselovac, D., and Klocke, F. 2014. Development of an innovative plate dynamometer for advanced milling and drilling applications. *Measurement*. 49: 164-181.
- [6] Transchel, R., Stirnimann, J., Blattner, M., Bill, B., Thiel, R., Kuster, F., and Wegener, K. 2012. Effective dynamometer for measuring high dynamic process force signals in micro machining operations. *Procedia Cirp*. 1: 558-562.
- [7] Korkut, I. 2003. A dynamometer design and its construction for milling operation. *Mater. Des.* 24(8): 631-637.
- [8] Yaldız, S., and Ünsaçar, F. 2006. Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement. *Mater. Des.* 27(10): 839-846.
- [9] Philippon, S., Voyiadjis, G. Z., Faure, L., Lodygowski, A., Rusinek, A., Chevrier, P., and Dossou, E. 2011. A device enhancement for the dry sliding friction coefficient measurement between steel 1080 and vascomax with respect to surface roughness changes. *Exp. Mech.* 51: 337-358.
- [10] Sheikh-Ahmad, J. Y., Ali, D., and Meng, F. 2018. Design and implementation of a force dynamometer for friction stir welding. *Arab. J. Sci. Eng.* 43: 4649-4657.
- [11] Liu, M., Zhou, Z., Tao, X., and Tan, Y. 2012. A dynamometer design and analysis for measurement the cutting forces on turning based on optical fiber Bragg Grating sensor. In: *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, Beijing, China*. pp. 4287-4290.
- [12] Uddin, M. S., and Songyi, D. 2016. On the design and analysis of an octagonal-ellipse ring based cutting force measuring transducer. *Measurement*. 90: 168-177.
- [13] Shishvan, S. H., cengiz Akdeniz, R., Gilandeh, Y. A., and Akkus, G. 2011. The Evaluation and Comparison of Stress Node on Extended Octogal Ring Transducers by Strain Energy Theory and Finite Element Method. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*. 7(3): 299-303.
- [14] Singh, B. B., Saini, N., Dhar, S., and Garg, V. 2006. Design and development of a Strain Gauge based Dynamometer for measurement of cutting force on a Lathe. In: *Proceedings of the International Conference on Advances in Mechanical Engineering, India*.

ระบบติดตามอายุการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนโดยใช้เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี A HARVESTING AGE MONITORING SYSTEM USING RFID TECHNOLOGY

ปณิญา ฐิตธนไท¹ ณัฐพงศ์ รัตนเดช¹ รัฐพงษ์ สุวลักษณ์^{1,*} และ กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์¹
Patinya Thitathanathai¹, Nuttapon Ruttanadech¹, Rattapong Suwalak^{1,*} and Kittisak Phetpan¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร
¹Engineering Department, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon
*Corresponding author: Rattapong Suwalak, e-mail address: rattapong.su@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี RFID เพื่อติดตามอายุการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยมีวัตถุประสงค์หลักสองประการ คือ (1) ออกแบบและสร้างระบบติดตามอายุการเก็บเกี่ยวโดยใช้เทคโนโลยี RFID และ (2) ศึกษาผลกระทบของมุมองศาแท็ก RFID ต่อระยะการอ่านข้อมูลเพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบ ในการทดลองได้ติดตั้งเครื่องอ่าน RFID ในแนวเส้นสายตา และหมุนแท็กรอบแกนแนวนอน จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าความไวแท็ก (S_{tag}) และค่าความไวชิป (S_{chip}) มีผลต่อระยะอ่านสูงสุดที่คำนวณได้ตามทฤษฎี (d_{max}) และระยะทางที่อ่านได้จริง (d_{mea}) โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 5.45–5.59% นอกจากนี้ การเปลี่ยนมุมเอียงของแท็กส่งผลให้ค่าความไวของแท็กเปลี่ยนไปในแต่ละองศา ซึ่งสัมพันธ์กับระยะทางการรับสัญญาณ โดยบางมุมสามารถรับสัญญาณได้ไกลกว่า 1.7 m แม้ค่าความไวจะต่ำ ผลการเปรียบเทียบระยะทางที่ได้ตามทฤษฎี และการทดลองจริงมีความสอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางทฤษฎีมีความแม่นยำ และข้อมูลจากการวิจัยนี้สามารถใช้ประกอบการออกแบบการติดตั้งระบบ RFID ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจริงในงานเกษตรกรรมได้

คำสำคัญ: RFID, ทุเรียน, การติดตามอายุการเก็บเกี่ยว, มุมองศาของแท็ก, ระยะการอ่าน

Abstract

This research focuses on the application of RFID technology to monitor the harvest age of Monthong durian. The study has two main objectives: (1) to design and build an RFID-based system for tracking the harvest age of durians, and (2) to investigate the impact of the RFID tag's orientation angle on the reading distance to improve system accuracy. Field experiments were conducted by installing a fixed RFID reader at eye level and rotating the RFID tag perpendicularly around the horizontal axis, while maintaining the tag's center in a fixed position. Results show that changes in antenna gain on the tag side (S_{tag}) and chip side (S_{chip}) affect both the maximum reading distance (d_{max}) and average reading distance (d_{mea}), with errors ranging between 5.45% and 5.59%. Additionally, varying the tilt angle of the tag influenced tag sensitivity, resulting in different reading distances. Some angles allowed signal detection beyond 1.7 meters, even with lower sensitivity. The comparison between theoretical and actual reading distances showed consistent trends, confirming the accuracy of the theoretical model. These findings are essential for optimizing RFID system installation in real-world agricultural environments.

Keywords: RFID, Durian, Harvest Age Tracking, Tag Orientation Angle, Reading Range

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกทุเรียนหลักไปยังจีนตั้งแต่ปี 2546 ซึ่งทำให้ไทยครองส่วนแบ่งตลาดจีนอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2565 ไทยส่งออกทุเรียนไปจีน 784,000 ตัน และเพิ่มขึ้นเป็น 929,000 ตันในปี 2566 มูลค่า 4.57 พันล้านเหรียญสหรัฐ อย่างไรก็ตาม ส่วนแบ่งตลาดของไทยลดลงจาก 95% ในปี 2565 เหลือ 68% ในปี 2566 และ 60% ในปี 2567 เนื่องจากการเติบโตของทุเรียนจากเวียดนามซึ่งเพิ่มการแข่งขันในตลาดจีน [1] ในช่วง 9 เดือนแรกของปี 2567 การนำเข้าทุเรียนจากไทย

ลดลง 14.1% และ 13.3% ตามลำดับ [2] ทุเรียนที่ส่งออกไปยังจีนส่วนใหญ่เป็นพันธุ์หมอนทอง กระดุมทอง และพวงมณี ซึ่งผลิตในช่วงระหว่างเดือนเมษายนถึงกันยายน โดยเฉพาะในช่วงเดือนเมษายนถึงสิงหาคม [3]

ในภาวะการแข่งขันส่งออกที่รุนแรง การส่งออกทุเรียนคุณภาพสูงไปจีนจึงมีความสำคัญ โดยระดับความสุกของผลผลิตเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อคุณภาพและกำหนดวันเก็บเกี่ยว โดยทั่วไปเกษตรกรจะนับวันหลังดอกบาน แต่ระยะเวลาการสุกอาจแปรผันตามสภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิสูงเร่งการสุก ขณะที่ความชื้นสูงชะลอการสุก เพื่อความแม่นยำ ควรบันทึกวันดอกบานและแยกวันดอกด้วยสัญลักษณ์ เช่น เชือกสีต่างกัน อย่างไรก็ตาม วิธีดั้งเดิมอาจซับซ้อนเมื่อจำแนกต้นและรุ่น [4] อีกทั้งลักษณะภายนอกอาจไม่สะท้อนการเปลี่ยนแปลงภายในผลทุเรียน ทำให้การประเมินด้วยสายตาเพียงอย่างเดียวยังไม่แม่นยำ จึงควรรนำเทคโนโลยีและระบบจัดการข้อมูลมาใช้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการเก็บเกี่ยว [5]

การใช้เทคโนโลยี RFID (Radio Frequency Identification) ในการติดตามอายุทุเรียนโดยการบันทึกวันที่ดอกบานและการจัดการข้อมูลอย่างมีระเบียบสามารถช่วยให้เกษตรกรเก็บเกี่ยวทุเรียนในช่วงเวลาที่เหมาะสมและรักษาคุณภาพของทุเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาของ Rayhana และคณะ (2021) พบว่า RFID สามารถใช้ในการติดตามการเจริญเติบโตของพืช การตรวจสอบคุณภาพผลผลิต และการติดตามสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการเติบโตของพืช เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และค่า pH ของดิน โดยการใช้เซนเซอร์ RFID UHF แบบพาสซีฟเพื่อวัดอุณหภูมิและเชื่อมต่อกับสมาร์ทโฟนในการควบคุมการรดน้ำและการใช้ปุ๋ย [6-8] นอกจากนี้ RFID ยังช่วยในการติดตามคุณภาพการเก็บเกี่ยว เช่น การตรวจสอบความชื้นและอุณหภูมิของผลผลิต ซึ่งเป็นปัจจัยที่ช่วยในการประเมินความสดของผลผลิต [9-11] การบูรณาการเทคโนโลยี RFID กับเซนเซอร์อื่น ๆ ส่งเสริมการเกษตรอัจฉริยะและช่วยเพิ่มผลผลิตที่มีคุณภาพสูง [12-14]

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ 1) การออกแบบและสร้างระบบติดตามอายุการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนโดยใช้เทคโนโลยี RFID และ 2) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของมุมมองของแท็ก RFID ต่อระยะการอ่านข้อมูลจากแท็ก RFID เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำในการติดตามอายุการเก็บเกี่ยวของทุเรียน โดยการใช้เทคโนโลยี RFID จะเป็นปัจจัยสำคัญในการส่งเสริมการผลิตทุเรียนที่มีคุณภาพสูง และช่วยให้สามารถแข่งขันในตลาดส่งออกได้อย่างยั่งยืน

2. วิธีการศึกษา

2.1 ออกแบบระบบติดตามอายุการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนโดยใช้เทคโนโลยี RFID

การศึกษานี้ได้ออกแบบระบบติดตามอายุการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนโดยใช้เทคโนโลยี RFID ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ ได้แก่ 1) ระบบ RFID UHF 920-925 MHz แบบพาสซีฟ และ 2) ระบบประมวลผลสำหรับติดตามอายุการเก็บเกี่ยวผลทุเรียน ดังแสดงใน Figure 1

การทำงานของระบบเริ่มต้นด้วยการอ่านแท็ก RFID จากนั้นผู้ใช้งานจะกรอกข้อมูลที่สำคัญที่เกี่ยวข้อง เช่น พื้นที่แปลง (A-Z), รหัสต้นทุเรียนซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ T, กิ่งก้านหลักแทนด้วยสัญลักษณ์ B, กิ่งก้านรองแทนด้วยสัญลักษณ์ S, ผลทุเรียนแทนด้วยสัญลักษณ์ F, และรวมถึงวันที่และเวลาที่ทำการติดแท็ก

เมื่อกรอกข้อมูลสำคัญครบถ้วนแล้ว ระบบจะทำการอ่านแท็กอีกครั้งเพื่อดึงข้อมูลที่ถูกรวบรวมเข้ามา และทำการประมวลผลข้อมูลโดยใช้วันที่และเวลาปัจจุบันเปรียบเทียบกับวันที่และเวลาที่ทำการติดแท็ก ระบบจะคำนวณอายุของทุเรียน ในขณะนั้นการคำนวณนี้จะช่วยให้สามารถติดตามอายุการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนได้อย่างแม่นยำและเป็นปัจจุบัน

โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกบันทึกลงใน SD Card ในรูปแบบออฟไลน์ เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลและเรียกดูข้อมูลย้อนหลังได้โดยไม่ต้องเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต เมื่อการบันทึกข้อมูลเสร็จสิ้น ข้อมูลทั้งหมดจะถูกแสดงผลบนหน้าจอ LCD เช่น พื้นที่แปลง, รหัสต้นทุเรียน, กิ่งก้านหลัก, กิ่งรอง, ผลทุเรียน, วันที่และเวลาที่ติดแท็ก, และอายุของทุเรียน ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบข้อมูลสำคัญได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว Figure 2 แสดงแผนผังการทำงานของระบบติดตามอายุการเกี่ยวผลทุเรียนโดยใช้เทคโนโลยี RFID

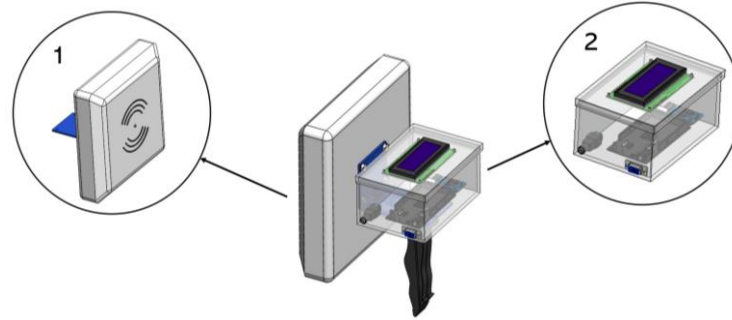


Figure 1 RFID-Based durian harvest age tracking system components

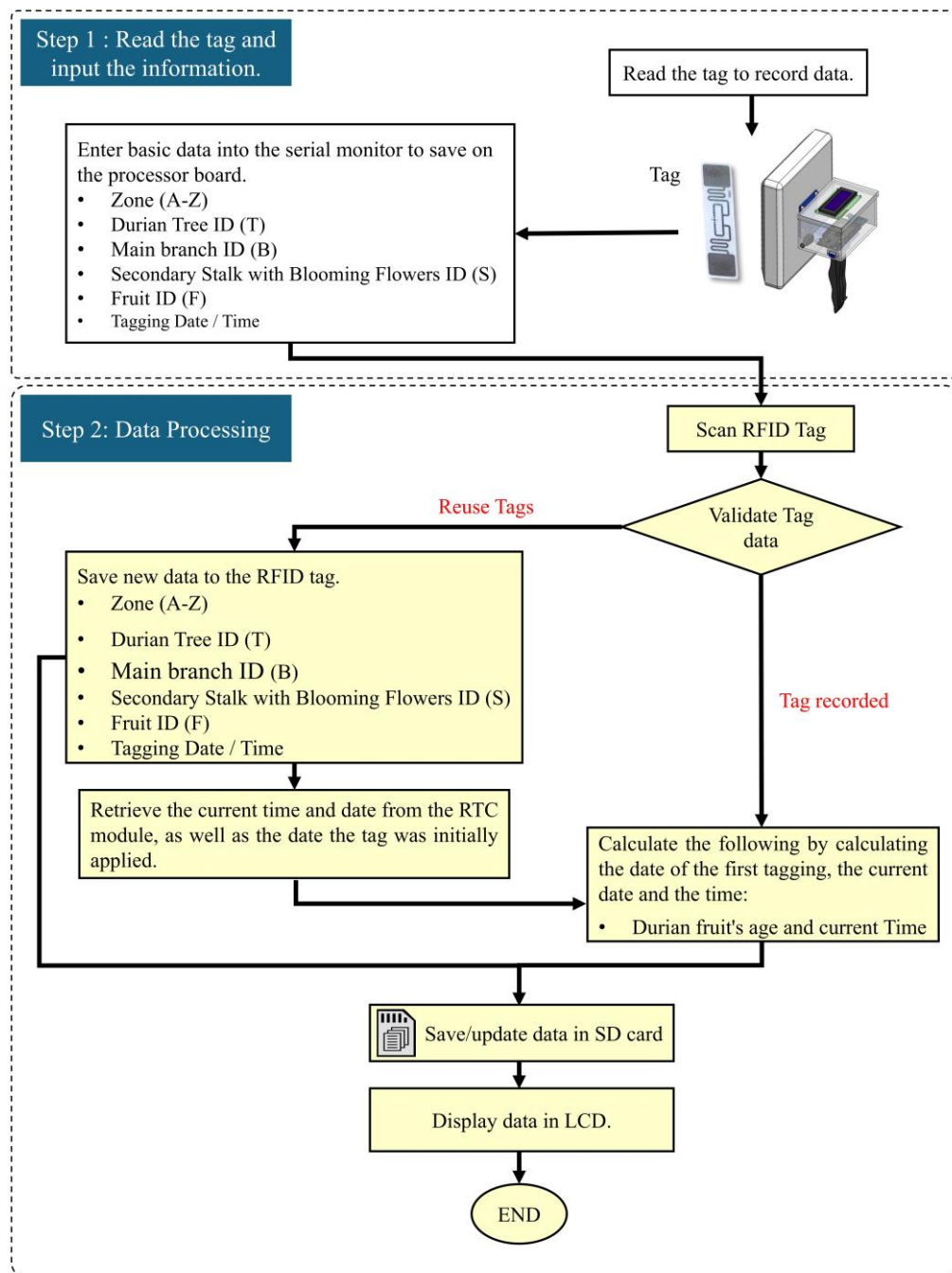


Figure 2 RFID-Based durian harvest age tracking system workflow diagram

2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองในครั้งนี้ได้ถูกออกแบบเพื่อทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการอ่านข้อมูลจากแท็ก RFID โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ มุมของแท็ก และมุมเอียงของแท็ก พร้อมกับการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์ผลในแต่ละสถานการณ์

2.2.1 การทดสอบมุมของแท็ก

การทดสอบนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบของมุมการติดตั้งแท็กต่อประสิทธิภาพในการอ่านข้อมูลจากเครื่องอ่าน RFID โดยขั้นตอนการทดลองประกอบด้วย การหมุนแท็กครบ 360° และเพิ่มครั้งละ 30° โดยทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ จากนั้นทำการวัดระยะที่เครื่องอ่าน RFID สามารถอ่านข้อมูลจากแท็กได้สูงสุดในแต่ละมุมที่ทดสอบ พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป ดังแสดงใน Figure 3 (a) แสดงการทดสอบมุมของแท็ก

2.2.2 การทดสอบมุมเอียงของแท็ก

การทดสอบนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบของมุมเอียงของแท็กต่อประสิทธิภาพในการอ่านข้อมูลจากเครื่องอ่าน RFID โดยพิจารณาความสามารถในการอ่านข้อมูลจากแท็กภายใต้มุมเอียงที่แตกต่างกัน การทดลองดำเนินการโดยปรับมุมเอียงของแท็กตั้งแต่ 0° ถึง 180° โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 30° และทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ จากนั้นทำการวัดระยะที่เครื่องอ่าน RFID ที่สามารถอ่านข้อมูลจากแท็กได้สูงสุดในแต่ละมุมที่ทดสอบ พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป ดังแสดงใน Figure 3 (b) แสดงการทดสอบมุมเอียงของแท็ก

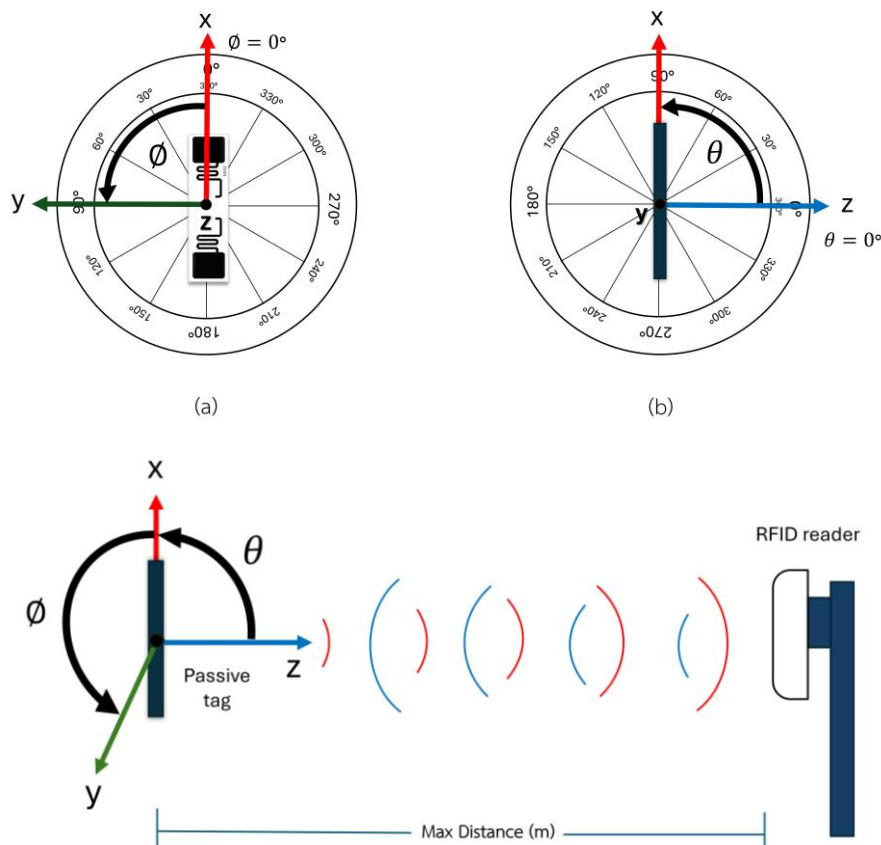


Figure 3 (a) The tag angle test and (b) The tag tilt angle test

2.3 การวิเคราะห์ค่ากำลังส่งขั้นต่ำที่ทำให้แท็กทำงานได้ (Tag activation power threshold)

สมการ Friis (Friis transmission equation) ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการส่งและรับสัญญาณระหว่างเครื่องอ่าน (Reader) และแท็ก (Tag) ในระบบ RFID โดยคำนึงถึงการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นจากระยะทางระหว่างอุปกรณ์ทั้งสอง สมการนี้สามารถใช้ในการคำนวณพลังงานที่แท็กได้รับจากเครื่องอ่าน และช่วยกำหนดระยะสูงสุดที่แท็กสามารถทำงานได้

ในทางปฏิบัติ การวิเคราะห์สมการ Friis สามารถนำไปใช้เพื่อหาค่ากำลังส่งขั้นต่ำของเครื่องอ่านที่ทำให้แท็กทำงานได้ โดยเริ่มจากการเพิ่มกำลังส่งของเครื่องอ่าน (P_{tx}) ที่ทำให้แท็กสามารถทำงานได้ และตรวจสอบว่าแท็กได้รับพลังงานเพียงพอสำหรับการทำงานหรือไม่ เมื่อกำลังส่งถึงระดับที่ทำให้พลังงานที่แท็กได้รับเท่ากับค่าความไวของชิป (S_{chip}) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของชิป RFID [15] และระบุในเอกสารข้อมูลของชิป [16-17] ดังนั้น สมการ Friis สามารถเขียนใหม่ได้ ดังสมการที่ 1

$$P_{tx,No}(\theta, \phi) = \frac{S_{chip}}{G_{tx} \cdot G_{tag}(\theta, \phi) \cdot \tau \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot \eta_{plf} \cdot A_{cable}} \quad (1)$$

โดยที่	$P_{tx,No}(\theta, \phi)$	คือ กำลังส่งขั้นต่ำที่ทำให้แท็กทำงานได้ (dBm) กำหนดให้ $\theta = 0^\circ$ และ $\phi = 0^\circ$
	G_{tx}	คือ อัตราขยายของเสาอากาศเครื่องอ่าน (dBi) กำหนดให้ $\theta = 0^\circ$ และ $\phi = 0^\circ$
	$G_{tag}(\theta, \phi)$	คือ อัตราขยายของเสาอากาศแท็ก (dBi) กำหนดให้ $\theta = 0^\circ$ และ $\phi = 0^\circ$
	S_{chip}	คือ ค่าความไวของชิป (Chip sensitivity)
	λ	คือ ความยาวคลื่น (Wavelength)
	d	คือ ระยะห่างระหว่างแท็ก RFID และเครื่องอ่าน
	η_{plf}	คือ ปัจจัยสูญเสียโพลาไรซ์ (Polarization loss factor)
	A_{cable}	คือ การสูญเสียในสายเคเบิล (Cable loss)
	τ	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงาน

2.4 การวิเคราะห์ความไวของแท็ก (Tag sensitivity analysis)

จากสมการ (1) สามารถคำนวณ $P_{tx,No}(\theta, \phi)$ ซึ่งเป็นค่ากำลังส่งขั้นต่ำที่ทำให้แท็กทำงานได้ โดยค่ากำลังส่งนี้ขึ้นอยู่กับมุมของแท็ก หากมุมเปลี่ยน ค่ากำลังส่งที่ต้องใช้จะเปลี่ยนไปด้วย แม้ว่าค่าความไวของชิป S_{chip} จะบ่งชี้คุณภาพของชิป แต่การประเมินประสิทธิภาพของแท็กต้องพิจารณาค่าความไวของแท็ก S_{tag} ด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับชิป เสาอากาศ และการจับคู่สัญญาณ (Impedance Matching) โดยทั่วไปค่าความไวของแท็ก S_{tag} ต่ำ ประสิทธิภาพของแท็กยิ่งดีขึ้น [15] ดังสมการที่ 2

$$S_{tag}(\theta, \phi) = \frac{S_{chip}}{\tau \cdot G_{tag}(\theta, \phi)}$$

$$= P_{tx,No}(\theta, \phi) \cdot G_{tx} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot \eta_{plf} \cdot A_{cable} \quad (2)$$

2.5 ระยะอ่านสูงสุด Max read distance (d_{max})

สมการความไวของแท็ก (2) สามารถนำมาใช้หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการคำนวณระยะอ่านสูงสุด ที่คาดการณ์ระหว่างเครื่องอ่านและแท็กจากการเปลี่ยนแปลงมุมการส่งสัญญาณ [15] ดังสมการที่ 3

$$d_{max}(\theta, \phi) = \frac{\lambda}{4\pi f} \sqrt{\frac{P_{tx,max} \cdot G_{tx} \cdot \eta_{plf} \cdot A_{cable}}{S_{tag}(\theta, \phi)}} \quad (3)$$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

จากการศึกษาระบบติดตามอายุการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนโดยใช้เทคโนโลยี RFID โดยติดตั้งระบบในตำแหน่งคงที่ โดยอยู่ในเส้นแนวสายตา (Line of Sight) กับแท็กซึ่งติดตั้งอยู่บนเสาแนวตั้ง ดังแสดงใน Figure 4 (a) การทดสอบได้ดำเนินการเพื่อหาระยะทางสูงสุดที่สามารถอ่านแท็กได้อย่างแม่นยำ และวิเคราะห์ผลจากการปรับมุมของแท็กในลักษณะที่ต่างกัน โดยการวิเคราะห์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบของมุมแท็กในแนวตั้งฉาก

จากการทดสอบแท็ก RFID ดังแสดงใน Figure 4 (b) แท็กจะถูกหมุนรอบแกนแนวนอนเพื่อเปลี่ยนมุมของแท็กโดยที่จุดศูนย์กลางของแท็กยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ทำให้ระยะทางระหว่างเครื่องอ่านและแท็กไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดสอบที่ได้ จาก Table 1 พบว่า การเปลี่ยนแปลงของ S_{tag} และ S_{chip} มีผลต่อค่าระยะอ่านสูงสุดที่คำนวณได้ตามทฤษฎี (d_{max}) เมื่อ S_{tag} เท่ากับ -2.67 และ S_{chip} เท่ากับ -0.63 ค่า d_{max} ที่คำนวณได้คือ 1.76 m และค่า d_{mea} ที่อ่านได้จริงเท่ากับ 1.67 m คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อน (%Error) ประมาณ 5.45%

ในอีกกรณีหนึ่ง เมื่อ S_{tag} ลดลงเป็น -4.95 และ S_{chip} เท่ากับ -2.91 ค่า d_{max} เพิ่มขึ้นเป็น 2.29 เมตร ในขณะที่ d_{mea} เท่ากับ 2.17 m คิดเป็น %Error ประมาณ 5.55% แสดงให้เห็นว่า แม้ค่า S_{tag} จะลดลง (ค่าลบมากขึ้น) แต่กลับส่งผลให้ระยะอ่านสูงสุดเพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับคุณลักษณะของการกระจายสัญญาณของเสาอากาศแบบ Dipole โดยเฉพาะกรณีที่ค่า d_{max} สูงที่สุดในการทดสอบ คือเมื่อ $S_{tag} = -5.34$ และ $S_{chip} = -3.30$ ส่งผลให้ d_{max} เท่ากับ 2.40 m และ d_{mea} เท่ากับ 2.27 m โดยมี %Error เท่ากับ 5.54% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

Table 1 Tag performance test results

ϕ	θ	S_{chip} (dBm)	S_{tag} (dBm)	d_{max} (m)	d_{mea} (m)	% Error
0	0	-0.63	-2.67	1.76	1.67	5.49
30		0.47	-1.57	1.55	1.47	5.59
60		-0.79	-2.83	1.79	1.70	5.56
90		-0.32	-2.36	1.70	1.61	5.59
120		-2.91	-4.95	2.29	2.17	5.55
150		-2.07	-4.11	2.08	1.97	5.55
180		-0.58	-2.62	1.75	1.66	5.52
210		-0.37	-2.41	1.71	1.62	5.54
240		-0.63	-2.67	1.76	1.67	5.45
270		-3.3	-5.34	2.40	2.27	5.54
300		-1.85	-3.89	2.03	1.92	5.59
330		-1.24	-3.28	1.89	1.79	5.58
360		-1.09	-3.13	1.86	1.76	5.54

การทดลองนี้ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในช่วงประมาณ 5.45% – 5.59% ซึ่งแสดงถึงความสอดคล้องระหว่างค่าทางทฤษฎีและค่าที่ได้จากการทดลองจริง และยังสะท้อนถึงความเสถียรของระบบในเงื่อนไขที่แท็กอยู่ในแนวตั้งฉากกับเครื่องอ่าน และระยะทางอยู่ในระดับคงที่

3.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบมุมเอียงของแท็ก

จากการทดสอบแท็ก RFID ที่มุมเอียงต่างๆ แสดงดังใน Figure 4 (c) และผลการทดสอบใน Table 2 พบว่า ค่าพารามิเตอร์ S_{chip} และ S_{tag} มีความแปรผันตามมุมเอียงของแท็ก โดย S_{chip} ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ชิปแท็กได้รับ มีค่าต่ำสุด

ที่ -4.15 dBm ที่มุม 0° และมีค่าสูงสุดที่ 6.94 dBm ที่มุม 300° ในขณะที่ S_{tag} ซึ่งแสดงพลังงานของสัญญาณที่แท็กสะท้อนกลับไปยังตัวอ่าน มีค่าต่ำสุด ที่ -2.88 dBm ที่มุม 240° และมีค่าสูงสุดที่ 9.11 dBm ที่มุม 360° การเปลี่ยนแปลงของค่าทั้งสองนี้ชี้ให้เห็นว่าแท็กมีประสิทธิภาพการรับและสะท้อนสัญญาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับมุมเอียง

การเปรียบเทียบ d_{max} และ d_{mea} พบว่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยเฉพาะมุมที่มีค่าความไวแท็กสูง เช่น มุมที่ 150° เท่ากับ 7.13 dBm และ 300° เท่ากับ 5.52 dBm ระยะทางสูงสุดที่คำนวณได้ เท่ากับ 0.57 m และ 0.69 m ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่า 1 m ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงลักษณะการสะท้อนหรือการกระจายสัญญาณในลักษณะเฉพาะของมุมดังกล่าว ตรงกันข้ามกับมุมที่มีค่าความไวแท็กต่ำ เช่น มุมที่ 90° เท่ากับ -2.67 dBm และ 240° เท่ากับ -2.88 dBm พบว่า d_{max} มีค่า 1.76 m และ 1.80 m ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า ในบางมุมถึงแม้ค่าความไวแท็กจะต่ำแต่ระยะการอ่านยังคงสูงขึ้น

การวิเคราะห์ % Error พบว่าโดยรวมค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนนั้นอยู่ในระดับที่ไม่สูงมาก โดยมีค่าคลาดเคลื่อนที่อยู่ระหว่าง 5.49% ถึง 5.59% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการคำนวณระยะทางตามทฤษฎีเมื่อเทียบกับผลการทดลองจริง ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ถึงความเสถียรของระบบ RFID ในการทำงานภายใต้การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของแท็ก แม้ว่าจะมีความแตกต่างของมุมเอียงที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ แต่ก็ยังสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงในการคำนวณระยะทาง

Table 2 The measurement of RFID tag performance at various tilt angles

θ	ϕ	S_{chip} (dBm)	S_{tag} (dBm)	d_{max} (m)	d_{mea} (m)	% Error
90	0	-0.63	-2.67	1.76	1.67	5.49
120		-0.38	-1.80	1.59	1.51	5.55
150		6.16	7.13	0.57	0.54	5.57
180		-2.25	8.72	0.47	0.45	5.49
210		4.96	5.93	0.65	0.62	5.57
240		-1.46	-2.88	1.80	1.71	5.54
270		-0.69	-2.73	1.77	1.68	5.59
300		6.94	5.52	0.69	0.65	5.56
330		4.69	5.66	0.68	0.64	5.50
360		-1.86	9.11	0.45	0.43	5.55
0		-4.15	6.82	0.59	0.56	5.50
30		-1.13	-0.16	1.32	1.25	5.57
60		-1.36	-2.78	1.78	1.69	5.57

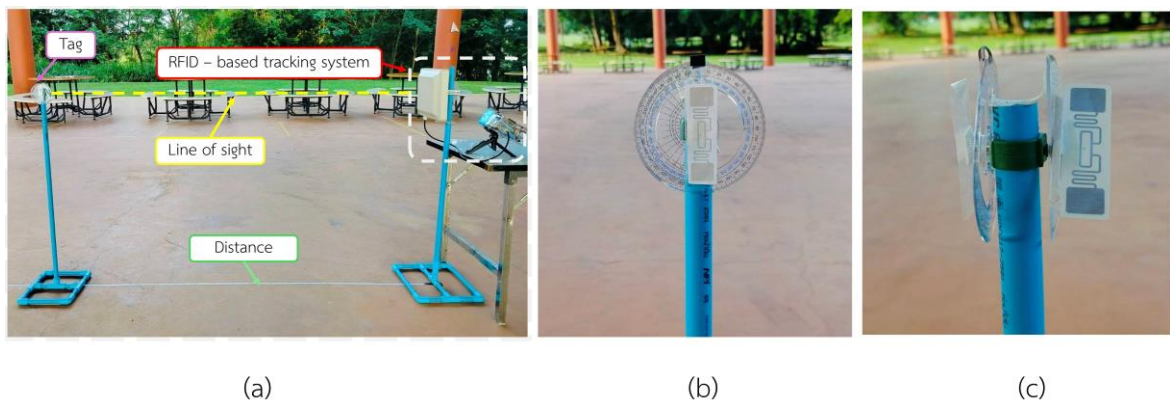


Figure 4 Photographs of (a) Field test environment (b) Tag angle test in field environment and (c) Tag tilt angle test in field environment.

4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาศึกษาผลกระทบของมุมมองของแท็ก RFID ต่อระยะการอ่านข้อมูล โดยทำการทดสอบในสภาพแวดล้อมเชิงทดสอบภาคสนาม ซึ่งยังไม่ได้นำไปใช้งานจริงกับต้นทุเรียน โดยติดตั้งเครื่องอ่าน RFID ในเส้นสายตา (Line of Sight) และหมุนแท็กรอบแกนแนวนอน โดยที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแท็กยังคงที่ ทำให้ระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและแท็กไม่เปลี่ยนแปลง

จากผลการทดลองใน Table 1 พบว่า การเปลี่ยนแปลงของความไวแท็ก (S_{tag}) และค่าความไวชิปแท็ก (S_{chip}) ส่งผลต่อระยะทางสูงสุดที่คำนวณได้ตามทฤษฎี (d_{max}) และระยะทางที่อ่านได้จริง (d_{mea}) โดยค่าความคลาดเคลื่อน (%Error) อยู่ในช่วง 5.45–5.59% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เมื่อ $S_{tag} = -2.67$ dB และ $S_{chip} = -0.63$ dB ค่า d_{max} เท่ากับ 1.76 m และ d_{mea} เท่ากับ 1.67 m คิดเป็น %Error เท่ากับ 5.45% ในอีกกรณีที่ $S_{tag} = -5.34$ dB และ $S_{chip} = -3.30$ dB พบว่า d_{max} เท่ากับ 2.40 m และ d_{mea} เท่ากับ 2.27 m โดยคิดเป็น %Error เท่ากับ 5.54%

เมื่อพิจารณาผลการทดลองมุมเอียงต่าง ๆ ใน Table 2 พบว่าค่าความไวของแท็กมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับมุมเอียง โดย S_{chip} ต่ำสุดที่ -4.15 dBm ที่มุม 0° และสูงสุดที่ 6.94 dBm ที่มุม 300° ในขณะที่ S_{tag} ต่ำสุดที่ -2.88 dBm ที่มุม 240° และสูงสุดที่ 9.11 dBm ที่มุม 360° การเปลี่ยนแปลงของค่าความไวส่งผลให้บางมุม เช่น 150° และ 300° มีระยะทางสูงสุดที่สามารถรับสัญญาณได้ต่ำกว่า 1 m ในขณะที่บางมุม เช่น 90° และ 240° สามารถรับสัญญาณได้ในระยะมากกว่า 1.7 m ซึ่งบ่งชี้ว่าแม้ค่าความไวของแท็กจะต่ำในบางมุม แต่ยังสามารถส่งผลให้แท็กรับสัญญาณได้ในระยะที่ไกลขึ้น

จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า d_{max} กับ d_{mea} พบว่าทั้งสองค่ามีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 5.49% ถึง 5.59% ซึ่งสะท้อนถึงความแม่นยำของแบบจำลองทางทฤษฎีในการพยากรณ์ระยะอ่านแท็กในสถานการณ์จริง ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของมุมเอียงต่อประสิทธิภาพของแท็ก RFID ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบและติดตั้งระบบ RFID ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย งานวิจัยเรื่อง การประเมินความบริสุทธิ์ของผลทุเรียนโดยใช้การวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า (เลขที่ RE-KRIS/FF66/61) พร้อมทั้งขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ สำหรับสถานที่ในการดำเนินโครงการ ตลอดจนกลุ่มวิจัยนวัตกรรมและเทคโนโลยีเกษตรภาคใต้ (SATIRU) และคณะอาจารย์ที่ปรึกษา ได้แก่ ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช รศ.ว่าที่ร้อยตรี ดร.กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์ และ ผศ.ดร.รัฐพงษ์ สุวลักษณ์ ที่ได้ให้คำแนะนำข้อมูล และแนวทางอันมีคุณค่าในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ - DITP. (2567). ในช่วง 9 เดือนแรกของปี 2567 จีนนำเข้าทุเรียนสดมากกว่า 1.38 ล้านตัน. สืบค้นจาก <https://www.ditp.go.th/post/188599> (เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2568).
- [2] กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ - DITP. (2567). ทุเรียนไทยครองใจชาวจีนเป็นอย่างมาก. สืบค้นจาก <https://www.ditp.go.th/post/188599> (เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2568).
- [3] กรุงเทพธุรกิจ. (2567). แรงยกระดับ "ทุเรียนไทย" ในตลาดจีน เน้นคุณภาพ ก่อนวิดแชมป์เบอร์ 1 จีน. สืบค้นจาก <https://www.bangkokbiznews.com/business/economic/1128341> (เข้าถึงเมื่อ 11 กุมภาพันธ์ 2568).
- [4] กรมส่งเสริมการเกษตร. (2022). การผลิตทุเรียนคุณภาพ. สำนักงานเกษตรจังหวัดชุมพร. https://chumphon.doe.go.th/province/?page_id=1516
- [5] Nanthachai, S. (Ed.). (1994). *Durian: Fruit development, postharvest physiology, handling, and marketing in ASEAN*. ASEAN Food Handling Bureau with support from the Australian International Development Assistance Bureau (AIDAB) under the ASEAN-Australia Economic Cooperation Program.
- [6] Rayhana, R., Xiao, G. & Liu, Z. (2020). Internet of things empowered smart greenhouse. in IEEE J. Radio Frequency Identification, vol. 4, pp. 195-211.

-
- [7] Ardiansah, I., Bafdal, N., Suryadi, E., & Bono, A. (2020). Greenhouse monitoring and automation using Arduino: A review on precision farming and internet of things (IoT). *International Journal of Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10.
- [8] Vijay, K. A., Kumar, K. C., Kumar, N., Harshitha, K., & Khan, M. K. (2018). An improved agriculture monitoring system using agri-app for better crop production. In Proceedings of the 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in *Electronics, Information and Communication Technology (RTEICT)* (pp. 2413-2417).
- [9] Breniuc, L., Haba, C. G., Plopa, O., & Ungureanu, L.-I. (2018). Electrochemical RFID sensor for gas concentration measurement. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference and Expo on Electrical Power Engineering (EPE) (pp. 290-295).
- [10] Amin, E. M., Bhattacharyya, R., Sarma, S., & Karmakar, N. C. (2014). Chipless RFID tag for light sensing. In Proceedings of the 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI) (pp. 1308-1309).
- [11] Vena, A., Sorli, B., Belaizi, Y., Saggin, B., & Podlecki, J. (2018). An inkjet-printed RFID-enabled humidity sensor on paper based on biopolymer. In Proceedings of the 2018 IEEE 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC) (pp. 1-3).
- [12] Cai, W., Cowan, T., Briggs, P., & Raupach, M. (2009). Rising temperature depletes soil moisture and exacerbates severe drought conditions across southeast Australia. *Geophysical Research Letters*, 36(21).
- [13] Hamrita, T. K., & Hoffacker, E. C. (2005). Development of a “smart” wireless soil monitoring sensor prototype using RFID technology. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(1), 139-143.
- [14] Vellidis, G., Tucker, M., Perry, C., Kvien, C., & Bednarz, C. (2008). A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(1), 44-50.
- [15] Colella, R., Catarinucci, L., & Tarricone, L. (2017). Measurement system for over-the-air evaluation of UHF RFID tags quality. *Wireless Power Transfer*, 4(1), 33-41.
- [16] S4A Industrial Co., Ltd. (n.d.). *UHF-105 & UHF-115: UHF 920-925MHz RFID long range reader* [PDF]. Retrieved April 14, 2025, from https://www.s4a.com.cn/download/UHF-Passive-RFID-Reader/UHF-105_UHF-115.pdf
- [17] Alien Technology. (n.d.). *Higgs-3: ALN-9662 Short Inlay*. [PDF]. Retrieved April 14, 2025, from <https://www.alientechnology.com/wp-content/uploads/Alien-Technology-Higgs-3-ALN-9662-Short.pdf>
-

สถานีตรวจวัดสภาพอากาศด้วยเทคโนโลยี IoT IoT Weather Station

ศตพร นิลหา¹, จุฑาทิพย์ แผลงสวัสดิ์¹, ชานันดา เสือชม¹, สิริพิชฌาย์ จันทรน้อย¹, พิชญาภา นิลปัจ¹, รัฐพงษ์ สุวลักษณ์^{1,*} และ กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์¹
Sataporn Ninha¹, Juthathip Palgsavas¹, Chananda Sueachom¹, Siriphitcha Jannuy¹, Phitchayapha Ninpad¹,
Rattapong Suwalak^{1,*} and Kittisak Phetpan¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

¹Department of Electrical Engineering, Communication Electrical Engineering Division, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Rattapong Suwalak e-mail address: rattapong.su@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ขอนำเสนอ สถานีตรวจวัดสภาพอากาศด้วยเทคโนโลยี IoT และ แสดงผลสภาพอากาศผ่านคลาวด์ เพื่อเป็นข้อมูลให้กับเกษตรกรในการทำงานในด้านต่างๆอาทิเช่น การเพาะปลูก และการเก็บเกี่ยว เป็นต้น งานวิจัยฉบับนี้สร้างขึ้น และทดลองตรวจวัดสภาพอากาศเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณค่าการให้น้ำของสวนทุเรียน โดยจะคิดค่าการให้น้ำจากการ คำนวณค่าของเซนเซอร์ที่วัดได้ อุปกรณ์ที่ใช้เป็นบอร์ดขนาดเล็กรุ่น Arduino R4 Wi-Fi ทำหน้าที่เป็นชุดควบคุม ส่วนชุดรับข้อมูล จะประกอบไปด้วยเซนเซอร์ 2 ตัว ประกอบไปด้วย เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เซนเซอร์วัดความเข้มแสง ผลการทดลองสรุปได้ว่า เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และเซนเซอร์วัดความเข้มแสง สามารถวัดค่าได้อย่าง ถูกต้อง

คำสำคัญ: สถานีตรวจวัดสภาพอากาศ, เซนเซอร์, ไอโอที

Abstract

This research presents a weather monitoring station utilizing IoT technology with weather data displayed via cloud services. The system aims to provide useful information for farmers in various activities such as planting and harvesting. This research was developed and tested to monitor weather conditions for use in calculating irrigation levels in a durian orchard. The irrigation calculation is based on data obtained from sensors. The device used is a compact Arduino R4 Wi-Fi board, which functions as the control unit. The data acquisition unit consists of two sensors: a temperature and relative humidity sensor, and a light intensity sensor. The experimental results show that both the temperature and relative humidity sensor and the light intensity sensor are capable of accurately measuring the respective values.

Keywords: Weather Station, Sensor, IoT

1. บทนำ

ภาคการเกษตรมีความสัมพันธ์กับภูมิอากาศเป็นอย่างมาก[1] หากภูมิอากาศมีการเปลี่ยนแปลงก็จะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน และระดับความชื้นของแสง จะส่งผลต่อสภาพพื้นที่เพาะปลูก การเลี้ยงปศุสัตว์ และแหล่งน้ำ รวมถึงการส่งผลกระทบเป็นลูกโซ่ตั้งแต่ระยะการออกดอกและการเก็บเกี่ยวผลผลิตตลอดจนถึงความชื้นในดินและการเข้าทำลายของศัตรูพืช นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินั้นยังได้ส่งผลกระทบต่อระดับน้ำใต้ดินอุณหภูมิของน้ำ และคุณภาพของน้ำใต้ดิน รวมถึงคุณภาพและปริมาณการผลิตอาหารที่จะส่งผลกระทบต่อรายได้ของเกษตรกร

ผลกระทบจากภัยแล้งและน้ำท่วมในช่วงปี 2566-2567 ส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อภาคการเกษตรและเศรษฐกิจโดยรวม ภัยแล้งทำให้พื้นที่เกษตรกรรมหลายแห่งขาดแคลนน้ำและประสบปัญหาผลผลิตลดลง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่พึ่งพาการชลประทานจากแม่น้ำและเขื่อน ทำให้เกษตรกรขาดรายได้และไม่สามารถเพาะปลูกได้ตามปกติ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อ การผลิตอาหารและราคาสินค้าเกษตรที่สูงขึ้น

ขณะที่น้ำท่วมทำให้พื้นที่เกษตรกรรมหลายแห่งถูกน้ำท่วมเสียหาย รวมถึงโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน สะพาน และระบบการขนส่งที่ได้รับผลกระทบ การสูญเสียผลผลิตจากน้ำท่วมและการทำลายของโครงสร้างพื้นฐาน ทำให้ต้องใช้เวลาในการฟื้นฟูและก่อให้เกิดภาระทางการเงินที่หนักสำหรับรัฐบาลและเกษตรกรตามการประเมินจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ค่าความเสียหายจากภัยแล้งและน้ำท่วมในปี 2566-2567 คาดว่าจะสูงถึงหลายหมื่นล้านบาท[2] โดยเฉพาะในภาคการเกษตร ซึ่งได้รับผลกระทบอย่างหนักจากทั้งสองภัยธรรมชาติ และยังต้องใช้เวลาในการฟื้นฟูระบบน้ำและโครงสร้างพื้นฐานที่ได้รับความเสียหาย.

จากข้อมูลข้างต้นในบางพื้นที่ ซึ่งการติดตั้งสถานีวัดสภาพอากาศเพื่อคาดการณ์ฝนและจัดการน้ำในพื้นที่ เกษตรกรรมได้รับการพิจารณาเป็นเครื่องมือสำคัญในการลดผลกระทบ เทคโนโลยี IoT และ Big Data ช่วยให้เกษตรกรวางแผนการเพาะปลูกตามปริมาณน้ำที่มีอยู่และสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง ทางคณะผู้วิจัยจึงได้ เล็งเห็นว่าสภาพอากาศเป็นตัวแปรที่เข้ามาเกี่ยวข้องตั้งแต่การปลูกไปจนถึงการเก็บเกี่ยวผลผลิต จึงได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพอากาศขึ้นมาเพื่อจัดเก็บข้อมูลประมวลผลและแสดงผลของข้อมูล เพื่อใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์คำนวณข้อมูลการให้น้ำอัตโนมัติในสวนทุเรียน

2. วิธีการศึกษา

หลักการและการออกแบบอุปกรณ์ตรวจสอบและแสดงผลสภาพอากาศ ได้แก่ การออกแบบอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบและแสดงผลสภาพอากาศผ่านอินเทอร์เน็ตการส่งข้อมูลโดยใช้ MQTT Protocol ผ่าน Node-RED และหลักการบล็อกไดอะแกรมของการทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์และฐานข้อมูลบนคลาวด์ แสดงดัง Figure 1

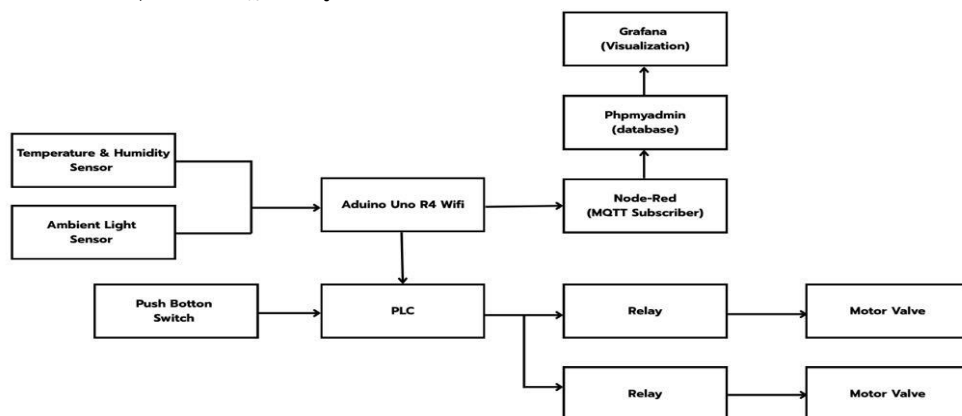


Figure 1 Block diagram of weather station with IoT Technology and PLC System

การทำงานของอุปกรณ์ Figure 2 การทำงานของเซนเซอร์ซึ่งจะเชื่อมต่อเซนเซอร์ทั้งหมด 2 ตัว ได้แก่ AM2306B และ TEMT6000 เข้ากับบอร์ด Arduino Uno R4 Wi-Fi ส่วนของ MQTT Protocol จะใช้ HiveMQTT เป็น Broker โดยใช้ Node-Red เป็นตัวกลางระหว่างเซนเซอร์และฐานข้อมูล phpmyadmin เป็นฐานข้อมูลแล้วจึงส่งต่อไปแสดงผลข้อมูลด้วย Grafana โดยใช้ Cloud Server รัน Node-Red, phpMyAdmin, Grafana และการทำงานของอุปกรณ์แสดงการทำงานของระบบควบคุมที่ใช้ PLC (Programmable Logic Controller) เป็นศูนย์กลางในการสั่งการอุปกรณ์ต่างๆโดยการทำงานของระบบคือ Arduino R4

Wi-Fi ประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์ และส่งคำสั่งไปยัง PLC เพื่อควบคุมการทำงานของรีเลย์ (Relay) แต่ละตัวเพื่อเปิด-ปิด มอเตอร์วาล์ว นอกจากนี้ยังสามารถรับคำสั่งจากปุ่มกด manual เพื่อสั่งเปิด-ปิด มอเตอร์วาล์วได้

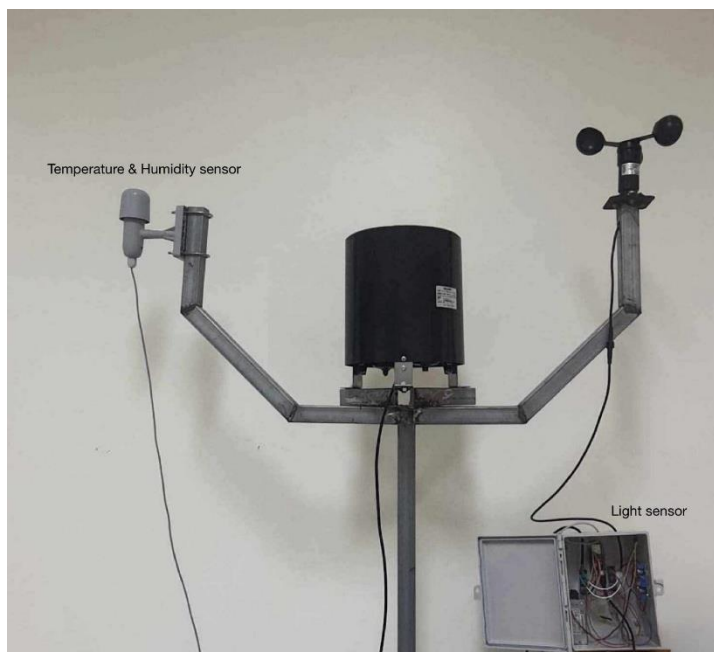


Figure 2 IoT Weather Station

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การทดสอบวัดสภาพอากาศ

ในการทดลองสถานีตรวจวัดสภาพอากาศด้วยเทคโนโลยี IoT มีอุปกรณ์ที่ใช้หลักๆอยู่ 2 ตัว คือ 1.เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น รุ่น AM2306B และ 2.เซนเซอร์วัดความเข้มแสงโดยรอบ รุ่น TEMT6000 โดยจะมีวิธีการวัด ดังนี้ การวัดเซนเซอร์อุณหภูมิและความชื้นจะวัดค่าบริเวณในสวนทุเรียนโดยหน่วยวัดอุณหภูมิ คือ องศาเซลเซียส และความชื้น คือ เปอร์เซ็นต์ การวัดเซนเซอร์ความเข้มแสงโดยรอบจะวัดค่าบริเวณในสวนทุเรียน หน่วยวัด คือ วัดต่อตารางเมตร

3.1.2 การแสดงผลบนแดชบอร์ด

จากผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถแสดงแดชบอร์ดได้ดัง Figure 3 โดยในกรณีค่าที่ทดสอบได้มีค่าไม่เต็มสเกลแถบแสดงผลจะแสดงเป็นสีเขียวและในกรณีที่ค่าการทดสอบมีค่าเต็มสเกลแถบการแสดงผลจะเปลี่ยนเป็นสีแดง เช่น ค่า Humdb มีค่า 27 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่า มีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 27 เปอร์เซ็นต์ จะแสดงด้วยแถบสีเขียวและค่าความเข้มแสงมีค่าเต็มสเกลจะมีแถบแสดงเป็นสีแดง โดยแดชบอร์ดแสดงผลนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้แบบเวลาจริง (Real time)

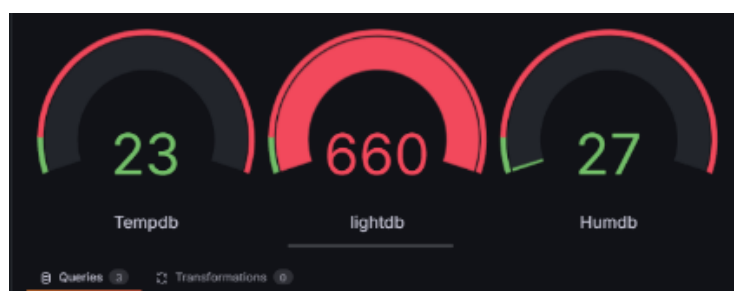


Figure 3 Experimental Results from Grafana: Temperature and Humidity Sensor, Wind Speed Sensor, Rainfall Sensor, Light Intensity Sensor

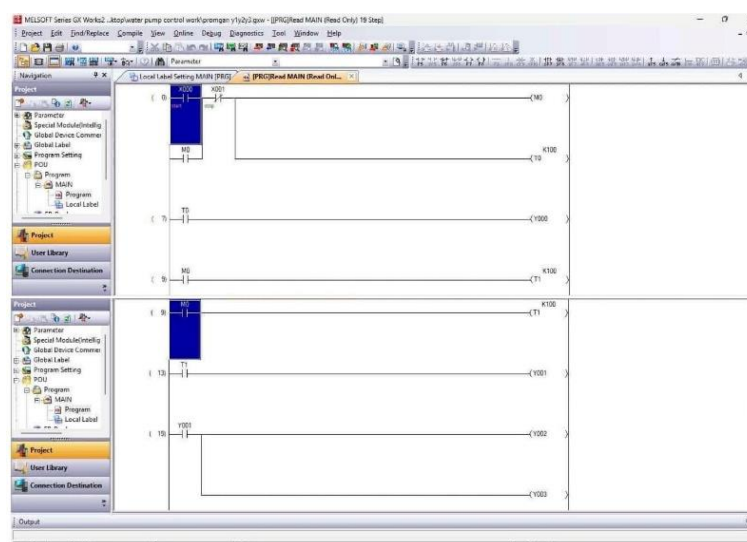
Table 1 Experimental Results Table: Comparison Between the Research Team's Data

ลำดับ	Temperature (°C)	Humidity (%)	Light Intensity (W/m2)
1	27.1	85.5	5.42
2	27.2	86.6	5.41
3	27.5	86	5.41
4	27.7	86.7	5.41
5	27.7	86.2	5.42
6	27.9	86.4	5.44

จาก Table 1 แสดงผลการทดสอบการวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศและความเข้มแสงของเครื่องวัดสภาพอากาศที่ออกแบบ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature) มีค่าเท่ากับ 27-27.9 องศาเซลเซียส เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (Humidity) มีค่าเท่ากับ 85-86 เปอร์เซ็นต์ และเซนเซอร์วัดความเข้มแสง (Light Intensity) มีค่าเท่ากับ 5.4 วัตต์ต่อตารางเมตร

3.2 การทดสอบการทำงานของ PLC

3.2.1 ระบบmanual

**Figure 4** Ladder of PLC System in manual mode

จาก Figure 4 เป็นการทดสอบขั้นตอนการเขียนโปรแกรมควบคุมที่ใช้ภาษา Ladder เพื่อสั่งการการทำงาน โดยการกดปุ่ม Start (X0) ระบบจะเริ่มการทำงาน โดยจะนับเวลา 10 วินาที หลังจากนับเวลาเสร็จมอเตอร์วาล์วตัวที่ 1 จะเริ่มทำงาน (Y0) และนับเวลาต่ออีก 10 วินาที เพื่อตัวที่ 1 จะหยุดทำงาน และมอเตอร์ตัวที่ 2 (Y1) จะเริ่มต้นทำงาน จนกระทั่งเมื่อกดปุ่ม Stop (X1) ระบบทั้งหมดจะหยุดทำงาน

3.2.2 ระบบ Timer

จาก Figure 5 เป็นการทดสอบขั้นตอนการเขียนโปรแกรมควบคุมที่ใช้ภาษา Ladder เพื่อสั่งการการทำงานแบบตั้งเวลา (Timer) เมื่อกดปุ่ม Start (X0) ระบบจะเริ่มการทำงาน โดยจะนับเวลา 20 วินาที หลังจากนับเวลาเสร็จมอเตอร์วาล์วทั้ง 2 ตัว (Y0,Y3) จะเริ่มต้นทำงานพร้อมกัน และเมื่อกดปุ่ม Stop (X1) ระบบจะหยุดการทำงาน

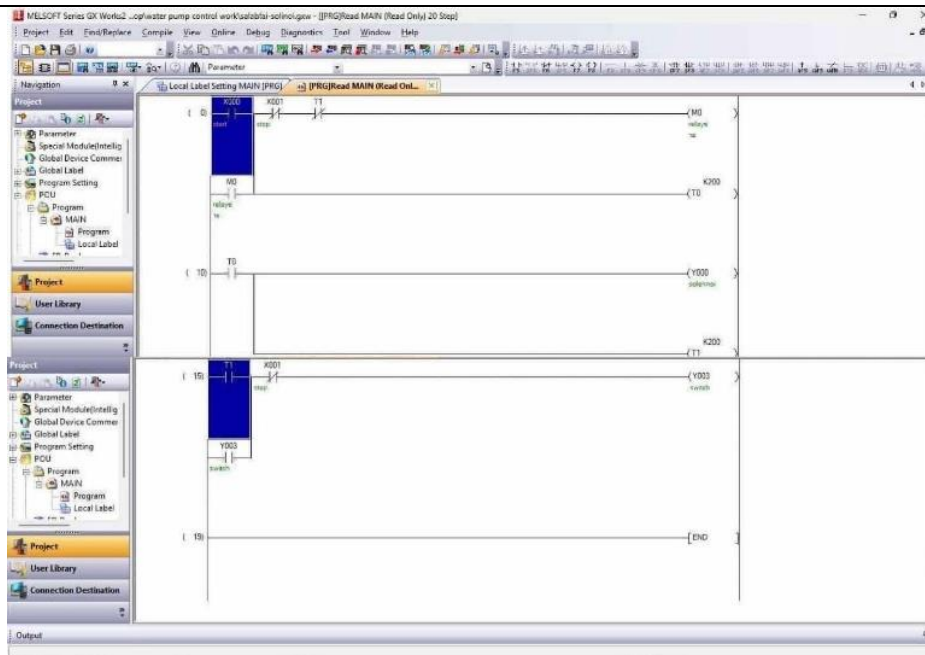


Figure 5 Ladder of PLC System in timer mode

4. สรุป

วิจัยนี้นำเสนอและสร้างเครื่องตรวจวัดสภาพอากาศด้วยเทคโนโลยี IoT โดยสามารถวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศและค่าความเข้มแสงได้ ดังนั้นอุปกรณ์เครื่องตรวจวัดสภาพอากาศด้วยเทคโนโลยี IoT สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสภาพอากาศและควบคุมระบบการให้น้ำพืช รวมถึงประยุกต์ใช้ในงานต่างๆในด้านการเกษตร

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้อย่างสมบูรณ์ นั้นเป็นเพราะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือ ได้รับการ สนับสนุน เอื้อเฟื้อเครื่องมือ และได้รับคำปรึกษาจากบุคคลหลายท่าน ขอขอบพระคุณครอบครัวซึ่งเป็นกำลังใจ ส่งความห่วงใย สนับสนุนค่าใช้จ่ายด้วยดีเสมอมา บุคคล เหล่านี้เป็นบุคคลที่ผู้จัดทำอยากกล่าวถึงเป็นลำดับแรก มีคำที่อยากบอกมากมายแต่ขอลั่นออกมาเพียงคำที่มีความหมายอัดแน่นนั่นคือ ขอขอบคุณค่ะ

และสุดท้ายขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.รัฐพงษ์ สุวลักษณ์ และ รศ.ว่าที่ร้อยตรี ดร.กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์ ผู้ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมซึ่งได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ รวมทั้งเอื้อเฟื้อเครื่องมือเครื่องใช้ ในการทำงานวิจัยและติดตามถามไถ่เกี่ยวกับงานอย่างสม่ำเสมอ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตาของท่านจึง ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ทีปกร จิริฐิตกุลชัย 2567 “การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศครัวเรือนเกษตรผลผลิตทางการเกษตรโลกร้อน” จาก <https://setthasarn.econ.tu.ac.th/blog/detail/691>
- [2] climateSA.(2021) “การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สถานการณ์ปัญหาและแนวทางการรับมือของเกษตรกรทางเอเชีย” จาก <https://climatesa.org/?p=1323&fbclid>
- [3] Transform. (2021). “ทำความรู้จักกับ MQTT Protocol สำหรับ ระบบ IoT ที่จำเป็นต้องรู้” จาก <https://www.hivemq.com/mqtt/>
- [4] Mr.P L. (2018). “เริ่มต้นใช้งาน Node-red ! ฉบับปี 2018-2019.” จาก <https://nodered.org/>
- [5] Tanawat Pintongpan. (2020). “อะไรคือ Grafana ? และติดตั้งใช้งานอย่างไร Step by step.” 2567 <http://localhost:3000/d/ae3pjalpnc1z4f/weather?from=now3h&to=now&timezone=browser&refresh=auto>
- [6] “เทคนิควิธีการปลูกทุเรียนและดูแลรักษาต้นทุเรียนอย่างมืออาชีพ” .จาก.https://www.laplastic.biz/how-to-grow-durian.html?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAR0B9snHfilusJ0BC6Ggr5Oddv_RF57yj4pe0rqmSh4oKuS8jOCbThVPxg_aem_6l6C4Y8g1NlK-rVCrkseTw
- [7] “การเกษตรและการจัดการน้ำ”.จาก <https://chatgpt.com/c/674de807-65c0-800e-b09f-b38fcb0a51f6>
- [8] “เก็บเกี่ยวผลผลิต โดยเฉพาะทุเรียนหมอนทอง”.จาก. <https://sondhitalk.com/detail/9650000053388> [9] “ประเภทของ PLC “.จาก. <https://www.unlimitedsales888.com/product/218/plc-fx3u-16mt-e-4ai-2ao-2rs485-8-input-8-output-lan-4-analog-input-2-analog-output-2-rs485-rtc>

การศึกษาปัญหาและแนวทางแก้ไขการใช้งานไม้พาเลทในอุตสาหกรรมขนส่งอย่างยั่งยืน A Study on Problems and Solutions for the Sustainable of Wooden Pallets in the Transportation Industry

พุทธิพงศ์ เลขาชัยวรกุล^{1,*} ณัฐพิชญา เอี่ยมเจริญโชค² และ ปฐมพงษ์ จันงค์พันธ์³
Putipong Lakachaiworakun^{1,*}, Natpitchaya Iamchareonchok² and Pathomphong Jumnongphan³

¹สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
²บริษัท เชฟ (ประเทศไทย) จำกัด

³สถาบันสหวิทยาการดิจิทัลและหุ่นยนต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

¹ Department of Sustainable Industrial Management Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon,
Bangkok Thailand

² CHEP (THAILAND) CO., LTD.

³Digital Interdisciplinary and Robotics Institute, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok Thailand

*Corresponding author: Putipong Lakachaiworakun e-mail address: Putipong.l@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มุ่งศึกษาปัญหาและแนวทางแก้ไขในการใช้งานไม้พาเลทในอุตสาหกรรมขนส่งอย่างยั่งยืน โดยเน้นการประยุกต์ใช้หลักเศรษฐกิจหมุนเวียน พบว่าระบบให้เช่าและหมุนเวียนพาเลทไม้ส่งผลให้เกิดปัญหาการซ่อมบำรุงสูงถึง 50.50% จากการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิแก๊งปลาและแผนภูมิพาเรโต พบว่าสาเหตุหลักมาจาก การแตกหักของไม้พาเลทที่ไม่สามารถซ่อมแซมได้ และมาตรฐานงานของลูกค้าที่ไม่เป็นสากล นอกจากนี้ การศึกษาด้านสิ่งแวดล้อมชี้ให้เห็นว่าการลดความเสียหายของพาเลทไม้สามารถช่วยลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 3,740 kg CO₂ แนวทางแก้ไขที่นำเสนอ ได้แก่ การพัฒนาไม้พาเลทให้มีความทนทานมากขึ้น โดยระบุประเภทของการแตกหักเป็น สามลักษณะ ได้แก่ แตกตามแนวเส้นไม้ แตกตั้งฉากกับเส้นไม้ และจุดยึดต่อ พร้อมข้อเสนอแนะในการออกแบบพาเลทที่ลดการใช้ตะปู และการเคลือบสารป้องกันการแตกหัก หากสามารถลดอัตราการแตกหักได้ จะช่วยลดปริมาณการใช้ไม้ ส่งเสริมความยั่งยืนในอุตสาหกรรมขนส่ง และสนับสนุนเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

คำสำคัญ: ไม้พาเลท, แผนภูมิแก๊งปลา, แผนภูมิพาเรโต, ความยั่งยืน

Abstract

This study examines the issues and solutions related to the use of wooden pallets in the transportation industry, focusing on the application of circular economy principles to enhance sustainability. The findings indicate that the rental and circulation system of wooden pallets results in a 50.50% maintenance rate. Using Fishbone Diagram and Pareto Chart analysis, the primary causes of these issues were identified as irreparable pallet breakage and the lack of standardized customer requirements. Additionally, environmental assessments suggest that reducing pallet damage can decrease carbon dioxide emissions by 3,740 kg CO₂. The proposed solution involves enhancing the durability of wooden pallets by addressing three common types of breakage: grain-line fractures, perpendicular fractures, and joint failures. Key recommendations include designing joint connections without nails and applying protective coatings to prevent fractures. Reducing breakage rates can lead to lower wood consumption, promote sustainability in the transportation industry, and contribute to long-term environmental goals.

Keywords: Wooden pallets, Fishbone Diagram, Pareto Chart, Sustainability.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการขนส่งและผลิตพาเลทไม้ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญในอุตสาหกรรมขนส่งสินค้า เนื่องจากช่วยให้การจัดเก็บ และการเคลื่อนย้ายสินค้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในยุคปัจจุบันมีหลายบริษัทที่มีการดำเนินธุรกิจที่คำนึงถึงการแก้ไขปัญหา ต่างๆในการขนส่ง [1] เช่น การบริการให้เข้าพื้นที่จัดเก็บพาเลทไม้ บริการให้เข้าพาเลทไม้และการขนส่ง เป็นต้น เพื่อที่จะคำนึงถึง การใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า มีการดำเนินการในหลักของความยั่งยืนเข้ามา โดยเน้นที่เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) หมายถึง แนวคิดเกี่ยวกับการนำทรัพยากรที่ถูกนำไปใช้แล้วให้กลับมาแปรรูปและนำกลับไปใช้ได้อีกในอนาคต เป็นการใช้ทรัพยากร ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อเป็นการแก้ปัญหการใช้ทรัพยากรเกินขนาดจากการขยายตัวในอัตราที่สูงขึ้นของประชากรโลก และ ปัญหาการจัดการขยะ [2] และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่โลกปัจจุบันกำลังพูดถึงการช่วยกันรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างเช่น คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) ที่เกี่ยวกับปริมาณรวมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซเรือนกระจกอื่นๆ ที่ปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์หรือบริการ (ตามข้อกำหนด ISO 14040) [3] ดังนั้นอุตสาหกรรมพาเลทไม้จึงยังคงเป็นที่นิยมในด้านการ ใช้งานที่ยั่งยืน ซึ่งมีเงื่อนไขในการใช้ไม้ทดแทนตามข้อกำหนดดังมาตรการดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริง พบว่ามี ปัญหาเกี่ยวกับการแตกหักของไม้พาเลทซึ่งนำไปสู่ต้นทุนเพิ่มเติมทั้งในด้านการซ่อมแซมและการเปลี่ยนใหม่ ส่งผลต่อการที่ต้องใช้ ทรัพยากรที่เพิ่มขึ้น

พาเลทไม้อุตสาหกรรมมีขนาดมาตรฐานของการขนส่ง พาเลทไม้ขนาด 1200×1000 มิลลิเมตร เป็นขนาดพาเลทไม้ที่ใช้ กันอย่างแพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรมขนส่งและโลจิสติกส์มี [4] โดยมีชนิดเพื่อที่จะใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น แบบที่สามารถให้ รถโฟล์คลิฟท์เข้าถึงทุกทิศทาง หรือ บางทิศทางขึ้นอยู่กับการใช้งาน และมีมาตรฐานความแข็งแรงในการกำหนด เช่น มอก 588- 2528 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ไม้รองรับสินค้า [5] เป็นต้น กระบวนการผลิตพาเลทไม้มีขั้นตอนดังนี้ การตัดแต่งให้ได้ ขนาดตามมาตรฐาน และครบทุกชิ้นส่วน ได้แก่ ไม้แผ่นหน้า ไม้แผ่นข้าง และ ลูกเต๋า (ตัวยึด) เมื่อได้ชิ้นส่วนเข้าสู่งานประกอบด้วย การเชื่อมต่อด้วยตะปู หรืออุปกรณ์ยึดติด การพ่นสีเพื่อทางทการตลาด และการส่งออก และในรูปแบบธุรกิจที่กล่าวมาข้างต้น การให้ เข้าพาเลทไม้ในการดำเนินธุรกิจจะมีการส่งมอบคืนหมุนเวียนซึ่งจากจุดนี้จะเห็นได้ว่าการเสื่อม ชำรุดของพาเลทไม้ที่ต้องซ่อมแซม เป็นจำนวนมาก ดังแสดงใน Figure 1

งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการศึกษาสาเหตุของปัญหา และเสนอแนวทางแก้ไขที่เป็นไปได้เพื่อศึกษาปัญหาการแตกหัก ของไม้พาเลทที่ใช้ในการขนส่งสินค้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการขนส่งและต้นทุนในการซ่อมแซม โดยใช้เครื่องมือ วิเคราะห์ ได้แก่ แผนภูมิก้างปลา (Fishbone Diagram) และแผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) ในการระบุและวิเคราะห์สาเหตุหลัก ของปัญหา จากนั้นนำเสนอแนวทางแก้ไขเพื่อเพิ่มความทนทานของไม้พาเลท ลดอัตราการชำรุด และปรับปรุงกระบวนการใช้งาน ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมไปถึงแนวโน้มการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืนโดยการทบทวนการวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อม การปล่อย คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Emission) จากการผลิตและซ่อมแซมพาเลทไม้ ผลการศึกษาเสนอแนะมาตรการที่สามารถนำไป ประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างเป็นระบบ

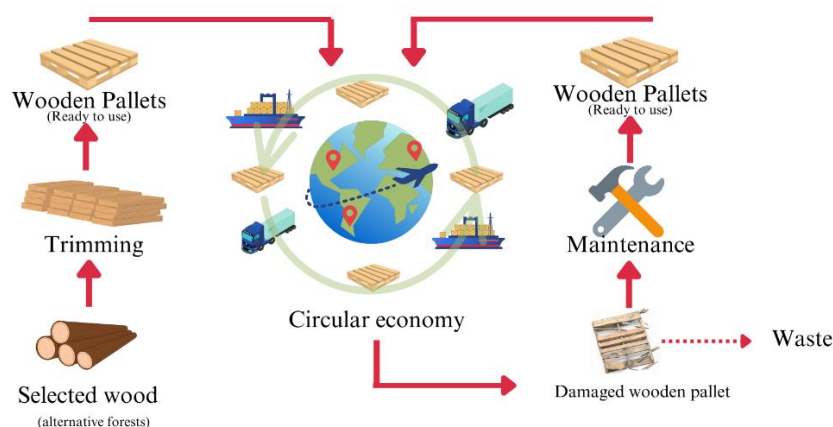


Figure 1 Circular economy in the wooden pallet industry

2. วิธีการศึกษา

การวิจัยนี้ได้รับการอนุเคราะห์ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตพาเลทไม้ และให้บริการการเช่าพาเลทไม้ในอุตสาหกรรมโดยมีหัวข้อการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วง 1 ปี มีดังนี้

Table 1 ข้อมูลการให้เช่า - นำกลับมาซ่อมของพาเลทไม้ในอุตสาหกรรมการขนส่งในรอบ 1 ปี

Month	Wooden pallets			Alternative trees	
	Rental (Unit)	Maintain (Unit)	%	Harvested (trees)	Replacement (trees)
January	3,500	1,750	50.00	219	875
February	2,500	1,325	53.00	147	587.5
March	4,200	1,950	46.43	281	1,125
April	3,200	2,000	62.50	150	600
May	3,400	1,745	51.32	207	827.5
June	3,200	1,250	39.06	244	975
July	2,800	990	35.36	226	905
August	2,500	1,475	59.00	128	512.5
September	3,000	1,300	43.33	213	850
October	4,000	1,890	47.25	264	1,055
November	3,200	1,960	61.25	155	620
December	3,400	2,010	59.12	174	695
Average			50.50 %		

2.1 เครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาคุณภาพ (7 QC tools)

เครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาคุณภาพ เพื่อทำความเข้าใจและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการใช้งานไม้พาเลทงานวิจัยหลายฉบับได้นำเครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพมาใช้ โดยเครื่องมือที่ได้รับความนิยม ได้แก่

2.1.1 แผนภูมิแก๊งปลา (Fishbone Diagram) [6] เป็นผู้พัฒนาแนวคิดของแผนภูมิแก๊งปลา ซึ่งใช้ในการจำแนกสาเหตุของปัญหาตามหมวดหมู่ที่เกี่ยวข้อง อาทิ 4 M วัสดุ (Material) กระบวนการ (Method) บุคคล (Man) เครื่องจักร (Machinery) หรือในบางกรณีอาจจะเพิ่มในส่วนองสภาพทางสิ่งแวดล้อม (Environment) เพื่อให้ครอบคลุมในมิติที่กว้างขึ้น โดยวิธีใช้แผนภูมิแก๊งปลาทำได้ดังนี้

- 1) กำหนดปัญหา – ระบุปัญหาที่หัวปลา เช่น ใช้เวลานานในการแพ็คของ หรือเครื่องจักรเสียบ่อย จากนั้นวาดลูกศรชี้ไปที่หัวปลาแทนกระดูกสันหลัง
- 2) ระบุสาเหตุหลัก – กำหนดสาเหตุหลักอย่างน้อย 4 ปัจจัย เช่น แรงงาน เครื่องจักร วัตถุดิบ และกระบวนการผลิต โดยวาดแก๊งปลาขนาดใหญ่เชื่อมกับกระดูกสันหลัง
- 3) ระบุสาเหตุย่อย – แดกแก๊งปลาขนาดเล็กจากแต่ละสาเหตุหลัก เพื่อแสดงรายละเอียดของปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหา
- 4) สรุปต้นตอปัญหา – วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้เพื่อระบุสาเหตุที่แท้จริง และหาแนวทางแก้ไขเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน

2.1.2 แผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) [7] หลักการพาเรโต (80/20 Rule) ได้รับการนำมาใช้เพื่อระบุปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบมากที่สุด ซึ่งขั้นตอนการทำแผนภูมิพาเรโต เริ่มจากกำหนดปัญหาหรือหัวข้อที่ต้องวิเคราะห์ แล้วรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ

สาเหตุและความถี่ที่เกิดขึ้น จากนั้นจัดเรียงข้อมูลจากมากไปน้อย และคำนวณเปอร์เซ็นต์สะสม วาดแผนภูมิพารेटโตโดยใช้แกนซ้าย แทนความถี่หรือผลกระทบ และแกนขวาแทนเปอร์เซ็นต์สะสม วาดแท่งกราฟแสดงปัจจัยตามลำดับ พร้อมเส้นกราฟแสดง เปอร์เซ็นต์สะสม สุดท้ายวิเคราะห์ผลลัพธ์โดยใช้หลัก 80/20 เพื่อระบุสาเหตุหลักและวางแผนแก้ไขปัญหามีประสิทธิภาพ

2.2 การคำนวณ การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Emission)

หมายถึงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศจากระบบการทางธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ ก๊าซ CO₂ เป็นก๊าซเรือนกระจกหลักที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การลดการปล่อย CO₂ เป็นปัจจัยสำคัญในการบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ลดปรากฏการณ์เรือนกระจก และช่วยให้บรรลุเป้าหมายด้านความยั่งยืนตามข้อตกลงปารีส (Paris Agreement) ซึ่งมีระบุไว้ในเว็บไซต์ขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) หรือ TGO จากการผลิตและซ่อมแซมไม้พาเลทสามารถคำนวณการปล่อย CO₂ จากระบบการผลิตและซ่อมแซมไม้พาเลทได้โดยใช้สมการ [8]

$$\text{CO}_2 \text{ Emission} = \text{จำนวนพาเลทที่ใช้} \times (\text{ค่าการปล่อย CO}_2 \text{ ต่อพาเลท (kgCO}_2\text{)}) / \text{อายุการใช้งานเฉลี่ย} \quad (1)$$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

จาก Table 1 เราจะเห็นได้ว่าการให้เข้าพาเลทไม้หมุนเวียนในระบบของธุรกิจ และพบว่าในแต่ละเดือนในรอบปีมีการส่งออกพาเลทไม้ใกล้เคียงกัน และเมื่อผ่านไปมีการหมุนเวียนพาเลทไม้กลับมาให้ทำการซ่อมบำรุงซึ่งจากการสำรวจพบว่าไม้พาเลทไม้ต้องซ่อมบำรุงเฉลี่ยมากถึง 50.50 % ซึ่งมีปริมาณมาก และในทางเดียวกันนั้นวัตถุดิบที่ต้องเอามาใช้คือการตัดต้นไม้อิงในสัดส่วน ต้นสน 1 ต้น ต่อ พาเลทไม้ 8 ตัว และต้องทำการปลูกในอัตราส่วน โค่น 1 ต้น ต่อการปลูกทดแทน 4 ต้น ดังนั้นปัญหานี้จึงนำมาสู่ขั้นตอนในการศึกษาปัญหาและแนวทางแก้ไขการใช้งานไม้พาเลทในอุตสาหกรรมดังกล่าวต่อไปนี้

3.1 การหาที่มาของปัญหาการใช้งานไม้พาเลทในอุตสาหกรรมขนส่ง

จากแผนภูมิแก๊งปลา (Fishbone Diagram) ซึ่งใช้ในการจำแนกสาเหตุของปัญหาตามหมวดหมู่ที่เกี่ยวข้องพบว่าเมื่อแบ่งสาเหตุของปัญหาหลักได้ 4 ด้าน และแบ่งย่อยได้ทั้งหมด 8 สาเหตุหลัก ดังแสดงใน Figure 2 พบว่ามีดังนี้ ด้านบุคลากร ได้แก่ ลูกจ้างขาดความรู้ในการใช้งาน ซ่อมแซมไม่ทันต่อความต้องการ ด้านกระบวนการทำงาน ได้แก่ ความผิดพลาดของการผลิต ขั้นตอนการทำงานหลากหลาย ด้านเครื่องจักรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ มีการใช้งานของเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องผิดวิธี มาตรฐานงานของลูกจ้างไม่เป็นสากล และด้านวัสดุ ได้แก่ ไม้เกิดเชื้อรา พาเลทไม้แตกหักไม่สามารถแก้ไขได้ โดยที่เมื่อเราได้สาเหตุหลักมาแล้วจึงทำการลงไปเก็บข้อมูลเชิงปริมาณที่เกิดขึ้นภายใต้เคสที่ส่งพาเลทไม้กลับมาซ่อมแซมจำนวน 19,645 ครั้ง และเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือแผนภูมิพารेटโต

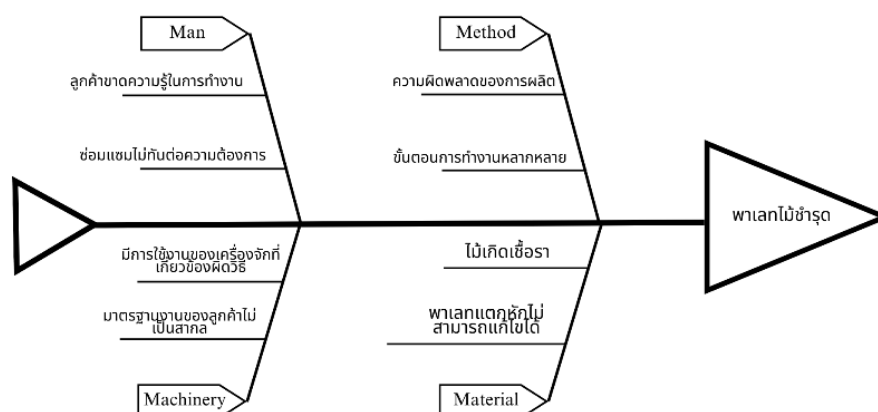


Figure 2 Fishbone Diagram

จาก Table 2 พบว่า เมื่อเราจัดแบ่งข้อมูลตามสาเหตุของปัญหาและนำจำนวนการเกิดปัญหาที่พบในงานอุตสาหกรรมพาเลทไม้สามารถคิดเป็นร้อยละได้จากจำนวนครั้งพบว่ากลุ่มสาเหตุหลักที่เกิดจากวัสดุและเครื่องจักรที่มีการทำงานร่วมกับพาเลทไม้โดยตรงดังแสดงใน Table 2 ได้แก่ พาเลทไม้แตกหักไม่สามารถแก้ไขได้ 44.52% และ มาตรฐานงานของลูกค้ายไม่เป็นสากล 20.82% (คือ ถูกนำไปใช้ผิดวิธี เช่น การยกวางเกินจากมาตรฐาน การใช้เครื่องจักรที่ไม่ได้ระบุไว้มาหยิบจับพาเลทไม้ ตามลำดับ

Table 2 สาเหตุของปัญหา และปริมาณจำนวนชิ้นงานที่เกิดการแตกหักต้องซ่อมบำรุง

4M	Cause of the problem	Number of times	%
Man	ลูกค้ายขาดความรู้ในการใช้งาน	1,450	7.38
	ซ่อมแซมไม่ทันต่อความต้องการ	1,760	8.96
Method	ความผิดพลาดของการผลิต	355	1.81
	ขั้นตอนการทำงานที่หลากหลาย	495	2.52
Machinery	มีการทำงานของเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องผิดวิธี	520	2.65
	มาตรฐานงานของลูกค้ายไม่เป็นสากล	4,090	20.82
Material	ไม้เกิดเชื้อรา	2,230	11.35
	พาเลทไม้แตกหักไม่สามารถแก้ไขได้	8,745	44.52
รวม		19,645	100.00

จากนั้นได้ทำการนำข้อมูลมาเรียบเรียงใหม่และกำหนดเป็นแผนภูมิพาเรโตดังแสดงใน Figure 3 พบว่าเมื่อลากเส้นของเปอร์เซ็นต์สะสมที่ 80% พบว่าสาเหตุของปัญหาที่ต้องดำเนินการลงไปแก้ไขได้แก่ พาเลทไม้แตกหักไม่สามารถแก้ไขได้ มาตรฐานงานของลูกค้ายไม่เป็นสากล และ ไม้เกิดเชื้อรา ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเจาะลึกข้อมูลลงไปพบว่าทุกปัญหาที่กล่าวมามีความเสียหายที่เกิดขึ้นกับพาเลทไม้โดยตรง มาจากการใช้งานที่มีความรุนแรง การกระแทกของวัสดุ การใช้รถโฟล์คลิฟท์ชนกับพาเลทไม้โดยตรง และสามารถแยกประเภทของการแตกหักของพาเลทได้ 3 ประเภท ดังแสดงใน Figure 4 ได้แก่ ไม้แตกแนวตั้งฉากเส้น ไม้แตกตามมุม และรอยต่อ และไม้แตกแนวนอนเส้น ซึ่งในส่วนนี้จะเน้นแนวทางในการวิจัยต่อไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรง หรือเพิ่มประสิทธิภาพการคงทนต่อการแตกหักเป็นต้น

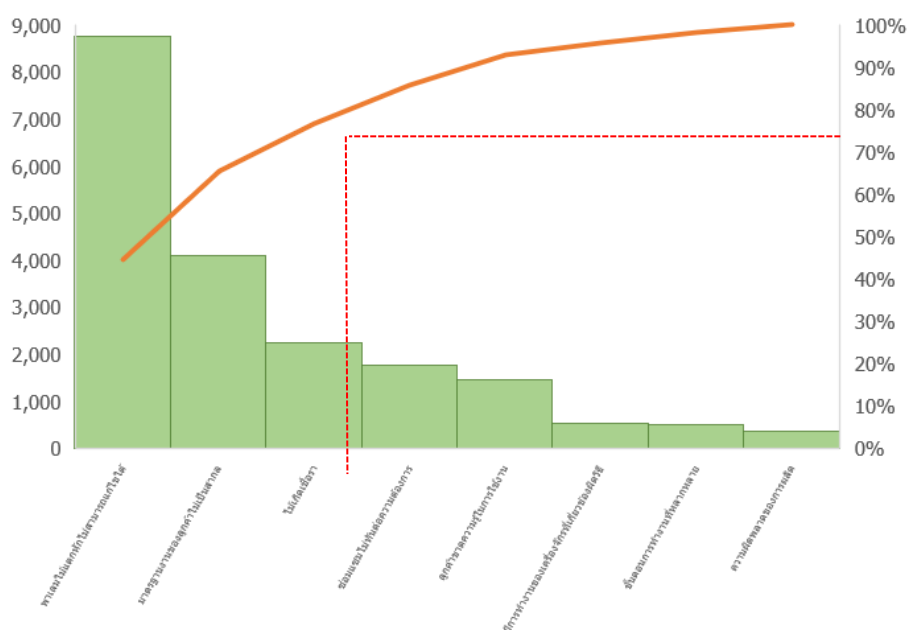


Figure 3 Pareto Chart

3.2 การคาดการณ์การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Emission)

เนื่องจากธุรกิจพาเลทไม้ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นอุตสาหกรรมที่คำนึงถึงความยั่งยืน มีการใช้หลักของเศรษฐกิจหมุนเวียนมาเป็นโมเดลสำคัญทางธุรกิจ คือ ให้เข้าพาเลทไม้และดำเนินการด้านการจัดเก็บและขนส่ง ดังนั้นในกระบวนการผลิตจึงคำนึงถึงความสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน โดยเมื่อมีการโค่นต้นไม้มาเพื่อทำพาเลทจะทำการปลูกต้นไม้ทดแทนในสัดส่วน 1 : 4 ต้น และไม้ที่นำมาใช้มาจากป่าทดแทนทั้งหมด แต่เมื่อมีความเสียหายที่เกิดขึ้นในกระบวนการการเข้า การใช้การดำเนินการจึงต้องมีการซ่อมบำรุงซึ่งสามารถคิดค่าการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ตามมาตรฐานสากลเพื่อเป็นการพัฒนาและแนวทางการดำเนินกิจกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป ซึ่งพาเลทไม้ 1 ชิ้น มีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Emission) เท่ากับ 4.12 kg CO₂ ตามข้อกำหนดใน Using the LCIA method IPCC 2013 GWP 100a V1.03 [9]

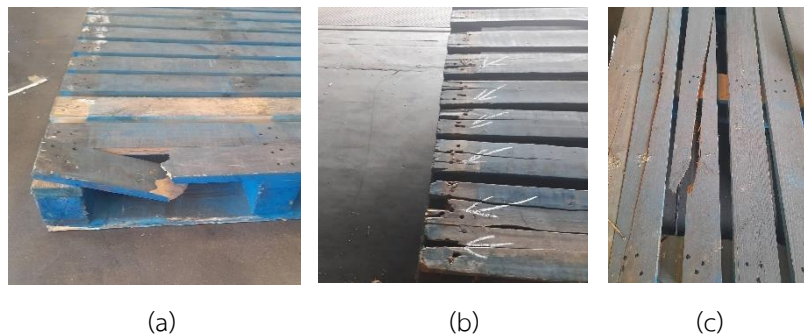


Figure 4 ชนิดการแตกหักของพาเลทไม้จากการใช้งาน a) ไม้แตกแนวตั้งฉากเส้น b) ไม้แตกตามมุมและรอยต่อ c) ไม้แตกแนวขนานเส้น

จาก Table 3 ได้นำข้อมูลจำนวนพาเลทไม้ที่เกิดขึ้นในสาเหตุของปัญหาจากแผนภูมิพาเรโต โดย 1 ชิ้น แต่ละปัญหามีสัดส่วนในการผลิตใหม่ และอายุการใช้งานเฉลี่ยดังที่แสดงในตาราง จะได้ค่าการปล่อย CO₂ Emission ต่อปี เท่ากับ 3,740.136 kg CO₂ ดังนั้นถ้าสามารถลดปัญหาที่เกิดขึ้น หรือเพิ่มประสิทธิภาพความแข็งแรงให้ผลิตภัณฑ์พาเลทไม้มากขึ้นก็จะสามารถลดค่า CO₂ Emission ได้อย่างยั่งยืน

Table 3 ข้อมูลการปล่อยค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีของการผลิตพาเลทไม้ใหม่

สาเหตุที่จะทำการแก้ไข	การปล่อยค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี					
	จำนวน (ชิ้น)	สัดส่วนที่ ต้องผลิต ใหม่	จำนวนพาเลท ไม้ ที่ต้องผลิตใหม่ (ชิ้น)	อายุการใช้ งานเฉลี่ย (รอบ)	ค่าการปล่อย CO ₂ ต่อพา เลทไม้ (kg CO ₂)	CO ₂ Emission (kg CO ₂)
พาเลทไม้แตกหักไม่สามารถแก้ไขได้	8,745	0.8	6,996	10	4.12	2,882.352
มาตรฐานงานของลูกค้าไม่เป็นสากล	4,090	0.4	1,636	10	4.12	674.032
ไม่เกิดเชื้อรา	2,230	0.2	446	10	4.12	183.752
					รวม	3,740.136

4. สรุป

การศึกษาปัญหาและแนวทางแก้ไขในการใช้งานไม้พาเลทในอุตสาหกรรมขนส่งอย่างยั่งยืนชี้ให้เห็นว่า การนำหลักเศรษฐกิจหมุนเวียนมาปรับใช้ในระบบให้เข้าและขนส่งสามารถช่วยเพิ่มความยั่งยืนได้ อย่างไรก็ตาม การหมุนเวียนพาเลทไม้ส่งผลให้เกิดปัญหาการซ่อมบำรุงสูงถึง 50.50% จากการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิแกงปลาและแผนภูมิพาเรโตพบว่า สาเหตุหลักมาจากพาเลทไม้แตกหักจนไม่สามารถซ่อมแซมได้ และมาตรฐานงานของลูกค้าไม่เป็นสากล เมื่อพิจารณาด้านสิ่งแวดล้อม พบว่าการใช้

ทรัพยากรหมุนเวียนสามารถลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 3,740 kg CO₂ แนวทางแก้ไขที่สำคัญคือการพัฒนาไม้พาเลทให้ทนทานขึ้น โดยการแตกหักที่พบแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ แตกตามแนวเสี้ยนไม้ แตกตั้งฉากกับเสี้ยนไม้ และจุดยึดต่อ

แนวทางพัฒนาเพิ่มเติม ได้แก่ การออกแบบจุดยึดต่อแบบไม่ใช้ตะปู และการเคลือบสารป้องกันการแตกหักตามแนวเสี้ยน หากสามารถลดอัตราการแตกหักได้ จะช่วยลดการใช้ไม้ ส่งเสริมความยั่งยืนของอุตสาหกรรมขนส่งอย่างมีนัยสำคัญในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ได้สนับสนุนการวิจัยและมีผลผลักดันให้บทความฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ บริษัท เซฟ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ให้ข้อมูลในภาพรวมของอุตสาหกรรมขนส่งอย่างยั่งยืน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Puasakul, K., Swangnop, S., Khunprom, K., and Vilasdaechanont, A. 2021. การปรับปรุงกระบวนการทำงานในบริษัทผลิตพาเลทไม้. *Thai Industrial Engineering Network Journal*, 7(2), 90-99.
- [2] Thammasiri, S., Phongthong, P., and Tewsoiy, C. 2022. Returnable Packaging Management Technology in Logistics and Supply Chain A case of Pallet Renting Business. *Journal of Multidisciplinary in Humanities and Social Sciences*, 5(1), 364-379.
- [3] Pryshlakivsky, J., and Searcy, C. 2013. Fifteen years of ISO 14040: a review. *Journal of Cleaner Production*, 57, 115-123.
- [4] สิงหา ประมรณ, อังกาบ บุญสูง, เรือนขวัญ หุ่นเริง ใจ และ เทียนชัย หรรุ่งโรจน์. 2020. การพัฒนาเฟอร์นิเจอร์จากพาเลทไม้. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม*, 2.3.2020, 54-64.
- [5] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2528. มอก. 588-2528: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไม้รองรับสินค้า. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [6] Kaewurai, R., and Noinakorn, S. 2021. A DEVELOPMENT OF LEARNING ACTIVITY USING FISHBONE DIAGRAM VIA FACEBOOK TO ENHANCE PROJECT PROBLEM ANALYTICAL ABILITY OF STUDENTS: การพัฒนากิจกรรมการเรียนรู้โดยใช้ผังก้างปลาร่วมกับเฟซบุ๊กเพื่อพัฒนาความสามารถในการคิดวิเคราะห์ปัญหาโครงการของนิสิต. *Journal of Education and Innovation*, 23(3), 269-285.
- [7] งามอาจ รัตนกระจ่าง, สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร, และ นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร. 2024. การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในโรงงานผลิตหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม*, 34(1), 76-89.
- [8] Dansawad, N. 2023. การพยากรณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย. *Recent Science and Technology*, 15(2), 408-422.
- [9] Kaewmanee, J., Pradabphetrat, P., and Rangpan, V. 2024. Carbon Footprint Assessment Based on Life Cycle Assessment of Biomass Power Plant. *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports*, 27(1), 92-101.

การจำแนกลักษณะความเครียดจากปัจจัยภายนอกในต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยใช้เทคนิควิสิเบิล
และเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่อง
Characterization of External Stress Factors in Durian (*Durio zibethinus*) ‘Monthong’
Seedlings Using Visible and Near-Infrared Spectroscopy Combined with Machine Learning

เจตณุสรณ์ รอดศิริ¹ กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์^{2,*} และ พรประพา คงตระกูล¹
Jetnusun Rodsiri¹, Kittisak Phetpan^{2,*} and Pornprapa Kongtragoul¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

²ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

¹Department of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

²Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Kittisak Phetpan, e-mail address: kittisak.ph@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิควิสิเบิลและเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Visible and Near-infrared Spectroscopy: VIS-NIRS) ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) เพื่อจำแนกลักษณะความเครียดในต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่เกิดจากการขาดน้ำและขาดธาตุอาหาร โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) มีชุดทดสอบจำนวน 3 กรรมวิธี กรรมวิธีละ 5 ซ้ำ ซึ่งประกอบด้วย กรรมวิธีที่ 1 ชุดต้นกล้าทุเรียนที่ให้น้ำให้ปุ๋ย (ชุดควบคุม) กรรมวิธีที่ 2 ชุดต้นกล้าทุเรียนที่ให้น้ำไม่ให้ปุ๋ย และกรรมวิธีที่ 3 ชุดต้นกล้าทุเรียนที่ไม่ให้น้ำให้ปุ๋ย โดยทำการเก็บข้อมูลสเปกตรัมจากใบ 3 ตำแหน่งของต้นกล้าทุเรียน ได้แก่ ใบช่วงบน (P1) ใบช่วงกลาง (P2) และใบช่วงล่าง (P3) ควบคู่กับการวัดค่าความชื้นในดินและค่าคลอโรฟิลล์ ดำเนินการทุก ๆ สัปดาห์ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ ผลการวิเคราะห์ PCA พบว่า เทคนิค VIS-NIRS สามารถจำแนกกลุ่มลักษณะความเครียดของต้นกล้าทุเรียนที่เกิดจากสาเหตุการขาดน้ำและขาดปุ๋ยเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม กล่าวคือ กรรมวิธีต้นกล้าทุเรียนชุดควบคุมได้ 58.04-74.72 เปอร์เซ็นต์ กรรมวิธีต้นกล้าทุเรียนขาดธาตุอาหาร 50.46-73.54 เปอร์เซ็นต์ และกรรมวิธีต้นกล้าทุเรียนขาดน้ำ 51.07-70.74 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะในช่วงคลื่น 680-760 นาโนเมตร ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิค VIS-NIRS ในการเป็นเครื่องมือที่ไม่ทำลายตัวอย่างสำหรับการจำแนกสภาวะความเครียดในต้นกล้าทุเรียนที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: ต้นกล้าทุเรียน, ความเครียดของพืช, วิสิเบิลและเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี, การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

Abstract

This study aimed to investigate the feasibility of applying Visible and Near-infrared Spectroscopy (VIS-NIRS) in combination with Principal Component Analysis (PCA) to classify stress conditions in ‘Monthong’ seedlings caused by water deficiency and nutrient deficiency. The experiment was conducted using a Completely Randomized Design (CRD) with three treatments, each consisting of five replications: control treatment seedlings receiving both water and fertilizer, (2) nutrient-deficient treatment seedlings receiving water but no fertilizer and (3) water-deficient treatment seedlings receiving fertilizer but no water. Spectral data were collected from three leaf positions: upper (P1), middle (P2) and lower (P3) leaves, alongside measurements of soil moisture content and chlorophyll content. Data collection was performed weekly over six weeks. The PCA results demonstrated that VIS-NIRS effectively differentiated stress conditions among durian seedlings caused by water and nutrient deficiency compared to the control. The classification accuracy ranged from 58.04 to 74.72 percent for the control treatment, 50.46 to 73.54 percent for the nutrient-deficient treatment and 51.07 to 70.74 percent for the water-deficient treatment, particularly in the wavelength range of 680 to 760 nm. These findings highlight the potential of VIS-NIRS as a non-destructive analytical tool for identifying physiological stress in durian seedlings.

Keywords: Durian seedlings, Plant stress, Visible and Near-infrared Spectroscopy, Principal Component Analysis

1. บทนำ

ทุเรียน (*Durio zibethinus*) เป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย และสามารถส่งออกผลผลิตเป็นอันดับที่หนึ่งในกลุ่มผลไม้ไทย โดยมีตลาดหลัก ได้แก่ จีน ออสเตรเลีย และเวียดนาม พื้นที่เพาะปลูกทุเรียนในประเทศไทยกระจายอยู่ในหลายภูมิภาค โดยเฉพาะในภาคตะวันออก เช่น จันทบุรี ระยอง และตราด และภาคใต้ เช่น ชุมพร ระนอง สุราษฎร์ธานี และนครศรีธรรมราช ในปี 2566 มีพื้นที่ปลูกทุเรียนทั่วประเทศมากกว่า 1 ล้านไร่ และให้ผลผลิตเฉลี่ย 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ รวมผลผลิตเกือบ 1 พันล้านตัน คิดเป็นมูลค่าการส่งออกกว่า 140,000 ล้านบาท [1] อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญที่เกษตรกรชาวสวนทุเรียนต้องเผชิญ คือ การบริหารจัดการความเครียดของต้นทุเรียนในแปลงปลูก ซึ่งส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของผลผลิตโดยตรง อันเป็นสาเหตุสำคัญของความสูญเสียทางเศรษฐกิจ ทั้งในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยวและหลังการเก็บเกี่ยว [2] นอกจากนี้ยังส่งผลให้เกษตรกรต้องเผชิญกับต้นทุนที่เพิ่มสูงขึ้นจากการบริหารจัดการและควบคุมปัจจัยที่ทำให้พืชเกิดความเครียด ซึ่งความเครียดของพืชสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย โดยแบ่งออกเป็นปัจจัยที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต (Biotic stress) เช่น การระบาดของโรคและแมลงศัตรูพืช และปัจจัยที่เกิดจากสิ่งไม่มีชีวิต (Abiotic stress) เช่น การขาดธาตุอาหาร ความเค็มของดิน และภัยแล้งขาดน้ำ [2] ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างและกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืช หากสามารถตรวจวินิจฉัยและระบุสาเหตุของความเครียดได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ก็จะช่วยให้อาณาการบริหารจัดการแปลงปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นกับผลผลิตได้ [3]

ในอดีตการตรวจวินิจฉัยสภาวะหรือลักษณะความเครียดของพืชเป็นการตรวจโดยใช้สายตาเปล่า (Visual diagnosis) ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกและมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่จำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ และพืชต้องแสดงอาการผิดปกติที่ชัดเจน จึงจะสามารถแยกแยะความแตกต่างของความเครียดที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ได้ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดจากการวินิจฉัยที่ล่าช้าและความไม่แม่นยำ [4] นอกจากนี้ ยังมีการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างพืชในห้องปฏิบัติการ ซึ่งให้ความแม่นยำสูงกว่า แต่ต้องใช้ต้นทุนที่สูงและระยะเวลาในการตรวจสอบที่นาน อีกทั้งยังไม่สามารถใช้วิเคราะห์พืชในระดับแปลงปลูกได้แบบทันที (real time) จากข้อจำกัดของวิธีการตรวจวินิจฉัยแบบดั้งเดิม ปัจจุบันมีการนำเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่างพืช (Non-destructive technique) เข้ามาช่วยตรวจหาความเครียดของพืชตั้งแต่ระยะเริ่มต้น โดยอาศัยการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของพืช เช่น Magnetic resonance imaging (MRI), Photo acoustic imaging, Tomography, Multispectral imaging, Hyperspectral imaging และ Visible and near-infrared spectroscopy (VIS-NIRS) ซึ่งช่วยให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีและชีวภาพของพืชในระดับเซลล์ได้อย่างแม่นยำ จากเทคนิคดังกล่าวพบว่าเทคนิค VIS-NIRS ได้รับความสนใจมากที่สุด เนื่องจากสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุ ธาตุอาหาร และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในใบพืช ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสภาวะความเครียดของพืช [2]

เทคนิค VIS-NIRS ใช้หลักการการดูดกลืนพลังงานของโมเลกุลสารประกอบในพืช เช่น H-O, H-N, H-C และ C=O ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์และโมเลกุลน้ำ โดยสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างน้ำในเนื้อเยื่อพืช รวมถึงการดูดซับแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นเฉพาะ ก่อนที่พืชจะแสดงอาการผิดปกติออกมา [5-7] เช่น การใช้เทคนิค VIS-NIRS ในการตรวจสอบสภาวะการขาดน้ำของใบพืช (*Epipremnum Aureum*) [8] และการตรวจวิเคราะห์สถานะของน้ำและคลอโรฟิลล์ในใบทานตะวัน [9] นอกจากนี้เทคนิค VIS-NIRS ยังถูกนำมาใช้ในการทำนายระดับธาตุอาหารในดิน เช่น โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส และอินทรีย์วัตถุ ซึ่งมีผลต่อการเติบโตของพืช [10] งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิค VIS-NIRS ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) เพื่อจำแนกกลุ่มความเครียดในต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่เกิดจากปัจจัยภายนอก

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทอง

เตรียมต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทอง อายุ 8 เดือน ที่สมบูรณ์และไม่พบอาการผิดปกติ ไม่มีบาดแผลและการเข้าทำลายของโรคและแมลง จำนวน 15 ต้น โดยต้นกล้าดังกล่าวถูกเลี้ยงในพื้นที่เปิด ไม่มีการควบคุมสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรือแสงสว่าง ทั้งนี้เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมจริงในแปลงปลูกที่อยู่กลางแจ้ง ก่อนนำมาศึกษาในแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) มีชุดทดสอบจำนวน 3 กรรมวิธี กรรมวิธีละ 5 ซ้ำ เพื่อทำการวัดค่าสเปกตรัมจากต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทอง ได้แก่

กรรมวิธีที่ 1 ชุดต้นกล้าทุเรียนให้น้ำให้ปุ๋ย (ชุดควบคุม: T0)

กรรมวิธีที่ 2 ชุดต้นกล้าทุเรียนให้น้ำไม่ให้ปุ๋ย (ชุดขาดธาตุอาหาร: T1)

กรรมวิธีที่ 3 ชุดต้นกล้าทุเรียนไม่ให้น้ำให้ปุ๋ย (ชุดขาดน้ำ: T2)

การให้ปุ๋ยในต้นกล้าทุเรียนที่อยู่ในกรรมวิธีที่ได้รับปุ๋ย ใช้ปุ๋ยเคมีสูตรแคลเซียมไนโตรเจน (15-0-0) ซึ่งเป็นปุ๋ยที่มีธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตและแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก โดยให้ในปริมาณ 1.5 กรัมต่อต้น ทุก ๆ 21 วัน ตลอดช่วงการทดลอง ส่วนการให้น้ำในกรรมวิธีที่ได้น้ำ มีการให้น้ำในปริมาณ 350 มิลลิลิตรต่อต้น โดยเป็นการให้แบบวันเว้นวัน เพื่อรักษาความชื้นในดินให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้า

2.2 การวัดค่าสเปกตรัมวิลิเบิลและเนียร์อินฟราเรด

Figure 1 ทำการสแกนใบของต้นกล้าทุเรียนทั้ง 3 กรรมวิธี เพื่อเก็บค่าสเปกตรัมวิลิเบิลและเนียร์อินฟราเรดด้วยเครื่อง AvaSpec-Pacta 4096CL, Avantes, The Netherlands (VIS-NIR spectrometer) ตัวอย่างละ 3 ตำแหน่งของต้น คือ ใบช่วงบน (P1) ใบช่วงกลาง (P2) และใบช่วงล่าง (P3) โดยสแกนใบละ 3 ตำแหน่งได้แก่ บริเวณโคนใบ กลางใบ และปลายใบ จากนั้นบันทึกสเปกตรัมลงคอมพิวเตอร์ ครอบคลุมระยะเวลา 35 วัน ต่อเนื่องจำนวน 6 ครั้ง (0 7 14 21 28 และ 35 วัน หลังเตรียมชุดทดลอง) พร้อมทั้งบันทึกภาพลักษณะการเปลี่ยนแปลงของต้นกล้าทุเรียน วัดความชื้นในดินด้วยเครื่อง soil moisture meter และวัดค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบด้วยเครื่อง SPAD-502 Plus

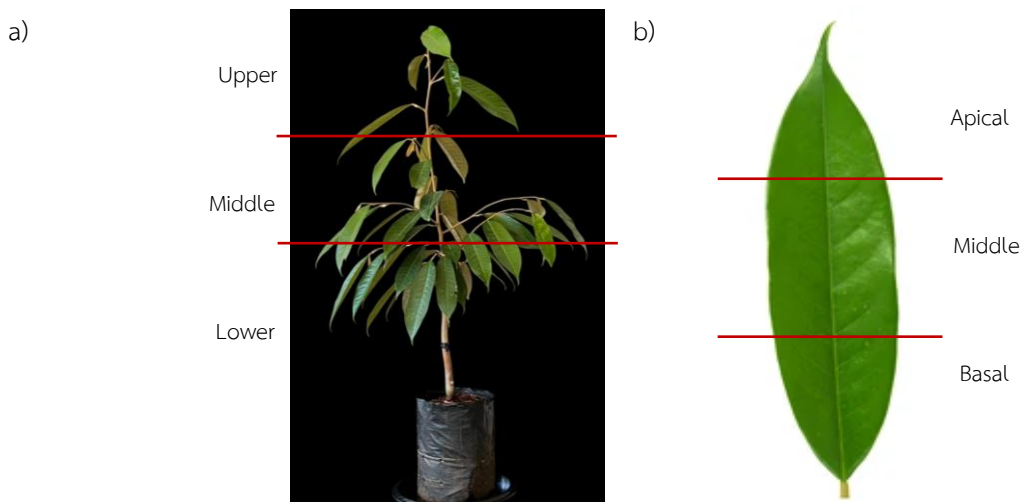


Figure 1 Sampling positions at different stem level (a) and different leaf position (b)

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลสเปกตรัมถูกนำมาจัดการเบื้องต้นด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ คือ Savitzky-Golay second derivative (SGD2) เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของสเปกตรัมโดยช่วยลบเส้นฐานที่อาจเกิดการกระเจิงแสง (Light scattering) ซึ่งทำให้สามารถเห็นจุดยอดของสเปกตรัม (Peaks) ที่ชัดเจนขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้สามารถแยกจุดยอดที่ซ้อนทับกันได้ดีขึ้น โดยปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ที่ถูกกำจัดออกจากข้อมูลสเปกตรัมทำให้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อจำแนกกลุ่มลักษณะ ความเครียดในต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่เกิดจากปัจจัยภายนอกผ่านวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) การวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดในงานวิจัยนี้ถูกดำเนินการโดยใช้ภาษา Python โดยมีแผนผังวิธีการดำเนินงานทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองดังแสดงใน Figure 2

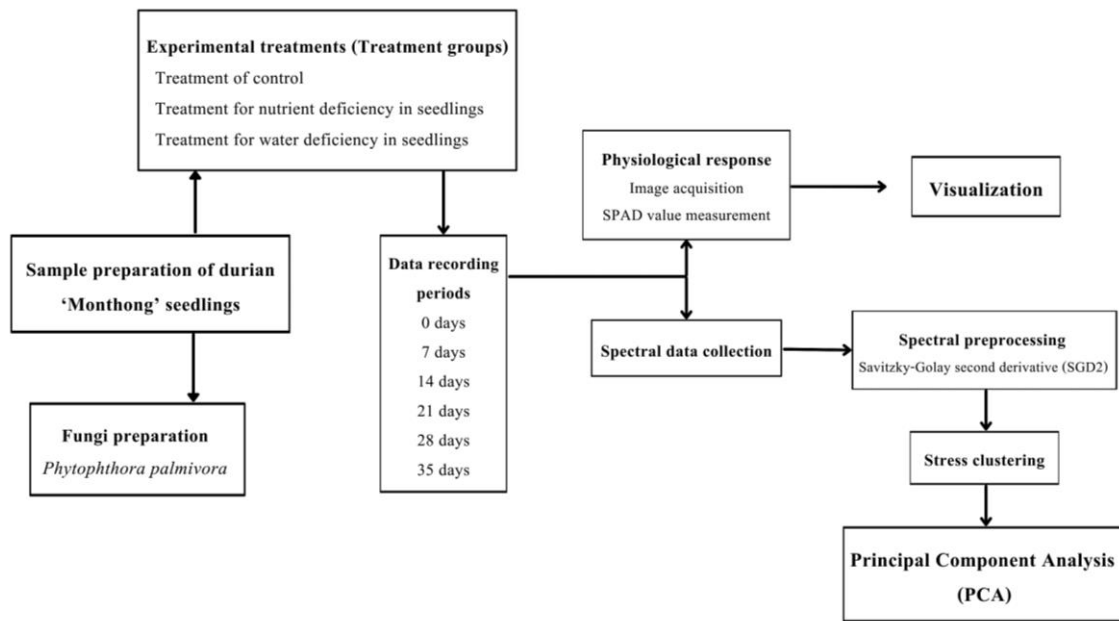


Figure 2 The experimental design and flowchart of data analysis.

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของต้นกล้าทุเรียนภายใต้สภาวะความเครียดที่แตกต่างกันตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์

จากการบันทึกภาพต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทอง อายุ 8 เดือน ดังแสดงใน Figure 3 ตั้งแต่เริ่มการทดลองสัปดาห์ที่ 0 ถึงสัปดาห์ที่ 5 (W0 -W5) พบว่า ต้นกล้าทุเรียนชุดควบคุมที่ได้รับการให้น้ำและปุ๋ยสม่ำเสมอ (T0) ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของใบและลำต้น ตลอดระยะเวลาทดลอง 6 สัปดาห์ สำหรับต้นกล้ากรรมวิธีที่ให้น้ำไม่ให้ปุ๋ย (T1) ช่วงสองสัปดาห์แรกไม่พบการเปลี่ยนแปลงของใบและลำต้น แต่สามารถเริ่มสังเกตเห็นอาการใบหงิกเล็กน้อยตั้งแต่สัปดาห์ที่ 4 เป็นต้นไป สอดคล้องกับรายงานของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ [11] ขณะที่ต้นกล้าในกรรมวิธีที่ไม่ให้น้ำให้ปุ๋ย (T2) ใบเริ่มเหี่ยวและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลตั้งแต่สัปดาห์ที่ 2 และแสดงอาการใบเหี่ยวเฉาและแห้งตายอย่างชัดเจนในสัปดาห์ที่ 4-5 ทั้งนี้การไม่ให้น้ำส่งผลกระทบต่อต้นกล้าทุเรียนแสดงอาการเหี่ยวเฉารุนแรงและตายในที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Köksal [12] ได้กล่าวว่าพืชที่ขาดน้ำจะส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตช้าและมีสีซีดขึ้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างและองค์ประกอบของใบ รวมทั้งความเข้มข้นของเมตสโนไซด์ของเซลล์ และองค์ประกอบและโครงสร้างของผนังเซลล์



Figure 3 Morphological changes in durian seedlings under different experimental conditions.

3.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของแต่ละกรรมวิธี

Figure 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณความชื้นในดินของต้นกล้าทุเรียนภายใต้สภาวะความเครียดที่แตกต่างกันตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ พบว่า กรรมวิธีชุดควบคุมที่ได้รับน้ำและปุ๋ย (T0) และกรรมวิธีที่ให้น้ำไม่ให้ปุ๋ย (T1) แสดงค่าความชื้นในดินค่อนข้างคงที่ในช่วง 18 - 20 เปอร์เซ็นต์ ตลอดช่วงการทดลอง แสดงให้เห็นว่าสภาพดินสามารถรักษาความชื้นได้ดีเมื่อได้รับน้ำอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ค่าความชื้นในดินจากกรรมวิธี T1 มีแนวโน้มลดลงประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินลดลง ส่งผลให้โครงสร้างของดินเสื่อมลงและเกิดการอัดแน่น ซึ่งส่งผลต่อการระบายน้ำและการเจริญเติบโตของรากพืช [13] ขณะที่กรรมวิธีที่ไม่ให้น้ำแต่ให้ปุ๋ย พบว่าความชื้นในดินลดลงอย่างรวดเร็วจากสัปดาห์แรก และภายใน 4-5 สัปดาห์ ค่าความชื้นในดินลดลงเป็นศูนย์ (T2) สะท้อนให้เห็นถึงการสูญเสียความชื้นที่รวดเร็ว ส่งผลให้ต้นกล้าทุเรียนเกิดความเครียดจากการขาดน้ำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุมิตร และคณะ [14] ซึ่งได้กล่าวว่า การให้น้ำแก่พืชควรให้มีระดับความชื้นในดินอยู่ระหว่างความชื้นชลประทานและจุดเหี่ยวเฉาถาวร ทั้งนี้ระดับความชื้นในดินที่ทุเรียนต้องการอยู่ที่ 20-30 เปอร์เซ็นต์

3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าคลอโรฟิลล์ของใบต้นกล้าทุเรียนภายใต้สภาวะความเครียดที่แตกต่างกันตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์

ผลการทดลองแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนี SPAD (SPAD value) ในใบต้นกล้าทุเรียนที่ตำแหน่งใบช่วงบน (Figure 5a) ใบช่วงกลาง (Figure 5b) และใบช่วงล่าง (Figure 5c) จากการทดลองภายใต้สภาวะความเครียดต่างๆ พบว่าค่าดัชนี SPAD ของใบที่วัดจาก 3 ตำแหน่งของต้นกล้าทุเรียนของชุดควบคุม (T0) และกรรมวิธีที่ให้น้ำไม่ให้ปุ๋ย (T1) มีค่าดัชนี SPAD 55-70 คงที่ตลอดการทดลอง [15] ขณะที่กรรมวิธีที่ไม่ให้น้ำให้ปุ๋ย (T2) มีค่าดัชนี SPAD 55 จากนั้นลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 และลดลงอย่างรวดเร็วในสัปดาห์ที่ 3 เป็นต้นไป จนใกล้ศูนย์ในสัปดาห์ที่ 5 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการขาดน้ำส่งผลให้คลอโรฟิลล์เสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับงานวิจัยของ วสันต์ และคณะ [16] ที่ได้กล่าวว่าสภาวะการขาดน้ำส่งผลต่อการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบ

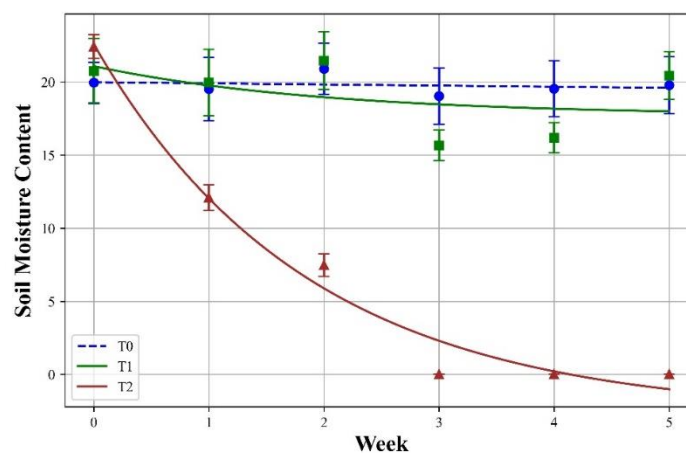
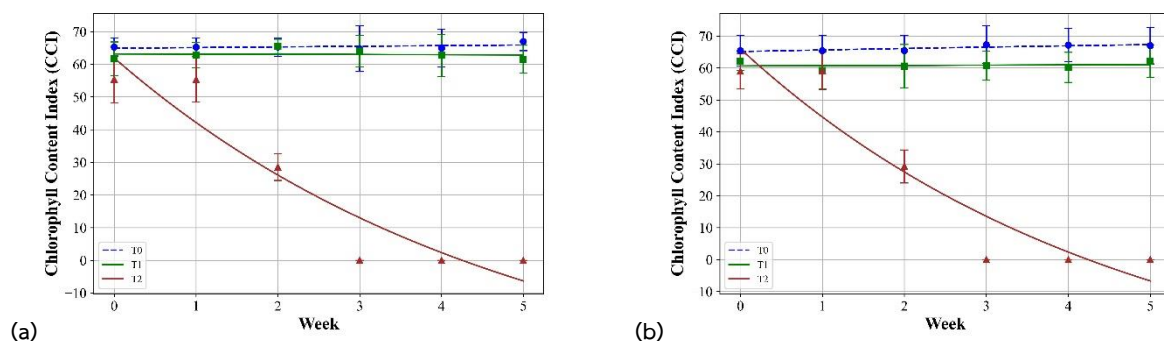


Figure 4 Soil moisture dynamics under different experimental conditions.



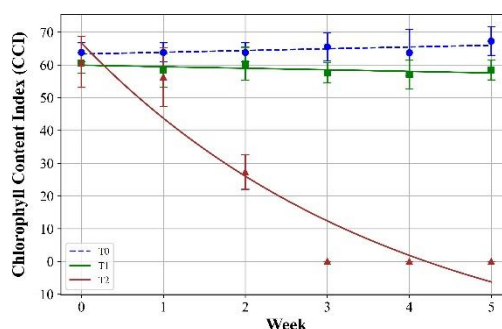


Figure 5 Temporal changes in SPAD value in durian seedling leaves under different leaf positions over six weeks: (a) upper leaf (P1), (b) middle leaf (P2) and (c) lower leaf (P3).

3.4 การจำแนกลักษณะความเครียดโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ของต้นกล้าทุเรียนภายใต้ 3 กรรมวิธี พบว่ามีความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างต้นกล้าทุเรียนชุดควบคุม (T0) ต้นกล้าทุเรียนชุดขาดธาตุอาหาร (T1) และต้นกล้าทุเรียนชุดขาดน้ำ (T2) ซึ่งเผยให้เห็นการตอบสนองทางสรีรวิทยาของต้นกล้าทุเรียนต่อความเครียดที่แตกต่างกันในสัปดาห์ต่างๆ Figure 6 แสดงแผนภาพ Score plot และ Loading plot จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) สำหรับชุดข้อมูลสเปกตรัมของใบช่วงบน (P1) ผลการวิเคราะห์พบว่าทั้ง 3 กรรมวิธีสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากกว่า 55% ในองค์ประกอบหลักที่หนึ่ง (PC1) สำหรับองค์ประกอบหลักที่สอง (PC2) ซึ่งมีสัดส่วนการอธิบายความแปรปรวนรองลงมาจาก PC1 ซึ่งมีบทบาทในการแสดงลักษณะความแตกต่างเพิ่มเติมระหว่างช่วงเวลาการเก็บตัวอย่าง หรือระหว่างต้นกล้าที่ตอบสนองต่อความเครียดในระดับที่ต่างกัน อย่างไรก็ตาม ต้นกล้าชุดควบคุม (T0) เป็นกรรมวิธีเดียวที่รูปแบบการกระจายตัวของค่า Score ไม่สามารถจำแนกความแตกต่างของข้อมูลที่ทำให้การทดลองในแต่ละสัปดาห์ได้อย่างชัดเจน (Figure 6a) ซึ่งเป็นการแสดงถึงการที่ต้นกล้าทุเรียนไม่ได้รับความเครียดใด ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ต้นกล้าทุเรียนได้รับน้ำและธาตุอาหารอย่างเพียงพอ ทำให้โครงสร้างใบและองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์คงที่ สอดคล้องกับผลการทดลองของ วสันต์ และคณะ [16] พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ของใบข้าวคังที่เมื่อไม่ได้รับความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำ ในขณะที่กรรมวิธีชุดขาดธาตุอาหาร (T1) แสดงการกระจายตัวของข้อมูลเพิ่มขึ้นและเริ่มเห็นแนวโน้มความแตกต่างกันในสัปดาห์ต่าง ๆ (Figure 6b) ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบทางสรีรวิทยาของใบ ส่งผลให้การดูกลืนแสงเปลี่ยนแปลงไป [2] และในส่วนของการทดลองจากกรรมวิธีชุดขาดน้ำ (T2) มีการแยกกลุ่มของข้อมูลออกจากกันได้อย่างชัดเจน (Figure 6c) แสดงให้เห็นว่าการขาดน้ำของต้นกล้าทุเรียนส่งผลกระทบบต่อองค์ประกอบภายในของใบอย่างรุนแรง [17] จาก Loading plot สามารถพิจารณา PC1 ซึ่งอธิบายความแปรปรวนได้มากกว่า 55% พบว่าช่วงคลื่นแสงที่มีอิทธิพลสูงต่อการจำแนกลักษณะความเครียดของต้นกล้าทุเรียนโดยเกิดจากปัจจัยที่กล่าวข้างต้น สามารถสังเกตถึงความแตกต่างของช่วง peak ได้ชัดเจน ในช่วง 680 nm เป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงคลื่นที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี [2] นอกจากนี้ ช่วงคลื่นดังกล่าวยังสัมพันธ์กับปริมาณน้ำและโครงสร้างภายในใบ [18] เมื่อพิจารณา Loading plot ทั้ง 3 พบว่าค่า Loading ของ PC1 ในชุดขาดน้ำ (T2) มีลักษณะเชิงสเปกตรัมที่แตกต่างจาก กรรมวิธี T0 และ T1 ซึ่งยังคงมีการให้น้ำกับต้นกล้าทุเรียน ความต่างนี้ชี้ให้เห็นว่าการสูญเสียภายในใบและการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของใบต้นกล้าทุเรียนเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างรุนแรงที่สุด (Figure 6d-f)

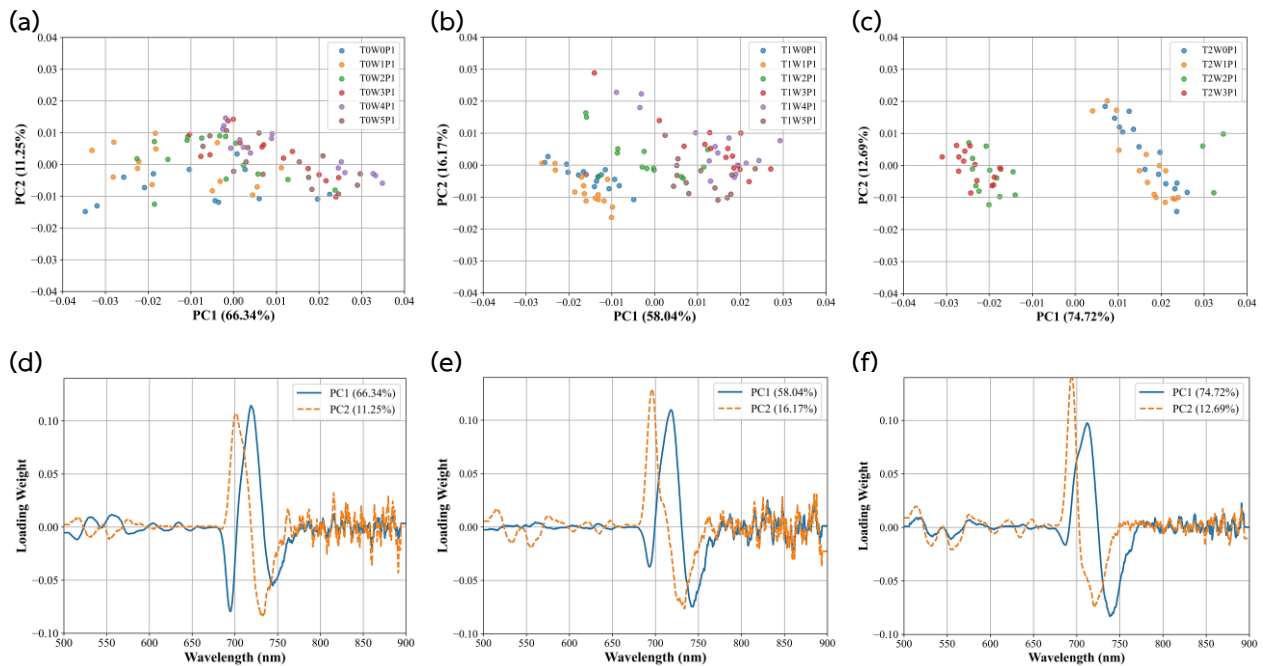


Figure 6 PCA Score plot (a-c) and Loading plot (d-f) of Vis-NIRS spectral data from upper leaves (P1) under different treatments: (a, d) control (T0), (b, e) nutrient deficiency (T1) and (c, f) water deficiency (T2).

Figure 7 แสดงแผนภาพ Score plot และ Loading plot จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) สำหรับชุดข้อมูลของใบช่วงกลาง (P2) โดยผลการวิเคราะห์พบว่า PC1 และ PC2 สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลรวมกันกว่า 70% ในส่วนของชุดควบคุม (T0) (Figure 7a) พบว่าการกระจายตัวของค่า Score ไม่มีการแบ่งแยกที่ชัดเจนระหว่างสัปดาห์ต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าต้นกล้าทุเรียนที่ได้รับน้ำและธาตุอาหารอย่างเพียงพอไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา แสดงถึงความสมบูรณ์ขององค์ประกอบรควัตถุและโครงสร้างของใบ [16] ซึ่งสอดคล้องกับ Loading plot (Figure 7d) ที่แสดงให้เห็นว่าช่วงความยาวคลื่นที่มีอิทธิพลสูงต่อ PC1 คือช่วง 680 nm เป็นต้นไป ซึ่งเป็นบริเวณที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์และโครงสร้างของใบ [2] ในขณะที่กรรมวิธีชุดขาดธาตุอาหาร (T1) (Figure 7b) มีการกระจายตัวของค่า Score ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชุดควบคุมและเริ่มเห็นแนวโน้มของการแยกกลุ่มข้อมูลในแต่ละสัปดาห์ จาก Loading plot (Figure 7e) พบว่าช่วงคลื่นที่มีอิทธิพลสูงต่อ PC1 เนื่องจากความเครียดจากธาตุอาหารที่เพิ่มขึ้น ในช่วง 680-760 nm ซึ่งเป็นช่วงที่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของคลอโรฟิลล์ที่เกิดจากโครงสร้างของใบ [18] และกรรมวิธีชุดขาดน้ำ (T2) (Figure 7c) พบว่าข้อมูลสามารถแบ่งกลุ่มออกจากกันได้ อย่างชัดเจนในแต่ละสัปดาห์ ซึ่งแตกต่างจากทั้งกรรมวิธีชุดควบคุม (T0) และกรรมวิธีชุดขาดธาตุอาหาร (T1) ซึ่งให้เห็นว่าการขาดน้ำส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบภายในของใบอย่างมีนัยสำคัญและรุนแรงที่สุด [17] ซึ่งสอดคล้องกับ Loading plot (Figure 7f) แสดงให้เห็นว่าค่าของ PC1 ในชุดขาดน้ำแตกต่างจากชุดทดลองอื่นอย่างชัดเจน ในช่วง 680 nm และ 740 nm เพราะเป็นบริเวณที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์และการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในใบ ซึ่งแสดงถึงการสูญเสียน้ำในเซลล์พืชและผลกระทบจากการปิดปากใบของต้นกล้าทุเรียน [16]

Figure 8 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ของข้อมูลสเปกตรัมจากใบช่วงล่าง (P3) โดยประกอบด้วย Score plot (a-c) และ Loading plot (d-f) ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่า PC1 สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากกว่า 65% ในทุกระบบวิธี ส่วน PC2 ซึ่งอธิบายความแปรปรวนรองจาก PC1 สามารถแสดงลักษณะเฉพาะบางประการของการตอบสนองต่อความเครียดจากน้ำและธาตุอาหารในบางช่วงเวลา แม้จะมีสัดส่วนการอธิบายข้อมูลน้อยกว่า แต่ PC2 มีแนวโน้มสะท้อนการเปลี่ยนแปลงในรายละเอียดของโครงสร้างใบหรือเมตสียภายในที่อาจไม่เด่นชัดจาก PC1 โดยในกรรมวิธีชุดควบคุม (T0) (Figure 8a) พบว่าการกระจายตัวของค่า Score มีความซ้อนทับกันระหว่างสัปดาห์ ทำให้ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ เพราะต้นกล้าทุเรียนในกลุ่มนี้ไม่ได้รับความเครียดทางสรีรวิทยาที่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบภายในใบ เนื่องจากได้รับน้ำและธาตุอาหารอย่างเพียงพอ ขณะที่กรรมวิธีชุดขาดธาตุอาหาร (T1) (Figure 8b) พบว่าการกระจายตัวของค่า Score มีแนวโน้มเริ่มแสดงความแตกต่างระหว่างสัปดาห์มากขึ้น เกิดจากคุณสมบัติการดูดกลืนแสงเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบของการขาดธาตุอาหารที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางสรีรวิทยาของใบพืช [2] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Silva et al. [19] พบว่าธาตุอาหารของต้นอ้อยที่ลดลงส่งผลต่อสเปกตรัมมากที่สุดในช่วง 680-760 นาโนเมตร และในกรรมวิธีชุดขาดน้ำ (T2) (Figure 8c) การกระจายตัวของข้อมูลแสดงให้เห็นการแยกกลุ่มที่

ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีอื่น ทำให้เห็นถึงผลกระทบที่รุนแรงของการขาดน้ำที่ส่งผลต่อองค์ประกอบภายในใบ [17] จาก Loading plot (Figure 8d-f) พบว่าช่วงความยาวคลื่น 680 nm เป็นต้นไปเป็นช่วงที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อ PC1 และพบความแตกต่างของข้อมูลในทุกกรรมวิธี นอกจากนี้กรรมวิธีขาดน้ำ (T2) มีค่า Loading ของ PC1 ที่น่าสังเกตก็คือความยาวคลื่น 680 nm และ 740 nm เป็นจุดแปรผันอย่างมากเมื่อเทียบกับกรรมวิธีขาดควบคุม (T0) และกรรมวิธีขาดธาตุอาหาร (T1) อย่างชัดเจน ซึ่งให้เห็นว่าผลกระทบจากการสูญเสียภายในใบเป็นปัจจัยที่ส่งผลรุนแรงที่สุดต่อการเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุรวมถึงโมเลกุลของน้ำ [2, 16-17]

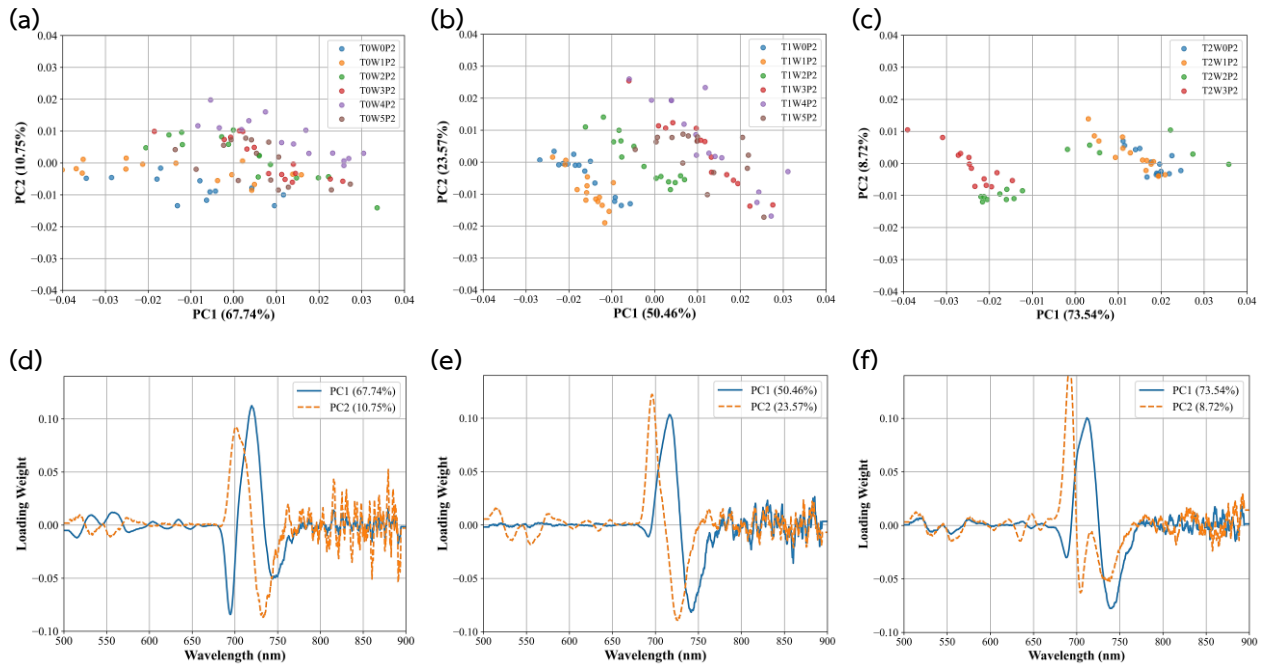


Figure 7 PCA Score plot (a-c) and Loading plot (d-f) of Vis-NIRS spectral data from middle leaves (P2) under different treatments: (a, d) control (T0), (b, e) nutrient deficiency (T1) and (c, f) water deficiency (T2).

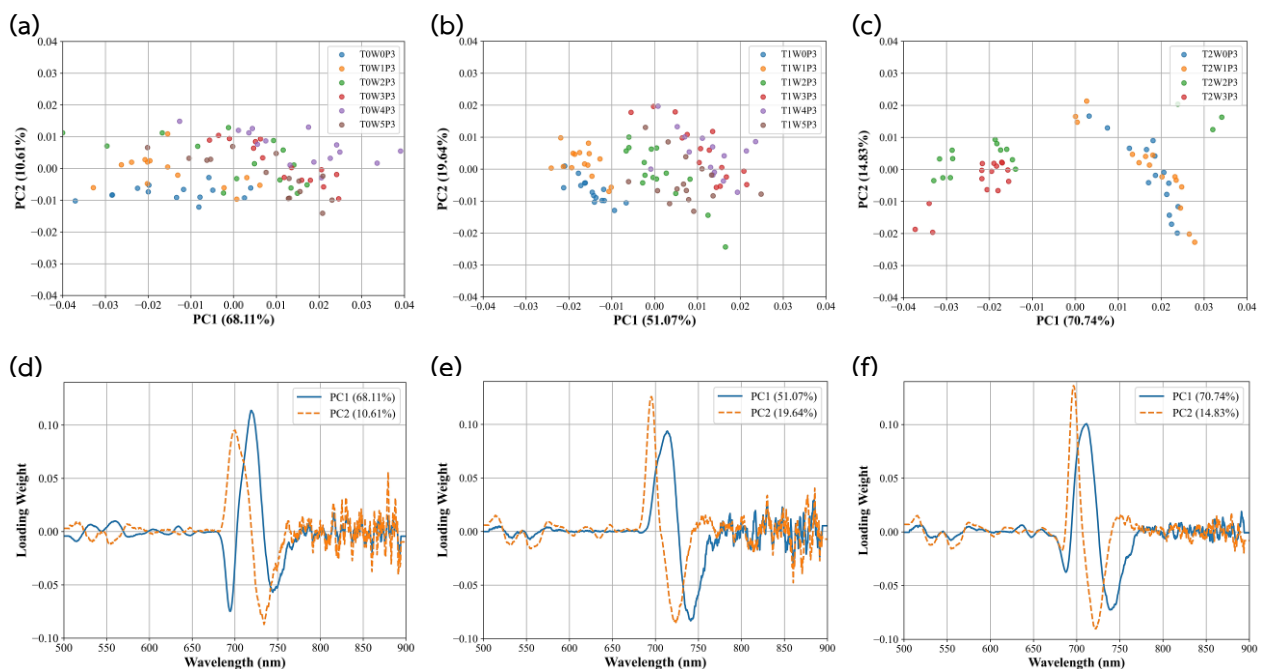


Figure 8 PCA Score plot (a-c) and Loading plot (d-f) of Vis-NIRS spectral data from lower leaves (P3) under different treatments: (a, d) control (T0), (b, e) nutrient deficiency (T1) and (c, f) water deficiency (T2).

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิค Vis-NIR spectroscopy มีศักยภาพในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืชในระดับต้นกล้าได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในสภาพแปลงจริง ยังมีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณา เช่น สภาพแวดล้อมที่ต่างกัน สภาพพื้นผิวของใบ ความชื้นในเนื้อเยื่อ ซึ่งสามารถส่งผลต่อความแตกต่างของข้อมูลสเปกตรัมที่วัดได้ ดังนั้น การใช้งานจริงจำเป็นต้องมีการเตรียมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม เช่น การเก็บข้อมูลในช่วงวันที่ฟ้าเปิด และอาจต้องใช้เทคนิคการปรับแก้ข้อมูลเบื้องต้น เพื่อชดเชยผลกระทบจากความชื้นหรือพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจวินิจฉัยพืชในระดับแปลงปลูก [20]

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิค Vis-NIR spectroscopy ร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักสามารถจำแนกความแตกต่างของสาเหตุความเครียดจากปัจจัยภายนอกของต้นกล้าทุเรียนที่เกิดจากกรรมวิธีที่ต่างกันได้อย่างชัดเจน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า PC1 มีความสามารถในการแยกความแตกต่างของลักษณะความเครียดได้อย่างชัดเจนที่ 58.04-74.72 เปอร์เซ็นต์ในกรรมวิธีต้นกล้าทุเรียนให้น้ำให้ปุ๋ย 50.46-73.54 เปอร์เซ็นต์ในกรรมวิธีต้นกล้าทุเรียนให้น้ำไม่ให้ปุ๋ย และ 51.07-70.74 เปอร์เซ็นต์ในกรรมวิธีต้นกล้าทุเรียนไม่ให้น้ำให้ปุ๋ย โดยเฉพาะช่วงคลื่น 680-760 นาโนเมตร ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิค VIS-NIRS ในการเป็นเครื่องมือที่ไม่ทำลายตัวอย่างสำหรับการประเมินภาวะความเครียดในต้นกล้าทุเรียนภายใต้สภาวะที่ต่างกันของน้ำและธาตุอาหาร

การพัฒนาเทคนิคนี้ในอนาคตจะมีการศึกษาช่วงคลื่นที่จำเพาะเจาะจงและสภาพแวดล้อมที่หลากหลายซึ่งมีความสัมพันธ์สูงกับการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืช เพื่อปรับปรุงการเลือกตัวแปรและลดความซับซ้อนของข้อมูลในการวิเคราะห์ และให้มีการพัฒนาแบบจำลองวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางสถิติหรือ Machine learning ที่เหมาะสมกับพืชเป้าหมาย โดยเฉพาะ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกลักษณะความเครียดของพืชในพื้นที่ปิดที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมและในพื้นที่เปิดสภาพแปลงปลูกจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2567. ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://impexpth.oae.go.th/export>
- [2] Muhammad-Zahir, S. A. D., Omar, A., Jamlos, M., Azmi, M. and Muncan, J. 2022. A review of visible and near-infrared (Vis-NIR) spectroscopy application in plant stress detection. Sensors and Actuators A: Physical. Volume 338. 113468.
- [3] Sindhuja, S., Ashish, M., Reza, E. and Cristina, D. 2010. A review of advance techniques for detecting plant diseases. Comput. Electron. Agric. 72 (1), 1–13.
- [4] Al-Hiary, H., Bani-Ahmad, S., Reyat, M., Braik, M. and Al-Rahamneh, Z. 2011. Fast and accurate detection and classification of plant diseases, Int. J. Comput. Appl. 17 (1) 31–38.
- [5] Rumpf, T., Mahlein, A. K., Steiner, U., Oerke, E. C., Dehne, H. W. and Plümer, L. 2010. Early detection and classification of plant diseases with support vector machines based on hyperspectral reflectance. Computers and Electronics in Agriculture. 74. 91-99.

- [6] Khaled, A. Y., Abd Aziz, S., Bejo, S. K., Naw, N.M., Seman, I. A. and Onwude, D. I. 2018. Early detection of diseases in plant tissue using spectroscopy-applications and limitations. *Applied Spectroscopy Reviews*. 53 (1). 36-64.
- [7] Khaled, A. Y., Abd Aziz, S., Bejo, S. K., Naw, N. M. and Sema, I.A. 2018. Spectral features selection and classification of oil palm leaves infected by Basal stem rot (BSR) disease using dielectric spectroscopy, *Comput. Electron. Agric.* 144 297–309.
- [8] Qianxuan, Z., Qingbo, L. and Guangjun, Z. 2012. Rapid determination of leaf water content using VIS/NIR spectroscopy analysis with wavelength selection. *Journal of Spectroscopy*. 27. 276795. 13 pages.
- [9] Neto, A. J. S., Lopes, D. C., Pinto, F. A. C. and Zolnier, S. 2017. Vis/NIR spectroscopy and chemometrics for non-destructive estimation of water and chlorophyll status in sunflower leaves. *Biosyst. Eng.* 155 124–133.
- [10] Guo, P., Li, T., Gao, H., Chen, X., Cui, Y. and Huang, Y. 2021. Evaluating calibration and spectral variable selection methods for predicting three soil nutrients using Vis-NIR spectroscopy. *Remote Sens.* 13. 4000.
- [11] สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.). 2567. อาการขาดธาตุอาหารของพืช. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://warning.acfs.go.th/th/articles-and-research/view/?page=144>
- [12] Köksal, E. S. 2011. Hyperspectral reflectance data processing through cluster and principal component analysis for estimating irrigation and yield related indicators, *Agricultural Water Management*, 98(8), 1317-1328.
- [13] สำนักสำรวจและวิจัยทรัพยากรดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2567. โครงสร้างดิน. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ http://oss101.ddd.go.th/web_soils_for_youth/s_prop_struc2.htm
- [14] สมิตร์ คุณเจตน์, ไพฑูรย์ ศรีนิล, สมบัติ ฝอยทอง, สุคนทิพย์ เถาโมรา และเอื้อน ปิ่นเงิน. 2561. การศึกษาปริมาณความต้องการน้ำและวิธีการให้น้ำที่เหมาะสม สำหรับทุเรียนพันธุ์หมอนทอง. คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี.
- [15] พงนิยน์ แสงมณี, วิมลฉัตร สมนิยาม และพิชัย ไกลกล้า. 2022. ปริมาณคลอโรฟิลล์และสถานะของธาตุอาหารในใบทุเรียนและดินที่เจริญเติบโตในระบบบวบเกษตร. *วารสารเกษตร*, 38(2), 209-221.
- [16] วสันต์ ปานนิม, ศัทธิตา ฉัตรเที่ยง, วินัย อุดขาว, ศิริพรรณ สุขขัง, สมนึก พรหมแดง และสุนทรี ยิ่งชัชวาลย์. 2563. การตอบสนองของปากใบและกระบวนการสังเคราะห์แสงภายใต้สภาวะขาดน้ำจากการชักนำด้วยสารพอลิเอทิลีนไกลคอลของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L. ssp. indica cv. KDML105) ในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 51(2), 90-106.
- [17] Pahlawan, M. F. R., Murti, B. M. A., and Masithoh, R. E. 2022. The potency of Vis/NIR spectroscopy for classification of soybean based of colour. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1018.
- [18] Patiluna, V., Owen, J., Jr., Maja, J. M., Neupane, J., Behmann, J., Bohnenkamp, D., Borra-Serrano, I., Peña, J. M., Robbins, J. and de Castro, A. 2025. Using hyperspectral imaging and principal component analysis to detect and monitor water stress in ornamental plants. *Remote Sensing*, 17(2), 285.
- [19] Silva, C., Fiorio, P., Rizzo, R., Rossetto, R., Vitti, A., Dias, F., Oliveira, K. and Neto, M. 2023. Detection of nutritional stress in sugarcane by VIS-NIR-SWIR reflectance spectroscopy. *Ciência Rural*. 53.
- [20] Piccini, C., Metzger, K., Debaene, G., Stenberg, B., Götzinger, S., Borůvka, L., Sandén, T., Bragazza, L. and Liebisch, F. 2024. In-field soil spectroscopy in Vis–NIR range for fast and reliable soil analysis: A review. *European Journal of Soil Science*, 75(2), e13481.

ระบบจัดการฟอร์มดิจิทัล Digital Form Management System

เสถียรวุฒิ กลิวิฑูชิตชูชัย¹ ศิลา ศิริมาสกุล¹ และ รัตติกร สมบัติแก้ว^{1,*}
Setthawut Kasiwutchoudchuchai¹, Sila Sirimasakul¹ and Rattikorn Sombutkaew^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

¹Bachelor of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

*Corresponding author: Rattikorn Sombutkaew, e-mail address: rattikorn.so@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบจัดการฟอร์มดิจิทัลในกระบวนการขออบรมของพนักงานเป็นการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันและใช้ฐานข้อมูลในการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ในกระบวนการอนุมัติจะออกแบบขั้นตอนให้สอดคล้องกับกระบวนการเดิม โดยผู้ใช้งานสามารถกรอกข้อมูลเพื่อยื่นคำร้องผ่านระบบ จากนั้นระบบจะแจ้งเตือนผ่านทางอีเมลไปยังผู้อนุมัติ ผู้นั้นคำร้อง และผู้มีส่วนร่วม ในส่วนของผู้ใช้งานจะออกแบบหน้าแดชบอร์ดแสดงสถานะของคำร้องที่เกี่ยวข้องเพื่อให้สามารถติดตามคำร้องได้สะดวก ในส่วนของผู้อนุมัติจะแสดงรายการขอเข้าอบรมและรายละเอียดเพื่อพิจารณาอนุมัติคำร้องที่เข้ามา จากการทดสอบใช้งานพบว่า ผู้ใช้งานแต่ละบทบาทมีความสะดวกในติดตามกระบวนการและลดขั้นตอนและความซ้ำซ้อนในกระบวนการอนุมัติ ลดระยะเวลาในการอนุมัติคำร้องลงอย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงประสิทธิภาพในการจัดเก็บและค้นหาข้อมูลที่ดีขึ้น อีกทั้งประหยัดต้นทุนและเพิ่มความปลอดภัยในการบริหารจัดการเอกสารได้

คำสำคัญ: เว็บแอปพลิเคชัน, ฐานข้อมูล, ผู้นั้นคำร้อง, ผู้มีส่วนร่วม, ผู้อนุมัติ

Abstract

This article presents the development of a digital form management system for the employee training request process. The system is implemented as a web application and utilizes a database to store various types of information. The approval process is designed to align with the existing workflow. Users can submit requests through the system by filling out the necessary information, after which the system sends email notifications to approvers, requesters, and relevant stakeholders. For users, a dashboard is designed to display the status of their related requests, allowing for easy tracking. Approvers are provided with a view that lists training requests along with detailed information to support their approval decisions. Testing results indicate that users in different roles find the system convenient for monitoring the process. It significantly reduces redundant steps in the approval workflow and shortens the overall approval time. Furthermore, the system improves data storage and retrieval efficiency, helps reduce costs, and enhances transparency in document management.

Keywords: Web application, Database, Requester, Stakeholders, Approver

1. บทนำ

ในกระบวนการดำเนินธุรกิจขององค์กรนั้นการพัฒนาทรัพยากรบุคคลถือเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน หนึ่งในแนวทางที่นิยมใช้คือ การจัดอบรมหรือสัมมนาเพื่อเสริมสร้างความรู้และทักษะให้กับพนักงาน [1] อย่างไรก็ตามกระบวนการยื่นเอกสารและรายงานผลการอบรมสำหรับบางองค์กรยังคงใช้เอกสารกระดาษ เริ่มต้นจากผู้นั้นคำร้องต้องจัดทำเอกสารขออนุมัติเข้าอบรมหรือสัมมนาและดำเนินการลงลายเซ็นรับทราบจากผู้เกี่ยวข้อง ได้แก่ ผู้เข้าร่วมอบรม หัวหน้าทีม และหัวหน้าแผนก เมื่อการยื่นคำร้องเสร็จสมบูรณ์แล้วจึงจะเข้าร่วมอบรมได้ อีกทั้งหลังจากเสร็จสิ้นการอบรมแล้วผู้มีส่วนร่วมจะต้องทำแบบประเมินการอบรมจากหัวหน้าฝ่ายเพื่อส่งรายงานผลและส่งคืนให้หัวหน้าฝ่ายเพื่อรับรองผลการอบรม กระบวนการเหล่านี้ทำให้เกิดปริมาณเอกสารจำนวนมากและเกิดปัญหาในการพิจารณาอนุมัติล่าช้า พื้นที่จัดเก็บเอกสาร และความเสี่ยงต่อการสูญหายของเอกสาร นอกจากนี้ยังส่งผลให้ต้นทุนด้านวัสดุสิ้นเปลือง ได้แก่ กระดาษและหมึกพิมพ์

ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับจัดการฟอร์มดิจิทัลเพื่อเป็นแนวทางในการช่วยแก้ไขปัญหาข้างต้น โดยระบบที่ออกแบบไว้สามารถลดปริมาณเอกสาร ลดความซ้ำซ้อนของกระบวนการ เพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการอนุมัติ อีกทั้งลดต้นทุนด้านการจัดการเอกสาร การศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นพัฒนาและประเมินผลระบบจัดการฟอร์มดิจิทัลเพื่อสนับสนุนกระบวนการอบรมของพนักงาน โดยพิจารณาด้านประสิทธิภาพและความสะดวกในการใช้งาน

2. วิธีการศึกษา

ผู้จัดทำได้ศึกษากระบวนการอบรมของพนักงานในบริษัทและแบบฟอร์มต่าง ๆ ที่มีอยู่เพื่อนำมาออกแบบขั้นตอนต่าง ๆ ในเว็บแอปพลิเคชัน โดยเริ่มต้นให้พนักงานภายในแผนกที่ต้นเองสังกัดได้ใช้งานเพื่อทดสอบประสิทธิภาพและวางแผนนำไปใช้กับแผนกอื่นๆ ขั้นตอนเริ่มจากผู้ยื่นคำร้องส่งคำร้องผ่านระบบโดยมีการแจ้งเตือนให้ผู้เกี่ยวข้องทราบ จากนั้นเมื่อผู้มีส่วนร่วมอบรมทุกคนได้รับทราบข้อมูลครบแล้ว คำร้องจะถูกส่งต่อไปยังผู้อนุมัติคนที่ 1 เพื่อพิจารณา หากได้รับการอนุมัติจะถูกส่งต่อไปยังผู้อนุมัติคนที่ 2 เมื่อได้รับการอนุมัติครบแล้ว คำร้องดังกล่าวจะถูกส่งกลับไปยังผู้ยื่นคำร้องเพื่ออนุญาตให้เข้าอบรมตามที่ยื่นไว้ เมื่อเข้าอบรมเสร็จสิ้นแล้วจะต้องสรุปรายงานดิจิทัลเพื่อยืนยันเข้าระบบให้ผู้อนุมัติคนที่ 1 ประเมินผลถือเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการ

ภาพรวมของระบบจัดการฟอร์มดิจิทัลนี้แสดงดังรูปที่ 1 เริ่มจากผู้ใช้งาน (User) ใช้งานระบบผ่านเว็บเบราว์เซอร์ (Web Browser) โดยมีการยืนยันตัวตนผ่าน Azure AD [2] เพื่อเข้าสู่เว็บไซต์ จากนั้น NextJS14 [3] จะเชื่อมต่อไปยังฐานข้อมูลที่ใช้ MongoDB [4] ในการจัดการข้อมูล ระบบนี้ออกแบบให้มีการแจ้งเตือนผ่านอีเมล (Email) ไปยังผู้ยื่นคำร้อง ผู้อนุมัติแบบคำร้อง และผู้มีส่วนร่วม ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบข้อมูล ระบบนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ การออกแบบ Use Case Diagram การออกแบบ Site Map Diagram และการออกแบบฐานข้อมูล มีรายละเอียดดังนี้

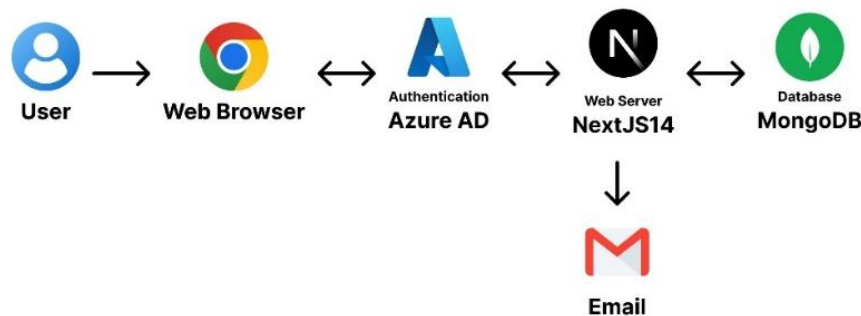


Figure 1 Overview Digital Form Management System

2.1 การออกแบบ Use Case Diagram

การออกแบบกระบวนการทำงานของระบบจัดการแบบฟอร์มดิจิทัลให้สอดคล้องกับกระบวนการอบรมของพนักงานแสดงในรูปที่ 2 โดยใช้ Use case diagram กำหนดให้มีผู้ใช้งานระบบ (Actors) ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 4 บทบาท โดยทุกบทบาทจะต้องล็อกอิน (Login) เพื่อใช้งานระบบดังนี้

1. ผู้ยื่นคำร้อง (Requester) สามารถยื่นคำร้องแบบอนุมัติและรายงานผลการอบรมได้
2. ผู้มีส่วนร่วม (Stakeholders) สามารถรับทราบการมีส่วนร่วมเข้าอบรมในแบบคำร้องและรายงานผลการอบรมได้
3. ผู้อนุมัติแบบคำร้อง (Approver) สามารถพิจารณาคำร้องแบบอนุมัติและประเมินผลการอบรมได้
4. ผู้ดูแลระบบ (Admin) มีหน้าที่ในการจัดการสิทธิ์ของผู้ใช้ (Manage User Permissions) เพื่อให้การทำงานของระบบมีความปลอดภัยและเป็นระเบียบ

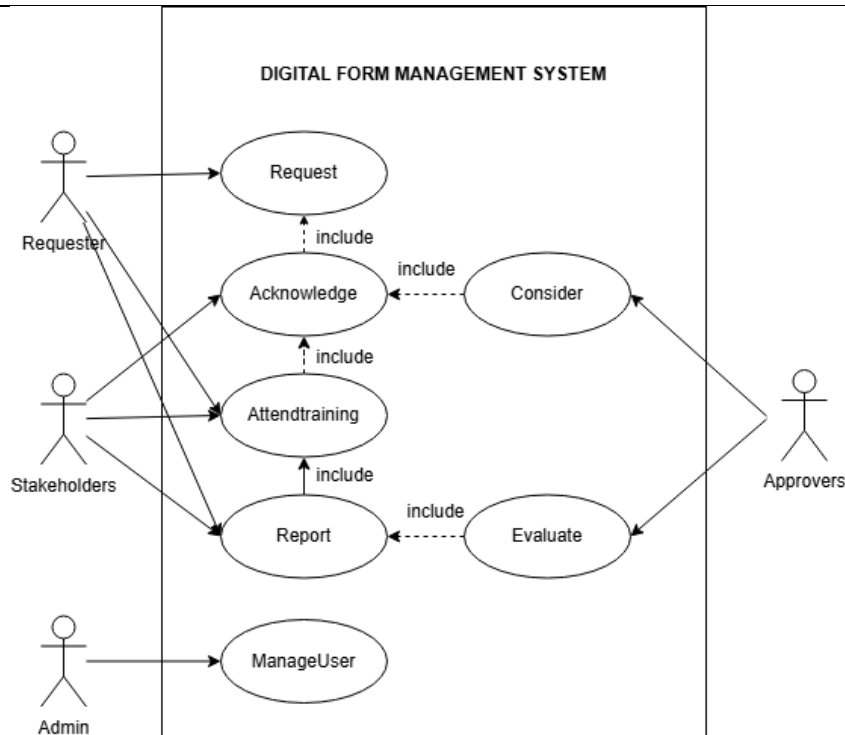


Figure 2 Use Case Diagram

2.2 การออกแบบ Sitemap Diagram

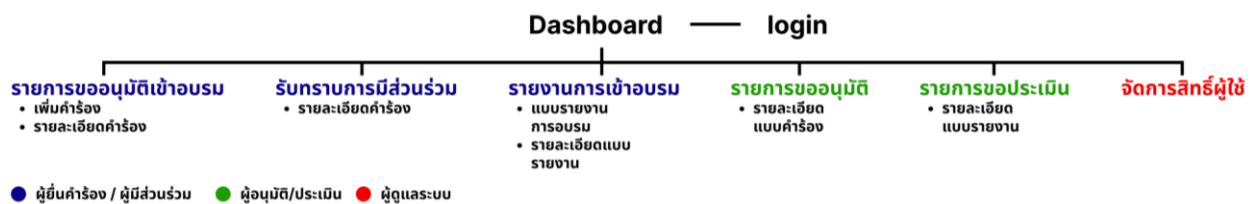


Figure 3 Sitemap Diagram

ในรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างหน้าเว็บไซต์ของระบบ แบ่งเป็นหน้าเพจต่าง ๆ และเส้นทางการเข้าถึงแต่ละหน้าเพจเพื่อให้ผู้ใช้งานแต่ละบทบาทเข้าถึงเนื้อหาตามการใช้งานของตนเองได้สะดวกมีรายละเอียดดังนี้

1. หน้าหรือเพจที่ผู้ใช้งานทุกบทบาทเข้าถึงได้ มีดังนี้

1.1 หน้า login สำหรับผู้ใช้งานที่ต้องการเข้าสู่ระบบจัดการแบบฟอร์มดิจิทัล

1.2 หน้า dashboard แสดงรายการที่ผู้ใช้งานต้องจัดการ เช่น รายการคำร้องต่าง ๆ และการแจ้งเตือน โดยเน้นแสดงรายการที่สำคัญให้กับผู้ใช้เพื่อให้จัดการและตรวจสอบสถานะของรายการต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว

2. หน้าหรือเพจสำหรับผู้ยื่นคำร้องและผู้มีส่วนร่วม (Requester / Stakeholders) มีดังนี้

2.1 หน้า รายการขออนุมัติเข้าอบรม ใช้สำหรับแสดงรายการคำร้องขออนุมัติเข้าอบรมทั้งหมดของผู้ใช้ พร้อมทั้งแสดงสถานะของคำร้องของแต่ละรายการเพื่อให้ผู้ใช้สามารถติดตามสถานะและดำเนินการตามขั้นตอนการอนุมัติได้และเข้าถึงหน้าเพิ่มคำร้องและรายละเอียดคำร้องได้ มีหน้าย่อย 2 หน้า ได้แก่

2.1.1 หน้า เพิ่มคำร้อง ใช้สำหรับกรอกข้อมูลคำร้องที่ต้องการ

2.1.2 หน้า รายละเอียดคำร้อง ใช้สำหรับดูรายละเอียดและสถานะคำร้องที่ผู้ใช้งานกรอกเข้าระบบ

2.2 หน้า รับทราบการมีส่วนร่วม ใช้สำหรับแสดงรายการคำร้องทั้งหมดที่ผู้ใช้มีส่วนร่วมในการดำเนินการ และแสดงสถานะของรายการดังกล่าวเพื่อให้ผู้ใช้สามารถติดตามคำร้องที่ตนมีส่วนร่วมได้ง่ายและชัดเจน ภายในหน้านี้สามารถเข้าถึงรายละเอียดคำร้องได้ มีหน้าย่อยคือ หน้ารายละเอียดคำร้อง ใช้สำหรับดูรายละเอียดและสถานะของคำร้องที่ผู้ใช้งานมีส่วนร่วมได้

2.3 หน้า รายงานการเข้าอบรม ใช้แสดงรายการแบบรายงานการเข้าอบรมทั้งหมดที่ผู้ใช้งานกรอกเข้าระบบ พร้อมทั้งแสดงสถานะของแบบรายงานเพื่อให้ผู้ใช้ติดตามและดำเนินการแบบรายงานได้สะดวก ในหน้านี้จะเข้าถึงหน้าย่อยดังนี้

2.3.1 หน้า ทำแบบรายงาน ใช้กรอกข้อมูลแบบรายงานของผู้ใช้หลังจากอบรมเสร็จแล้ว

2.3.2 หน้า รายละเอียดแบบรายงาน ใช้ดูรายละเอียดและสถานะแบบรายงานของผู้ใช้

3. หน้าหรือเพจสำหรับผู้อนุมัติ (Approvers) มีดังนี้

3.1 หน้า รายการขออนุมัติ ใช้แสดงรายการคำร้องที่ผู้ใช้คนอื่น ๆ ส่งมาเพื่อให้ผู้ใช้พิจารณาและอนุมัติ พร้อมทั้งแสดงสถานะของแต่ละรายการ ในหน้านี้สามารถเข้าถึงหน้ารายละเอียดคำร้องที่มีหน้าย่อยคือ หน้า รายละเอียดคำร้อง ใช้สำหรับดูรายละเอียดและสถานะคำร้องรายการต่างๆ

3.2 หน้า รายการขอประเมิน ใช้แสดงรายการรายงานการประเมินที่ผู้ใช้งานต้องดำเนินการ ซึ่งเป็นรายงานที่ผู้ใช้งานคนอื่น ๆ ส่งมาให้ทำการประเมิน พร้อมทั้งแสดงสถานะของแต่ละรายการเพื่อความสะดวกในการติดตาม ในหน้านี้สามารถเข้าถึงหน้ารายละเอียดแบบรายงานได้ มีหน้าย่อย คือ หน้ารายละเอียดแบบรายงาน เพื่อดูรายละเอียดและสถานะแบบรายงานของผู้ใช้

4. หน้าหรือเพจสำหรับผู้ดูแลระบบ (Admin) จะมีหน้า จัดการสิทธิ์ผู้ใช้ สำหรับผู้ใช้ที่มีสิทธิ์ในการจัดการสิทธิ์ของผู้ใช้งานระบบ ช่วยให้ผู้ใช้สามารถควบคุมการเข้าถึงและสิทธิ์ของผู้ใช้คนอื่น ๆ ภายในระบบ

2.3 การออกแบบฐานข้อมูล

จากขั้นตอนการทำงานของระบบจัดการฟอร์มดิจิทัลหัวข้อ 2.1 ผู้จัดทำได้ออกแบบฐานข้อมูล [6] สำหรับบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับแบบคำร้องและแบบรายงานทั้งหมด 4 ตาราง ได้แก่ ตารางข้อมูลผู้ใช้งาน ตารางข้อมูลบุคลากรภายในบริษัท ตารางข้อมูลแบบคำร้องขออบรม และตารางข้อมูลแบบรายงานและแบบประเมิน มีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 ตารางข้อมูลผู้ใช้งาน (User Collection)

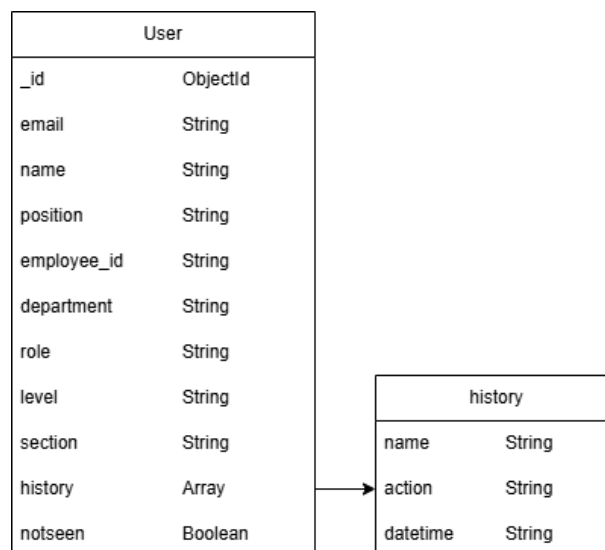


Figure 4 ER diagram of user collection

ในรูปที่ 4 แสดงแผนผัง ER Diagram ของ User Collection ซึ่งจัดเก็บและบันทึกข้อมูลทั้งหมด 2 ตาราง คือ

1. User เป็นตารางเก็บข้อมูลรายละเอียดของผู้ใช้ ซึ่งเป็นพนักงานและผู้ใช้งานภายในบริษัท
2. History เป็นตารางแยกย่อยจากตาราง User ใช้เก็บประวัติแบบคำร้องหรือแบบรายงานที่ผู้ใช้งานมีส่วนร่วม

2.3.2 ตารางข้อมูลบุคลากรภายในบริษัท (Organization Collection)

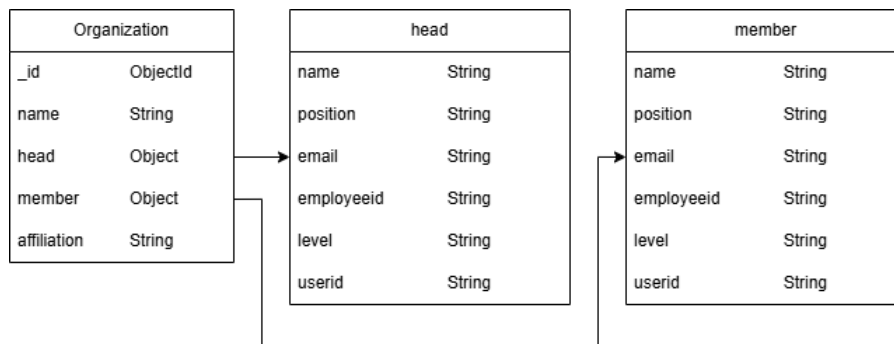


Figure 5 ER diagram of organization collection

ในรูปที่ 5 แสดงแผนผัง ER Diagram ของ Collection Organization ซึ่งเก็บข้อมูลผู้ใช้ที่เป็นพนักงานภายในบริษัท โดยจัดเก็บและบันทึกข้อมูลทั้งหมด 3 ตาราง ดังนี้

1. Organization เป็นตารางเก็บรายชื่อหัวหน้าและสมาชิกของส่วนงาน
2. Head เป็นตารางเก็บข้อมูลรายละเอียดของหัวหน้ากลุ่มงาน
3. Member เป็นตารางเก็บข้อมูลรายละเอียดของสมาชิกในกลุ่มงาน

2.3.3 ตารางข้อมูลแบบคำร้องขออบรม (Training Form Collection)

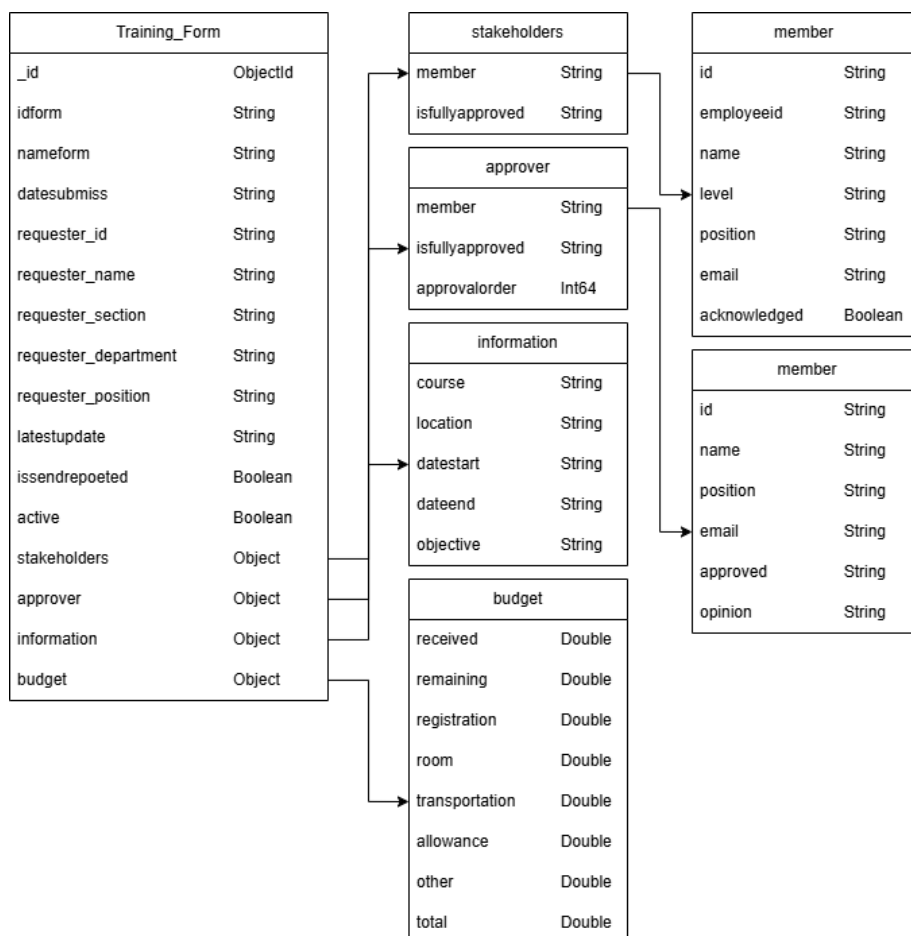


Figure 6 ER diagram of training form collection

จากรูปที่ 6 แสดงแผนผัง ER Diagram ของ Training_Form ซึ่งจัดเก็บและบันทึกข้อมูลทั้งหมด 7 ตาราง ดังนี้

1. Training_Form เป็นตารางหลักใช้เก็บข้อมูลคำร้องขอเข้าร่วมอบรม
2. Stakeholders เป็นตารางย่อยของ Training_Form ใช้เก็บข้อมูลของผู้มีส่วนร่วมของแบบคำร้องนี้ โดยเก็บข้อมูลส่วนตัวของผู้มีส่วนร่วมและสถานะของ Stakeholders
3. Member เป็นตารางย่อยของ Stakeholders ใช้เก็บข้อมูลรายละเอียดของสมาชิกในกลุ่มงาน
4. Approver เป็นตารางย่อยของ Training_Form ใช้เก็บข้อมูลของผู้มีอนุมัติของแบบคำร้อง โดยเก็บข้อมูลส่วนตัวของผู้อนุมัติ และสถานะของคำร้องแบ่งเป็น สำเร็จแล้ว รอผู้อนุมัติ รอผู้มีส่วนร่วม และไม่ได้รับการอนุมัติ
5. Member เป็นตารางย่อยของ Approver ใช้เก็บข้อมูลรายละเอียดของสมาชิกในกลุ่มงาน
6. Information เป็นตารางแยกย่อยมาจาก Training_Form ใช้เก็บข้อมูลการฝึกอบรม
7. Budget เป็นตารางย่อยของ Training_Form ใช้เก็บข้อมูลงบประมาณที่ใช้ในการอบรม

2.3.4 ตารางข้อมูลแบบรายงานและแบบประเมิน (Training Survey Collection)

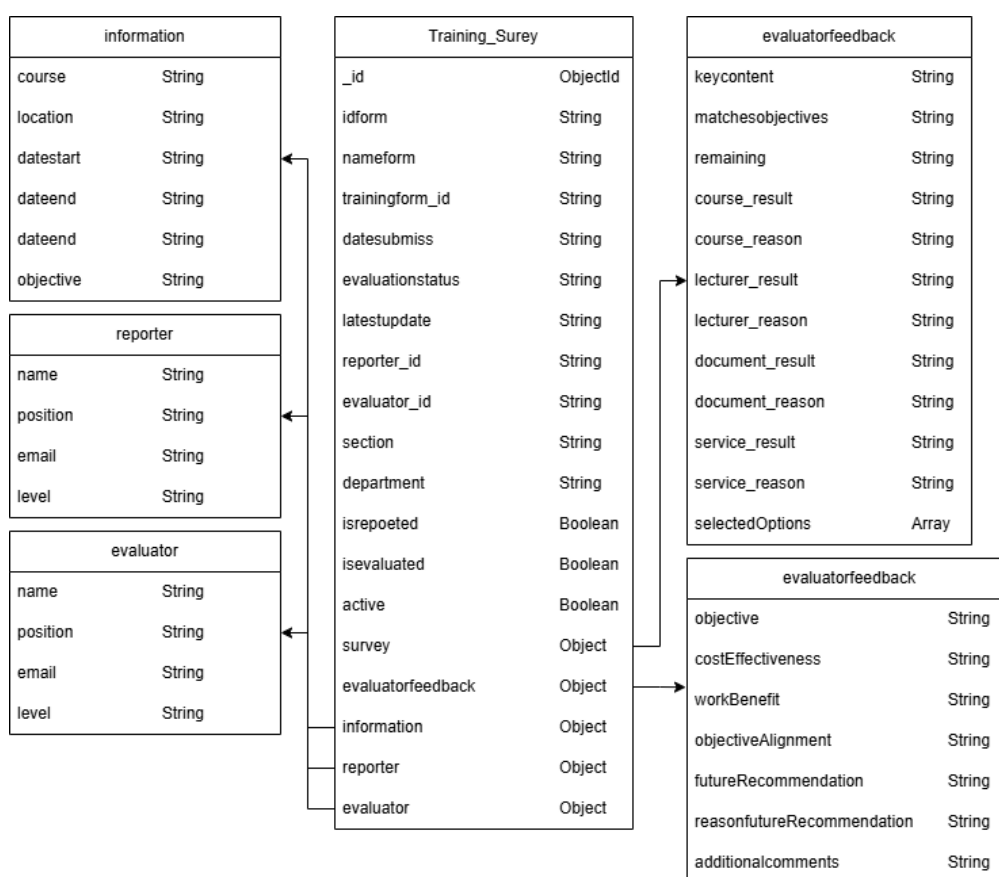


Figure 7 ER diagram of training survey collection

จากรูปที่ 7 แสดงแผนผัง ER Diagram สำหรับเก็บข้อมูลของ Training_Survey ซึ่งจัดเก็บและบันทึกข้อมูลทั้งหมด 6 ตาราง ดังต่อไปนี้

1. Training_Survey ใช้เก็บข้อมูลแบบรายงานและแบบประเมินของคำร้องเข้าร่วมการอบรม โดยทำหลังจากการเข้าร่วมอบรมเสร็จ และเก็บสถานะของแบบรายงานแบ่งเป็น รอการประเมิน และประเมินสำเร็จ
2. Survey เป็นตารางย่อยของ Training_Survey ใช้เก็บข้อมูลผลสำรวจจากการฝึกอบรม
3. Evaluatorfeedback เป็นตารางย่อยของ Training Survey ใช้สำหรับเก็บข้อเสนอแนะจากผู้ประเมินเกี่ยวกับการฝึกอบรม
4. Information เป็นตารางย่อยของ Training_Survey ใช้เก็บข้อมูลการฝึกอบรม
5. Reporter เป็นตารางย่อยของ Training_Survey ใช้เก็บข้อมูลของผู้รายงานการฝึกอบรม
6. Evaluator เป็นตารางย่อย Training_Survey ใช้เก็บข้อมูลของผู้ประเมินการฝึกอบรม

3. ผลการออกแบบระบบและทดสอบการใช้งาน

ในส่วนนี้เป็นหน้าเว็บไซต์ของระบบจัดการฟอร์มดิจิทัลตามกระบวนการขอบรมของพนักงานที่ได้ออกแบบไว้ และการทดสอบใช้งานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของส่วนต่าง ๆ ด้วยผู้ใช้งาน 5 คน มีรายละเอียดดังนี้

3.1 ส่วนเว็บไซต์

ส่วนเว็บไซต์ที่ได้หลังจากการพัฒนาระบบประกอบด้วย ส่วนเมนูหลัก หน้า Dashboard หน้ารายการขออนุมัติเข้าอบรม และหน้ารายละเอียดของแบบคำร้อง ดังรายละเอียดด้านล่าง

3.1.1 เมนูหลัก (Sidebar)

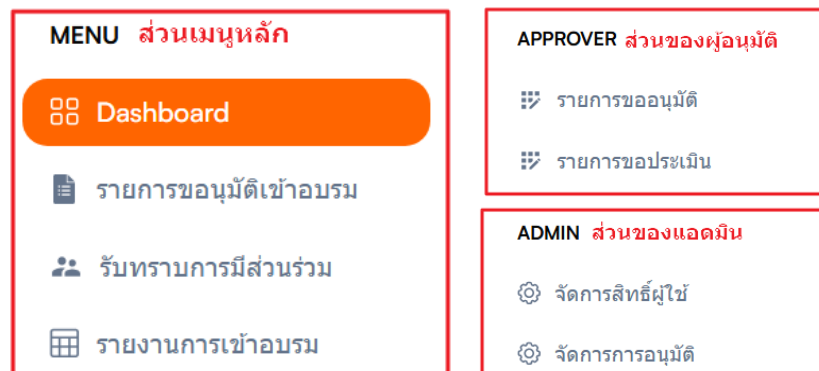


Figure 8 Sidebar

รูปที่ 8 แสดงหน้าเมนูหลักของระบบที่ออกแบบเพื่อใช้ในการนำทางไปยังหน้าต่าง ๆ ของเว็บแอปพลิเคชันให้กับผู้ใช้งานมีโครงสร้างเมนูตามบทบาทของผู้ใช้ดังนี้

1. เมนูทั่วไป (MENU) ผู้ใช้ทุกบทบาทสามารถเข้าถึงได้ประกอบด้วย Dashboard รายการขออนุมัติเข้าอบรม รับทราบการมีส่วนร่วม และรายงานการเข้าอบรม
2. เมนูสำหรับผู้อนุมัติ (APPROVER) เป็นเมนูเฉพาะสำหรับผู้มีสิทธิ์อนุมัติ ประกอบด้วย รายการขออนุมัติ และรายการขอประเมิน
3. เมนูสำหรับผู้ดูแลระบบ (ADMIN) เป็นเมนูเฉพาะสำหรับผู้ดูแลระบบสามารถเข้าถึงเพื่อจัดการสิทธิ์ผู้ใช้งาน

3.1.2 หน้า Dashboard

จากรูปที่ 9 หน้า Dashboard แสดงข้อมูลแต่ละส่วนที่ออกแบบไว้เพื่อให้ผู้ใช้งานดูข้อมูลต่างๆ เพื่อติดตามผลของคำร้องต่างๆ ที่ตนเองมีส่วนเกี่ยวข้อง รายละเอียดตามกรอบหมายเลขดังนี้

1. จำนวนแบบคำร้องที่รอการพิจารณาอยู่ระหว่างการดำเนินการทั้งหมด
2. จำนวนแบบคำร้องที่ผู้ใช้งานต้องแก้ไขทั้งหมด
3. การรับทราบการมีส่วนร่วมที่รอผู้ใช้งานดำเนินการทั้งหมดที่คำร้อง
4. แบบรายงานที่รอการประเมินอยู่ระหว่างการดำเนินการทั้งหมดที่คำร้อง
5. แบบรายงานที่รอผู้ใช้งานแก้ไขมีอยู่ทั้งหมดที่รายงาน
6. เพิ่มแบบคำร้อง ผู้ใช้งานสามารถสร้างแบบคำร้องในหน้านี้ได้ทันที

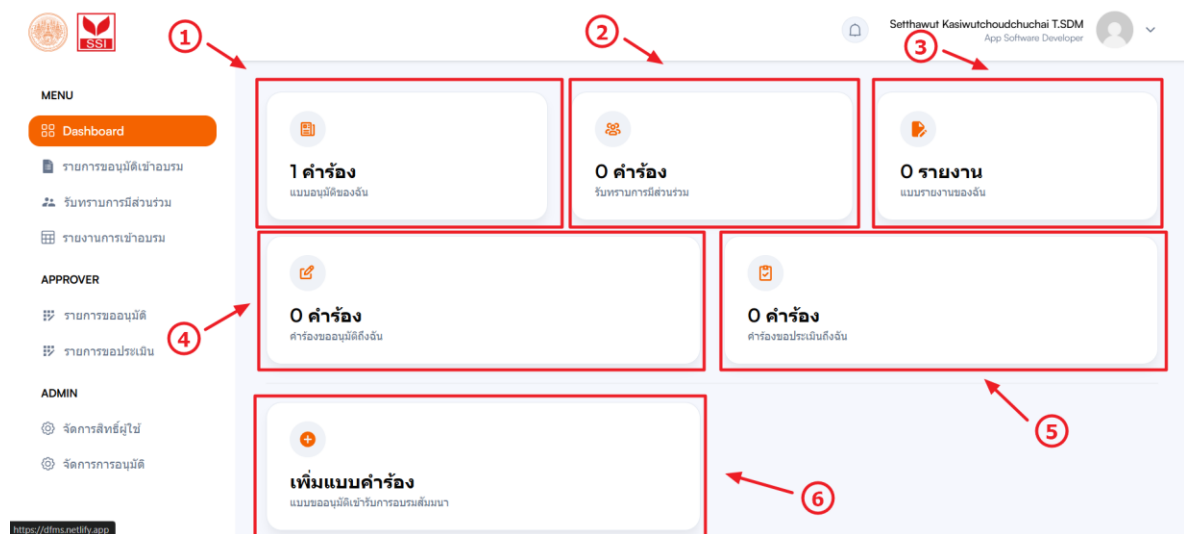


Figure 9 Dashboard Page

3.1.3 หน้ารายการขออนุมัติเข้าอบรม

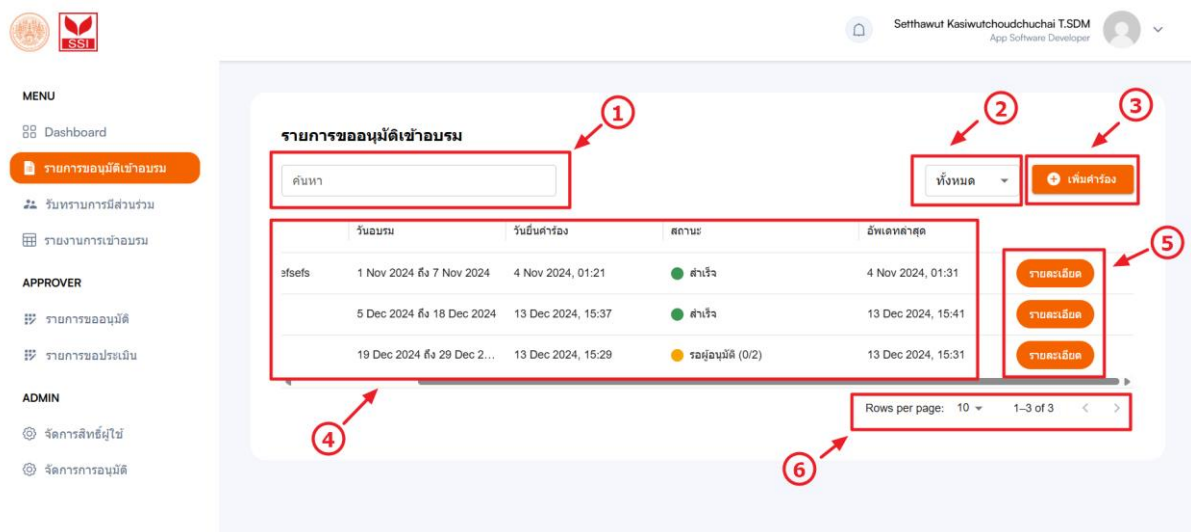


Figure 10 Training form Page

จากรูปที่ 10 หน้ารายการขออนุมัติเข้าอบรม ประกอบด้วยฟังก์ชันการใช้งานตามหมายเลขดังนี้

1. ส่วนการค้นหาคำด้วยชื่อหลักสูตรที่ผู้ต้องการ ผู้ใช้งานสามารถกรอกข้อความเพื่อค้นหาได้
2. ส่วนค้นหาสถานะที่ต้องการ สามารถค้นหาได้ทั้ง สถานะที่สำเร็จแล้ว รอผู้อนุมัติ รอผู้มีส่วนร่วม เป็นต้น
3. ปุ่มสำหรับเพิ่มคำร้องใหม่ที่ต้องการยื่นขออนุมัติเข้าอบรม
4. ส่วนแสดงสถานะคำร้องที่ผู้ใช้ได้ดำเนินการจะแสดงเป็นรายการ เช่น ลำดับที่ ชื่อหลักสูตร วันที่อบรม วันที่ยื่นคำร้อง สถานะของคำร้อง และเวลาวันเดือนปีของการอัปเดตล่าสุด
5. ปุ่มกดสำหรับเลือกดูรายละเอียดของแบบคำร้องในแต่ละรายการ
6. ส่วนแสดงรายการข้อมูลออกเป็นหน้าๆ หลายหน้า (Pagination)

3.1.4 หน้ารายละเอียดของแบบคำร้อง

จากรูปที่ 11 แสดงการออกแบบหน้ารายละเอียดข้อมูล ประกอบด้วยฟังก์ชันการใช้งานตามหมายเลขดังนี้

1. ส่วนแสดงรายละเอียดข้อมูลของผู้ยื่นคำร้อง เช่น วันที่ยื่นคำร้อง ชื่อ ระดับ ตำแหน่ง เป็นต้น
2. ส่วนแสดงข้อมูลหลักสูตรที่ผู้ยื่นคำร้องได้เขียนรายละเอียดมา เช่น ชื่อหลักสูตร สถานที่อบรม วันที่อบรม วันสุดท้ายของการอบรม วัตถุประสงค์ในการเข้าอบรม เป็นต้น
3. ส่วนแสดงข้อมูลรายละเอียดงบประมาณทั้งหมด เช่น งบประมาณที่ได้รับ งบประมาณคงเหลือ ค่าลงทะเบียน ค่าที่พัก ค่าพาหนะ ค่าเบี้ยเลี้ยง ค่าอื่น ๆ รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด เป็นต้น
4. ส่วนแสดงผู้อนุมัติคำร้องนี้ เช่น ชื่อ ระดับ ตำแหน่ง สถานะคำร้อง ความเห็นของผู้อนุมัติ เป็นต้น
5. ส่วนแสดงรายชื่อผู้ที่เข้าร่วมอบรมทั้งหมด เช่น รหัสพนักงาน ชื่อ - นามสกุล ระดับ ตำแหน่ง สถานะของแบบคำร้อง เป็นต้น

รายละเอียดทั้งหมด				
วันขึ้นดำรง 24 Mar 2025, 19:03 ชื่อผู้จ้าง SDM	ผู้ยื่นคำร้อง Setthawut Kasivuthoudchual T.SDM ตำแหน่ง App Software Developer			
ข้อมูลเชิงสรุป				
ชื่อหน่วยงาน เจ้าภาพโครงการ NextJS15				
วันที่เริ่มอบรม 10 Mar 2025	วันสุดท้ายของการอบรม 12 Mar 2025			
สถานที่อบรม KMUTL-PCC				
วัตถุประสงค์ พัฒนาศักยภาพวิทยากร				
ประมาณการค่าใช้จ่าย				
งบประมาณที่ได้รับ 3500 บาท	งบประมาณคงเหลือ 0 บาท	ค่าลงทะเบียน 1000 บาท	ค่าที่พัก 1000 บาท	
ค่าอาหาร 1000 บาท	ค่าเบี้ยเลี้ยง 500 บาท	ค่าอื่น ๆ 0 บาท	รวมทั้งหมด 3500 บาท	
ผู้ปฏิบัติงานบนาน / สังกัด				
ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	ระดับ	ตำแหน่ง	สถานะ
1		Sr.Manager	Head of Group Software Development and Maintenance	✔
2		AVP	Head of Group Information Technology Office	⚠
ความเห็นหรือข้อสงสัยอื่น ๆ เช่นเดียวกับ ผู้ปฏิบัติลำดับ 1		ความเห็นหรือข้อสงสัยอื่น ๆ เช่นเดียวกับ ผู้ปฏิบัติลำดับ 2 ยังไม่ได้พิจารณา		
รายชื่อพนักงานที่แนบมาเข้ารับการอบรม				
รหัสพนักงาน	ชื่อ-นามสกุล	ระดับ	ตำแหน่ง	สถานะ
S3730		Supervisor	Software Developer	✔
S3708		Supervisor	Software Developer	✔
T001		Trainee	App Software Developer	✔
S3624		I Sr.Supervisor	Software Developer	✔

Figure 11 Detail Page

3.2 การทดสอบใช้งานระบบ

ในการทดสอบระบบจัดการฟอร์มดิจิทัลผ่านเว็บไซต์นี้ผู้จัดทำได้ทำเอกสาร (UAT) [5] ให้กับทีมในแผนกทั้งหมด 3 คน และต่างแผนกอีก 2 คน เพื่อทดสอบการทำงานของระบบ โดยทดสอบการใช้งานของส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 1 ประกอบด้วยหัวข้อการทดสอบ 15 หัวข้อ ได้แก่ การทดสอบการใช้งานเว็บไซต์ และการทดสอบการแจ้งเตือนผ่านอีเมลหรือภายในเว็บไซต์ จากการทดสอบระบบสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบ (Working) เป็นต้น

Table 1 User Acceptance Test

ID	Test Topics	Output
1	Website Login	Working
2	Verify access upon successful and unsuccessful login	Working
3	Add training request form	Working
4	Check email (in the role of a stakeholder in the request form)	Working
5	Check status and view my request information	Working
6	Acknowledge in the request form	Working
7	All stakeholders have acknowledged the request	Working
8	Review the request form	Working
9	Send report form to stakeholders	Working
10	Complete Training Report Form	Working
11	Review evaluation form	Working
12	Notification Website	Working
13	Check email	Working
14	Information on the profile page	Working
15	Manage user permissions	Working

4. สรุป

การพัฒนาระบบจัดการฟอร์มดิจิทัลตามด้วยเว็บแอปพลิเคชันสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ตามกระบวนการอบรมของพนักงานแบบเดิมที่ใช้งานด้วยกระดาษ ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานแต่ละประเภทสามารถค้นหา ติดตาม และประเมินเอกสารได้อย่างสะดวกรวดเร็ว การเข้าใช้งานสามารถเข้าใช้งานจากทุกอุปกรณ์โดยล็อกอินเข้าสู่ระบบ นอกจากนี้เป็นการลดความซ้ำซ้อนในกระบวนการอนุมัติทำให้การพิจารณาอนุมัติมีความรวดเร็วเพิ่มมากขึ้น และลดต้นทุนจากปริมาณเอกสารได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท สหวิริยาสติลอนด์สตรี จำกัด (มหาชน) ที่มอบโอกาสทำโครงการงานสหกิจศึกษาร่วมกับบริษัท ตลอดจนการเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานและอุปกรณ์ในการปฏิบัติงาน และการช่วยเหลือของพนักงานที่ปรึกษาในทุก ๆ ด้านที่มีให้เสมอมา

6. เอกสารอ้างอิง

[1] บทความเกี่ยวกับ การพัฒนาศักยภาพบุคลากร. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์

<https://www.humansoft.co.th/th/blog/potential-development> (เข้าถึงเมื่อ 13 เมษายน 2568).

[2] บทความเกี่ยวกับ Azure AB. เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/app-service/configure-authentication-provider-aad?tabs=workforce-configuration> (เข้าถึงเมื่อ 10 ตุลาคม 2567).

-
- [3] บทความเกี่ยวกับ Next.js เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://www.chaiyohosting.com/nextjs-hosting.html> (เข้าถึงเมื่อ 07 กันยายน 2567).
- [4] บทความเกี่ยวกับ MongoDB เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://appmaster.io/th/blog/mongodb-khuue-aair> (เข้าถึงเมื่อ 07 กันยายน 2567).
- [5] บทความเกี่ยวกับ User Acceptance Testing (UAT). เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://swiftlet.co.th/what-is-uat/> (เข้าถึงเมื่อ 13 เมษายน 2568).
- [6] โอภาส เอี่ยมสิริวงศ์. 2558. ระบบฐานข้อมูล (Database Systems) ฉบับปรับปรุงเพิ่มเติม พิมพ์ครั้งที่ 1.

ระบบติดตามงานของสมาชิกในทีม Team Member Work Tracking System

ชัชวาลย์ ขวัญเมือง¹ และ รัตติกกร สมบัติแก้ว^{1,*}

Chatchawan Kwanmuang¹ and Rattikorn Sombutkaew^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

¹Bachelor of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus

*Corresponding author: Rattikorn Sombutkaew, e-mail address: rattikorn.so@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบติดตามงานสำหรับสมาชิกทีม MIS-Incentive โดยออกแบบระบบด้วยภาษาไพธอน ประกอบด้วย 4 ส่วนการทำงานหลัก ได้แก่ (1) การอ่านและนำเข้าข้อมูลสู่ฐานข้อมูล (2) การดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ (3) การทำความสะอาดและจัดรูปแบบข้อมูลให้เหมาะสม และ (4) การแสดงภาพรวมของงานทั้งในระดับทีมและส่วนบุคคลผ่านแดชบอร์ด การทำงานของระบบเริ่มต้นด้วยการใช้ภาษาไพธอนในการอ่านข้อมูลจากไฟล์เอ็กเซลที่จัดเตรียมไว้ และนำเข้าสู่ฐานข้อมูล SQL Server ในระหว่างกระบวนการนำเข้านี้ระบบจะทำการเปรียบเทียบเวลากำหนดส่งงานระหว่างข้อมูลเวลาที่เก็บในฐานข้อมูลกับข้อมูลเวลาที่ถูกเพิ่มเข้ามาใหม่จากไฟล์เอ็กเซล หากพบความคลาดเคลื่อนจะมีการแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชันไลน์กลุ่มของหัวหน้างานเพื่อตรวจสอบสาเหตุการเปลี่ยนแปลง จากนั้นระบบจะใช้ภาษาไพธอนดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลเพื่อดำเนินการแจ้งเตือนสถานะงาน 6 รูปแบบผ่านไลน์ ได้แก่ งานที่เลยกำหนดส่ง งานที่ต้องส่งภายในวัน งานที่ต้องส่งภายใน 3 วันข้างหน้า งานที่เลยกำหนดการเริ่มดำเนินการ งานที่ถึงกำหนดเริ่มดำเนินการ และงานที่ต้องเริ่มดำเนินการภายใน 3 วัน นอกจากนี้ระบบยังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลจากฐานข้อมูลและสร้างตารางสรุปข้อมูลของบุคลากร เพื่อนำไปใช้ในการสร้างรายงานภาพรวมของงานและประสิทธิภาพของบุคลากรแต่ละคนผ่านเครื่องมือ Power BI

คำสำคัญ: ระบบติดตามงาน, การแจ้งเตือนงาน, การจัดลำดับความสำคัญของงาน, SQL Server, Power BI

Abstract

This article presents a task tracking system for MIS-Incentive team members, designed using Python and comprising four main functional components: (1) data reading and database import, (2) data retrieval from the database for Line application notifications, (3) data cleaning and formatting, and (4) task overview visualization at both team and individual levels via a dashboard. The system's operation begins with Python reading data from prepared Excel files and importing it into an SQL Server database. During the import process, the system compares task due dates between the database's stored time data and the newly imported Excel file data. If discrepancies are found, notifications are sent to the team leader's Line group for investigation. Subsequently, the system utilizes Python to retrieve data from the database and trigger six types of task status notifications via Line: overdue tasks, tasks due today, tasks due within the next three days, overdue task initiation, tasks due for initiation today, and tasks due for initiation within the next three days. Additionally, the system analyzes database information and generates personnel summary tables for creating task overviews and individual performance reports through Power BI.

Keywords: Task tracking system, Task notification, Task prioritization, SQL Server, Power BI

1. บทนำ

บริษัท เงินดีลล์ จำกัด (มหาชน) เป็นบริษัทที่ให้บริการสินเชื่อที่มีทะเบียนรถเป็นประกันและนายหน้าประกันภัยทั้งออนไลน์และออฟไลน์ ซึ่งมีปริมาณข้อมูลจำนวนมากที่ต้องจัดการในแต่ละวันและใช้ Due date หรือวันกำหนดส่งงานเป็นเกณฑ์ในการประเมินความสำเร็จของงานว่าดำเนินการเสร็จสิ้นตามกำหนดเวลาหรือไม่ ส่งผลให้แผนกบริหารและจัดการข้อมูล (Management Information System) จำเป็นต้องมีระบบที่สามารถบริหารเวลาและติดตามงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]

ปัจจุบันพนักงานในทีม Incentive ใช้วิธีบันทึกข้อมูลงานในไฟล์เอ็กเซล (Excel) แยกกันและหัวหน้าจะทำการเรียกดูงานจากไฟล์ของแต่ละคนเพื่อตรวจสอบงานซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความล่าช้า เกิดความผิดพลาด และพนักงานบางคนอาจหลงลืมงานที่ได้รับมอบหมายได้เนื่องจากไม่มีการแจ้งเตือนข้อมูลอะไรที่เกี่ยวกับงานเลยตลอดช่วงเวลาทำงาน นอกจากนี้พนักงานระดับสูง (Senior) ยังไม่สามารถติดตามและประเมินผลการทำงานของพนักงานระดับปฏิบัติการ (Execution) ได้อย่างทั่วถึง

จากการศึกษาเหตุผลที่ทางทีม Incentive ไม่ใช้งานซอฟต์แวร์ที่มีอยู่แล้วในท้องตลาด เช่น Trello หรือ Click Up ในการติดตามการทำงานเพราะหากทีมต้องการใช้งานฟังก์ชันการทำงานพิเศษหรือตรงกับความต้องการจำเป็นต้องจ่ายเงินเพิ่มเพื่อใช้งานฟังก์ชันเหล่านั้นและจะมีฟังก์ชันอื่นที่ไม่ได้ใช้งานรวมอยู่ด้วยจึงทำให้ต้องจ่ายเงินมากกว่าความต้องการจริงของทีม

ระบบติดตามงานของสมาชิกในทีมจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยจัดการข้อมูลและติดตามงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยถูกออกแบบให้ตรงต่อความต้องการและมีความเหมาะสมต่อการใช้งานของทีมโดยเฉพาะ ซึ่งรองรับการพัฒนาที่มากยิ่งขึ้นในอนาคต โดยสามารถแจ้งเตือนพนักงานผ่านแอปพลิเคชัน (LINE) และช่วยให้พนักงานระดับสูงสามารถติดตามงานและให้ความช่วยเหลือได้ทันทีทั้งที่มีงานล่าช้าหรือเกินกำหนดส่ง และช่วยให้พนักงานสามารถจัดลำดับความสำคัญของงานและบริหารเวลาได้อย่างดีมากยิ่ง [2-8]

2. วิธีการศึกษา

ในขั้นตอนแรกผู้จัดทำได้ออกแบบภาพรวมการทำงานของโปรแกรมเพื่อกำหนดกระบวนการทำงานโดยรวมอย่างชัดเจน จากนั้นศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องมือและส่วนเสริมของโค้ดที่เหมาะสม เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ หลังจากนั้น ผู้จัดทำจะดำเนินการเขียนโปรแกรมสำหรับกระบวนการทำงานต่างๆ โดยแบ่งออกเป็นส่วนย่อย ๆ พร้อมทั้งทำการทดสอบการทำงานของแต่ละส่วน เพื่อตรวจสอบขอบเขตและความถูกต้องของระบบ เมื่อทุกส่วนได้รับการพัฒนาและทดสอบแล้วจะนำมารวมกันเพื่อทดสอบการทำงานแบบครบวงจร เพื่อตรวจสอบข้อผิดพลาดและปรับปรุงให้ระบบทำงานได้อย่างสมบูรณ์ [2-8]

2.1 ภาพรวมของระบบติดตามงานของสมาชิกในทีม

จากการตรวจสอบเครื่องมือและเทคโนโลยีที่ทางองค์กรใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ผู้จัดทำจึงได้ออกแบบภาพรวมของระบบติดตามงานของสมาชิกในทีมดังรูปที่ 1

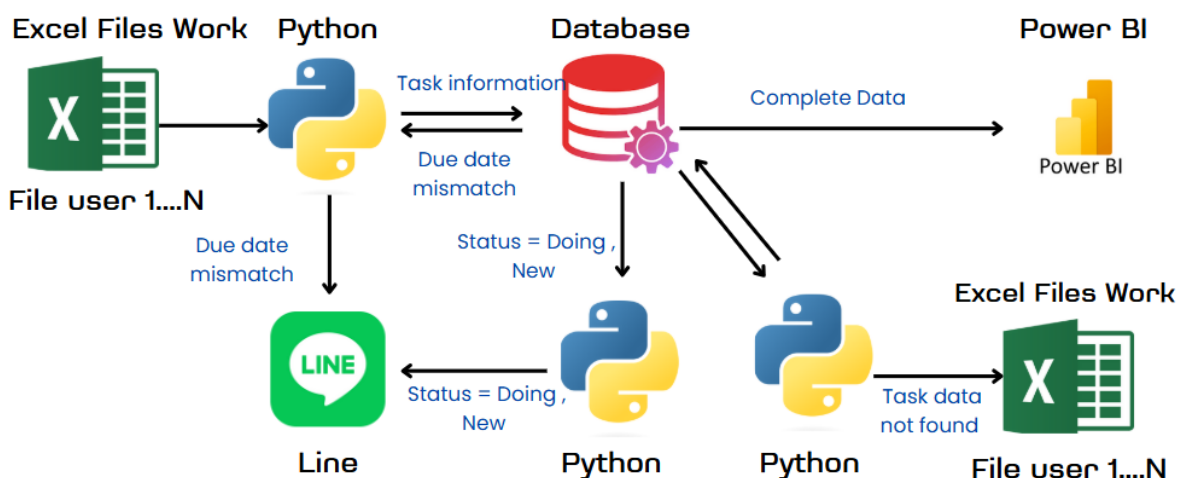


Figure 1 Overview Team Member Work Tracking System

ระบบติดตามงานของสมาชิกภายในทีมใช้ไพธอน (Python) ในการอ่านข้อมูลจากไฟล์ Excel Work และบันทึกลงฐานข้อมูล (Database) จากนั้นดึงข้อมูลเพื่อแจ้งเตือนผ่าน Line Notify รวมถึงวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลแลนำงานที่ขาดไปเพิ่มลงไฟล์ Excel และใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลในการสร้างแดชบอร์ด (Dashboard) ด้วยโปรแกรม Power BI เพื่อติดตามงานของสมาชิกภายในทีม [2-8]

2.2 การออกแบบฐานข้อมูล (Database)

ในขั้นตอนการออกแบบฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องเป็น 5 ตารางดังรูปที่ 2 มีรายละเอียดดังนี้ [6]

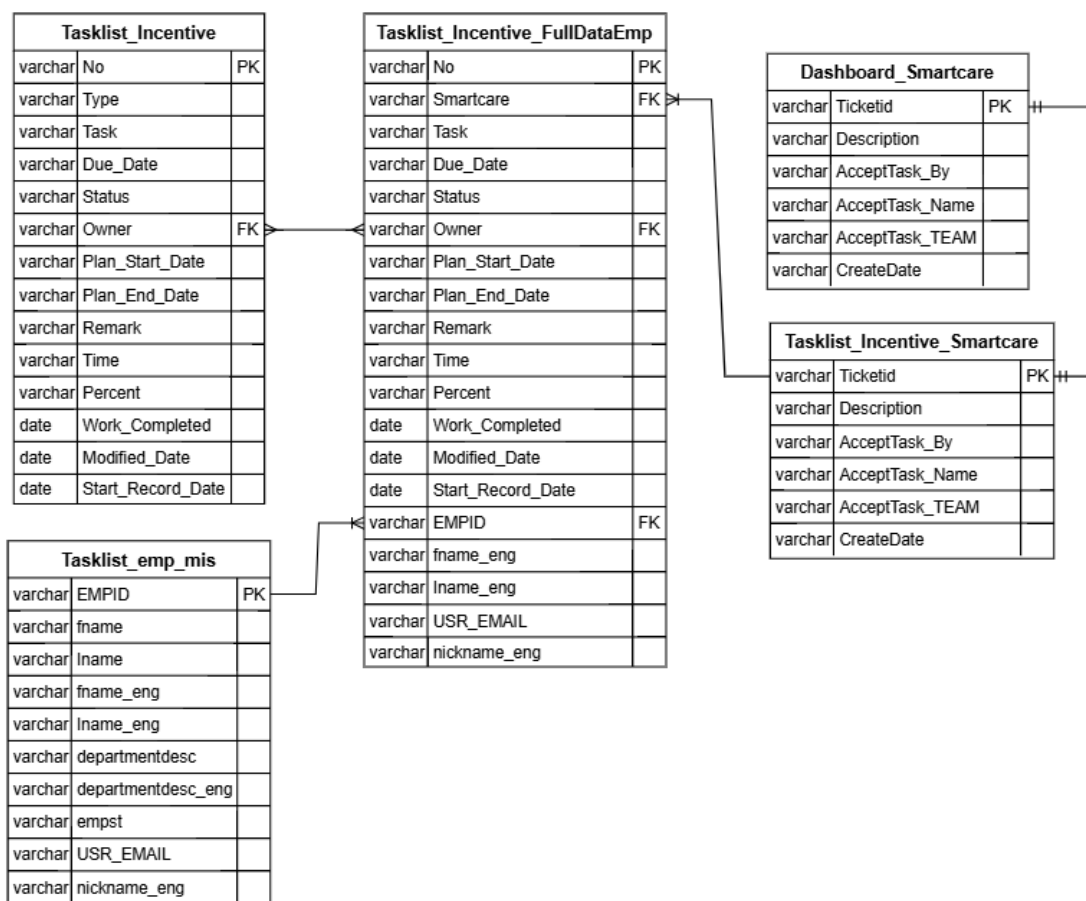


Figure 2 ER-Diagram of Team Member Work Tracking System

1. ตารางเก็บข้อมูลงานของสมาชิกในทีม (Tasklist Incentive) ใช้สำหรับเก็บข้อมูลงานต่างๆ ที่พนักงานบันทึกในไฟล์ Excel
2. ตารางเก็บข้อมูลผู้ใช้งาน (Tasklist_emp_mis) ใช้สำหรับเก็บข้อมูลส่วนตัวพนักงานภายในทีม เช่น ชื่อ-สกุล และตำแหน่งของพนักงาน
3. ตารางเก็บข้อมูลงานที่ถูกเพิ่มข้อมูลสมาชิกในทีมเข้ามา (Tasklist_Incentive_FullDataEmp) ใช้สำหรับเก็บข้อมูลที่เกิดจากการรวมกันระหว่างข้อมูลงานและข้อมูลส่วนตัวทำให้เป็นตารางที่มีความสมบูรณ์
4. ตารางเก็บข้อมูลงานชนิด Smartcare ทั้งหมดของแผนก (Dashboard Smartcare) ใช้สำหรับเก็บข้อมูลงานชนิด Smartcare ของทีมทั้งหมด ที่เป็นงานนอกเหนือจากหน้าที่หลักที่รับผิดชอบปกติ
5. ตารางเก็บข้อมูลงานชนิด Smartcare ทั้งหมดของทีม (Tasklist_Incentive_Smartcare) ใช้สำหรับเก็บข้อมูลของงานที่เกิดจากการเปรียบแล้ว งานส่วนนั้นไม่ได้มีอยู่ในไฟล์ Excel ทำให้ข้อมูลไม่ครบถ้วน จะถูกเพิ่มข้อมูลนั้นเข้ามา

2.3 การออกแบบหน้ารายงาน (Power BI Dashboard)

ในขั้นตอนการออกแบบหน้ารายงานแสดงข้อมูลแยกเป็น 17 ส่วน ในรูปที่ 3-6 มีรายละเอียดดังนี้ [8]

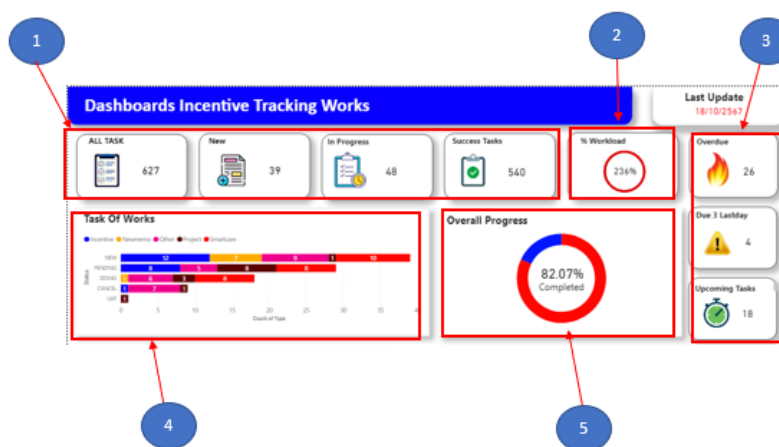


Figure 3 Report Components (Overview 1-5)

1. ส่วนที่ 1 คือ ภาพรวมของสถานะภายในทีม
2. ส่วนที่ 2 คือ สถานะงาน %Workload ของงานที่จะทำใน 14 วันข้างหน้าถ้าเกิน 50 งานสถานะจะถูกเปลี่ยนเป็น “สีแดง” ถ้าน้อยกว่า 50 ก็จะเป็น “สีเขียว”
3. ส่วนที่ 3 คือ สถานะ New และ Doing ที่ถูกนำ Due date มาแบ่งออกเป็น 3 สถานะดังนี้
 - Overdue คือ งานที่เกินกำหนดส่งงานของสมาชิกภายในทีม
 - Due 3 Lastday คืองานที่ใกล้จะถึงวันกำหนดส่งงานอีก 3 วัน
 - Upcomming Task คือ งานที่อยู่มากกว่า 3 วันขึ้นไป
4. ส่วนที่ 4 Task of works เป็นงานทั้งหมดนำมาแบ่งเป็นชนิดของงานต่างๆและแบ่งตามแต่ละสถานะ
5. ส่วนที่ 5 Overall Progress คือ สถานะของงานที่เป็น %Completed



Figure 4 Report Components (Overview 6 – 9)

6. ส่วนที่ 6 Overview of running status over the last 14 days คือ ส่วนที่ใช้ในการบอกถึงจำนวนงานสถานะต่าง และ %Workload ของงาน โดยกำหนดสถานะสำคัญที่สนใจดังนี้

- Username คือ ชื่อของพนักงานภายในทีม
- New Task คือ จำนวนสถานะของงานใหม่ที่ยังไม่ได้เริ่มทำ
- Doing Task คือ สถานะของงานที่กำลังดำเนินงาน
- Overdue คือ สถานะงานทั้งหมดทั้งที่เป็นงาน New และ งาน Doing
- %Workload คือ งานสถานะ 14 วันข้างหน้าโดยไม่ได้พิจารณาว่าคือวันอะไร เช่น วันนี้วันอังคารก็จะนับวัน

อังคารเป็นวันที่ 1 โดยจะคำนวณเป็นวันต่อวัน

7. ส่วนที่ 7 Over View Per Week คือ สถานะที่บ่งบอกถึงการทำงานภายในสัปดาห์นั้นๆ โดยไม่สนใจว่าวันนี้คือวันอะไร เช่น ปัจจุบันคือวันเสาร์แล้ววันเสาร์อยู่ในสัปดาห์ที่เท่าไรของปี ระบบจะพิจารณาวันทั้งหมดในสัปดาห์นั้น

8. ส่วนที่ 8 Task Submission Overview คือ สถานะของงานที่ Overdue หรือเกิดกำหนด และ Due soon หรือ งานที่ใกล้กำหนดส่งเหลืออีก 3 วัน

9. ส่วนที่ 9 เป็น Task ที่บ่งบอกการเปลี่ยนแปลง วันที่แก้ไขไฟล์ล่าสุด และจำนวนแถว (Row) ที่ไม่ได้ใส่ค่า Due Date

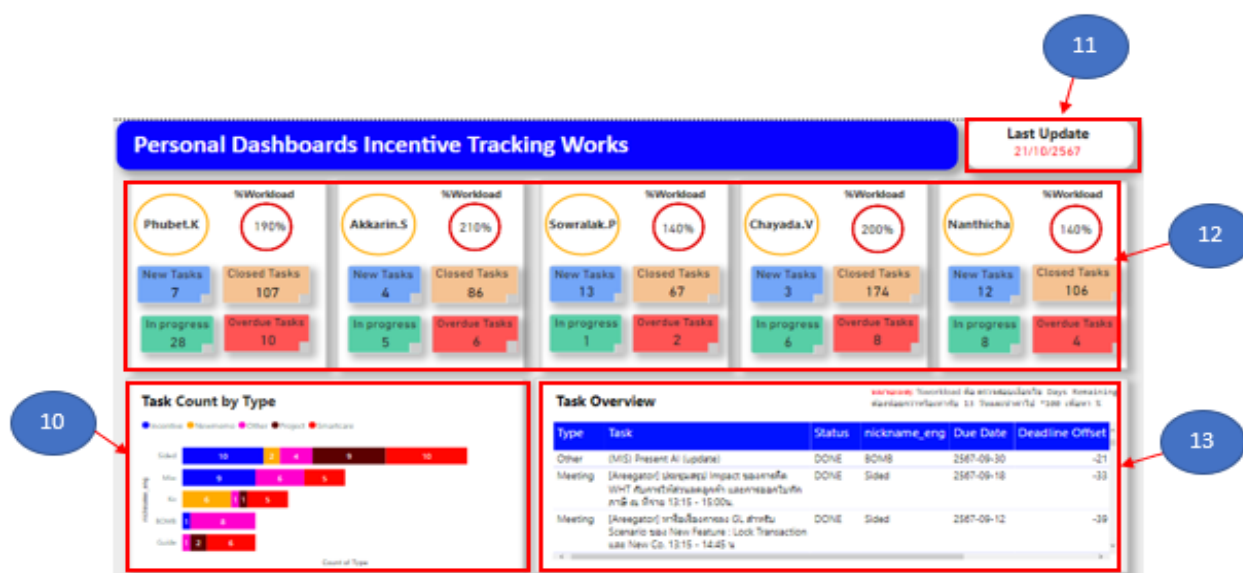


Figure 5 Report Components (Personal View 10 – 13)

10. ส่วนที่ 10 Task Count by Type คือ Task ที่จะมีงานแต่ละชนิดต่างๆ แบ่งเป็นแต่ละบุคคล โดยงานสถานะต่างๆ จะมีสถานะงานที่กำลังดำเนินงานและงานใหม่เท่านั้น

11. ส่วนที่ 11 Last Update คือ การบ่งบอกวันที่ล่าสุดที่ทำการอัปเดตไฟล์

12. ส่วนที่ 12 คือ การบ่งบอกถึงงานสถานะที่แยกกันไปของแต่ละคน โดยสามารถกด “Filter” เพื่อตรวจสอบข้อมูลโดยละเอียดได้ และ %Workload คือ สถานะของงานในอีก 14 วันข้างหน้าไม่เกิน 10 งาน

13. ส่วนที่ 13 Task Overdue คือ Task ที่ใช้ในการดูรายละเอียดของงาน เพื่อทำการดูรายละเอียดข้อมูลของงานทั้งหมดที่ได้รับการ



Figure 6 Report Components (Personal View 14 – 17)

14. ส่วนที่ 14 Task Submission Overview คือ สถานะของงานที่ Overdue หรือเกินกำหนด และ Due soon หรือ งานที่ใกล้กำหนดส่งเหลืออีก 3 วัน

15. ส่วนที่ 15 Calendar due date each week คือ ตารางที่จะแบ่งออกเป็น 5 ช่วงเวลาที่สนใจ ได้แก่ 1 สัปดาห์ก่อนหน้า (Week After), 2 สัปดาห์ก่อนหน้า (2 Weeks After), สัปดาห์ปัจจุบัน (Current Week), 1 สัปดาห์หน้า (1 Week Before) และ 2 สัปดาห์หน้า (2 Weeks Before) ใช้ในการตรวจสอบ Due date ที่ใกล้ส่งงาน

16. ส่วนที่ 16 กราฟระบุงานประจำเดือนใช้ในการบ่งบอกถึงงานต่างๆ ที่ยังไม่เป็น Done เพื่อใช้ในการตรวจสอบงานของพนักงานในทีมในแต่ละวันในเดือน

17. ส่วนที่ 17 Task Open In Progress คือ สถานะของงานที่ยังถือดำเนินการอยู่

3. ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

จากระบบติดตามงานของสมาชิกภายในทีมที่ได้ออกแบบพัฒนาระบบเสร็จสิ้นแล้ว หัวข้อนี้เป็นการทดสอบการทำงานในส่วนต่างๆ โดยจะทำการทดสอบจากข้อมูลงานจริงของพนักงานภายในทีมทุกคนจำนวน 5 คน แต่ละคนมีข้อมูลของงานที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบส่งข้อมูลเข้าฐานข้อมูล การทดสอบเงื่อนไขการอินเทอร์แอกทีฟและอัปเดตข้อมูลในฐานข้อมูล การทดสอบในกรณีสถานะมีการเปลี่ยนแปลงเป็น Done โดยให้มีการบันทึกวันและเวลา การทดสอบการแจ้งเตือนไลน์ของการเปลี่ยนแปลงวันส่งงาน การทดสอบการแจ้งเตือนสถานะงานต่างๆ การทดสอบการแจ้งเตือนสถานะงานที่กำลังดำเนินการและงานใหม่ และการทดสอบการเปรียบเทียบเลขรหัสของงานเพื่อส่งค่าเข้าฐานข้อมูล แสดงผลลัพธ์ในตารางที่ 1 ถึง 7 ดังนี้

3.1 การทดสอบส่งข้อมูลเข้าฐานข้อมูล

เป็นการทดสอบส่งข้อมูลเข้าฐานข้อมูล โดยจะทำการทดสอบนำเข้าข้อมูลหลากหลายชนิดที่ได้ออกแบบไว้ เช่น ข้อมูลงานที่เป็นค่าว่าง ข้อมูลงานที่มีความยาว 100 ขึ้นไป รวมทั้งอักขระพิเศษต่างๆ ดังตารางที่ 1

Table 1 Database data entry testing

Test No.	Condition	Result	Accuracy
1	Job description contains 50 characters	Success	Correct
2	Job description contains 100 characters	Success	Correct
3	Special characters such as @, -, and + are included	Success	Correct
4	Due date field is left blank	Success	Correct
5	Includes unsupported special characters	Failed	Incorrect

3.2 การตรวจสอบเงื่อนไขการเพิ่มข้อมูลใหม่และปรับปรุงข้อมูลในฐานข้อมูล

เป็นการทดลองเพื่อประเมินความถูกต้องของกระบวนการเพิ่มข้อมูลใหม่ (Insert) และการปรับปรุงข้อมูลที่มีอยู่ (Update) ภายในฐานข้อมูล กรณีในการตรวจสอบการมีอยู่ของข้อมูลจะพิจารณาจากค่าในฟิลด์ "No" ซึ่งเป็นรหัสอ้างอิงเฉพาะสำหรับลำดับงานของบุคลากรแต่ละราย โดยอักขระแรกของรหัสดังกล่าวจะใช้ระบุผู้ปฏิบัติงานตามรายละเอียดในตารางที่ 2

Table 2 Database insert and update condition checks.

Test No.	Test Description	Result	Accuracy
1	Test case where No = B01 already exists in the database	Data updated	Correct
2	Test case where No = B101 does not exist in the database	New data inserted	Correct
3	Test case where No = M01 already exists in the database	Data updated	Correct
4	Test case where No = M11 does not exist in the database	New data inserted	Correct

3.3 การทดสอบในกรณีข้อมูลสถานะเปลี่ยนเป็น Done โดยมีการบันทึกวันและเวลา

Table 3 Testing scenarios where the status changes to "Done," including date and time logging.

Test No.	Test Description	Result	Accuracy
1	Status changed from "New" to "Done"	Value saved successfully	Correct
2	Status changed from "Doing" to "Done"	Value saved successfully	Correct
3	Status changed from "New" to "Doing"	No value saved	Correct
4	Status changed from "Pending" to "Done"	Value saved successfully	Correct
5	Status changed from "Doing" to "Pending"	No value saved	Correct

เป็นการทดสอบการเพิ่มข้อมูลวันที่ทำงานเสร็จในคอลัมน์ Work Completed ในตารางข้อมูล Tasklist_Incentive หากสถานะ "New" "Doing" "Pending" มีการเปลี่ยนแปลงเป็น Done เพื่อให้ข้อมูลความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้ดังตารางที่ 3

3.4 การทดสอบการแจ้งเตือนไลน์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำหนดวันส่งงาน

เป็นการทดสอบการแจ้งเตือนไลน์เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงกำหนดวันส่งงานในระบบ โดยการตรวจสอบจาก Due date เช่น วันกำหนดส่งงานในฐานข้อมูลคือ 2024-07-01 มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าที่เข้ามาใหม่เป็น 2024-07-15 ก็จะมีการแจ้งเตือนการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 4

Table 4 Line notification test for changes in assignment due dates

Test No.	Test Description	Result	Accuracy
1	Due date changed from nan to 2024-07-01	No LINE notification sent	Correct
2	Due date remained unchanged at 2024-07-21	LINE notification sent	Correct
3	Due date changed from 2024-07-21 to 2024-08-15	LINE notification sent	Correct
4	Due date changed from 2024-07-01 to Unknown Date	LINE notification sent	Correct

3.5 การทดสอบการแจ้งเตือนสถานะงานต่างๆ

เป็นการทดสอบการแจ้งเตือนไลน์ถึงสถานะของงานที่กำลังดำเนินการอยู่ โดยการตรวจสอบจาก Due date ว่าใกล้ถึงกำหนดส่งหรือยัง ดังตารางที่ 5

Table 5 Testing of notifications for various work statuses

Test No.	Test Description	Result	Accuracy
1	Task status is "New"	Notification sent	Correct
2	Task status is "Doing"	Notification sent	Correct
3	Task status is "Done"	No notification sent	Correct
4	Task status is "Pending"	No notification sent	Correct
5	Task status is "UAT"	No notification sent	Correct

3.6 การทดสอบการแจ้งเตือนสถานะงานที่กำลังดำเนินการและงานใหม่

Table 6 Testing notifications for in-progress and new tasks

Test No.	Test Description	Result	Accuracy
1	Task status is "New" and start date was due 30 days ago	Notification sent	Correct
2	Task status is "New" and start date is in 3 days	Notification sent	Correct
3	Task status is "New" and today is the start date	Notification sent	Correct
4	Task status is "Doing" and due date was 35 days ago	Notification sent	Correct
5	Task status is "Doing" and due date is in 3 days	Notification sent	Correct
6	Task status is "Doing" and today is the due date	Notification sent	Correct
7	Task status is "New" and start date is in 5 days	No notification sent	Correct
8	Task status is "Doing" and due date is in 5 days	No notification sent	Correct

เป็นการทดสอบการแจ้งเตือนไลน์ถึงสถานะของงานที่วางแผนจะเริ่มดำเนินการ โดยการตรวจสอบจาก Due date ว่าใกล้ถึงวันกำหนดส่งงานเช่น เรากำหนดส่งงานวันที่ 2024-07-12 และวันปัจจุบันคือคือวันที่ 2024-07-10 ก็จะมีการแจ้งเตือนไลน์และตรวจสอบจาก Plan starts ว่าใกล้ถึงวันเริ่มทำงานเช่น วันที่เราวางแผนเริ่มทำงานคือ 2024-08-11และวันปัจจุบันคือคือวันที่ 2024-08-1 ก็จะไม่มีการแจ้งเตือนเพราะไม่อยู่ในการออกแบบของระบบ ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6

3.7 การทดสอบเปรียบเทียบเลขรหัสของงานเพื่อส่งค่าเข้าฐานข้อมูล

เป็นการทดสอบการตรวจสอบข้อมูลที่อ่านมาจากรางที่ถูกเพิ่มข้อมูลในไฟล์ Excel นำไปเปรียบเทียบกับตารางเก็บข้อมูลของบริษัท โดยใช้หมายเลขของงานนั้นในการตรวจสอบ หลังจากนั้นจะส่งข้อมูลเข้าไปเก็บไว้ในตารางของงานที่ยังไม่มี เพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบงานที่ไม่สมบูรณ์ ดังตารางที่ 7

Table 7 Testing the comparison of task IDs for database entry.

Test No.	Test Description	Result	Accuracy
1	Job code is S23019825, which already exists in the database	No data inserted	Correct
2	Job code is S24011235, which does not exist in the database	New data inserted	Correct

4. สรุป

จากการออกแบบและพัฒนาระบบติดตามการทำงานของสมาชิกภายในทีมงานพบว่า สามารถอ่านและบันทึกข้อมูลจากไฟล์เอ็กเซลลงฐานข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการตรวจสอบและแปลงรูปแบบข้อมูลให้ตรงกับโครงสร้างฐานข้อมูล ระบบสามารถรวบรวมข้อมูลระหว่างข้อมูลงานและข้อมูลส่วนตัวของผู้รับผิดชอบงานเพื่อให้รายละเอียดครบถ้วน รวมถึงเปรียบเทียบข้อมูลกับฐานข้อมูลของบริษัทเพื่อตรวจสอบและบันทึกงานที่ยังไม่มีอยู่ ส่วนการแจ้งเตือนผ่าน Line Notify สามารถแจ้งเตือนตามสถานะงาน (New, Doing, Done) ได้ตามที่ออกแบบไว้โดยการพิจารณาวันกำหนดส่งและวันเริ่มงานเพื่อลดปัญหาทางล่าช้า รวมทั้งระบบสามารถปรับปรุงข้อมูลในไฟล์เอ็กเซลของแต่ละบุคคลให้ตรงกับฐานข้อมูลโดยอัตโนมัติซึ่งช่วยลดข้อผิดพลาดและเพิ่มความแม่นยำในการจัดการงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัท เงินดีดล้อ จำกัด (มหาชน) ที่ได้ต้อนรับและดูแลนักศึกษาเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาการทำโครงการสหกิจศึกษา รวมทั้งความเอื้อเฟื้อและความเป็นกันเองของทีมงานทำให้ข้าพเจ้ารู้สึกอบอุ่นและเป็นส่วนหนึ่งขององค์กร ผู้จัดทำจะจดจำประสบการณ์อันมีค่านี้ไว้และนำไปใช้เป็นแรงบันดาลใจในการทำงานในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ข้อมูลของบริษัทเงินดีดล้อจำกัด (มหาชน) เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://www.tidlorinvestor.com/th/corporate-information/nature-of-business> (เข้าถึงเมื่อ 11 มีนาคม 2568).
- [2] Microsoft. (n.d.). Introduction to Excel. เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://support.microsoft.com/en-us/excel> (เข้าถึงเมื่อ 11 มีนาคม 2568).
- [3] Python Software Foundation. (n.d.). Python Documentation. เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://docs.python.org> (เข้าถึงเมื่อ 11 มีนาคม 2568).
- [4] LINE Corporation. (n.d.). LINE Messaging API. เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://developers.line.biz> (เข้าถึงเมื่อ 11 มีนาคม 2568).
- [5] Microsoft. (n.d.). Power BI Documentation. เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://docs.microsoft.com/en-us/power-bi> (เข้าถึงเมื่อ 11 มีนาคม 2568).
- [6] โอภาส เอี่ยมสิริวงศ์. 2558. ระบบฐานข้อมูล (Database Systems) ฉบับปรับปรุงเพิ่มเติม พิมพ์ครั้งที่ 1
- [7] นันทินี แสงโสภณ. 2567. วิเคราะห์และนำเสนอข้อมูลด้วย Power BI พิมพ์ครั้งที่ 1
- [8] บัญชา ปะสิละเตสัง. 2562. การเขียนโปรแกรมด้วย PYTHON สำหรับผู้เริ่มต้น พิมพ์ครั้งที่ 1

การจำแนกลักษณะความเครียดจากสิ่งไม่มีชีวิตในต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทอง
โดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
Classification of Abiotic Stresses in “Monthong” Durian Seedlings
Using Near-infrared Spectroscopy

พิชชาพร แก้ววิจิตต์¹ กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์² และ พรประพา คงตระกูล^{1,*}
Pitchaporn Kaewwijit¹, Kittisak Phetpan² and Pornprapa Kongtragoul^{1,*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร
²ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

¹Department of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

²Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Pornprapa Kongtragoul, e-mail address: : pornprapa.ko@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near-infrared spectroscopy; NIRS) ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) เพื่อจำแนกลักษณะความเครียดในต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่เกิดจากการขาดน้ำและการขาดธาตุอาหาร โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) มีชุดทดสอบจำนวน 3 กรรมวิธี กรรมวิธีละ 5 ซ้ำ ซึ่งประกอบด้วย กรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม (T0) กรรมวิธีที่ 2 ชุดต้นกล้าทุเรียนที่ไม่ให้น้ำ (T1) และกรรมวิธีที่ 3 ชุดต้นกล้าทุเรียนที่ไม่ให้น้ำ (T2) ระยะเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์ พร้อมทั้งเก็บข้อมูลความชื้นในดิน ค่าคลอโรฟิลล์ (SPAD) และภาพลักษณะอาการของต้นทุเรียน พบว่า ต้นกล้าทุเรียนในชุดขาดน้ำ (T2) มีการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาที่เด่นชัดที่สุด ได้แก่ ใบเหี่ยวแห้งเร็วและค่าคลอโรฟิลล์ ลดลงอย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับค่าความชื้นในดินที่ลดลงจนถึงระดับศูนย์ ในขณะที่ชุดขาดปุ๋ย (T1) แสดงอาการใบเหลืองช้ากว่า แต่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดด้วยเทคนิค PCA พบว่า สามารถจำแนกกลุ่มของต้นกล้า ที่ได้รับความเครียด จากการขาดน้ำ (T2) ออกจากกลุ่มอื่นๆ (T0 และ T1) ได้อย่างชัดเจน โดยตำแหน่งของใบไม้ได้มีผลต่อการ จำแนกกลุ่มลักษณะความเครียด ผลการศึกษาเบื้องต้นนี้สะท้อนให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS ผสานกับการวิเคราะห์ทาง สถิติเป็นวิธีที่รวดเร็ว ไม่ทำลายตัวอย่าง และเหมาะสมสำหรับการติดตามและจำแนกความเครียดของต้นกล้าทุเรียน ซึ่งช่วยให้ สามารถจัดการกับสวนทุเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ต้นกล้าทุเรียน, ความเครียดของพืช, เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี, เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

Abstract

This research aims to investigate the feasibility of applying near-infrared spectroscopy (NIRS) combined with principal component analysis (PCA) to differentiate stress responses in Monthong durian seedlings induced by water deficit and nutrient deficiency. The experiment was designed as a Completely Randomized Design (CRD) with three treatments, each with five replicates. The treatments include: Treatment 1 (T0) as the control, Treatment 2 (T1) non-fertilized, watered seedlings, and Treatment 3 (T2) with non-watered, fertilized seedlings. The study was conducted over six weeks, during which soil moisture, chlorophyll content (SPAD values), and visual symptoms of the durian seedlings were recorded. The results indicated that the water-deficit group (T2) exhibited the most pronounced physiological changes, such as rapid leaf wilting and a sharp decline in SPAD values, consistent with a reduction in soil moisture to zero. In contrast, the fertilizer-deficient group (T1) showed a slower onset of leaf yellowing that gradually increased over time. Analysis of the near-infrared spectral data using PCA demonstrated that the water-stressed group (T2) could be clearly differentiated from the other groups (T0 and T1), regardless of leaf position. This preliminary study suggests that integrating NIRS with statistical analysis is a rapid, non-destructive, and effective method for monitoring and classifying stress in durian seedlings, thereby enhancing the management of durian orchards.

Keywords: Durian seedlings, Plant stress, Near-infrared Spectroscopy, Principal Component Analysis

1. บทนำ

ทุเรียน (*Durio zibethinus* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยเพราะมีการผลิตและส่งออกทุเรียนเป็นอันดับ 1 ของโลก เป็นผลไม้ที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว มีกลิ่นที่โดดเด่น รสชาติอร่อย เป็นที่นิยมบริโภค จึงได้ชื่อว่าเป็น “ราชาแห่งผลไม้” (King of Fruits) ในปี 2566 มีพื้นที่ปลูกทั่วประเทศกว่า 1 ล้านไร่ มีผลผลิตต่อไร่เฉลี่ย 1,457 กิโลกรัมต่อไร่ ผลผลิต 1.537 ล้านตัน มูลค่าการส่งออกกว่า 1 แสนสี่หมื่นล้านบาท [1] จังหวัดที่มีพื้นที่ปลูกทุเรียนมากที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ จังหวัดชุมพร จันทบุรี ระยอง นครศรีธรรมราช และยะลา โดยมีตลาดหลักที่สำคัญ คือ จีน ฮองกง และไต้หวัน [2] ในระหว่างการปลูกทุเรียน เกษตรกรชาวสวนทุเรียนต้องเผชิญปัญหาหลายประการ ทั้งสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง การดูแลไม่ถูกต้อง ทำให้ทุเรียนมีการตอบสนองต่อภาวะความเครียดส่งผลกระทบต่อทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ และทำให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการจัดการความเครียดในสวนทุเรียนเพิ่มขึ้นทั้งในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยวและหลังการเก็บเกี่ยว

ความเครียดจากสิ่งไม่มีชีวิต (abiotic stress) เช่น การขาดน้ำและธาตุอาหารในทุเรียน [3][4] จำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบอย่างแม่นยำและรวดเร็วตั้งแต่ระยะเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลง [5] ปัจจุบันมีเทคนิคหลากหลายในการตรวจจับและจำแนกความเครียดของพืช เช่น เทคนิคทางสเปกโทรสโกปีและการถ่ายภาพ (spectroscopic and imaging techniques) ซึ่งรวมถึง ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (Fluorescence spectroscopy), วิสิเบิลและอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Visible and infrared spectroscopy), การถ่ายภาพเรืองแสง (Fluorescence imaging) และ การถ่ายภาพไฮเปอร์สเปกตรัม (Hyperspectral imaging) [6] เทคนิคเหล่านี้ช่วยให้สามารถจำแนกลักษณะความเครียดได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ที่รวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่างพืช

หนึ่งในเทคนิคที่มีแนวโน้มดีที่สุดสำหรับการจำแนกความเครียดของพืชคือ สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ หรือ เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near-Infrared Spectroscopy; NIRS) ซึ่งใช้หลักการวัดการสะท้อนแสง (Reflectance) ในช่วงความยาวคลื่น 900-1,700 นาโนเมตร NIRS เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างพืช โดยอาศัยหลักการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารประกอบอินทรีย์ที่มีพันธะ C-H, O-H และ N-H ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร [7] ข้อดีของเทคนิคนี้คือการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ใช้ระยะเวลาสั้น แม่นยำ และไม่ทำลายตัวอย่าง ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้มีเป้าหมายในการประยุกต์ใช้ เทคนิค NIRS เพื่อจำแนกลักษณะความเครียดจากสิ่งไม่มีชีวิตในต้นกล้าทุเรียนแบบไม่ทำลายตัวอย่าง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างและทดสอบ แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning Model) ที่ใช้ข้อมูลสเปกตรัม NIR ในการจำแนกความเครียดของต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทอง โดยพิจารณาการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำสูงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานเกษตรกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมต้นกล้าทุเรียน

เตรียมต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่มีอายุ 8 เดือน จำนวน 15 ต้น สำหรับใช้เป็นตัวอย่างในการทดลอง จากนั้นวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) โดยมีจำนวน 3 กรรมวิธี ดังนี้ กรรมวิธีที่ 1 ขุดต้นกล้าทุเรียนที่ให้น้ำให้ปุ๋ย (ชุดควบคุม หรือ T0) กรรมวิธีที่ 2 ขุดต้นกล้าทุเรียนที่ให้น้ำไม่ให้ปุ๋ย (ชุดขาดธาตุอาหาร หรือ T1) และกรรมวิธีที่ 3 ขุดต้นกล้าทุเรียนที่ไม่ให้น้ำให้ปุ๋ย (ชุดขาดน้ำ หรือ T2)

2.2 การวัดค่าสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด

นำตัวอย่างต้นกล้าทุเรียนแต่ละกรรมวิธีมาสแกนใบเพื่อเก็บค่าสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดด้วยเครื่อง NIRQuest512, Ocean optics, USA ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่นครอบคลุมตั้งแต่ 900 - 1700 นาโนเมตร โดยทำการสแกนตัวอย่างละ 3 ตำแหน่ง คือ ใบส่วนยอด (P1) ใบส่วนกลาง (P2) และใบส่วนล่าง (P3) โดยทำการสแกนที่ตำแหน่งกลางใบ โดยตัวอย่างใบที่เลือกจะเป็นใบที่มีความสมบูรณ์ทางกายภาพ หลังจากนั้นบันทึกสเปกตรัมลงคอมพิวเตอร์ การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองครอบคลุมระยะเวลา 6 สัปดาห์ (0 7 14 21 28 และ 35 วัน หลังเตรียมชุดทดลอง) โดยแต่ละครั้งของการทดลอง ได้ทำการบันทึกภาพลักษณะอาการของต้นทุเรียน วัดค่าความชื้นในดินด้วยเครื่อง soil moisture meter และวัดค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบด้วยเครื่อง SPAD-502 Plus

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัม

ข้อมูลสเปกตรัมทั้งหมดถูกนำมาจัดการเบื้องต้นด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยใช้เทคนิค Savitzky-Golay 2nd derivative (SGD2) และจากนั้นนำข้อมูลสเปกตรัมที่ได้ไปทำการวิเคราะห์เพื่อจำแนกกลุ่มความเครียดที่เกิดจากสิ่งไม่มีชีวิตผ่านวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) โดยมีแผนผังวิธีการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองดังแสดงใน Figure 1

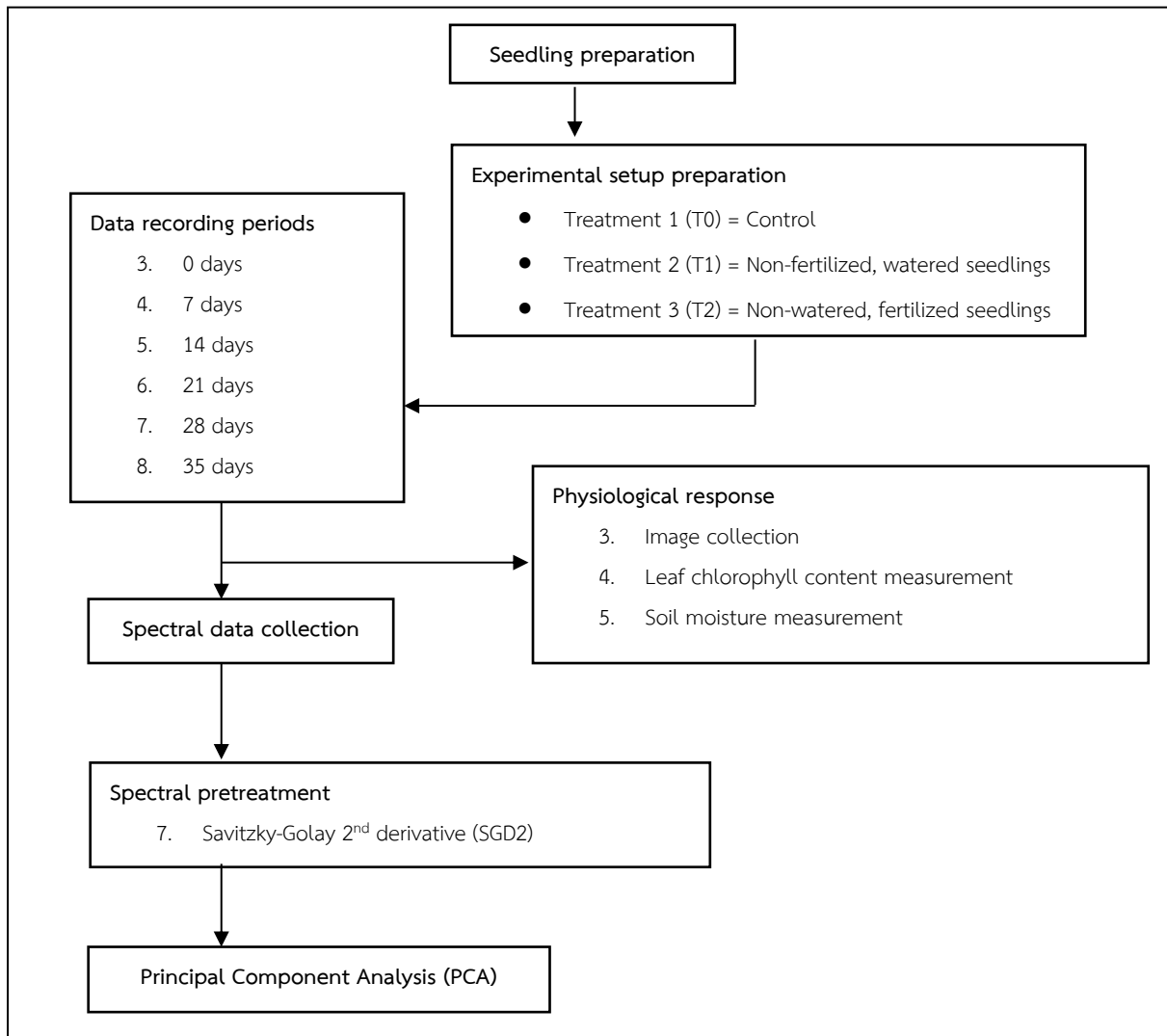


Figure 1 Comprehensive Flowchart of Experimental Steps and Analysis of Outcomes.

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การบันทึกภาพลักษณะอาการของต้นทุเรียน

จากการเตรียมต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทองจำนวน 15 ต้น และทำการแบ่งออกเป็น 3 กรรมวิธี ได้มีการบันทึกภาพลักษณะอาการผ่านการถ่ายภาพตลอด 6 สัปดาห์ พบว่า ในกรรมวิธีชุดควบคุม (T0) ใบของต้นทุเรียนยังคงมีความเขียวและสมบูรณ์ตลอดช่วงเวลา 6 สัปดาห์ ในทางกลับกัน ต้นกล้าทุเรียนที่ให้น้ำและไม่ให้ปุ๋ย (T1) พบว่า ต้นกล้าทุเรียนมีการแสดงอาการใบเหลืองบางส่วนตั้งแต่สัปดาห์ที่ 2-3 แต่ใบยังคงมีความเขียวอยู่ และอาการเริ่มชัดเจนขึ้นในสัปดาห์ที่ 4-5 ส่วนต้นกล้าทุเรียนที่ไม่ให้น้ำแต่ให้ปุ๋ย (T2) เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด และใบเริ่มมีอาการเหี่ยวเฉา ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 โดยมีอาการที่รุนแรงขึ้นเรื่อย ๆ และมีการใบแห้งและมีสีน้ำตาลในสัปดาห์ที่ 4-5 (Figure 2) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของจริญญา และคณะ [8] ซึ่งได้กล่าวว่า

ความเครียดที่เกิดจากการขาดน้ำส่งผลกระทบเชิงลบต่อปริมาณน้ำสัมพัทธ์ ค่าดัชนีความเขียวใบ และการเจริญเติบโตของข้าวใน
ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น

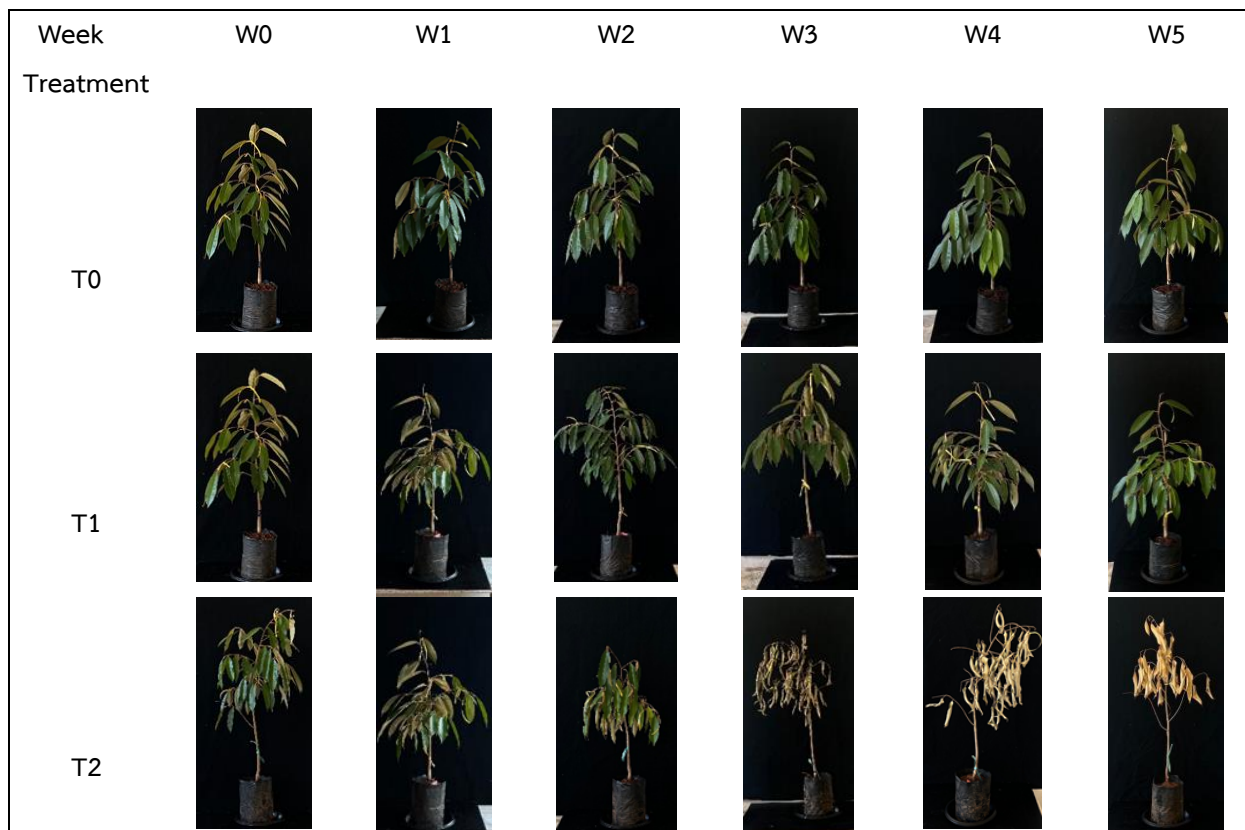


Figure 2 Symptoms of durian seedlings by T0 = Control, T1 = Non-fertilized, watered seedlings and T2 = Non-watered, fertilized seedlings.

3.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับความชื้นในดิน

จากการเปลี่ยนแปลงระดับความชื้นในดินของต้นกล้าทุเรียนตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ พบว่า ชูตต้นกล้าทุเรียนที่ให้น้ำให้ปุ๋ย (T0) มีความชื้นในดินค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 19-20 เปอร์เซ็นต์ ชูตต้นกล้าทุเรียนที่ให้น้ำไม่ให้ปุ๋ย (T1) มีความชื้นลดลงเล็กน้อย แต่ยังอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับ T0 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 15-20 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากทั้ง 2 กรรมวิธียังคงมีการให้น้ำเหมือนกัน ในขณะที่ชูตต้นกล้าทุเรียนที่ไม่ให้น้ำแต่มีการให้ปุ๋ย (T2) พบว่า ปริมาณความชื้นในดินลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 และมีค่าเป็น 0 เปอร์เซ็นต์ ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 3 เป็นต้นไป (Figure 3) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Reddy et al. [9] ที่ได้กล่าวว่า ความเครียดของต้นถั่วเหลืองที่เกิดจากการขาดความชื้นในดินส่งผลต่อการเจริญเติบโตทั้งในด้านความสูง จำนวนฝัก และผลผลิตทั้งในฝักและเมล็ด

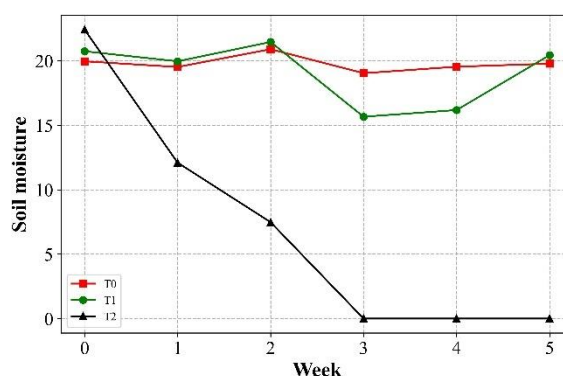


Figure 3 The changes in soil moisture levels over a period of six weeks for each treatment.

3.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าคลอโรฟิลล์ของใบ

Figure 4 แสดงผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าคลอโรฟิลล์ในใบต้นกล้าทุเรียนจาก 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ใบส่วนยอด (P1) ใบส่วนกลาง (P2) และใบส่วนล่าง (P3) ผ่านการนำเสนอการเปลี่ยนแปลงเชิงเปรียบเทียบระหว่างกรรมวิธีที่แตกต่างกันทั้ง 3 กรรมวิธี จากการพิจารณาพบว่า ค่าคลอโรฟิลล์ของใบที่วัดจากต้นกล้าทุเรียนในชุด T₀ และ T₁ มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แตกต่างกันทั้ง 3 ตำแหน่ง และมีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาทั้ง 6 สัปดาห์ อย่างไรก็ตาม ชุดต้นกล้าทุเรียนที่ไม่ให้น้ำแต่ให้ปุ๋ย (T₂) แสดงค่าคลอโรฟิลล์ที่ลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อผ่านสัปดาห์ที่ 1 และลดลงถึงระดับ 0 เปอร์เซ็นต์ ภายใน 3 สัปดาห์ แสดงให้เห็นว่าการขาดน้ำมีผลกระทบอย่างมากต่อการเจริญเติบโตและการอยู่รอดของพืช ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ คงเอก [10] ซึ่งได้กล่าวว่า สภาพการขาดน้ำส่งผลทำให้ปริมาณรงควัตถุภายในใบ ได้แก่ คลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์ทั้งหมด และแคโรทีนอยด์ทั้งหมดลดลง

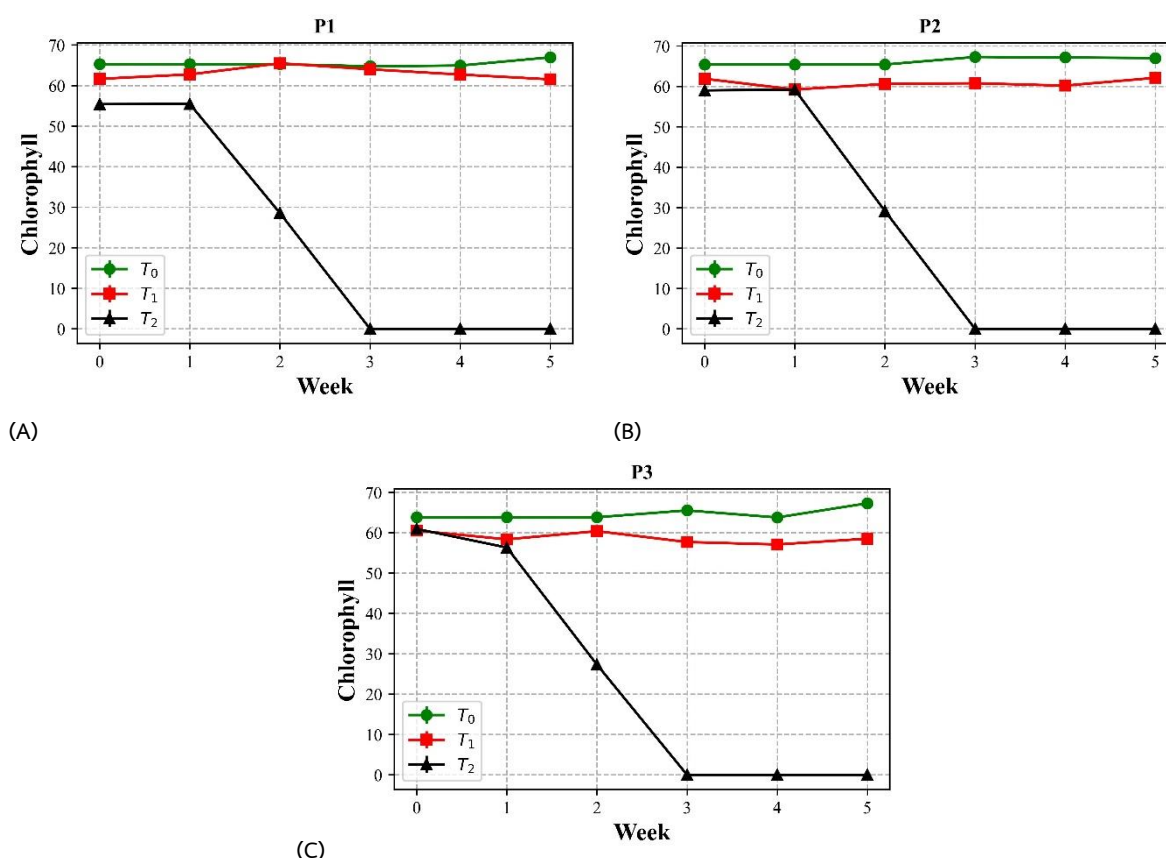


Figure 4 The changes in leaf chlorophyll content over a period of six weeks for control treatment (A), non-fertilized, watered seedlings (B) and non-watered, fertilized seedlings (C).

3.4 การจำแนกลักษณะความเครียดโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

จากการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) ของต้นกล้าทุเรียนทั้ง 3 กรรมวิธี พบว่า การกระจายตัวของข้อมูลในแผนภาพ Score plot ที่ได้จากการวิเคราะห์ PCA สำหรับชุดข้อมูลสเปกตรัมของใบส่วนบน (P1) (Figure 5) มีบางส่วนที่เกิดการซ้อนทับกัน และไม่สามารถแยกออกจากกันอย่างชัดเจนในชุดทดลอง T₀ และ T₁ โดยเทคนิค PCA สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในช่วง 61-63 % ในองค์ประกอบหลักที่หนึ่ง (PC-1) ในทางกลับกัน แผนภาพ Score plot ที่แสดงการกระจายตัวของข้อมูลในชุดทดลอง T₂ พบว่า มีรูปแบบการกระจายตัวที่แยกออกจากกันอย่างชัดเจน ซึ่ง PC-1 สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลสเปกตรัมได้ถึงประมาณ 89% เมื่อพิจารณาแผนภาพ Loading plot ของชุดทดลอง T₀ (Figure 5D) และ T₁ (Figure 5E) พบว่ามีค่า Loading ที่สูงอยู่ในพีกเดียวกันที่ 1400 nm ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนของโมเลกุล O-H ในใบพืช [11] ผลดังกล่าวเป็นการบ่งชี้ว่าต้นกล้าทุเรียนในชุดทดลองทั้ง 2 อาจมีระดับจำนวนโมเลกุลนี้ที่ไม่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้ข้อมูลการกระจายตัวของสเปกตรัมมีการซ้อนทับกัน อย่างไรก็ตาม ค่า Loading plot ที่เกิดจากตัวอย่างต้นกล้าทุเรียนในชุดทดลอง T₂ (Figure 5F) กลับให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างจาก

2 การทดลองแรก กล่าวคือ จากการพิจารณาพบว่า มีพีคเด่นของ PC-1 มีการขยับจาก 1400 ไปอยู่ที่ประมาณ 1380 nm ซึ่งเป็นช่วงที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนของการดูดซับของน้ำในใบพืช ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนแบบผสมผสานของพันธะ O-H (ทั้งการสั่นแบบยืดและการโค้ง) ในโมเลกุลของน้ำ [12] จากผลดังกล่าวสามารถบ่งชี้ได้ว่าการเปลี่ยนระดับโมเลกุลของพันธะ O-H ในใบพืชเป็นดัชนีสำคัญในการบ่งชี้ความแตกต่างทางความเครียดภายในต้นกล้าทุเรียนในชุดทดลอง T2 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ได้

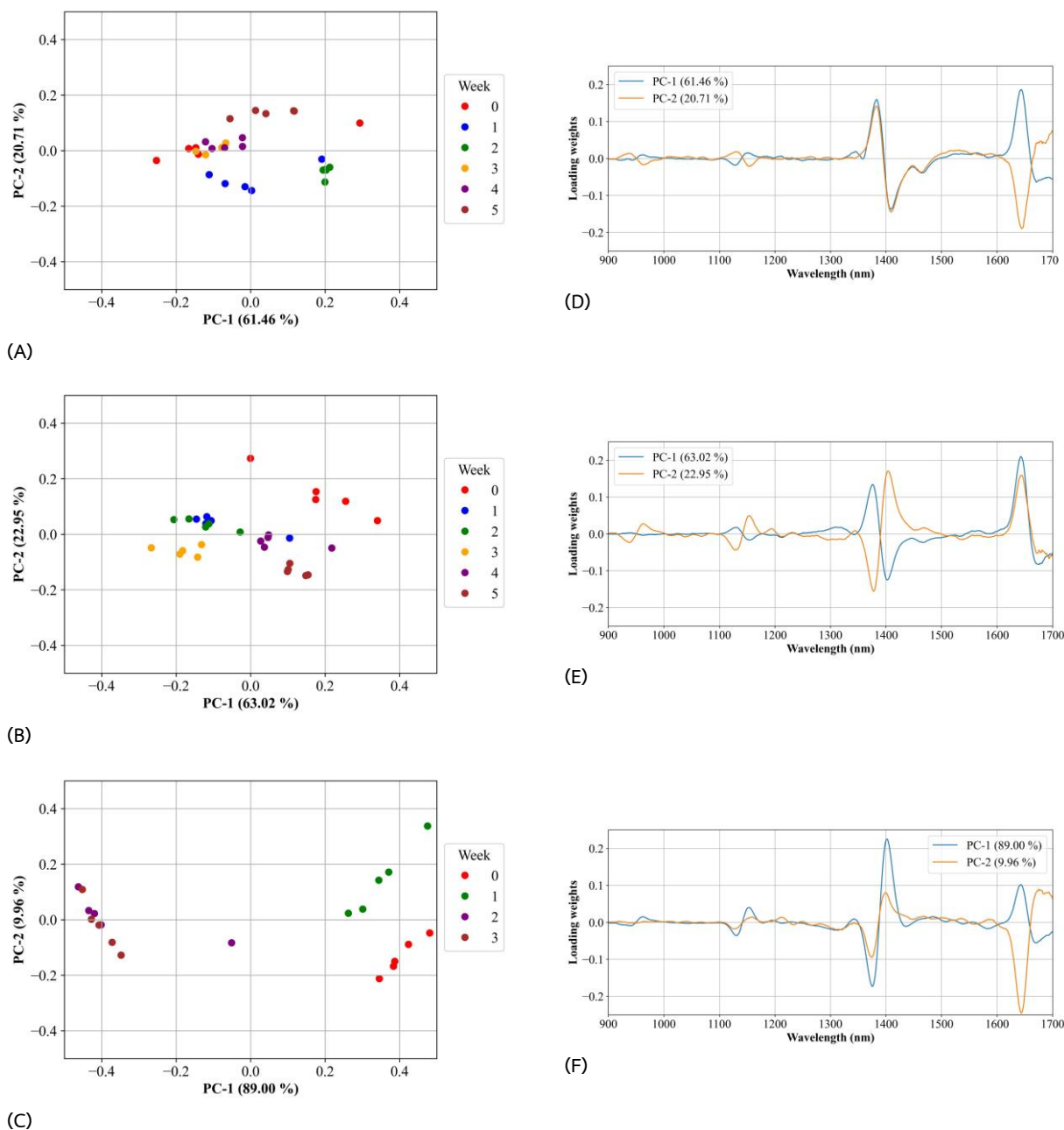
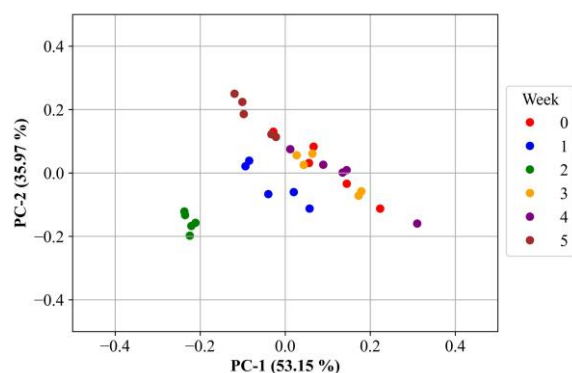


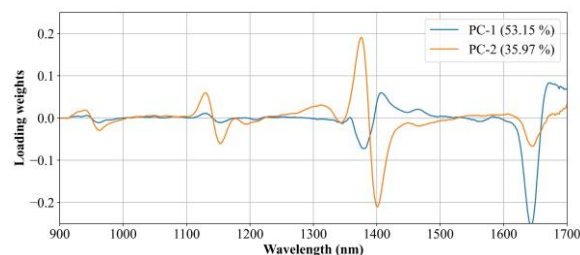
Figure 5 The PCA Score plot (A-C) and Loading plot (D-F) of NIRs spectral data from upper leaves (P1) treatment of control (T0) (A, D), treatment for non-fertilized, watered seedlings (T1) (B, E) treatment for non-watered, fertilized seedlings (T2) (C, F).

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ของสเปกตรัม NIR พบว่า Score plot ที่ได้จากการวิเคราะห์ PCA สำหรับชุดข้อมูลสเปกตรัมของใบส่วนกลาง (P2) (Figure 6) มีบางส่วนที่เกิดการซ้อนทับกัน ซึ่งในชุดทดลอง T0 และ T1 ชุดข้อมูลสเปกตรัมมีความคล้ายกับข้อมูลของใบส่วนบน (P1) สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในช่วง 53-71 % ในองค์ประกอบหลักที่หนึ่ง (PC-1) ในขณะที่ แผนภาพ Score plot ที่แสดงการกระจายตัวของข้อมูลในชุดทดลอง T2 พบว่า มีรูปแบบการกระจายตัว

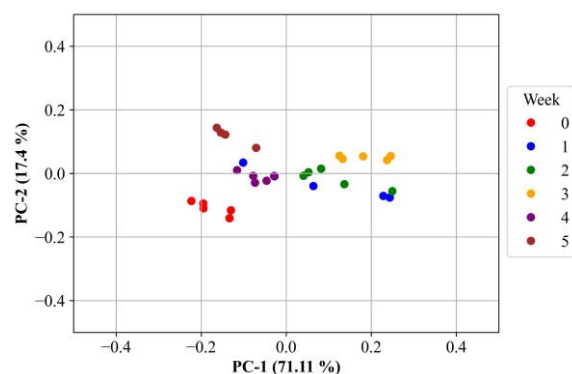
ที่แยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลสเปกตรัมได้ถึงประมาณ 84% เมื่อพิจารณาแผนภาพ Loading plot ของชุดทดลอง T0 (Figure 6D) และ T1 (Figure 6E) พบว่ามีค่า Loading plot ที่สูงอยู่ในพิกัดเดียวกันที่ 1410 nm ซึ่งผลดังกล่าวเป็นการบ่งชี้ได้ว่าต้นกล้าทุเรียนในชุดทดลองทั้ง 2 อาจมีระดับจำนวนโมเลกุลที่ไม่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้ข้อมูลการกระจายตัวของสเปกตรัมมีการซ้อนทับกัน [11] อย่างไรก็ตาม ค่า Loading plot ที่เกิดจากตัวอย่างต้นกล้าทุเรียนในชุดทดลอง T2 (Figure 5F) กลับให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างจาก 2 การทดลองแรก กล่าวคือ จากการพิจารณาพบว่า มีพีคเด่นของ PC-1 มีการขยับจาก 1410 ไปอยู่ที่ประมาณ 1370 nm บ่งบอกถึงการสูญเสียในเซลล์พืช เมื่อเซลล์พืชสูญเสีย น้ำ จะพบว่าค่าสัญญาณดูดซับในแถบนี้ลดลง [13]



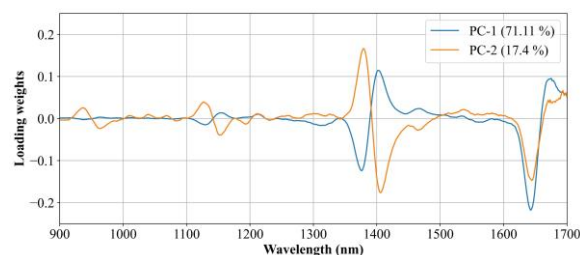
(A)



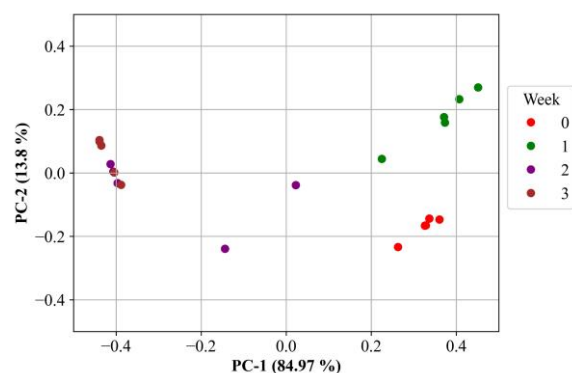
(D)



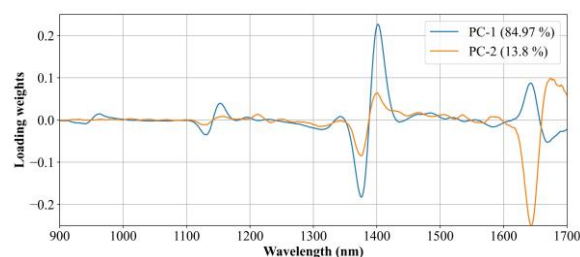
(B)



(E)



(C)



(F)

Figure 6 The PCA Score plot (A-C) and Loading plot (D-F) of NIRs spectral data from center leaves (P2) treatment of control (T0) (A, D), treatment for non-fertilized, watered seedlings (T1) (B, E) treatment for non-watered, fertilized seedlings (T2) (C, F).

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) สำหรับชุดข้อมูลสเปกตรัมของใบส่วนล่าง (P3) ผลการวิเคราะห์พบว่า ชุดการทดลองที่ T0 และ T1 สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ 79-81% ในองค์ประกอบหลักที่หนึ่ง (PC-1) ซึ่งค่า Score plot มีการแยกกลุ่มที่ไม่ชัดเจนมากนัก มีการซ้อนทับกันในส่วน (Figure 7) ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นว่าพืชที่ได้รับสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม จึงทำให้มีสเปกตรัมที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่การทดลองของชุดต้นกล้าทุเรียนที่ไม่ให้น้ำให้ปุ๋ย (T2) Score plot ของข้อมูลของแต่ละสัปดาห์มีแนวโน้มแยกกลุ่มจากกันอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าการขาดน้ำทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบเคมีในใบอย่างมีนัยสำคัญ พืชที่ขาดน้ำมักสูญเสียความชื้นในใบ [13] สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึงประมาณ 82% (Figure 7C) และจาก Loading plot สามารถพิจารณาได้ว่า ช่วงความยาวคลื่นมีอิทธิพลต่อการจำแนกลักษณะความเครียดของต้นกล้าทุเรียนโดยเกิดจากปัจจัยที่กล่าวข้างต้น เมื่อพิจารณา Loading plot ทั้ง 3 พบว่า ใน T0 มีค่า Loading plot ที่สูงอยู่ในพิกัดที่ 1410 nm เพราะองค์ประกอบยังคงสภาพเดิมตามปกติ (Figure 7D) ชุดการทดลองที่ T1 (Figure 7E) และ T2 (Figure 7F) มีค่า Loading plot ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าพีคสูงสุดอยู่ที่ 1380 nm ซึ่งในชุดทุเรียนที่ไม่ให้น้ำแต่ใส่ปุ๋ย (T2) มักจะเห็นความเปลี่ยนแปลงชัดเจนในช่วงความยาวคลื่นที่เกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำในใบ สะท้อนให้เห็นว่าการขาดน้ำเป็นปัจจัยความเครียดที่มีผลอย่างรวดเร็วและรุนแรงต่อสภาพใบ [14]

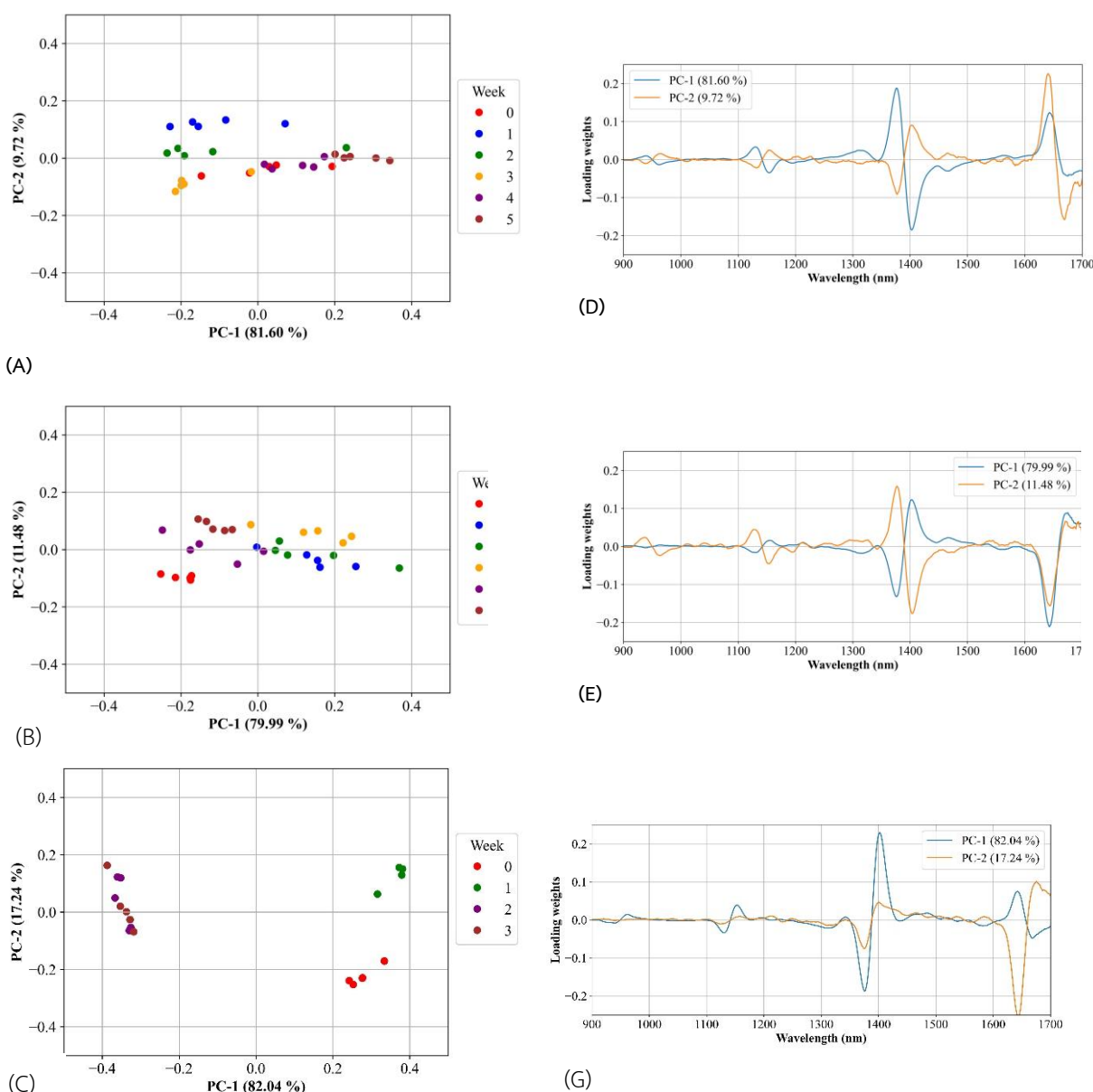


Figure 7 The PCA Score plot (A-C) and Loading plot (D-F) of NIRs spectral data from lower leaves (P3) treatment of control (T0) (A, D), treatment for non-fertilized, watered seedlings (T1) (B, E) treatment for non-watered, fertilized seedlings (T2) (C, F).

จากผลการทดลองพบว่า การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIRS) ร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) สามารถจำแนกต้นกล้าทุเรียนที่เกิดความเครียดจากสภาวะต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม การศึกษาวิจัยนี้เป็นเพียงการใช้เทคนิค PCA ในการจำแนกกลุ่มความเครียด ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิค Machine Learning พื้นฐานประเภทการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) แต่ในอนาคตควรมีการประยุกต์ใช้เทคนิค Machine Learning ประเภทการเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) แบบอื่น ๆ เพื่อให้สามารถจำแนกประเภทของกลุ่มความเครียดที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจช่วยเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกกลุ่มที่มีความแตกต่างกันน้อยได้ดีกว่า [15]

4. สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษามลของความเครียดจากสิ่งไม่มีชีวิต (abiotic stress) ที่เกิดจากการขาดธาตุอาหาร (T1) และการขาดน้ำ (T2) เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (T0) ในต้นกล้าทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่มีอายุ 8 เดือน โดยวัดค่าสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด (NIR) จากใบ 3 ตำแหน่ง (ใบส่วนบน P1 ใบส่วนกลาง P2 และใบส่วนล่าง P3) อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 6 สัปดาห์ ร่วมกับการบันทึกข้อมูลลักษณะอาการของต้น การวัดค่าความชื้นในดิน และการวัดค่าคลอโรฟิลล์ (SPAD) พบว่า อาการเปลี่ยนแปลงของต้นทุเรียน T0 มีใบสีเขียวสมบูรณ์ทุกสัปดาห์ ค่าคลอโรฟิลล์ และค่าความชื้นในดินมีความสูงคงที่ตลอด ในขณะที่ T1 เริ่มแสดงอาการใบเหลืองบางส่วนตั้งแต่สัปดาห์ที่ 2-3 และเริ่มมีอาการชัดเจนขึ้นในสัปดาห์ถัดไปค่าคลอโรฟิลล์ และค่าความชื้นในดินลดลงเล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในระดับคงที่ และ T2 มีลักษณะอาการใบเหี่ยวและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วดังแต่สัปดาห์แรก ค่าคลอโรฟิลล์และค่าความชื้นในดิน ลดลงอย่างรวดเร็ว จากสัปดาห์ที่ 3 เป็นต้นไป เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมไปวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) พบว่า ใบส่วนบน (P1) ใบส่วนกลาง (P2) และใบส่วนล่าง (P3) ในชุดทดลอง T0 และ T1 การกระจายตัวของข้อมูลใน Score plot มีบางส่วนที่เกิดการซ้อนทับกัน และไม่สามารถแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ในทางกลับกัน ข้อมูลใน Score plot ที่แสดงการกระจายตัวของข้อมูลในชุดทดลอง T2 พบว่า มีรูปแบบการกระจายตัวที่แยกออกจากกันอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเครียดที่เกิดจากการขาดน้ำมีความสัมพันธ์กับความแตกต่างของสเปกตรัมและการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบชีวเคมีในใบ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2566. ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร. (ระบบออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ : <https://www.oae.go.th/> (เข้าถึงเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2568)
- [2] กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ. 2565. สินค้าทุเรียนและผลิตภัณฑ์. (ระบบออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์: <https://xn--42ca1c5gh2k.com> (เข้าถึงเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2568)
- [3] ยงยุทธ โอสดสภา. 2559. ความเครียดของพืชและการบรรเทาความเครียด. วารสารดินและปุ๋ย. 38. 1-4. 47-78.
- [4] Mosa, K.A., Ismail, A., Helmy, M. 2017. Introduction to Plant Stresses. Plant Stress Tolerance an Integrated Omics Approach. 1. 1-19.
- [5] Al-Hiary, H., Bani-Ahmad, S., Reyat, M., Braik, M., ALRahamneh, Z. 2011. Fast and Accurate Detection and Classification of Plant Diseases. International Journal of Computer Applications. 17(1). 31-38.
- [6] Ehsani, R., Sankaran, S., Mishra, A., Davis, C. 2010. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. Computers and Electronics in Agriculture. 72. 1-13.
- [7] อาทิตย์ พวงสมบัติ, จิรวาส์ เจียรตระกูล, แก้วกานต์ พวงสมบัติ และอนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล. 2565. การประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้บนท่อนอ้อยด้วยเทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. วารสารวิชาการเกษตร. ปีที่ 40. 3. 276-287.

-
- [8] จริญญา กุลยะ, ปัญญา มาดี, เจนจิรา ทิพย์ท่ามา และนธกร ไชยธรรม. 2567. ผลของสภาวะขาดน้ำต่อปริมาณน้ำสัมพัทธ์ ค่าดัชนีความเขียวใบ และการเจริญเติบโตของข้าวระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 5. 1. 37-48.
- [9] Reddy, K.R., Wijewardana, C., Alsajr, F.A., Irby, J.T., Krutz, J and Golden, B. 2018. Quantifying soil moisture deficit effects on soybean yield and yield component distribution patterns. Irrigation Science. 36: 241-255.
- [10] คงเอก ศิริงาม. 2558. ผลของสภาวะขาดน้ำต่อการร่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ ปริมาณรงควัตถุ ปริมาณโปรตีน และการเจริญเติบโตของข้าว. Thai Journal of Science and Technology. 4(2). 133-146.
- [11] Burns, D. A., and Ciurczak, E. W. 2007. Handbook of Near-Infrared Analysis. 2. 167-195
- [12] Osborne, F. G., Fearn, T. and Hindle, P. T., 1993. Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis. Longman Scientific and Technical, Harlow. 8(7).
- [13] Chaves, M. M., Maroco, J. P. and Pereira, J. S. 2003. Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant. Functional Plant Biology. 30(3). 239-264.
- [14] Boyer, J. S. 1982. Plant productivity and environment. Science. 218(4571). 443-448.
- [15] Cramer, G. R., Urano, K., Delrot, S., Pezzotti, M., and Shinozaki, K. (2011). Effects of abiotic stress on plants: A systems biology perspective. BMC Plant Biology. 11. 163.

ภาคโปสเตอร์

การทดสอบปลูกพญาโยในโรงเรือนระบบเปิดควบคุมการระบายอากาศและความชื้นสัมพัทธ์แบบอัตโนมัติ Testing growing Phaya Yo in an open greenhouse with automatic ventilation and humidity control

สรารวุฒิ ปานทน¹ ธนาวัฒน์ ทิพย์ชิต¹ วุฒิพล จันทร์สระคู² และ จารุวรรณ รัตนสกุลธรรม^{3,*}

Sarawuth Parnthon¹, Thanawat Tipchit¹, Wuttiphol Chansakoo² and Charuwan Rattanasakultham^{3,*}

¹ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมสุราษฎร์ธานี กรมวิชาการเกษตร จังหวัดสุราษฎร์ธานี

²สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพมหานคร

³กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพมหานคร

¹Suratthani Agricultural Engineering Research Center, Department of Agriculture, Suratthani

²Agricultural Engineering Research Institute, Department of Agriculture, Bangkok

³Postharvest and Processing Research and Development Division, Department of Agriculture, Bangkok

*Corresponding author: Sarawuth Parnthon, e-mail address: sarawutpa@hotmail.com

บทคัดย่อ

การผลิตพืชในโรงเรือนเป็นแนวทางการทำการเกษตรที่มีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในประเทศไทย เพราะสามารถปรับหรือควบคุมสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืชให้เหมาะสมได้ โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนทางภาคใต้ จะมีฝนตกติดต่อกันเป็นเวลานาน ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง มีความเสี่ยงที่จะทำให้พืชที่ปลูกเกิดโรคได้ หากสามารถควบคุมการระบายอากาศเพื่อลดความเสี่ยงได้ก็จะสามารถลดการเกิดโรคและช่วยให้พืชที่ปลูกเจริญเติบโตได้ดี โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการปลูกพญาโยในโรงเรือนระบบเปิดควบคุมการระบายอากาศและความชื้นสัมพัทธ์แบบอัตโนมัติ เพื่อลดความเสี่ยงการเกิดโรคเนื่องจากความชื้นภายในโรงเรือนที่สูงมากเกินไป ต้นแบบโรงเรือนระบบเปิด ขนาดกว้าง 5 เมตร ยาว 12 เมตร โครงสร้างเป็นเหล็กชุบกัลวาไนซ์ หลังคาโค้งมุงด้วยพลาสติกใสกันยูวี หนา 150 ไมครอน ด้านข้างปิดด้วยมุ้งกันแมลงความละเอียด 32 เมช ประตูทางเข้า-ออก ออกแบบให้เป็นประตูสองชั้น เพื่อป้องกันแมลงขณะมีการเข้า-ออกโรงเรือน ภายในโรงเรือนติดตั้งพัดลมอุตสาหกรรมขนาด 20 เซนติเมตร 3 ตัว เพื่อช่วยการระบายอากาศและหมุนเวียนอากาศภายใน โดยมีเงื่อนไขในการทำงาน คือ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน มากกว่า 80% และความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน น้อยกว่าหรือเท่ากับ ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือน ให้พัดลมหมุนเวียนอากาศชุดที่ 1 ทำงาน และเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน มากกว่า 80% และความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน มากกว่า ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือน 5% ให้พัดลมหมุนเวียนอากาศชุดที่ 2 ทำงาน ผลการทดสอบปลูกพญาโยในโรงเรือนเปรียบเทียบกับนอกโรงเรือน พบว่า พญาโยที่ปลูกในโรงเรือนมีปริมาณสารสำคัญ ได้แก่ ปริมาณคอลโรฟิลล์ทั้งหมด ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH มากกว่า พญาโยที่ปลูกนอกโรงเรือน

คำสำคัญ: ความชื้นสัมพัทธ์, การควบคุมการระบายอากาศ, พญาโย

Abstract

Greenhouse crop production is an agricultural practice that is playing an increasing role in Thailand. Because it's can adjust or control various environments related to proper plant growth. If ventilation and relative humidity can be controlled to reduced the risk, it can reduce disease incidence and help crops grow well. This project aims to test the cultivation of Phaya Yor in an open greenhouse with automatic ventilation and relative humidity control. A prototype of an open system greenhouse, 5 meters wide and 12 meters long. The curved roof is covered with clear UV protective plastic 150 microns thick. The sides are covered with insect nets, 32 mesh. Entrance-exit door it's double door to protect against insects. Inside the greenhouse, three 50 centimeters air circulation fans are installed. The condition for controlling ventilation, when the relative humidity inside the greenhouse is more than 80%RH and the relative humidity inside the greenhouse is less than or equal to the relative humidity outside of the greenhouse, the first set of air circulation fans should operate. When the relative humidity inside the greenhouse is more than 80%RH and the relative humidity inside the greenhouse is 5% more than relative humidity outside of the greenhouse, turn on the second set of air circulation fans.

The results of test of growing Phaya yo in the greenhouse compared to outside the greenhouse found that. Phaya yo grown in greenhouse has important substances, including the amount of total chlorophyll, total carotenoid, total phenolic, total flavonoid and the antioxidant radicals using the DPPH method is greater than Phaya yo grown outside the greenhouse.

Keywords: Relative humidity, Ventilation control, Phaya Yo

1. บทนำ

การผลิตพืชในโรงเรือน เป็นแนวทางการทำการเกษตรที่มีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในประเทศไทย เพราะสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืช เช่น แสง อุณหภูมิ ความชื้น น้ำ และปุ๋ยได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดผลกระทบจากความแปรปรวนของสภาพอากาศ กรณีที่ปลูกกลางแจ้ง และยังสามารถปลูกพืชนอกฤดูกาลได้ ปัญหาที่สำคัญของการปลูกพืชในโรงเรือนในประเทศไทย คือ อุณหภูมิ และความชื้นที่สูงเกินไปจนก่อให้เกิดโรคได้ง่าย ปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับโรงเรือนมักจะเน้นไปที่การลดความร้อนภายในโรงเรือน แต่ในเขตที่มีฝนตกชุก จะพบปัญหาความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนที่สูงเกินไปจนก่อให้เกิดโรคได้ หากสามารถพัฒนาระบบระบายอากาศ หรือระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนให้เหมาะสม ก็จะสามารถลดสาเหตุการเกิดโรคได้

โดยทั่วไปสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนแบบมีหลังคาพลาสติกและมุ้งกันแมลง จะมีการระบายอากาศไม่ดีเท่าสภาพแวดล้อมในที่โล่ง เนื่องจากมีหลังคาพลาสติกและมุ้งกันแมลง มาปิดขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ ทำให้การถ่ายเทของอากาศไม่ดีเท่าที่ควร เมื่ออากาศร้อนภายในโรงเรือนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าภายนอก เนื่องจากอากาศร้อนที่สะสมขึ้นที่สูงจะถูกหลังคาพลาสติกกั้นไว้ หากเป็นโรงเรือนหลังคาโค้งจะเกิดการสะสมความร้อนบริเวณใต้หลังคา ส่วนหลังคาแบบจั่วสองชั้นและหลังคาแบบเหลื่อม (ทรง ก.ไก่) ที่มีช่องระบายอากาศจะช่วยลดปัญหานี้ แต่มุ้งกันแมลงที่ปิดอยู่ที่ช่องระบายก็ยังเป็นตัวชะลอการถ่ายเทของอากาศ ให้เคลื่อนที่ได้ช้ากว่าที่โล่ง โดยเฉพาะมุ้งกันแมลงที่มีความละเอียดมากสามารถกันแมลงได้ดี แต่ก็ส่งผลต่อการถ่ายเทอากาศของโรงเรือน ทำให้อากาศผ่านได้ยากขึ้น นอกจากปัญหาด้านความร้อนแล้ว หากภายในโรงเรือนมีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงร่วมด้วย ก็จะส่งผลให้การถ่ายเทความชื้นจากภายในสู่ภายนอกโรงเรือนช้า ในช่วงที่มีฝนตกติดต่อกัน ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง เมื่อฝนหยุดและอุณหภูมิเริ่มสูงขึ้น สภาพอากาศภายในโรงเรือนที่ถ่ายเทอากาศได้ช้า มีโอกาสที่จะทำให้เกิดสภาพร้อน-ชื้นขึ้นในโรงเรือน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรค การควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเขตฝนตกชุก จึงเป็นปัญหาให้ผู้ศึกษาด้านโรงเรือนต้องหาแนวทางการแก้ปัญหาในการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนให้เหมาะสมกับพืชที่ปลูก สภาพพื้นที่ที่แตกต่างกัน สภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกันจะต้องการการควบคุมที่ไม่เหมือนกัน สำหรับพื้นที่ที่มีฝนตกชุกจะประสบกับปัญหาความชื้นที่สูงเกินไป ก่อให้เกิดโรค หรือเชื้อราทำให้พืชที่ปลูกเสียหาย ผลผลิตไม่ได้คุณภาพ หากเราสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนให้ความชื้นและอุณหภูมิ อยู่ในระดับที่เหมาะสม จะส่งผลให้ผลผลิตที่ได้มีคุณภาพและลดสาเหตุของการเกิดโรคได้

2. วิธีการศึกษา

1. ออกแบบและสร้างโรงเรือน ขนาดกว้าง 5 เมตร ยาว 12 เมตร โครงสร้างเป็นเหล็กชุบกัลวาไนซ์ หลังคาโค้งมุงด้วยพลาสติกใสกันยูวี หนา 150 ไมครอน ด้านข้างปิดด้วยมุ้งกันแมลงความละเอียด 32 เมช ประตูทางเข้า-ออก ออกแบบให้เป็นประตูสองชั้น เพื่อป้องกันแมลงขณะมีการเข้า-ออกโรงเรือน
2. ติดตั้งระบบให้น้ำ ให้ปุ๋ยพืชแบบอัตโนมัติ
3. ติดตั้งระบบควบคุมการระบายอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ ทดสอบการทำงาน ตั้งเงื่อนไขการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน
4. ดำเนินการปลูกทดสอบพญาโยในโรงเรือน กับนอกโรงเรือน โดยเปรียบเทียบปริมาณสารสำคัญของพญาโยที่ปลูกในโรงเรือนกับนอกโรงเรือน
5. เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตด้านพืช และสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนปลูกพืช บันทึกผลและวิเคราะห์ข้อมูล
6. วิเคราะห์สารสำคัญ

- ทำการเก็บตัวอย่างพญาโย โดยใช้คูใบที่ 1-6 จากยอด อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส [1] จนแห้งและบดละเอียด การสกัดสารสำคัญ จะทำการชั่งตัวอย่างแห้ง 0.2 กรัม ใส่ลงในหลอดหมุนเหวี่ยง เติมน้ำเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95

ปริมาณ 25 มิลลิกรัม ตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง นำไปเหวี่ยงแยกของแข็งด้วยเครื่องเหวี่ยง ที่ความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที เทแยกส่วนใสใส่ขวดสีชา เพื่อนำไปวิเคราะห์สารสำคัญ ได้แก่ ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH

- การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์และปริมาณแคโรทีนอยด์ นำสารที่สกัดได้วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 470, 648.6 และ 664.1 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และนำมาคำนวณตามสูตรของ Lichtenthaler and Buschmann (2005) [2]

- การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด โดยวิธี total phenols assay ดัดแปลงจากวิธีของ Kim *et al.* (2003) รายงานผลเป็นปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิก/กรัม น้ำหนักแห้ง) [3]

- การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด ด้วยวิธี colorimetric assay ดัดแปลงจากวิธีของ Kim *et al.* (2003) รายงานผลเป็นปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (มิลลิกรัมสมมูลของคาเทชิน/กรัม น้ำหนักแห้ง) [3]

- การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (DPPH Radical Scavenging Capacity) ดัดแปลงจาก Kim *et al.* (2002) รายงานผลเป็นความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (มิลลิกรัมสมมูลของกรดแอสคอร์บิก/กรัม น้ำหนักแห้ง) [4]

การดำเนินการ

ดำเนินการออกแบบและสร้างโรงเรือนต้นแบบสำหรับการทดสอบ ขนาด (กxย) 5 x 12 เมตร หลังคาโค้งมุงด้วยพลาสติกใสกันยูวี หนา 150 ไมครอน ด้านข้างปิดด้วยมุ้งกันแมลงความละเอียด 32 เมช ประตูทางเข้า-ออก เป็นประตูสองชั้นเพื่อป้องกันแมลงขณะมีการเข้า-ออกโรงเรือน นอกจากนี้ ห้องระหว่างประตูชั้นที่ 1 และ 2 จะเป็นห้องที่ติดตั้งระบบควบคุมต่างๆ กรณีที่ปฏิบัติงานเกี่ยวกับระบบควบคุม สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องเข้าไปในโรงเรือนปลูกพืช ติดตั้งระบบให้น้ำและให้ปุ๋ยแบบอัตโนมัติ



Figure 1 Prototype of greenhouse

ดำเนินการออกแบบและสร้างระบบควบคุมการระบายอากาศและความชื้นสัมพัทธ์แบบอัตโนมัติ ติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ภายในและภายนอกโรงเรือน โดยมีเงื่อนไขในการทำงาน คือ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนมากกว่า 80% และความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน น้อยกว่าหรือเท่ากับ ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือน ให้พัดลมหมุนเวียนอากาศชุดที่ 1 ทำงาน และเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน มากกว่า 80% และความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน มากกว่า ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือน 5% ให้พัดลมหมุนเวียนอากาศชุดที่ 2 ทำงาน ทำการทดสอบระบบและปรับปรุงควบคุมฯ ให้ทำงานตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ แล้วจึงทำการทดสอบปลูกพืชมะเขือเทศในโรงเรือนที่มีระบบควบคุมการระบายอากาศและความชื้นสัมพัทธ์เปรียบเทียบกับโรงเรือนปลูกนอกโรงเรือน



Figure 2 Ventilation control, Temperature and Humidity sensor

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

ผลการศึกษา

จากการเก็บตัวอย่างพญาอคูใบที่ 1-6 ที่ปลูกในโรงเรือนและนอกโรงเรือน นำไปอบแห้งและบดตามขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง แล้ววิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญที่ต้องการศึกษา พบว่า พญาอคูที่ปลูกในโรงเรือนมีปริมาณสารสำคัญ ได้แก่ ปริมาณคอลโรฟิลล์ทั้งหมด ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH มากกว่า พญาอคูที่ปลูกนอกโรงเรือน

Table 1 Testing the extraction of important substances of Phaya Yo

	Phaya Yo	Phaya Yo drying 60 °C	Phaya Yo grinding
Inside Greenhouse			
Outside Greenhouse			

Table 2 The Quality of Phaya Yo grown outside and inside the greenhouse

Quality	Outside Greenhouse	Inside Greenhouse
Total chlorophyll (mg/g DW)	4.26±0.12	5.51±0.20
Total carotenoid (mg/g DW)	0.71±0.01	0.96±0.04
Total phenolic compound (mg GAE/g DW)	6.31±0.20	8.10±0.21
Total flavonoid (mg CE/g DW)	4.18±0.16	4.68±0.13
Antioxidant capacity by DPPH (mg VCEAC/g DW)	3.41±0.06	4.23±0.27

วิจารณ์ผล

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญของพญาयोที่ปลูกในโรงเรือน และพญาयोที่ปลูกนอกโรงเรือน จะเห็นว่า ปริมาณสารสำคัญของพญาयोที่ปลูกในโรงเรือนสูงกว่านอกโรงเรือน ซึ่งมีแนวโน้มแสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมการระบายและความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ สามารถปรับสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนให้เหมาะสมกับการปลูกพญาयोได้ดีกว่าการปลูกนอกโรงเรือน ส่งผลให้ปริมาณสารสำคัญของพญาयोที่ปลูกในโรงเรือนสูงกว่าการปลูกนอกโรงเรือน อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ได้ผลการศึกษาค้นคว้าที่ครบถ้วนสมบูรณ์ ควรจะต้องทำการปลูกทดสอบซ้ำ และควรปลูกทดสอบในช่วงฤดูกาลที่แตกต่างกัน เพื่อให้มีข้อมูลเปรียบเทียบที่มากขึ้น

4. สรุป

ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ปริมาณคลอโรฟิลล์บี ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH มากกว่า ของพญาयोภายในโรงเรือน ระบบเปิดควบคุมการระบายอากาศและความชื้นสัมพัทธ์แบบอัตโนมัติมากกว่าการปลูกนอกโรงเรือน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยเกษตรกรรมสุราษฎร์ธานี ที่ช่วยดำเนินการปลูก ทดสอบ และเก็บข้อมูลการทดลอง เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรสุราษฎร์ธานี ที่ได้ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ คำแนะนำด้านการปลูกพืช การดูแลบำรุงรักษา และเอื้อเฟื้อข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดูแลแปลงทดลอง นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณเกษตรกร เจ้าหน้าที่และหน่วยงานต่างๆ ที่ไม่ได้เอื้อเฟื้อนาม ที่ได้เอื้อเฟื้อทั้งข้อมูล และให้คำแนะนำต่างๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ภคพร สาทลาลัย ลักขณา เบญจวรรณ ศิริวรรณ ทิพักษ์ ศิริพรรณ สุขขัง ศศิวิมล จันทร์สุเทพ ญาณิ มัมอัน นิขณา วิภยวราภรณ์ ธัญวิสิษฐ์ เจริญยิ่ง และ พิษณุ อุชวัฒน์. 2565. การเปรียบเทียบวิธีการสกัดสารจากสมุนไพรพญาयोที่มีประสิทธิภาพสู่การใช้ประโยชน์. เกษตรกรรม. กันยายน-ธันวาคม. หน้า 46-47.
- [2] Lichtenthaler, K. and C. Buschmann. 2005. chlorophyll and carotenoids: measurement and characterization by UV-Visible spectroscopy, pp. 171-178. In R.E. Wrolstad, T.E. Acree, E.A. Decker, M.H. Penner, D.S. Reid, S.J. Schwartz, C.F. Shoemaker, D. Smith and P. Sporns, eds. Handbook of Food Analytical Chemistry. Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey.
- [3] Kim, D.-O., S. W. Jeong and C.Y. Lee. 2003. Antioxidant capacity of phenolic phytochemicals from various cultivars of plums. Food Chemistry. 81: 321-326
- [4] Kim, D.-O., K. W. Lee, H.J. Lee and C.H. Lee. 2002. vitamin C equivalent antioxidant capacity (VCEAC) of phenolic phytochemicals. J. Agric. Food Chem. 50(13): 3713-3717.

การศึกษาวัดปรับปรุงดินคุณภาพสูงเพื่อเพิ่มคุณภาพดินกลุ่มดินที่ 48
ในพื้นที่ตำบลท่าตะคร้อ อำเภอนองหญ้าปล้อง จังหวัดเพชรบุรี

Study High-Quality Soil Amendments to Improve the Quality of Soil Group 48
in the Area of Tha Tako Subdistrict, Nong Ya Plong District, Phetchaburi Province

วัชรินทร์ รัตนพันธ์¹ พิรภัทร อังกินันท์¹ ปฏิพัฒน์ ศรีสงคราม² และ โอภาส สืบสาย^{1,*}
Watcharin Rattanaphan¹, Peraphat Angkinan¹, Patipat Srisongkram² and Opart Suebsay^{1,*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร
²งานบริการห้องปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

¹Department of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

²Scientific Laboratory Service Center, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Opart Suebsay, e-mail address: opart.su@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษากการปรับปรุงดินด้วยวัสดุปรับปรุงดินที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มคุณภาพดินกลุ่มดินที่ 48 ในพื้นที่ตำบลท่าตะคร้อ อำเภอนองหญ้าปล้อง จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งกลุ่มดินที่ 48 มีลักษณะเป็นดินกรด ดินตื้น ลูกวังหนา มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ ธาตุอาหารหลัก (N, P, K) และธาตุอาหารรอง (Ca, Mg) อยู่ในเกณฑ์ต่ำ โดยใช้แผนการทดลองการแบบ CRD (Completely Randomized Design) ประกอบด้วย 4 กรรมวิธี (Treatment) จำนวน 3 ซ้ำ (Replication) ปริมาตรรวมกรรมวิธีละ 400 กิโลกรัม ประกอบด้วยกรรมวิธีที่ 1 มูลวัว (ควบคุม) 16 ส่วน กรรมวิธีที่ 2 มูลวัว+ขุยมะพร้าว+แกลบดำ สัดส่วน 10:3:3 กรรมวิธีที่ 3 มูลวัว+แกลบดำ+หินฟอสเฟต สัดส่วน 10:4:2 กรรมวิธีที่ 4 มูลวัว+ขุยมะพร้าว+แกลบดำ+หินฟอสเฟต สัดส่วน 10:2:2:2 และใช้จุลินทรีย์ พด.1 และ พด.3 เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพจุลินทรีย์ในการหมักวัสดุปรับปรุงดินและคุณสมบัติทางเคมีในทุกกรรมวิธี ในกรรมวิธีที่ 3 และ 4 มีการใช้ พด.9 เพื่อช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส ผลการทดลองพบว่า การปรับปรุงดินด้วยมูลวัวในกรรมวิธีควบคุมมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงกว่ากรรมวิธีอื่นที่มีสัดส่วนของมูลวัวน้อยลง การปรับปรุงดินด้วยขุยมะพร้าวในกรรมวิธีที่มีสัดส่วนมากที่สุดมีปริมาณความชื้นสูงกว่ากรรมวิธีอื่นที่มีสัดส่วนของขุยมะพร้าวน้อยลง การปรับปรุงดินด้วยหินฟอสเฟตในทั้งสองกรรมวิธีมีปริมาณฟอสฟอรัส แคลเซียมและแมกนีเซียมทั้งหมดที่สูงกว่ากรรมวิธีอื่น จึงแนะนำให้ใช้วัสดุปรับปรุงดินในกรรมวิธีที่มีการใส่หินฟอสเฟตในการเพิ่มคุณภาพดินกลุ่มดินที่ 48

คำสำคัญ: วัสดุปรับปรุงดิน, อินทรีย์วัตถุ, ธาตุอาหาร

Abstract

Study of soil improvement with suitable soil amendment materials to improve soil quality in soil group 48, in Tha Tako Subdistrict area, Nong Ya Plong District, Phetchaburi Province. Soil group 48 is acidic, shallow soil, thick laterite with low organic matter, N, P, K, Ca and Mg. The experiment used CRD experimental plan, consisting of 4 treatments with 3 replications, total volume of each treatment 400 kilograms; method 1: cow dung (control) a ratio 16, method 2: cow dung + coconut peat + black rice husk a ratio 10:3:3, method 3: cow dung + black rice husk + rock phosphate a ratio 10:4:2 and method 4: cow dung + coconut peat + black rice husks + rock phosphate a ratio 10:2:2:2. Each treatment, using microorganisms P.D.1 and P.D.3 to increase the efficiency of microorganisms in fermenting soil improvement materials and chemical properties, in treatment 3 and 4 add P.D.9 to increase phosphorus availability. Results experiment found that soil amendment with cow dung in the control treatment had higher organic matter content than the other treatments with lower proportion of cow dung. Soil amendment with the coconut peat in the method with the highest proportion had a higher moisture content than the other methods with lower proportion of coconut peat. Soil amendment with rock phosphate in both treatments had higher amounts of total phosphorus calcium and magnesium than the other methods. Therefore, it is recommended to use soil amendment with rock phosphate to improve the quality of soil in soil group 48.

Keywords: soil improvement materials, organic matter, nutrients

1. บทนำ

พื้นที่ตำบลท่าตะคร้อ อำเภอนองหญ้าปล้อง จังหวัดเพชรบุรี พบปัญหาดินตื้นถึงชั้นก้อนกรวดหรือลูกรังหนา ขาดแคลนน้ำ และเกิดการชะล้างพังทลายสูญเสียหน้าดิน มีค่าอินทรีย์วัตถุ มีธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมอยู่ในเกณฑ์ต่ำ มีความเป็นกรด จึงต้องมีการปรับปรุงโดยใช้วัสดุปรับปรุงดินที่ผสมผสานสารธรรมชาติและสารสังเคราะห์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดิน โดยวัสดุปรับปรุงดินนั้นจะต้องสามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ ชีวภาพ เคมี และ ความอุดมสมบูรณ์ของดิน [1] และช่วยให้ดินมีสภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชให้ดีขึ้น และยังสามารถจัดการความ อุดม-สมบูรณ์ของดินในระยะยาวได้ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการเกษตร การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาผลของวัสดุปรับปรุง ดินและวิธีการผลิต เพื่อปรับปรุงดินให้เป็นแนวทางในการใช้วัสดุปรับปรุงดินคุณภาพสูงในพื้นที่เพาะปลูกสำหรับการเกษตรต่อไป

2. วิธีการศึกษา

สุ่มเก็บตัวอย่างดินที่อยู่ในกลุ่มดินที่ 48 ของพื้นที่ตำบลท่าตะคร้อ อำเภอนองหญ้าปล้อง จังหวัดเพชรบุรี มาวิเคราะห์ สมบัติทางเคมี ได้แก่ pH และ EC (1:5 organic material: H₂O), Organic Matter (Walkley and Black), Available P (Bray II), Extractable K, Ca, Mg (1 N NH₄OAc pH 7.0) และประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดินกับเกณฑ์มาตรฐานของประเทศ ไทย [2] และวางแผนปรับสูตรการผลิตวัสดุปรับปรุงดินให้เหมาะสมกับปัญหาของดิน โดยวัสดุปรับปรุงดินที่ได้ในพื้นที่ ได้แก่ มูลวัว (cow dung), ขุยมะพร้าว (coconut peat), แกลบดำ (black rice husk) และแร่ฟอสเฟต (rock phosphate) มาวิเคราะห์ สมบัติทางเคมีก่อนที่จะทำการผลิตวัสดุปรับปรุงดินคุณภาพสูง ได้แก่ pH และ EC (1:5 material: H₂O), ความชื้น, Organic Matter (Walkley and Black), N โดยวิธี micro-Kjeldahl ส่วน P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu และ Zn ใช้วิธี dry ashing ที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเอาที่ได้ไปละลายด้วย 1 N HCl แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารด้วยเครื่อง ICP [3] จากนั้นทำการผลิตวัสดุปรับปรุงดินคุณภาพสูง โดยวางแผนการผลิตวัสดุปรับปรุงดินคุณภาพสูงแบบ CRD (Completely Randomized Design) ประกอบด้วย 4 กรรมวิธี (treatment) จำนวน 3 ซ้ำ (replication) ปริมาตรรวมกรรมวิธีละ 400 กิโลกรัม (Table 1) โดยมีการเพิ่มจุลินทรีย์จาก พด.1 พด.3 และ พด.9 ในวันแรกทำการเริ่มกระบวนการหมักวัสดุปรับปรุงดินคุณภาพสูง ทำการหมักแบบกลับกอง ทุก 7 วัน เป็นเวลา 3 เดือน ควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงเกิน 70°C ความชื้นอยู่ในช่วง 70% และคลุมผ้าใบ พลาสติกสีดำ โดยใช้เครื่องจักรในการกลับกอง เช่นเดียวกันในทุกกรรมวิธี นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ โปรแกรม IBM SPSS Statistics โดยเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี Duncan's multiple range test ในระดับความเชื่อมั่น 95%

Table 1 Proportion of soil amendments in each treatment.

Treatment	Ratio of each material*					P.D.1	P.D.3	P.D.9
	cow dung	coconut peat	black rice husk	rock phosphate	total			
1	16	-	-	-	16	✓	✓	-
2	10	3	3	-	16	✓	✓	-
3	10	-	4	2	16	✓	✓	✓
4	10	2	2	2	16	✓	✓	✓

* 1 part = 25 kilograms of soil amendments.

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 สมบัติของดิน

ตัวอย่างดินที่อยู่ในกลุ่มดินที่ 48 ของพื้นที่ตำบลท่าตะคร้อ อำเภอนองหญ้าปล้อง จังหวัดเพชรบุรี มีเนื้อดินเป็นดินทราย ปนร่วน (Loamy Sand) ดินเป็นกรด (pH 5.14) ที่ไม่มีความเค็ม อินทรีย์วัตถุสูง (3.65%) มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ต่ำ (5.39 mg P/kg, 27.6 mg K/kg, 217 mg Ca/kg และ 66.4 mg

Mg/kg ตามลำดับ) (Table 2) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของกรมพัฒนาที่ดิน [4] ที่รายงานว่า ข้อมูลชุดดินที่ 48 มีระดับปฏิกิริยาดินอยู่ในช่วง 4.5-5.5 และเนื้อดินเป็นดินทรายปนร่วน

Table 2 Average of soil properties (0-20 cm depth) of soil group 48.

Parameter	Moderate range nutrient standards ^[2]	Result
Texture	-	Loamy Sand
pH (material:water = 1:5)	-	5.14
EC (material:water = 1:5) (mS/cm)	-	0.10
Organic Matter	1.5-2.5	3.65
Available Phosphorus (Avai. P) (mg/kg)	30-60	5.39
Extractable Potassium (Extr. K) (mg/kg)	60-90	27.6
Extractable Calcium (Extr. Ca) (mg/kg)	1,000-2,000	217
Extractable Magnesium (Extr. Mg) (mg/kg)	120-360	66.4

3.2 สมบัติทางเคมีของวัสดุปรับปรุงดินก่อนทำการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุปรับปรุงดินก่อนการหมักทดลอง (Table 3) พบว่า มูลวัวมีค่าการนำไฟฟ้าอินทรีย์วัตถุสูง ซึ่งในมูลสัตว์สามารถเพิ่มความจุในการกักเก็บน้ำ และทำให้โครงสร้างของดินพรุนขึ้น [5] อีกทั้งยังเป็นแหล่งของธาตุอาหารพืช ได้แก่ ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและแคลเซียม เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน [6] แกลบดำมีค่า pH ที่สูง สามารถระบายอากาศได้ดีเพราะมีช่องว่างขนาดใหญ่สามารถจับแร่ธาตุได้ดี เพื่อเป็นตัวช่วยเก็บกักแร่ธาตุเวลาใส่ปุ๋ย [7] หินฟอสเฟตมีธาตุอาหารและคุณสมบัติในการปรับความเป็นกรด-ด่าง และใช้จุลินทรีย์ พด.9 เพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน [8] ซึ่งหินฟอสเฟตมีฟอสฟอรัสทั้งหมด 4.63% และยังมีแคลเซียมทั้งหมด 15.7% ขุยมะพร้าวมีค่า pH ที่ 6.28 สอดคล้องกับอิทธิสุนทร [9] ที่รายงานว่ ขุยมะพร้าวมีค่า pH 6-7

จากการวิเคราะห์สมบัติดินของกลุ่มดินที่ 48 และสมบัติทางเคมีของวัสดุปรับปรุงดินก่อนทำการทดลอง จึงได้กำหนดสัดส่วนในแต่ละกรรมวิธี โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุปรับปรุงดินแต่ละชนิดร่วมกับสมบัติดินของกลุ่มดินที่ 48 ให้ดินมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการเกษตรมากขึ้น ในกรรมวิธีควบคุมใช้เพียงมูลวัวอย่างเดียวเนื่องจากมีค่า pH สูง มีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมสูง ส่วนในกรรมวิธี 2-3 มีการใส่มูลวัวร่วมกับขุยมะพร้าว แกลบดำ และหินแร่ฟอสเฟต ที่สัดส่วนต่างๆ เพื่อให้วัสดุปรับปรุงดินมีสมบัติที่ใกล้เคียงกัน

Table 3 The properties of soil amendment materials before experiment.

Parameter	Results			
	cow dung	coconut peat	black rice husk	rock
pH (organic material:water = 1:5)	9.67	6.28	10.5	7.97
EC (organic material:water = 1:5) (mS/cm)	9.20	0.35	0.83	0.52
Total N (%)	0.66	0.30	0.02	0.02
Total P ₂ O ₅ (%)	2.68	0.02	0.45	4.63
Total K ₂ O (%)	2.16	0.47	0.34	0.11
Total Ca (%)	1.78	0.11	0.19	15.7
Total Mg (%)	0.60	0.07	0.07	0.85

หลังจากหมักวัสดุปรับปรุงดิน เป็นเวลา 3 เดือน แล้วนำมาวิเคราะห์พบว่า ความเป็นกรด-ด่างในทุกกรรมวิธีมีค่า pH ที่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง เมื่อเปรียบค่า pH ของกรรมวิธีที่ 1 และ 2 ที่มีการลดสัดส่วนของมูลวัวลง เพิ่มแกลบดำ และ

ขุยมะพร้าว ชนิดละ 3 ส่วน ส่งผลให้ค่า pH จาก 8.40 สูงขึ้นเป็น 8.86 คิดเป็น 5.19% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแกลบดำและขุยมะพร้าวส่งผลต่อ pH ของวัสดุปรับปรุงดิน ช่วยยกระดับ pH ของดินที่เป็นกรดนี้ได้ การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในกรรมวิธีที่ 2 มีปริมาณความชื้นที่ 63.9% สูงกว่ากรรมวิธีที่ 4 ที่ 45.2% ต่างกัน 18.69% มีสัดส่วนของขุยมะพร้าวที่ 3 และ 2 ตามลำดับ สอดคล้องกับอิทธิสุนทร [9] ที่รายงานว่า ขุยมะพร้าวมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำดีมาก การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในกรรมวิธีที่ 1 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุที่สูงที่สุด (18.5%) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีส่วนประกอบเพียงอย่างเดียว คือ มูลวัวที่ 16 ส่วน ในขณะที่กรรมวิธีที่ 2, 3 และ 4 มีปริมาณสัดส่วนลดลงถึง 6 ส่วน เหลือเพียง 10 ส่วน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในกรรมวิธีที่ 3 และ 4 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่วิเคราะห์ได้ ที่ 3.68 และ 3.45% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัดส่วนของหินฟอสเฟตที่มีอยู่ 2 ส่วน แต่สอดคล้องกับ Anderson et al. [10] ที่พบว่าหินฟอสเฟตปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมากถึงร้อยละ 42.6 ของปริมาณที่ใส่ทั้งหมด แต่เมื่อเพิ่มการใส่หินฟอสเฟตเป็น 500 มก.ต่อน้ำหนักดิน 1 กก. ปริมาณการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจะเหลือเพียงร้อยละ 14.2 ของปริมาณที่ใส่ทั้งหมด กรรมวิธีที่มีการใส่หินฟอสเฟตทำให้วัสดุปรับปรุงดินมีแคลเซียมทั้งหมดสูงกว่ากรรมวิธีที่ไม่ได้ใส่หินฟอสเฟตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนโพแทสเซียมและแมกนีเซียมไม่พบความแตกต่างทางสถิติในแต่ละกรรมวิธี

Table 4 The properties of soil amendment materials after fermentation for 3 months.

Parameter	Treatment				Mean	P<0.05
	1: control	2	3	4		
pH (1:5)	8.40b	8.86a	8.51b	8.03c	8.45	***
EC (1:5) (mS/cm)	4.24a	3.23c	3.35bc	3.44b	3.57	***
Moisture (%)	46.1b	63.9a	43.0c	45.2bc	49.6	***
Organic matter (%)	18.5a	12.3b	11.9b	11.5b	13.6	*
Total N (%)	0.93a	0.59b	0.62b	0.71b	0.71	*
Total P ₂ O ₅ (%)	2.91ab	2.00b	3.68a	3.45a	3.02	*
Total K ₂ O (%)	0.92	0.87	0.82	0.76	0.84	ns
Total Ca (%)	2.89b	1.46b	5.31a	5.03a	3.68	**
Total Mg (%)	0.68	0.55	0.73	0.81	0.70	ns

ns = non-significant

4. สรุป

จากผลวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของวัสดุปรับปรุงดินคุณภาพสูงในทุกกรรมวิธี พบว่ามูลวัวในกรรมวิธีควบคุมมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงกว่ากรรมวิธีอื่นที่มีสัดส่วนของมูลวัวน้อยลง ขุยมะพร้าวในกรรมวิธีที่มีสัดส่วนมากที่สุดมีปริมาณความชื้นสูงกว่ากรรมวิธีอื่นที่มีสัดส่วนของขุยมะพร้าวน้อยลง การใส่ขุยมะพร้าวร่วมกับแกลบดำทำให้มีค่า pH ที่สูงขึ้น หินฟอสเฟตในทั้งสองกรรมวิธีมีปริมาณปริมาณฟอสฟอรัส แคลเซียม และแมกนีเซียมทั้งหมดสูงกว่าในกรรมวิธีอื่น ในทุกกรรมวิธีมีปริมาณไนโตรเจนต่ำสำหรับการทำการเกษตร อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงสมบัติทางเคมีของวัสดุปลูกในแต่ละกรรมวิธี จะพบว่า กรรมวิธีที่มีการใส่หินฟอสเฟต (กรรมวิธีที่ 3 และ 4) มีสมบัติทางเคมีไม่แตกต่างกันยกเว้นเพียงค่า pH ของวัสดุปรับปรุงดินในกรรมวิธีที่ 4 ที่มีค่าต่ำกว่ากรรมวิธีที่ 3 และมีปริมาณฟอสฟอรัสและแคลเซียมสูงกว่ากรรมวิธีที่ไม่ใส่หินฟอสเฟต จึงขอแนะนำให้ใช้วัสดุปรับปรุงดินในกรรมวิธีที่มีการใส่หินฟอสเฟตในการเพิ่มคุณภาพดินกลุ่มดินที่ 48

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ดินและพืช สจล. วิทยาเขตชุมพรฯ ที่สนับสนุนการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lazarovits, G. 2001. Management of soil-borne plant pathogens with organic soil amendments: a disease control strategy salvaged from the past. *The Canadian Journal of Plant Pathology*. 23(1): 1-7.
- [2] Land Classification Division and FAO Staff. 1973. *Soil Interpretation Handbook for Thailand*. Department of Land Development Ministry of Agriculture and Cooperatives. Bangkok. Thailand. 135 p.1.
- [3] Allen, S. E., Grimshaw, H. M., Parkinson, J. A. and Quarmby, C. 1974. *Chemical analysis of ecological materials*. John Wiley & Sons, Inc., New York. 565 p.
- [4] กรมพัฒนาที่ดิน. ข้อมูลชุดดิน 62 กลุ่ม. เข้าถึงจาก <http://oss101.idd.go.th/> (เข้าถึงเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2566)
- [5] Rasnake, M. 2002. *The Agronomics of Manure Use for Crop Production*. University of Kentucky Cooperative Extension Service.
- [6] Gana, A.K. 2009. Evaluation of the Residual Effect of Cattle Manure Combinations with Inorganic Fertilizer and Chemical Weed Control on the Sustainability of Chewing Sugarcane Production at Badeggi Southern Guinea Savanna of Nigeria. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 4 (4): 282-287.
- [7] สุทัศน์ จันทรบัวลา. 2558. ผลของแกลบ เถ้าแกลบ ชานอ้อย และเถ้าชานอ้อยต่อสมบัติทางกายภาพของอิฐดินเผามวลเบา. เข้าถึงจาก <https://www.car.chula.ac.th/display7.php?bib=2128476> (เข้าถึงเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2566)
- [8] กรมพัฒนาที่ดิน. 2550. การใช้สารปรับปรุงดินในพื้นที่เกษตรกรรม. สำนักนิเทศและถ่ายทอดเทคโนโลยีการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [9] อิทธิสุนทร นันทกิจ. 2555. การปลูกพืชในวัสดุปลูก. ภาควิชา ปฐพีวิทยา คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. แหล่งข้อมูล:<http://www.kmitl.ac.th/hydro/Substratdoc.htm>. (เข้าถึงเมื่อ 9 เมษายน 2567).
- [10] Anderson, D.L., Kussow, W. R. and Corey, R. B. 1985. Phosphate Rock Dissolution in Soil: Indications from Plant Growth Studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 918-925.

ความอุดมสมบูรณ์ของดินและความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียน พันธุ์หมอนทอง
ที่มีการจัดการธาตุอาหารต่างกันในอำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร
Soil Fertility and Nutrient Concentration of Durian Leaf (Mon Thong)
With Different Nutrient Management Plots in Pathio District, Chumphon Province

นารี พันธุ์จินดาวรรณ^{1,*} ป.ปฏินญา พรหมอักษร² และ พรธิวา กัญยวงศ์หา²
Naree Phanchindawan^{1,*}, Po.Patinya Promaksorn² and Pornthiwa Kanyawongha²

¹งานบริการห้องปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

²ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ

¹Scientific Laboratory Service Center, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

²Department of Plant Production Technology, Faculty of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

*Corresponding author: Naree Phanchindawan, e-mail address: naree.ph@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

เพื่อการจัดการธาตุอาหารอย่างเหมาะสมในสวนเดียวกันแต่ต้นทุเรียนมีอายุต่างกันและใส่ปุ๋ยต่างกัน ได้เลือกแปลงที่มีอายุ 26-29 ปี (แปลง 1 จำนวน 49 ต้น) กับแปลง 2 (31 ต้น) ที่อายุ 5-10 ปี ใส่ปุ๋ย 15-15-15 ต้นละ 5 กิโลกรัม และ 2 กิโลกรัม ตามลำดับ เป็นกรณีศึกษา เก็บตัวอย่างดินและพืชตามวิธีมาตรฐาน ผลการศึกษา พบว่า สมบัติของดินและความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียนผันแปรทั้ง 2 แปลง ดินเป็นกรดรุนแรงมากถึงเป็นกรดเล็กน้อย ไม่เป็นดินเค็ม อินทรีย์วัตถุค่อนข้างต่ำถึงสูง ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงถึงสูงมาก โพแทสเซียมที่สกัดได้ต่ำมากถึงสูงมาก แคลเซียม และแมกนีเซียมที่สกัดได้ต่ำมากถึงต่ำ เหล็กที่สกัดได้สูงถึงสูงมาก ส่วนจุลธาตุประจุบวกอื่น (แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี) ต่ำถึงสูงมาก ความอุดมสมบูรณ์ของดินเฉลี่ยทั้ง 2 แปลงมีเพียงฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์กับจุลธาตุประจุบวกที่สกัดได้เท่านั้นที่อยู่ในเกณฑ์สูงถึงสูงมาก นอกนั้นอยู่ในเกณฑ์ต่ำมากถึงต่ำ และเป็นดินกรดจัดมาก แปลง 2 มีค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดิน อินทรีย์วัตถุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียมและทองแดงที่สกัดได้สูงกว่าแปลง 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ใบทุเรียนมีธาตุอาหารส่วนใหญ่อยู่ในพิสัยต่ำกว่าค่ามาตรฐานพอเพียงถึงสูงกว่าค่ามาตรฐานพอเพียงเป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นทองแดงที่อยู่ในช่วงค่ามาตรฐานพอเพียงถึงสูงกว่าค่ามาตรฐานพอเพียง อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นเฉลี่ยแทบทุกธาตุอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานพอเพียง ยกเว้นทองแดงกับสังกะสีที่สูงกว่าและต่ำกว่าค่ามาตรฐานพอเพียง ตามลำดับ แมงกานีสและทองแดงในใบทุเรียนแปลง 2 สูงกว่าแปลง 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เพื่อปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินและจัดการธาตุอาหารอย่างเหมาะสม ทั้ง 2 แปลงควรใส่ปูนขาว และปุ๋ยโดโลไมท์ลดการใส่ปุ๋ยสูตรเดิม แต่เพิ่มปริมาณปุ๋ยเรียกับปุ๋ยโพแทช โดยใส่ให้แปลง 1 มากกว่าแปลง 2

คำสำคัญ: ความอุดมสมบูรณ์ของดิน, ความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบ, การจัดการธาตุอาหาร, ทุเรียน, ปะทิว ชุมพร

Abstract

For appropriate management of durian trees with different ages and fertilizer application in the same orchard, the Plot 1 (49 plants) which aged of 26-29 years and 5-10 years for Plot 2 (31 plants) that the 15-15-15 chemical fertilizer was applied with rated of 5 kg/plant and 2 kg/plant were selected as the case studied. Soil and leaf samples were collected following the standard methods. The results revealed that variation of soil properties and leaf nutrient concentrations were noticeable throughout both plots. The very strongly to slightly acid soil with non-saline had slightly low to high organic matter, high to very high available phosphorus, very low to very high extractable potassium, very low to low extractable calcium and magnesium, high to very high extractable iron whilst low to very high for the other cationic micronutrients (Mn, Cu and Zn). In average, the very acid soil had high to very high fertility only for available phosphorus and extractable micronutrients. The remaining parameters were very low to low status. Plot 2 had significantly higher of the electrical conductivity, organic matter, available phosphorus, extractable potassium and copper than those of Plot 1. Durian leaf mainly contained lower to higher than adequate ranges of nutrient concentrations, in most. The except ones were copper which rated as adequate to higher than adequate. However, in average, almost of nutrients were in adequate ranges, excepted higher and lower than adequate ranges for copper and zinc,

respectively. Plot 2 contained significantly higher of manganese and copper than Plot 1. To improve soil fertility status and optimal nutrient management of both plots, liming with calcium oxide and dolomite should be applied. Reducing the ordinary fertilizer should be recommended together with adding more urea and potash fertilizer and more fertilizer application for Plot 1 than Plot 2 should be done.

Keywords: soil fertility, plant nutrient concentrations, nutrient managements, Durian, Pathio District Chumphon Province

1. บทนำ

ภูมิภาคที่มีพื้นที่ปลูกทุเรียนมากที่สุด คือ ภาคใต้ (814,414 ไร่) รองลงมา คือ ภาคตะวันออก (694,944 ไร่) และภาคเหนือ ภาคกลาง ตามลำดับ แต่พื้นที่ที่ให้ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่สูงสุด คือ ภาคตะวันออก (1,569 กิโลกรัม/ไร่) รองลงมาคือ ภาคใต้ (739 กิโลกรัม/ไร่) และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง ภาคเหนือ ตามลำดับ [1] แม้ว่างานวิจัยด้านการจัดการธาตุอาหารในสวนทุเรียนของประเทศไทยจะมีมานานแล้ว [2] รวมทั้งมีคำแนะนำจากหลายหน่วยงานเกี่ยวกับการจัดการดินและการใส่ปุ๋ยในสวนทุเรียน อย่างไรก็ตาม ยังมีเกษตรกรมากมายโดยเฉพาะเกษตรกรรายย่อยที่จัดการธาตุอาหารในสวนทุเรียนไม่เหมาะสม เกษตรกรบางส่วนเชื่อว่าต้นทุเรียนที่อายุต่างกันใส่ปุ๋ยต่างกัน หรือเชื่อว่าทุเรียนที่ยังไม่ให้ผลผลิตต้องการธาตุอาหารน้อยกว่าต้นที่ให้ผลผลิตแล้ว ทำให้เกษตรกรที่ปลูกทุเรียนอายุต่างกันใส่ปุ๋ยต่างกัน การจัดการดินและธาตุอาหารพืชในลักษณะนี้อาจส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตและผลผลิตของทุเรียนในระยะยาว เพื่อการจัดการธาตุอาหารในสวนที่ต้นทุเรียนมีอายุต่างกันได้อย่างเหมาะสม การทราบความอุดมสมบูรณ์ของดินและธาตุอาหารในใบทุเรียนเป็นสิ่งจำเป็น และในพื้นที่อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร มีเกษตรกรรายย่อยปลูกทุเรียนเป็นจำนวนมาก ภายในสวนมีทั้งแปลงที่ต้นทุเรียนอายุมาก และแปลงที่อายุน้อย ซึ่งมีการใส่ปุ๋ยต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการดินธาตุอาหารพืชในสวนที่ต้นทุเรียนอายุต่างกัน จึงสนใจศึกษาความอุดมสมบูรณ์ของดินและความเข้มข้นของธาตุอาหารในสวนทุเรียนของเกษตรกรรายย่อยในพื้นที่อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร

2. วิธีการศึกษา

เก็บตัวอย่างดินและใบจากสวนทุเรียนพันธุ์หมอนทองของเกษตรกรรายย่อยในตำบลสะพลี อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร สวนทุเรียนที่เป็นกรณีศึกษาอยู่ภายในขอบเขตเขตดินชุมพร [3] ลักษณะภายในสวน มีทุเรียน 2 แปลง พื้นที่ของแปลง 1 มีพื้นที่สูงกว่าแปลง 2 และลาดเอียงไปทางแปลง 2 การจัดการแปลงและอายุของต้นทุเรียนมีความแตกต่างกัน โดยแปลง 1 ต้นทุเรียนอายุ 26-29 ปี ให้ผลผลิตแล้ว และมีการใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 จำนวน 2 ครั้งต่อปี ในอัตรา 5 กิโลกรัมต่อต้น แปลง 2 ต้นทุเรียนอายุ 5-10 ปี ให้ผลผลิตแล้วแต่ยังไม่เก็บผลผลิตอย่างเป็นกิจจะลักษณะ และมีการใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 จำนวน 2 ครั้งต่อปี ในอัตรา 2 กิโลกรัมต่อต้น ซึ่งทั้ง 2 แปลง ใส่ปุ๋ยในช่วงเดือนพฤษภาคมและช่วงเดือนพฤศจิกายน และก่อนปลูกทุเรียน มีการใส่ปูนขาวเป็นการรองกันหลุมเพียงครั้งเดียว และไม่มีการใส่อีกเลย อีกทั้งปริมาณผลผลิตไม่เป็นที่น่าพอใจของเกษตรกรเจ้าของแปลง

2.1 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดินเพื่อการวิเคราะห์

เลือกต้นทุเรียนที่เป็นตัวแทนของแต่ละแปลง เก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร จาก 4 ทิศรอบทรงพุ่ม แล้วนำมารวมกันเป็น 1 ตัวอย่างดินรวม แปลง 1 เก็บตัวอย่างดินจากต้นทุเรียน จำนวน 49 ต้น และแปลง 2 เก็บตัวอย่างดินจากต้นทุเรียน จำนวน 31 ต้น นำตัวอย่างดินมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม บด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร สุ่มตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์เนื้อดินโดยวิธีไปเปต และนำตัวอย่างดินทั้งหมดไปวิเคราะห์สมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ pH และ EC (1:1 Soil: H₂O), Organic Matter (Loss on ignition หรือ LOI), Available P (Bray II), Extractable K, Ca, Mg (1N NH₄OAc pH 7.0) และ Extractable Fe, Mn, Cu, Zn (DTPA) [4] และประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดินกับเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทย [5-7]

2.2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างพืชเพื่อการวิเคราะห์

เก็บตัวอย่างใบจากต้นที่เก็บตัวอย่างดินตามวิธีมาตรฐาน โดยเก็บใบที่อายุ 5-7 เดือน [2] จาก 4 ทิศรอบทรงพุ่ม แล้วนำมารวมกันเป็น 1 ตัวอย่าง นำตัวอย่างใบที่ได้มาล้างทำความสะอาด อบ และบดให้ละเอียด แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบ (Total form) ได้แก่ N โดยวิธี micro-Kjeldahl ส่วน P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu และ Zn โดยการย่อยสลายด้วยกรด HNO₃-HClO₄ อัตราส่วน 4:1 หลังจากที่ได้ตัวอย่างใสแล้ว ทิ้งไว้ให้เย็น ปรับปริมาตรเป็น 50 มล. ด้วยน้ำ

กลั่น กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ P โดยวิธี molybdate - vanadate yellow color แล้ววัดด้วยเครื่อง spectrophotometer วิเคราะห์หาปริมาณ K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu และ Zn โดยใช้เครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) [8] และเปรียบเทียบความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียนกับค่ามาตรฐาน [2]

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics โดยเปรียบเทียบข้อมูลความแตกต่างระหว่างแปลงโดยใช้วิธี t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% วิเคราะห์หาสหสัมพันธ์ของสมบัติดินและความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียน โดยวิธี Pearson's correlation coefficient ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 สมบัติของดิน

ดินปลูกทุเรียนที่เป็นกรณีศึกษามีเนื้อดินค่อนข้างหยาบ โดยแปลง 1 เป็นดินทรายร่วน ประกอบด้วยอนุภาคขนาดทราย ขนาดทรายแป้ง และขนาดดินเหนียว 78.28%, 14.38% และ 7.34% ตามลำดับ ในขณะที่แปลง 2 เป็นดินร่วนปนทราย ประกอบด้วยอนุภาคขนาดทราย ขนาดทรายแป้ง และขนาดดินเหนียว 76.54%, 16.15% และ 7.31% ตามลำดับ การที่แปลง 2 มีเนื้อดินละเอียดกว่าแปลง 1 เล็กน้อย เป็นไปได้ว่าเกิดจากแปลง 2 ตั้งอยู่บนภูมิประเทศที่ต่ำกว่า จึงมีความเป็นไปได้สูงที่อนุภาคดินขนาดเล็กกว่าจะเคลื่อนที่ลงมาทับถม การที่อนุภาคขนาดดินเหนียวมีไม่มากนักจะส่งผลต่อความอุดมสมบูรณ์โดยธรรมชาติของดิน เนื่องจากประจุลบที่อยู่บนผิวของแร่ดินเหนียวมีน้อย ทำให้ความสามารถในการดูดซับแคตไอออนซึ่งส่วนใหญ่เป็นธาตุอาหารพืชต่ำตามไปด้วย [9]

สมบัติทางเคมีบางประการ (Table 1) ทั้ง 2 แปลงแสดงความผันแปรของสมบัติทางเคมีของดิน โดยที่ทั้ง 2 แปลงเป็นกรดจัดมากถึงเป็นกรดเล็กน้อย (แปลง 1: 4.20-6.46; แปลง 2: 4.17-6.50) ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดินที่สัมพันธ์กับเนื้อดินพบว่าไม่เป็นดินเค็ม (แปลง 1: 82.9-287 $\mu\text{S}/\text{cm}$; แปลง 2: 111-288 $\mu\text{S}/\text{cm}$) อินทรีย์วัตถุค่อนข้างต่ำถึงค่อนข้างสูง (แปลง 1: 0.86-2.73%) และ ค่อนข้างต่ำถึงปานกลาง (แปลง 2: 1.24-2.43%) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และเหล็กที่สกัดได้สูงถึงสูงมาก (แปลง 1: 42.2-414 mg P/kg และ 22.4-116 mg Fe/kg) และสูงมาก (แปลง 2: 68.8-217 mg P/kg และ 32.2-87.2 mg Fe/kg) โพแทสเซียมที่สกัดได้ต่ำมากถึงปานกลาง (แปลง 1: 21.8-81.7 mg K/kg) และต่ำมากถึงสูงมาก (แปลง 2: 23.6-128 mg K/kg) ในขณะที่ทั้ง 2 แปลงมีแคลเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ต่ำมากถึงต่ำ (แปลง 1: 45.3-833 mg Ca/kg และ 16.1-76.4 mg Mg/kg; แปลง 2: 69.7-622 mg Ca/kg และ 16.6-50.7 mg Mg/kg) แมงกานีสและทองแดงที่สกัดได้ต่ำถึงสูงมาก (แปลง 1: 7.16-97.0 mg Mn/kg และ 0.45-2.89 mg Cu/kg; แปลง 2: 8.28-70.7 mg Mn/kg และ 0.86-6.24 mg Cu/kg) ส่วนสังกะสีที่สกัดได้ของแปลง 1 ต่ำมากถึงสูงมาก (0.93-17.0 mg Zn/kg) แปลง 2 ปานกลางถึงสูง (1.55-5.44 mg Zn/kg) การประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดินโดยใช้ค่าเฉลี่ยทั้งแปลงเป็นเกณฑ์ พบว่า แปลง 1 เป็นกรดจัดมาก (pH 4.63 ± 0.34) ไม่เป็นดินเค็ม (EC 125 ± 39.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$) แคลเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ต่ำมาก (179 ± 163 mg Ca/kg และ 32.6 ± 13.1 mg Mg/kg ตามลำดับ) อินทรีย์วัตถุ ($1.48 \pm 0.37\%$) และโพแทสเซียมที่สกัดได้ (43.1 ± 13.4 mg K/kg) ต่ำ แมงกานีส ทองแดง และสังกะสีที่สกัดได้สูง (20.5 ± 16.5 mg Mn/kg, 1.38 ± 0.56 mg Cu/kg และ 3.60 ± 3.92 mg Zn/kg) ในขณะที่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และเหล็กที่สกัดได้สูงมาก (119 ± 61.6 mg P/kg และ 60.1 ± 19.1 mg Fe/kg) แปลง 2 เป็นกรดจัดมาก (pH 4.59 ± 0.44) ไม่เป็นดินเค็ม (EC 174 ± 44.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$) แคลเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ต่ำมาก (177 ± 132 mg Ca/kg และ 33.2 ± 9.39 mg Mg/kg) โพแทสเซียมที่สกัดได้ต่ำ (58.7 ± 22.1 mg K/kg) อินทรีย์วัตถุและสังกะสีที่สกัดได้ปานกลาง แมงกานีสที่สกัดได้สูง ($1.70 \pm 0.35\%$, 2.76 ± 1.13 mg Zn/kg และ 22.3 ± 13.2 mg Mn/kg ตามลำดับ) ส่วนฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (132 ± 36.9 mg P/kg) เหล็ก (58.8 ± 13.5 mg Fe/kg) และทองแดงที่สกัดได้ (2.63 ± 1.40 mg Cu/kg) สูงมาก

เมื่อนำค่าเฉลี่ยทั้งแปลงมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ พบว่า การนำไฟฟ้าของสารละลายดิน อินทรีย์วัตถุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียมและทองแดงที่สกัดได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยแปลง 2 มีค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดิน ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียมและทองแดงที่สกัดได้สูงกว่าที่พบในแปลง 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนสมบัติทางเคมีอื่นที่ไม่แตกต่างทางสถิติ พบว่า แปลง 1 มีปฏิกิริยาดิน แคลเซียม เหล็ก และสังกะสีที่สกัดได้สูงกว่าแปลง 2 เล็กน้อย แต่มีแมกนีเซียมและแมงกานีสที่สกัดได้ต่ำกว่าแปลง 2 เล็กน้อย

การอยู่ในเขตภูมิอากาศมรสุมเขตร้อน (Tropical monsoon, Am) ซึ่งฝนตกชุกแทบตลอดทั้งปี ทำให้มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดการชะละลาย (Leaching) ของแคปไอออนที่เป็นเบส (Ca, Mg, K, Na) ออกจากหน้าตัดดิน และมีแคปไอออนที่เป็นกรด (H, Fe, Al) เกิดขึ้น ทำให้ดินเป็นกรดจัดมาก แคลเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ต่ำมาก โพแทสเซียมที่สกัดได้ต่ำ ในขณะที่จุลธาตุประจุบวกที่สกัดได้ (Fe, Mn, Cu, Zn) ส่วนใหญ่สูงถึงสูงมาก นอกจากนี้ การที่ไม่เคยใส่ปุ๋ยเลยตั้งแต่การไถร่อนกันหลุมตอนปลูก รวมทั้งการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนซึ่งมีผลตกค้างเป็นกรดก็มีส่วนทำให้ดินเป็นกรดจัดมากด้วย

การที่แปลง 2 มีค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดิน ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียมและทองแดงที่สกัดได้สูงกว่าที่พบในแปลง 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แม้ว่าปริมาณปุ๋ยที่ใส่จะต่ำกว่าแปลง 1 ก็ตาม เป็นไปได้ว่าเกิดจากอายุต้นที่น้อยกว่า จึงมีทรงต้นเล็กกว่า การดูดใช้ธาตุอาหารจากดินจึงน้อยกว่า

3.2 ความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียน (Total form)

ธาตุอาหารในใบทุเรียนทั้ง 2 แปลง มีความผันแปรเช่นเดียวกับที่พบในสมบัติของดิน (Table 2) ความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียนแปลง 1 แทบทุกธาตุอยู่ในพิสัยต่ำกว่ามาตรฐานพอเพียงถึงสูงกว่าค่ามาตรฐานพอเพียง มีเพียงสังกะสีอยู่ในพิสัยต่ำกว่าค่ามาตรฐานพอเพียงถึงอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานพอเพียง และแมกนีเซียมกับทองแดงที่อยู่ในช่วงค่ามาตรฐานพอเพียงถึงสูงกว่าค่ามาตรฐานพอเพียง (1.35-2.56% N, 0.12-0.26% P, 1.08-2.75% K, 0.53-4.39% Ca, 0.31-0.63% Mg, 35.7-181 mg Fe/kg, 38.0-315 mg Mn/kg, 18.0-157 mg Cu/kg และ ND-23.8 mg Zn/kg) ในขณะที่ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และสังกะสีในใบทุเรียนแปลง 2 มีความเข้มข้นอยู่ในพิสัยต่ำกว่าค่ามาตรฐานพอเพียงถึงสูงกว่าค่ามาตรฐานพอเพียง (1.31-2.50% N, 0.14-0.29% P, 0.47-3.28% Ca, 0.23-0.59% Mg, 23.8-164 mg Fe/kg, ND-31.2 mg Zn/kg) ส่วนโพแทสเซียม (1.15-2.26% K) อยู่ในพิสัยต่ำกว่าค่ามาตรฐานพอเพียงถึงอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานพอเพียง แมงกานีสอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานพอเพียงถึงสูงกว่าค่ามาตรฐานพอเพียง (57.4-176 mg Mn/kg) และทองแดงสูงกว่าช่วงค่ามาตรฐานพอเพียง (33.3-155 mg Cu/kg)

เมื่อตีความโดยใช้ความเข้มข้นเฉลี่ยเป็นเกณฑ์ พบว่า ทั้ง 2 แปลงมีเพียงทองแดงเท่านั้นที่ความเข้มข้นสูงกว่าค่ามาตรฐานพอเพียง (แปลง 1: 38.7±21.1 mg Cu/kg; แปลง 2: 70.8±30.1 mg Cu/kg) กับสังกะสีที่ความเข้มข้นต่ำกว่าค่ามาตรฐานพอเพียง (แปลง 1: 7.96±6.74 mg Zn/kg; แปลง 2: 8.45±8.03 mg Zn/kg) ธาตุอื่นอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานพอเพียง (แปลง 1: 2.01±0.23% N, 0.18±0.03% P, 1.75±0.35% K, 2.24±0.92% Ca, 0.43±0.08% Mg, 57.1±23.6 mg Fe/kg, 81.4±43.7 mg Mn/kg; แปลง 2: 2.07±0.24% N, 0.20±0.04% P, 1.72±0.26% K, 2.08±0.75% Ca, 0.41±0.10% Mg, 64.0±27.3 mg Fe/kg, 115±29.8 mg Mn/kg) นอกจากนี้ ยังพบว่า มีเพียงแมงกานีสกับทองแดงเท่านั้นที่แปลง 2 มีความเข้มข้นสูงกว่าแปลง 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนธาตุอื่นไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียนที่ผันแปรทั้ง 2 แปลง ซึ่งโดยส่วนใหญ่อยู่ในพิสัยต่ำกว่าค่ามาตรฐานพอเพียงถึงสูงกว่าค่ามาตรฐานพอเพียง สอดคล้องกับค่าวิเคราะห์สมบัติของดินที่อยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงสูงมากเป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นโพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ต่ำมากถึงต่ำ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ซึ่งอยู่ในเกณฑ์สูงถึงสูงมาก สิ่งเหล่านี้แสดงถึงความไม่สมดุลของธาตุอาหารในดินที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารในพืช โดยเฉพาะการมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูง จะทำให้พืชไม่สามารถดูดใช้สังกะสีได้ ทำให้สังกะสีในใบทุเรียนต่ำกว่าค่ามาตรฐานพอเพียง

ถึงแม้ว่าแปลง 1 ได้รับปุ๋ยมากกว่าแปลง 2 แต่จะเห็นว่าความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียนแทบทุกธาตุไม่แตกต่างกันทางสถิติ ยกเว้นแปลง 2 มีแมงกานีสกับทองแดงสูงกว่าแปลง 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งเกิดจากแปลง 2 มีทองแดงที่สกัดได้สูงมากและสูงกว่าแปลง 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีแมงกานีสที่สกัดได้สูงกว่าแปลง 1 เล็กน้อย รวมทั้งการมีค่าปฏิกิริยาดินต่ำกว่าแปลง 1 เล็กน้อย จะทำให้แมงกานีสออกสู่สารละลายดินได้มาก พืชจึงดูดใช้ได้มาก (Table 1)

3.3 สหสัมพันธ์ระหว่างสมบัติดินและความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียนของทั้ง 2 แปลง

เมื่อนำสมบัติของดินและความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียนของทั้ง 2 แปลง มาหาสหสัมพันธ์ Pearson (Table 3) พบว่าสมบัติของดินมีสหสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อกันเป็นส่วนใหญ่ เช่น สหสัมพันธ์ระหว่างค่าปฏิกิริยาดินกับแคลเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ นั่นคือ ถ้าดินมีค่า pH เพิ่มขึ้น จะทำให้ดินมี Ca และ Mg ที่สกัดได้สูงขึ้น ดังนั้น เกษตรกรควรใส่ปูนขาว ปูนโดโลไมท์ เพื่อเพิ่มค่า pH ของดิน ส่งผลให้ดินมีปริมาณ Ca และ Mg ที่สกัดได้สูงขึ้น พบสหสัมพันธ์ระหว่างอินทรีย์วัตถุในดินกับแทบทุกค่าวิเคราะห์ ยกเว้นแมงกานีสที่สกัดได้ เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มีสหสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดิน โพแทสเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และสังกะสีที่

สกัดได้ ในขณะที่สหสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่สำคัญ ได้แก่ ค่าปฏิกิริยาดินกับเหล็กที่สกัดได้ เหล็กกับแคลเซียมที่สกัดได้ ส่วนสมบัติของดินกับความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียนมีน้อยมากที่พบสหสัมพันธ์ที่แตกต่างทางสถิติ และเป็นสหสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเท่านั้น ได้แก่ สหสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้าของสารละลายดินกับทองแดง โพแทสเซียมที่สกัดกับเหล็ก เหล็กที่สกัดกับสังกะสี และทองแดงที่สกัดกับฟอสฟอรัส แมงกานีส และทองแดงในใบทุเรียน ในขณะที่สหสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียนมีทั้งเชิงบวกและเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ได้แก่ สหสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างธาตุอาหารหลัก (N, P, K) ธาตุอาหารรอง (Ca, Mg) แคลเซียมและแมกนีเซียมกับแมงกานีสและทองแดง เหล็กกับสังกะสี และแมงกานีสกับทองแดง ส่วนสหสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ได้แก่ สหสัมพันธ์ระหว่างฟอสฟอรัสกับแคลเซียม และระหว่างโพแทสเซียมกับแคลเซียม แมกนีเซียม แมงกานีสและทองแดง และจะเห็นว่าฟอสฟอรัสมีสหสัมพันธ์เชิงลบกับสังกะสีแต่ไม่แตกต่างทางสถิติ

สหสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างธาตุอาหารหลัก (N, P, K) ในใบ ได้แก่ ไนโตรเจนกับฟอสฟอรัส หรือไนโตรเจนกับโพแทสเซียม เนื่องด้วยปฏิกิริยาส่งเสริมกันนี้ จึงสามารถใช้ปุ๋ยไนโตรเจนน้อยลงเมื่อใช้ร่วมกับปุ๋ยโพแทสเซียม แต่ยังคงให้ผลผลิตเท่าเดิม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อทั้งเกษตรกรในการประหยัดต้นทุนและสิ่งแวดล้อม [10]

สหสัมพันธ์เชิงลบระหว่างโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมในใบพืช เป็นสิ่งที่พบในไม้ผลหลายชนิดของประเทศ ไทย โดยเฉพาะ ทุเรียน มังคุด ซึ่งเป็นไม้ผลเศรษฐกิจที่สำคัญ [2, 11] ตลอดจนเงาะ มะม่วง ลองกอง และกาแฟ เป็นต้น [12] เมื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแคลเซียมและแมกนีเซียมกับโพแทสเซียมในใบทุเรียนแต่ละแปลง (Figure 1) ก็พบความสัมพันธ์เชิงลบอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากธาตุเหล่านี้เป็นปฏิปักษ์ต่อกัน [13]

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

ทุเรียนทั้ง 2 แปลงที่เป็นกรณีศึกษามีอายุต่างกัน และให้ปุ๋ยต่างกัน แปลง 1 ต้นทุเรียนมีอายุ 26-29 ปี ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 ต้นละ 5 กิโลกรัม ซึ่งมากกว่าแปลง 2 ที่อายุ 5-10 ปี ใส่ปุ๋ยสูตรเดียวกัน ต้นละ 2 กิโลกรัม ผลการศึกษาแสดงถึงความผันแปรทั่วทั้งพื้นที่ของความอุดมสมบูรณ์ของดินและความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียนของทั้ง 2 แปลงซึ่งเป็นดินเนื้อหยาบถึงค่อนข้างหยาบ โดยเฉลี่ยทั้งแปลงเป็นดินกรดจัด ความอุดมสมบูรณ์ของดินอยู่ในเกณฑ์ต่ำมากถึงต่ำเป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์กับจุลธาตุประจวบที่สกัดได้อยู่ในเกณฑ์สูง แปลง 2 มีค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดิน อินทรีย์วัตถุ ฟอสฟอรัสที่สกัดได้ โพแทสเซียมและทองแดงที่สกัดได้สูงกว่าแปลง 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พบสหสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างปฏิกิริยาดินกับแคลเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ และระหว่างอินทรีย์วัตถุกับสมบัติของดินแทบทั้งหมดยกเว้นทองแดงที่สกัดได้ และปฏิกิริยาดินมีสหสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเหล็กที่สกัดได้ ความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบทุเรียนแทบทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่าค่ามาตรฐานพอเพียงถึงสูงกว่าค่ามาตรฐานพอเพียง แม้ว่าความเข้มข้นเฉลี่ยทั้งแปลงจะอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานพอเพียง ยกเว้นทองแดงสูงกว่าค่ามาตรฐานพอเพียงและสังกะสีที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานพอเพียง มีเพียงแมงกานีสกับทองแดงเท่านั้นที่แปลง 2 สูงกว่าแปลง 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบสหสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างโพแทสเซียมกับแคลเซียม แมกนีเซียม แมงกานีสและทองแดง

เพื่อการยกระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินร่วมกับการจัดการธาตุอาหารในสวนทุเรียนอย่างเหมาะสม ทั้ง 2 แปลงควรใส่ปุ๋ยคอกหรือปุ๋ยคลอรีนคาร์บอนเนต และปุ๋ยโดโลไมท์ (สัดส่วน 2:1) ในอัตราต้นละ 6 กิโลกรัม (แปลง 1) และ 3 กิโลกรัม (แปลง 2) ซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่าปฏิกิริยาดิน แคลเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ ลดจุลธาตุประจวบในสารละลายดินโดยเฉพาะเหล็ก ควรใส่เศษเหลือของพืช มูลสัตว์หรือปุ๋ยหมักเพื่อเพิ่มอินทรีย์วัตถุซึ่งช่วยเพิ่มธาตุอาหารให้กับดินและทำให้ดินดูดซับธาตุอาหารได้ดีขึ้น หากยังคงใส่ปุ๋ยสูตรเดิม ควรใส่ให้กับแปลง 1 เพียงต้นละ 2-3 กิโลกรัม เนื่องจากดินมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงอยู่แล้ว และควรเพิ่มปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) ต้นละ 4-6 กิโลกรัม ปุ๋ยโพแทช (0-0-60) ต้นละ 3-4 กิโลกรัม ส่วนแปลง 2 ควรใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 ต้นละ 1 กิโลกรัม ร่วมกับปุ๋ยยูเรียต้นละ 2-3 กิโลกรัม และปุ๋ยโพแทชต้นละ 2-3 กิโลกรัม ในช่วงแรกควรฉีดพ่นปุ๋ยสังกะสีทางใบ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการปฐพีวิทยา ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนการทำวิจัย และขอขอบคุณเจ้าของสวนทุเรียนอำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร ที่เอื้อเฟื้อสวนทุเรียนในการทำวิจัยครั้งนี้

Table 1 Soil properties (0-20 cm depth) of the studied orchards and interpretations based on mean±SD.

Parameters		Plot 1 (n=49)	Plot 2 (n=31)	p<0.05 (t-test)
pH	Range	4.20-6.46	4.17-6.50	
	Mean±SD	4.63±0.34	4.59±0.44	NS
	Interpretation	Very acidic ^[5]	Very acidic ^[5]	
	Moderate range: -			
EC (µS/cm)	Range	82.9-287	111-288	
	Mean±SD	125±39.9	174±44.2	*
	Interpretation	Nonsaline ^[6]	Nonsaline ^[6]	
	Moderate range: -			
OM (%)	Range	0.86-2.73	1.24-2.43	
	Mean±SD	1.48±0.37	1.70±0.35	*
	Interpretation	Low	Moderate	
	Moderate range: 1.5-2.5 ^[7]			
Available P (mg/kg)	Range	42.4-414	68.8-217	
	Mean±SD	119±61.6	132±36.9	*
	Interpretation	Very high	Very high	
	Moderate range: 30-60 ^[7]			
Extractable K (mg/kg)	Range	21.8-81.7	23.6-128	
	Mean±SD	43.1±13.4	58.7±22.1	*
	Interpretation	Low	Low	
	Moderate range: 60-90 ^[7]			
Extractable Ca (mg/kg)	Range	45.3-833	69.7-622	
	Mean±SD	179±163	177±132	NS
	Interpretation	Very low	Very low	
	Moderate range: 1000-2000 ^[7]			
Extractable Mg (mg/kg)	Range	16.1-76.4	16.6-50.7	
	Mean±SD	32.6±13.1	33.2±9.39	NS
	Interpretation	Very low	Very low	
	Moderate range: 120-360 ^[7]			
Extractable Fe (mg/kg)	Range	22.4-116	32.2-87.2	
	Mean±SD	60.1±19.1	58.8±13.5	NS
	Interpretation	Very high	Very high	
	Moderate range: 11-16 ^[6]			
Extractable Mn (mg/kg)	Range	7.16-97.0	8.28-70.7	
	Mean±SD	20.5±16.5	22.3±13.2	NS
	Interpretation	High	High	
	Moderate range: 9-12 ^[6]			
Extractable Cu (mg/kg)	Range	0.45-2.89	0.86-6.24	
	Mean±SD	1.38±0.56	2.63±1.40	*
	Interpretation	High	Very high	
	Moderate range: 0.9-1.2 ^[6]			
Extractable Zn (mg/kg)	Range	0.93-17.0	1.50-5.44	
	Mean±SD	3.60±3.92	2.76±1.13	NS
	Interpretation	High	Moderate	
	Moderate range: 1.1-3.0 ^[6]			

Table 2 Leaf nutrient concentrations of the studied orchards and interpretations based on mean±SD.

Parameters		Plot 1 (n=49)	Plot 2 (n=31)	p<0.05 (t-test)
Total N (%)	Range	1.35-2.56	1.31-2.50	
	Mean±SD	2.01±0.23	2.07±0.24	NS
	Interpretation	Adequate	Adequate	
	Adequate range ^[2] : 2.00-2.40			
Total P (%)	Range	0.12-0.26	0.14-0.29	
	Mean±SD	0.18±0.03	0.20±0.04	NS
	Interpretation	Adequate	Adequate	
	Adequate range ^[2] : 0.15-0.25			
Total K (%)	Range	1.08-2.75	1.15-2.26	
	Mean±SD	1.75±0.35	1.72±0.26	NS
	Interpretation	Adequate	Adequate	
	Adequate range ^[2] : 1.50-2.50			
Total Ca (%)	Range	0.53-4.39	0.47-3.28	
	Mean±SD	2.24±0.92	2.08±0.75	NS
	Interpretation	Adequate	Adequate	
	Adequate range ^[2] : 1.70-2.50			
Total Mg (%)	Range	0.31-0.63	0.23-0.59	
	Mean±SD	0.43±0.08	0.41±0.10	NS
	Interpretation	Adequate	Adequate	
	Adequate range ^[2] : 0.25-0.50			
Total Fe (mg/kg)	Range	35.7-181	23.8-164	
	Mean±SD	57.1±23.6	64.0±27.3	NS
	Interpretation	Adequate	Adequate	
	Adequate range ^[2] : 40-150			
Total Mn (mg/kg)	Range	38.0-315	57.4-176	
	Mean±SD	81.4±43.7	115±29.8	*
	Interpretation	Adequate	Adequate	
	Adequate range ^[2] : 50-120			
Total Cu (mg/kg)	Range	18.0-157	33.4-155	
	Mean±SD	38.7±21.1	70.8±30.1	*
	Interpretation	High	High	
	Adequate range ^[2] : 10-25			
Total Zn (mg/kg)	Range	ND-23.8	ND-31.2	
	Mean±SD	7.96±6.74	8.45±8.03	NS
	Interpretation	Low	Low	
	Adequate range ^[2] : 10-30			

Note: ND = Non detectable

Table 3 Correlation coefficient between soil properties and nutrient concentrations of durian leaf in both plots.

	pH	EC	OM	Avai. P	Extr. K	Extr. Ca	Extr. Mg	Extr. Fe	Extr. Mn	Extr. Cu	Extr. Zn	Total N	Total P	Total K	Total Ca	Total Mg	Total Fe	Total Mn	Total Cu	Total Zn
pH	1																			
EC	.353 ^{**}	1																		
OM	-.111	.316 ^{**}	1																	
Avai. P	-.098	.221 [*]	.540 ^{**}	1																
Extr. K	0.064	.507 ^{**}	.516 ^{**}	.547 ^{**}	1															
Extr. Ca	.822 ^{**}	.516 ^{**}	.270 [*]	0.187 ^{**}	.316 ^{**}	1														
Extr. Mg	.580 ^{**}	.537 ^{**}	.294 ^{**}	.284 [*]	.332 ^{**}	.789 ^{**}	1													
Extr. Fe	-.539 ^{**}	-.063	.447 ^{**}	.557 ^{**}	.221 [*]	-.280 [*]	-.052	1												
Extr. Mn	0.185	0.093	0.093	-.0193	0.146	.295	0.201	-.0180	1											
Extr. Cu	-.0160	.427 ^{**}	.398 ^{**}	0.116	0.202	0.014	0.045	.223 [*]	0.194	1										
Extr. Zn	0.134	0.019	.485 ^{**}	.253 [*]	0.138	.376 ^{**}	.238 [*]	0.144 [*]	.263 [*]	.253 [*]	1									
Total N	-.0192	0.131	0.116	0.141	0.020	-.0119	0.050	0.167	0.001	0.172	-.078	1								
Total P	-.0154	0.035	-.0119	-.0151	-.0213	-.0204	-.0137	-.0100	0.152	.220 [*]	-.0117	.342 ^{**}	1							
Total K	-.0001	-.094	-.095	-.065	-.084	-.055	-.053	-.054	0.073	-.076	0.007	.361 ^{**}	.322 ^{**}	1						
Total Ca	-.096	0.036	0.000	0.065	0.045	0.001	0.085	0.156	-.047	0.080	0.018	-.0200	-.278 [*]	.729 ^{**}	1					
Total Mg	-.063	-.069	0.063	0.026	-.063	-.045	0.044	0.077	0.127	0.159	0.039	-.0141	-.097 ^{**}	-.543 ^{**}	.576 ^{**}	1				
Total Fe	-.0170	0.106	0.133	0.115	.263 [*]	-.0146	-.059	0.120	-.057	0.064	-.040	0.044	-.0006	-.088	-.0116	-.011	1			
Total Mn	-.0154	0.209	0.152	-.037	0.043	-.059	-.019	-.029	0.137	.396 ^{**}	-.075	0.037	0.186	-.434 ^{**}	.322 ^{**}	.340 ^{**}	0.098	1		
Total Cu	0.146	.302 ^{**}	0.040	-.066	0.143	0.069	-.007	-.0186	0.090	.340 ^{**}	-.097	-.0135	0.038	-.358 ^{**}	.264 [*]	.231 [*]	0.027	.382 ^{**}	1	
Total Zn	-.0169	-.082	-.024	0.177	0.150	-.0191	-.094	.224 [*]	-.0183	-.055	-.096	0.024	-.0169	-.0126	0.055	0.017	.483 ^{**}	-.0101	-.0154	1

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

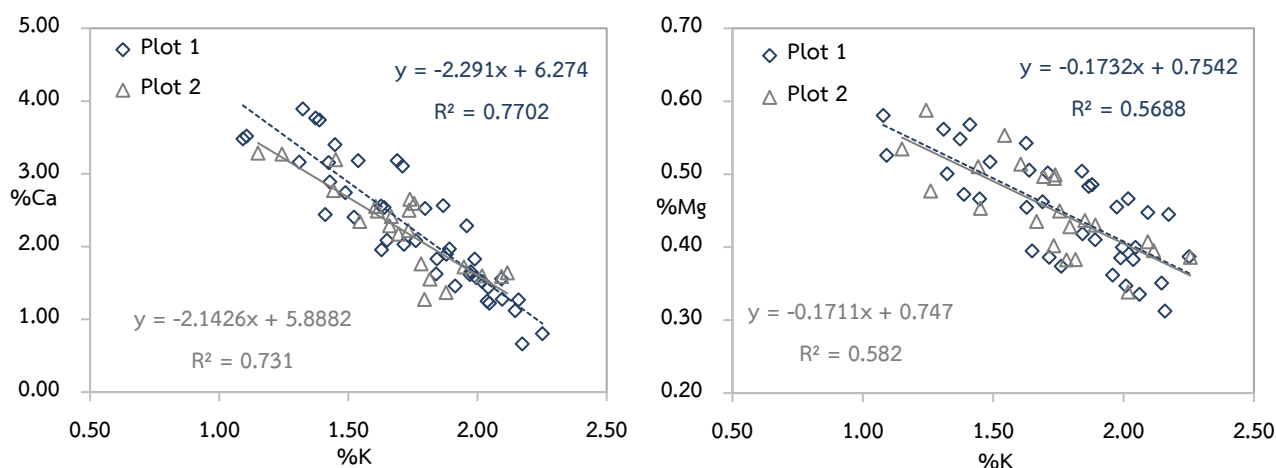


Figure 1 Correlation between leaf Ca and K concentrations and leaf Mg and K concentrations of each plot

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมส่งเสริมการเกษตร. 2567. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <http://www.agriman.doe.go.th/home/news/year2568.pdf> (เข้าถึงเมื่อ 1 เมษายน 2568).
- [2] สุมิตรา ภู่วโรตม, นกุล ถวิลถึง, สมพิศ ไม่เรียง, พิมพ์ เกษสม และจิรพงษ์ ประสทธิเชตร. 2544. โครงการ ความต้องการธาตุอาหารและการแนะนำปุ๋ยในทุเรียน: รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม. 196 หน้า.
- [3] Soil Survey Division. 1972. Detailed reconnaissance soil map of Chumphon Province. Scale 1:100,000. Soil Survey Division. Department of Land Development. Ministry of Agriculture and Cooperatives. Bangkok, Thailand. 1 Sheet.
- [4] สุมิตรา ภู่วโรตม. 2555. เอกสารประกอบการสอนวิชาวิเคราะห์ดินและพืชเบื้องต้น. ภาควิชาปฐพีวิทยา สาขาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ. (ไม่เรียงเลขหน้า)
- [5] เอ็ม เขียวรัตน์. 2542. คู่มือปฏิบัติการการสำรวจดิน. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 187 หน้า.
- [6] Jones, Jr., J.B. 2001. Laboratory Guides for Conducting Soil Tests and Plant Analysis. CRC Press. LLC., Boca Raton, Florida. USA. 363 p.
- [7] Land Classification Division and FAO Staff. 1973. Soil Interpretation Handbook for Thailand. Department of Land Development Ministry of Agriculture and Cooperatives. Bangkok. Thailand. 135 p.
- [8] Allen, S. E., Grimshaw, H. M., Parkinson, J. A. and Quarmby, C. 1974. Chemical analysis of ecological materials. John Wiley & Sons, Inc., New York. 565 p.
- [9] Weil, R.R. and N.C. Brady. 2017. The Nature and Properties of Soil. 15th Edition. Global Edition. Pearson. Education Limited. Harrow, England. UK. 1104 p.
- [10] ลินด์เซย์ โรบินสัน. 2567. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://vlsci.com/blog/using-nutrient-interactions-to-increase-yield/> (เข้าถึงเมื่อ 2 เมษายน 2568).
- [11] สุมิตรา ภู่วโรตม, พรทิพา กัญยวงศ์หา, นุจรี บุญแปลง และชัยวัฒน์ มกรเทศ. 2547. การวิเคราะห์พืชเพื่อเป็นแนวทางการใส่ปุ๋ยในมังคุด: รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม. 160 หน้า.
- [12] Foshey, C.G. 1969. Potassium nutrition of deciduous fruits. HortScience. 4: 39-41.
- [13] Goldy R. 2016. More reason for soil testing. Available: https://www.canr.msu.edu/news/more_reasons_for_soil_testing. (Accessed: March 10th, 2025.)

อิทธิพลของความหนาแน่นเริ่มต้นและชนิดของมูลสัตว์ต่อการเจริญเติบโตของแหนแดงในบ่อปูนซีเมนต์ Influence of Initial Density and Type of Manure to Growth of *Azolla* spp. in Cement Ponds

ธนรรษมลวรรณ พลมนั^{1,*}, อิดารัตน์ พูลสวัสดิ์¹, กริตพร ปิ่นเกตุ¹, ณัฏฐพร ทองประทุม¹

ศรศิริ แห่หงษ์¹ และ ถาวรณ สุบรรณรัตน์²

Thanatsamonwan Phonmun^{1,*}, Tidarat Poonsawat, Paritporn Pinket¹, Natthaphorn Thongprathum¹,
Sornsiri Langla¹ and Thaworn Subunrat²

¹ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

²ศูนย์เกษตร อาหาร และพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

¹Department of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

²Agriculture Food and Energy Center, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Thanatsamonwan Phonmun, e-mail address: Thanatsamonwan.ph@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นเริ่มต้นและชนิดของมูลสัตว์ต่อการเจริญเติบโตของแหนแดงในบ่อปูนซีเมนต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 เมตร สูง 0.5 เมตร โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของความหนาแน่นเริ่มต้นในการปล่อยแหนแดง 3 ระดับ คือ 44, 88 และ 132 กรัม/ตารางเมตร เป็นเวลา 19 วัน วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติดำเนินการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Statistix 8 และ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) ผลการทดลองพบว่า ระดับความหนาแน่นเริ่มต้นที่ 132 กรัมต่อตารางเมตร ให้อัตราการเติบโตของแหนแดงสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ตั้งแต่วันที่ 2-13 ในขณะที่ระดับ 44 และ 88 กรัมต่อตารางเมตร ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$)

การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของมูลสัตว์ 3 ชนิด คือ มูลโค มูลสุกร และมูลแพะ ต่อการเติบโตของแหนแดง เป็นเวลา 19 วัน วางแผนการทดลองแบบ CRD พบว่า กลุ่มที่ใช้มูลสุกร มีการเจริญเติบโตของแหนแดงสูงที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ในวันที่ 6-9 ขณะที่มูลโค และมูลแพะ ให้ผลไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ทั้งนี้สรุปได้ว่า ความหนาแน่นเริ่มต้นในการปล่อยแหนแดง คือ 132 กรัมต่อตารางเมตร และมูลสัตว์เป็นแหล่งธาตุอาหารที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตของแหนแดง

คำสำคัญ: แหนแดง, ความหนาแน่นเริ่มต้น, มูลสัตว์, การเติบโต

Abstract

This study aimed to evaluate the effects of initial density and animal manure type on the growth of *Azolla* in cement ponds with a diameter of 1.2 meters and a height of 0.5 meters. The experiment was divided into two parts. The first experiment investigated the effects of three initial stocking densities of *Azolla* 44, 88, and 132 g/m² over a period of 19 days. A completely randomized design (CRD) was used, and data analysis was performed using Statistix 8 with mean comparisons conducted using the Least Significant Difference (LSD) method. The results showed that an initial stocking density of 132 g/m² resulted in the highest growth rate of *Azolla* with statistical significance ($P<0.05$) from day 2 to day 13, whereas the growth rates at 44 and 88 g/m² were not significantly different ($P>0.05$).

The second experiment examined the effects of three types of animals manure cattle, swine, and goat manure on *Azolla* growth over the same 19-day period using the same experimental design and statistical analysis. The results indicated that *Azolla* grown with swine manure exhibited the highest growth rate with statistical significance ($P<0.05$) between days 6 and 9, while those grown with cattle and goat manure showed no significant difference ($P>0.05$). Therefore, it can be concluded that the optimal initial stocking density for *Azolla* cultivation is 132 g/m², and swine manure is the most suitable nutrient source for promoting *Azolla* growth.

Keywords: *Azolla*, Initial density, Animal manure, Growth

1. บทนำ

แหนแดง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Azolla* spp. มีสีเขียวเมื่อยังไม่โตเต็มที่ และเปลี่ยนเป็นสีแดงเมื่อแก่เต็มที่ ในประเทศไทยแหนแดงเป็นพันธุ์พื้นเมือง ชื่อ *Azolla pinnata* ซึ่งมีขนาดเล็ก ให้ผลผลิตต่ำ จนในปัจจุบันได้มีการนำแหนแดงสายพันธุ์ต่างประเทศมาปรับปรุงจนได้สายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์พื้นเมืองหลายเท่า ชื่อ *Azolla microphylla* โดยคุณสมบัติที่โดดเด่นของแหนแดง คือ การเป็นพืชน้ำที่สามารถตรึงไนโตรเจนสูง ดูแลง่าย สามารถขยายพันธุ์ได้ในเวลา 1-2 สัปดาห์ เหมาะในการเป็นแหล่งอาหารสัตว์เนื่องจากแหนแดงมีระดับโปรตีนสูงถึง 21 – 28 เปอร์เซ็นต์ รวมถึงยังมีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อสัตว์ จึงถูกใช้เป็นอาหารสัตว์เพื่อลดต้นทุนค่าอาหาร [1]



Figure 1 *Azolla microphylla* [6]

แหนแดงเป็นเฟิร์นน้ำขนาดเล็กพบอยู่ทั่วไป บริเวณน้ำนิ่ง มีคุณสมบัติเป็นทั้งปุ๋ยพืชสด ปุ๋ยชีวภาพ และอาหารสัตว์ [1] [5] เนื่องจากในใบของแหนแดงมีสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanobacteria) อาศัยอยู่ ซึ่งสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ ทำให้แหนแดงเจริญเติบโตได้เร็วและมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสูง [4] แหนแดงเจริญได้ดีในน้ำที่มีช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) กว้าง คือ ประมาณ 3.5 – 10 และสามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 18 – 26 องศาเซลเซียส แหนแดงสามารถเจริญเติบโตได้ในบริเวณที่ได้รับแสงเต็มที่ไปจนถึงบริเวณที่เป็นร่มเงา หากแหนแดงเจริญเติบโตในที่ที่แสงส่องถึงน้อยจะทำให้การเจริญเติบโตของแหนแดงลดลง [8]

การเพาะขยายพันธุ์แหนแดง ดูแลง่าย สามารถเติบโตได้ในผิวน้ำ และเติบโตได้ดีในน้ำที่ไม่ลึก หรือสามารถเพาะเลี้ยงแหนแดงในภาชนะเพื่อเลี้ยงในพื้นที่ที่จำกัดได้ แต่ควรพิจารณาตามความเหมาะสมของพื้นที่และสภาวะการเลี้ยงนั้นๆ ด้วย โดยบ่อปูนซีเมนต์เป็นภาชนะหนึ่งที่ยิยมเพาะเลี้ยงแหนแดง แต่จำเป็นต้องมีการจัดการที่เหมาะสมต่อการเติบโตของแหนแดง เช่น ระดับการใส่ปุ๋ยคอก เพื่อให้มีแหล่งอาหารเพียงพอและเหมาะสมกับแหนแดง ระดับการปล่อยแหนแดงเพื่อให้เกิดการเติบโตขยายตัวของแหนแดงที่เหมาะสม เป็นต้น แหนแดงสามารถสืบพันธุ์ได้ 2 วิธี [2] ได้แก่ แบบไม่อาศัยเพศ โดยแบ่งตัวออกจากต้นแม่แล้วเจริญเป็นต้นเล็กๆ ซึ่งเพิ่มจำนวนได้เป็น 2 เท่า ในเวลาเพียง 3-6 วัน ดังนั้นการศึกษารังไข่จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหนาแน่นเริ่มต้น และชนิดของมูลสัตว์ ต่อการเติบโตของแหนแดงในบ่อปูนซีเมนต์ เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการการเพาะขยายพันธุ์แหนแดงในบ่อปูนซีเมนต์อย่างเหมาะสม

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมบ่อปูนซีเมนต์

การทดลองนี้ดำเนินการในบ่อปูนซีเมนต์ภายในพื้นที่วิจัยของหลักสูตรสัตวศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร จังหวัดชุมพร มีการเตรียมบ่อเพื่อเพาะเลี้ยงแหนแดง โดยใช้บ่อปูนซีเมนต์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 เมตร สูง 0.5 เมตร ใส่มูลโคแห้ง 1 ส่วนต่อน้ำ 50 ส่วน ละลายมูลกับน้ำให้เข้ากัน (1 บ่อปูนซีเมนต์จุน้ำ 200 ลิตรโดยประมาณ) ทำการช้อนกากและเศษใบไม้ที่ปะปนมากับมูลโคแห้งออก แล้วพักน้ำเป็นเวลา 2 วัน ทำเครื่องหมายระดับน้ำในบ่อเพื่อการเติมน้ำให้คงที่ระหว่างการทดลอง

2.2 วิธีการทดลอง

การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ การทดลองที่ 1 : ทำการศึกษาผลของความหนาแน่นเริ่มต้นต่อการเจริญเติบโตของเหียงในบ่อปูนซีเมนต์ ระหว่างวันที่ 11 - 29 เมษายน 2567 โดยทำการปล่อยเหียงเริ่มต้น 3 ระดับๆ ละ 3 ซ้ำ คือ 44, 88 และ 132 กรัม/ตารางเมตร โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) ทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักเหียงเวลา 7.00 น. ทุกวัน โดยใช้ตะแกรงช้อนเหียง ทำการสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง เก็บข้อมูลเป็นเวลา 19 วัน

การทดลองที่ 2 : ทำการศึกษาน้ำหนักของมูลสัตว์ต่อการเจริญเติบโตของเหียงในบ่อปูนซีเมนต์ ระหว่างวันที่ 7 - 25 พฤษภาคม 2567 โดยใช้มูลสัตว์ 3 ชนิด ได้แก่ มูลโคแห้ง มูลสุกรแห้ง และมูลแพะแห้ง ที่ระดับมูลสัตว์ 1 ส่วนต่อน้ำ 50 ส่วนในบ่อปูนซีเมนต์ พักน้ำเป็นเวลา 2 วัน และทำการปล่อยเหียงแต่ละบ่อที่ระดับ 44 กรัม/ตารางเมตร แต่ละชนิดทำการทดลอง 3 ซ้ำ ทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักเหียงเวลา 7.00 น. ทุกวัน โดยใช้ตะแกรงช้อนเหียง ทำการสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง เก็บข้อมูลเป็นเวลา 19 วัน

2.3 การออกแบบการทดลอง

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติดำเนินการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Statistix 8 และ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) และนำผลที่ได้มาสรุปเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเริ่มต้นของเหียง และชนิดของมูลสัตว์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตของเหียง

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

การทดลองที่ 1 : ผลการศึกษาความหนาแน่นในการปล่อยเหียงในบ่อปูนซีเมนต์ที่ระดับ 44, 88 และ 132 กรัม/ตารางเมตร ต่อการเติบโตของเหียง พบว่า การเติบโตของเหียงตลอดระยะเวลาการทดลอง ระดับการปล่อยเหียงเริ่มต้นที่ 132 กรัมต่อตารางเมตร มีอัตราการเติบโตที่สูงที่สุด โดยพบว่าการเติบโตของเหียงในกลุ่มนี้สูงกว่าการปล่อยเหียงที่ระดับอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ตั้งแต่วันที่ 2-13 ซึ่งระดับการปล่อยเหียงที่ระดับ 44 กรัมต่อตารางเมตร มีการเติบโตที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) กับระดับการปล่อยเหียงที่ 88 กรัมต่อตารางเมตร ดังแสดงใน Table 1 และ Figure 1

การทดลองที่ 2 : ผลของการศึกษาชนิดของมูลสัตว์ในการเพาะเลี้ยงเหียงในบ่อปูนซีเมนต์ 3 ชนิด คือ มูลโค มูลสุกร และมูลแพะ ต่อการเติบโตของเหียง พบว่า การเติบโตของเหียงในกลุ่มที่ใช้มูลสุกร มีการเติบโตที่สูงที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในวันที่ 6-9 ($P < 0.05$) ดังแสดงใน Table 2 และ Figure 2 สอดคล้องกับการศึกษาของ [3] ที่รายงานว่าผลผลิตของเหียงสูงที่สุดเมื่อมีการใช้มูลสุกรในการเพาะเลี้ยงเหียง ขณะที่มูลโค และมูลแพะ มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ขัดแย้งกับ การรายงานของ [7] ที่พบว่าการใช้มูลโคทำให้ผลผลิตเหียง มีค่ามากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้มูลไก่ มูลโค และมูลสุกร นอกจากนี้ [9] รายงานว่าชนิดของมูลสัตว์ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการสะสมโปรตีนของเหียง โดยการใช้ปุ๋ยหมักมูลไก่หรือมูลกระต่าย ทำให้เหียงมีปริมาณผลผลิตน้ำหนักแห้ง และปริมาณโปรตีนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยหมักมูลแพะ

Table 1 Effect of initial density on the growth rate of azolla in cement ponds (g)

Day	Initial stocking density of azolla			P-value
	44 g/m ³	88 g/m ³	132 g/m ³	
1	0	0	0	ns
2	8.33 ^b	15.33 ^b	64.00 ^a	0.0000
3	14.67 ^c	26.33 ^b	113.67 ^a	0.0000
4	19.00 ^b	40.00 ^b	154.00 ^a	0.0000
5	24.00 ^b	60.33 ^b	195.33 ^a	0.0002
6	28.67 ^b	80.00 ^b	231.00 ^a	0.0013
7	35.00 ^b	104.00 ^b	274.00 ^a	0.0073
8	82.67 ^b	145.00 ^b	388.00 ^a	0.0093
9	132.00 ^b	193.67 ^b	454.33 ^a	0.0155
10	180.00 ^b	243.33 ^b	550.67 ^a	0.0366
11	222.33 ^b	264.33 ^b	621.00 ^a	0.0245
12	287.33 ^b	299.67 ^b	663.00 ^a	0.0332
13	327.67 ^b	337.33 ^b	711.00 ^a	0.0348
14	372.33	341.67	713.00	ns
15	384.67	452.00	719.33	ns
16	484.33	415.33	722.33	ns
17	518.00	446.33	722.33	ns
18	556.33	475.00	717.00	ns
19	596.67	508.67	711.00	ns
Overall	4184.33 ^b	4386.33 ^b	8716.33 ^a	ns

* Means within row followed by the same letters are not significantly different as determined by least significant difference test at $P < 0.05$.

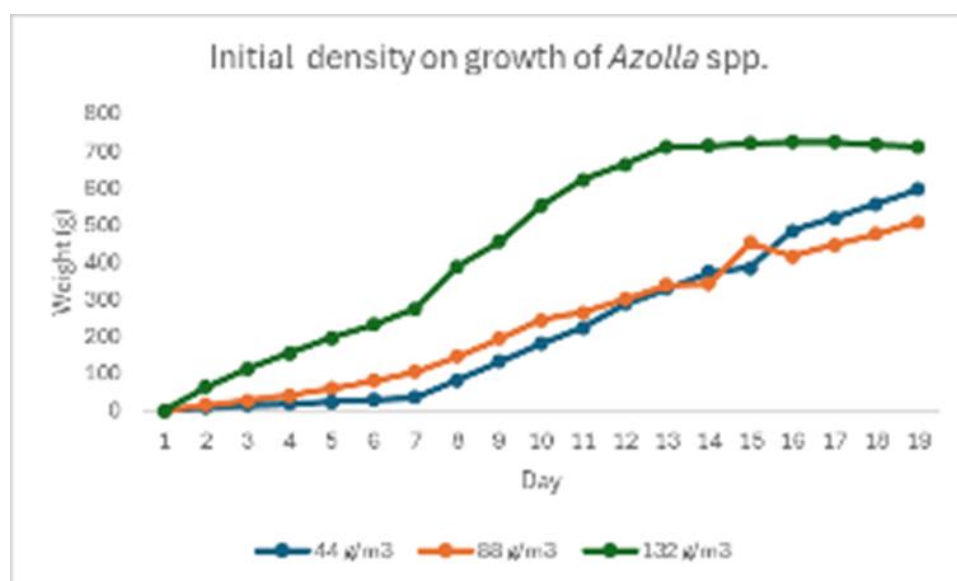
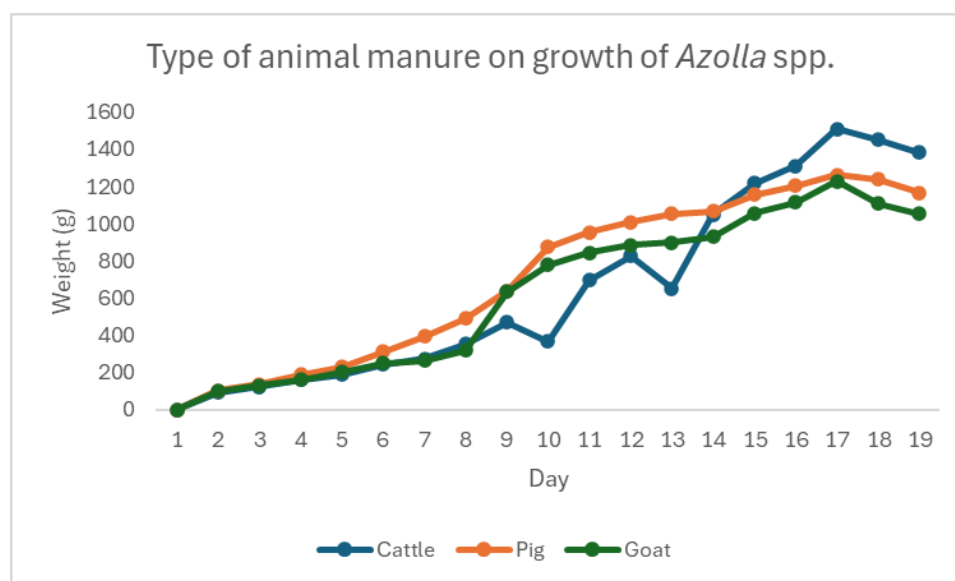
**Figure 2** Show initial stocking density on the growth rate of azolla in cement ponds (g)

Table 2 Effect of animal manure on the growth of azolla in cement ponds (g)

Day	Type of animal waste			P-value
	Cattle	Pig	Goat	
1	0	0	0	0.73
2	92.67	102.00	97.67	0.44
3	124.00	136.33	129.33	0.45
4	159.67	188.00	159.67	0.22
5	188.33	227.67	200.67	0.27
6	242.00 ^b	311.67 ^a	250.67 ^b	0.03
7	272.33 ^b	392.67 ^a	264.67 ^b	0.00
8	351.33 ^b	489.00 ^a	317.33 ^b	0.01
9	470.33	638.33	636.33	0.10
10	368.00 ^b	874.33 ^a	777.67 ^a	0.04
11	697.33	955.33	844.67	0.13
12	828.70	1010.00	885.33	0.25
13	652.70	1055.33	899.00	0.45
14	1051.33	1066.33	930.33	0.81
15	1218.00	1158.33	1058.00	0.81
16	1311.33	1205.00	1116.67	0.68
17	1512.67	1263.33	1229.67	0.53
18	1451.67	1241.00	1108.67	0.47
19	1383.00	1168.67	1053.67	0.51
Overall	13044.00	13585.33	12060.00	0.67

* Means within row followed by the same letters are not significantly different as determined by least significant difference test at $P < 0.05$

**Figure 3** Show type of animal waste on the growth rate of azolla in cement ponds (g)

4. สรุป

ในการศึกษาการเติบโตของแหนแดงที่มีการปล่อยแหนแดงเริ่มต้นที่ระดับต่างกัน พบว่า ความหนาแน่นเริ่มต้นของแหนแดงที่ 132 กรัม/ตารางเมตร ให้อัตราการเจริญเติบโตสูงสุดเมื่อเทียบกับระดับอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ มูลสุกรเป็นแหล่งธาตุอาหารที่ช่วยส่งเสริมการเติบโตของแหนแดงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับมูลโคและมูลแพะ ดังนั้น การเพาะเลี้ยงแหนแดงที่มีประสิทธิภาพควรใช้ความหนาแน่นเริ่มต้น 132 กรัม/ตารางเมตร ร่วมกับมูลสุกรเพื่อให้ได้ผลผลิตสูงสุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ที่เอื้ออำนวยสถานที่ศึกษาทดลองในครั้งนี้ และขอขอบคุณบุคลากรทุกๆ ฝ่ายที่ให้ความช่วยเหลือจนการศึกษาครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กุลยาภัสร์ วุฒิจาริ อัจฉรา พวงน้าอ่าง เทวินทร์ ทองมูล และวันดี ทาตระกูล. 2555. การใช้ประโยชน์จากแหนแดงอบแห้งในอาหารไก่เนื้อ. หน้า.262-267. ใน: การประชุมวิชาการงานเกษตรนเรศวร ครั้งที่ 10. วันที่ 24-29 กรกฎาคม 2555. มหาวิทยาลัยนเรศวร. พิษณุโลก.
- [2] กมลวรรณ ศรีปลั่ง สุรางค์วัฒน์ พันแสง และ พวงผกา แก้วกรม. 2554. การศึกษา สภาวะที่เหมาะสมต่อการ เจริญเติบโต ของแหนแดงในท้องถื่น และสาหร่ายสี เขียวแกมน้ำเงินเพื่อเพิ่มผลผลิตข้าว. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัย ราชภัฏเพชรบูรณ์. 75 หน้า.
- [3] พัชร วิมูลชาติ. 2563. กระบวนการผลิตแหนแดง (*Azolla microphylla*) เพื่อใช้ในการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [4] ศิริลักษณ์ แก้วสุริยิต และประไพ ทองระอา. 2557. การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแหนแดงที่ใช้เป็นวัสดุสำหรับการผลิตปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟต. กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา, สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร, กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.
- [5] สายันท์ คำรักษา. 2554. การเพาะเลี้ยงและการประเมินคุณภาพแหนแดง (*Azolla Microphylla*) เพื่อเป็นวัตถุดิบอาหารสุกร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [6] สารานุกรมพืช. 2568. *Azolla microphylla*. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ https://www.picturethisai.com/th/wiki/Azolla_microphylla.html (เข้าถึงเมื่อ 29 มีนาคม 2568).
- [7] Indira, D., Rao, K. Sarjan, Suresh J., Naidu, K. Venugopal and Ravi, A. 2014. Optimum conditions for culturing *Azolla* (*Azolla pinnata*). Int.J.Adv.Res.Biol.Sci 1(2): 87-89.
- [8] Sadeghi, R., Zarkami R., Sabetraftar, K. and Damme, P. Van. 2012. A review of some ecological factors affecting the growth of *Azolla* spp. Caspian J. Env. Sci. 11(1): 65-76.
- [9] Utomo, Ristianto, Noviandi, Cuk Tri, Umami, Nafiatul and Permadi, Adhitya. 2019. Effect of composted animal manure as fertilizer on productivity of *Azolla pinnata* grown in easthen ponds. OnLine Journal of Biological Sciences. 19(4): 232-236.

การทดสอบพัดลมไฟฟ้าแบบใบพัดโค้งหลัง ในระบบคัดแยกและทำความสะอาด
เครื่องเกี่ยวนวดข้าวไร้ต่อพ่วงหน้ารถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก (14 แรงม้า)

Testing a Backward-Curved Blade Electric Blower in the Separation and Cleaning System of
an Upland Rice Combine Harvester Attachment for a Small Tractor (14 hp)

วรุตน์ วิเชียร¹ อภิลักข์ณ เอียดเอื้อ² จุมพล กุลยวน¹ ธนราช สวัสดิผล¹ สกฤ ห่อวโนทยาน¹ รณชาติ มั่นศิลป์³ และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช^{1,*}
Warut Wichian¹, Apiluck Eiadua², Jumpon Kunyuan¹, Tanarach Sawasdiapol¹, Sakul Hovanotayan¹, Ronnachart Munsin³
and Nuttapong Ruttanadech^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร
²ภาควิชาเทคโนโลยีและนาโนเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีนิวตริตรบูรณาการสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ
³สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

¹Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon

²Department of Nanoscience and Nanotechnology, School of Integrated Innovative Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai

*Corresponding author: Nuttapong Ruttanadech, e-mail address: nuttapong.ru@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาชุดทำความสะอาดสำหรับเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไร้ต่อพ่วงหน้ารถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก (14 แรงม้า) โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) ระบบทำความสะอาดเมล็ดข้าว และ 2) ระบบคัดแยกฟางข้าว ในระบบทำความสะอาดเมล็ดข้าว ได้ทำการทดสอบโดยใช้พัดลมไฟฟ้าแบบหมุนเหวี่ยงชนิดใบพัดโค้งไปทางด้านหลัง (backward-curved blade) ด้วยมุมใบพัด 2 ระดับ (45 และ 70 องศา) และปรับระดับความเร็วรอบมอเตอร์ 3 ระดับ (1,250, 1,300 และ 1,350 รอบต่อนาที) ผลการทดลองพบว่าที่เงื่อนไขมุมใบพัด 70 องศา และความเร็วรอบ 1,300 รอบต่อนาที สามารถทำงานได้ดีที่สุด โดยมีความเร็วลม 6.85 เมตรต่อวินาที อัตราการไหลของอากาศ 0.0998 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเมล็ดข้าวต่ำที่สุดประมาณ 15.08% ในขณะที่ระบบคัดแยกฟางข้าว (การเป่าฟาง) พบว่าการทดลองในเงื่อนไขเดียวกัน (มุมใบพัด 70 องศา ที่ 1,300 รอบต่อนาที) ให้ผลดีที่สุดเช่นเดียวกัน และมีเปอร์เซ็นต์ฟางข้าวตกค้างในเครื่องต่ำที่สุดที่ 13.93% เมื่อประเมินประสิทธิภาพโดยรวมของระบบทำความสะอาดและคัดแยกฟาง พบว่าที่ความเร็วรอบ 1,250 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพรวม 68.64% ที่ 1,300 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพ 72.24% และที่ 1,350 รอบต่อนาที 72.68% ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าชุดทำความสะอาดที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในการเก็บเกี่ยวข้าวไร้ในพื้นที่ขนาดเล็กหรือพื้นที่ที่มีภูมิประเทศจำกัดได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: เครื่องเกี่ยวนวด, ข้าวไร้, พัดลมไฟฟ้า, ใบพัดโค้งหลัง

Abstract

This research aimed to develop a cleaning unit for an upland rice combine harvester attached to a small tractor (14 horsepower). The experiment consisted of two main parts: 1) grain cleaning and 2) straw separation. In the grain cleaning system, an electric centrifugal fan with backward-curved blades was tested at two blade angles (45° and 70°) and three motor speeds (1,250, 1,300, and 1,350 rpm). The results showed that the optimal cleaning performance occurred at a blade angle of 70° and a fan speed of 1,300 rpm, achieving an air velocity of 6.85 m/s, an airflow rate of 0.0998 m³/s, and the lowest grain loss of approximately 15.08%. In the straw separation system, under the same conditions (blade angle of 70° and fan speed of 1,300 rpm), the system achieved the best separation performance, indicated by the lowest straw residue percentage of approximately 13.93%. Considering the overall performance of both grain cleaning and straw separation at various speeds, the combined efficiencies were 68.64%, 72.24%, and 72.68% at motor speeds of 1,250, 1,300, and 1,350 rpm, respectively. These results suggest that the developed cleaning unit significantly improves the performance of grain cleaning and straw separation for small-scale rice harvesting machinery, potentially benefiting upland rice farmers in mountainous or limited-access areas.

Keywords: Combine harvester, Upland rice, Electric centrifugal fan, Backward-curved blades

1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของไทย มีผลผลิตข้าวเปลือกปีละประมาณ 32 ล้านตัน [1] การใช้เครื่องจักรกลโดยเฉพาะเครื่องเกี่ยวรวงข้าว ซึ่งเกี่ยว ตี และทำความสะอาดเมล็ดได้ในขั้นตอนเดียว มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดการใช้แรงงานและลดความสูญเสียหลังเก็บเกี่ยว เมื่อเทียบกับแรงงานคนและเครื่องนวดแบบดั้งเดิม [2,3] อย่างไรก็ตาม พื้นที่เพาะปลูกข้าวไร่นามีภูมิประเทศลาดชันหรือพื้นที่ขนาดเล็ก มีข้อจำกัดในการใช้เครื่องจักรกลขนาดใหญ่ จึงนิยมเครื่องเกี่ยวรวงขนาดเล็กต่อพ่วงรถแทรกเตอร์แทน แต่ยังพบปัญหาเรื่องประสิทธิภาพชุดทำความสะอาดต่ำ ส่งผลให้สูญเสียเมล็ดข้าวและมีสิ่งเจือปนสูง [4]

ชุดทำความสะอาดของเครื่องเกี่ยวรวงทำหน้าที่แยกเมล็ดข้าวออกจากแกลบ ฟาง และสิ่งเจือปน โดยมีพัดลมและตะแกรงเป็นส่วนสำคัญ หากปรับตั้งไม่เหมาะสมจะเกิดความสูญเสียและสิ่งเจือปนเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่ส่งผลสำคัญคือ ความเร็วลมพัดลม มุมเอียงและความถี่การสั่นของตะแกรง [2,4] โดยเฉพาะความเร็วลมส่งผลต่อความสูญเสียถึง 38% ของทั้งหมด งานวิจัยของ [4-6] แสดงให้เห็นว่าการปรับความเร็วลมและอัตราการป้อนวัสดุให้เหมาะสมแบบเรียลไทม์ช่วยลดการสูญเสียได้อย่างมีนัยสำคัญ และสอดคล้องกับแนวโน้มการใช้เซ็นเซอร์และระบบควบคุมอัตโนมัติในอนาคต

จากการศึกษาของ [3] พบว่าการใช้เครื่องเกี่ยวรวงขนาดเล็กในบางเวลาช่วยลดแรงงานและความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวจาก 3.09% (แรงงานคน) เหลือ 1.25% (เครื่องเกี่ยวรวง) ยืนยันถึงความคุ้มค่าของเครื่องขนาดเล็กในพื้นที่ที่ไม่เหมาะสมกับเครื่องขนาดใหญ่ [3] ในส่วนของการเลือกประเภทพัดลม พบว่าพัดลมแบบแรงเหวี่ยง (centrifugal fan) มีความเหมาะสมสำหรับเครื่องเกี่ยวรวงข้าว เพราะให้ความดันสูง ทนต่อฝุ่นและสิ่งเจือปน ใบพัดชนิดโค้งไปข้างหลัง (backward-curved blade) มีประสิทธิภาพสูงสุด ประหยัดพลังงาน เสียรบกวนต่ำ และทนทานกว่าแบบโค้งไปข้างหน้า จึงเหมาะกับระบบทำความสะอาดในเครื่องเกี่ยวรวงข้าว [7]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งทดสอบชุดทำความสะอาดสำหรับเครื่องเกี่ยวรวงข้าวไร่นาขนาดเล็กต่อพ่วงรถแทรกเตอร์ 14 แรงม้า เน้นปรับปรุงประสิทธิภาพระบบทำความสะอาดและคัดแยกฟาง เพื่อลดการสูญเสียเมล็ดและสิ่งเจือปนในผลผลิต

2. วิธีการศึกษา

[8, 9] ได้ดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องเกี่ยวรวงข้าวไร่นาขนาดเล็กแบบต่อพ่วงรถแทรกเตอร์ขนาด 14 แรงม้า ดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งได้พัฒนาต่อจาก [10] โดยแบ่งระบบการทำงานเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ระบบการตัด ระบบการป้อน และระบบการนวด การคัดแยกและทำความสะอาด อย่างไรก็ตาม [11] จากการศึกษพบว่าความเร็วลมที่ใช้ในการคัดแยกข้าวไร่นา ฟางข้าว และสิ่งเจือปน ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีการออกแบบเพิ่มเติม โดยการติดตั้งชุดพัดลมไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดแยกข้าวไร่นาและฟางข้าว โดยเน้นการปรับปรุงที่ส่วนพัดลมเป่าลมและชุดคัดแยกฟางข้าว รายละเอียดขั้นตอนดังนี้



Figure 1 Model of an Upland Rice Combine Harvester Attachment for a Small Tractor (14 hp)

2.1 การออกแบบชุดพัดลมไฟฟ้าสำหรับการคัดแยก

ชุดทำความสะอาดถูกออกแบบโดยประกอบด้วยพัดลมไฟฟ้าและตะแกรงร่อนที่สามารถติดตั้งร่วมกับเครื่องเกี่ยวนวดข้าวเดิมที่ต่อพ่วงรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กยี่ห้อ Kubota รุ่น RT140DI [10] โดยใช้พัดลมไฟฟ้ากระแสตรง จำนวน 2 ชุด แต่ละชุดมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่แกนเพลลา 12.7 เซนติเมตร (5 นิ้ว) และมีความยาว 15 เซนติเมตร ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ (Figure 2) ใบพัดมีลักษณะเป็นแบบโค้งหลัง โดยทำการทดลองที่มุมเอียงใบพัด 45 และ 70 องศา พัดลมทั้งสองชุดติดตั้งภายในเสื้อหุ้มใบพัด (Cover) ที่มีช่องเป่าอากาศขนาด 9 x 18 เซนติเมตรทั้งสองด้าน แล้วนำติดตั้งบริเวณด้านหน้าของชุดทำความสะอาดของเครื่องเกี่ยวนวดต้นแบบ (Figure 3)



(a) 45 Degree



(b) 70 Degree

Figure 2 Electric Blower Unit



(a) Installation (Front View)



(b) Installation (Side View)

Figure 3 Installation of Electric Blower Unit for Separation

2.2 การทดสอบหาค่าความเร็วลมและอัตราการไหลของอากาศสัมพันธ์กับความเร็วรอบมอเตอร์

ทำการวัดค่าความเร็วลมและอัตราการไหลของอากาศด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometer) ยี่ห้อ Digicon รุ่น DA-43A โดยวัดที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 3 ระดับ ได้แก่ 1,250, 1,300 และ 1,350 รอบต่อนาที และใบพัดที่มีมุมเอียง 45 และ 70 องศา

2.3 การทดสอบหาประสิทธิภาพของชุดพัดลมไฟฟ้าทำความสะอาด ในห้องปฏิบัติการ

ชุดทำความสะอาดต้นแบบถูกติดตั้งกับเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไร้ต่อพ่วงรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก พัดลมขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ควบคุมความเร็วรอบได้โดยตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor speed controller) โดยต่อเข้ากับแบตเตอรี่ของรถแทรกเตอร์ และติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัดที่ช่องทางออกลมของพัดลมเพื่อวัดความเร็วลมผ่านตะแกรง นอกจากนี้ยังมีการชั่งน้ำหนักเมล็ดข้าวและฟางข้าวก่อนและหลังผ่านชุดทำความสะอาดเพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเมล็ดและฟางที่ตกค้าง ข้าวที่ใช้ทดสอบคือข้าวไร้พันธุ์เล็บนกที่เก็บเกี่ยว ณ ความชื้นประมาณ 25% และผ่านการนวดด้วยลูกนวดในตัวเครื่องเกี่ยวนวดก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการทำความสะอาด โดยในการทดลองใช้เครื่องซึ่งละเอียดและภาชนะรองรับผลผลิต เพื่อเก็บตัวอย่างเมล็ดข้าวและฟางข้าวที่ร่วงหล่นหรือถูกพัดออกไปชั่งน้ำหนัก

2.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพการคัดแยกเมล็ดข้าวไร้

ทำการทดลองโดยเตรียมเมล็ดข้าวไร้ครั้งละประมาณ 800 กรัม โดยใช้เครื่องซึ่งแบบตัวเลขทศนิยม 2 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นปล่อยเมล็ดข้าวไร้ให้ไหลผ่านตะแกรงและถูกเป่าด้วยพัดลมที่ทำงานที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 3 ระดับ

(1,250, 1,300 และ 1,350 รอบต่อนาที) และมุมเอียงใบพัด 45 และ 70 องศา ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งต่อระดับความเร็วและมุมใบพัด เพื่อหาค่าน้ำหนักเฉลี่ย

2.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพการคัดแยกเมล็ดข้าวไร

ทำการทดลองโดยเตรียมเมล็ดข้าวไรครั้งละประมาณ 800 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งแบบตัวเลขทศนิยม 2 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นปล่อยเมล็ดข้าวไรให้ไหลผ่านตะแกรงและถูกเป่าด้วยพัดลมที่ทำงานที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 3 ระดับ (1,250, 1,300 และ 1,350 รอบต่อนาที) และมุมเอียงใบพัด 45 และ 70 องศา ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งต่อระดับความเร็วและมุมใบพัด เพื่อหาค่าน้ำหนักเฉลี่ย

2.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการคัดแยกฟางข้าว

ทำการทดลองโดยเตรียมฟางข้าวครั้งละประมาณ 40 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งแบบตัวเลขทศนิยม 2 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น ปล่อยฟางข้าวให้ไหลผ่านตะแกรงและถูกเป่าด้วยพัดลมที่ทำงานที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 3 ระดับ (1,250, 1,300 และ 1,350 รอบต่อนาที) และมุมเอียงใบพัด 45 และ 70 องศา ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งต่อระดับความเร็วและมุมใบพัด เพื่อหาค่าน้ำหนักเฉลี่ยของฟางที่ตกค้างและที่ถูกคัดแยกออก จากการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเมล็ดข้าวไร เปอร์เซ็นต์ฟางข้าวที่ตกค้าง และประสิทธิภาพการเป่าของชุดทำความสะอาด จากสมการ (1) (2) และ (3) ตามลำดับ

โดยคำนวณเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเมล็ดข้าวไรได้จากสูตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสูญเสียเมล็ดข้าวไร} = \frac{\text{น้ำหนักเมล็ดข้าวไรที่หายไป}}{\text{เมล็ดข้าวไรทั้งหมด}} \times 100 \quad (1)$$

เปอร์เซ็นต์ฟางข้าวที่ตกค้างได้จากสูตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์ฟางข้าวที่ตกค้าง} = \frac{\text{ฟางข้าวที่ตกค้างในเครื่อง}}{\text{ฟางข้าวทั้งหมด}} \times 100 \quad (2)$$

และประสิทธิภาพการเป่าของชุดทำความสะอาดคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ประสิทธิภาพการเป่าของชุดทำความสะอาด} = \frac{\text{ฟางข้าวที่คัดแยกได้}}{\text{ฟางข้าวทั้งหมด}} \times 100 \quad (3)$$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การทดสอบหาความเร็วลมและอัตราการไหลของอากาศสัมพันธ์กับความเร็วรอบมอเตอร์

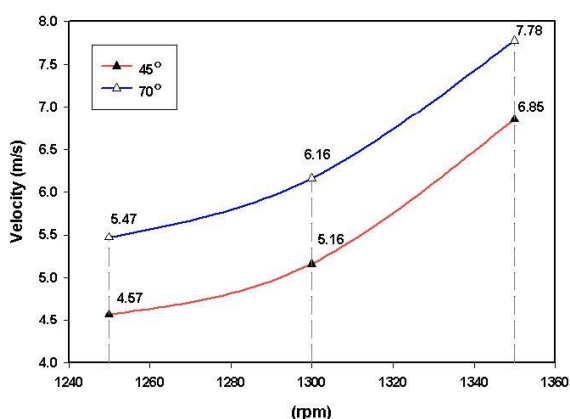


Figure 4 Relationship between motor speed (RPM) and air velocity (m/s).

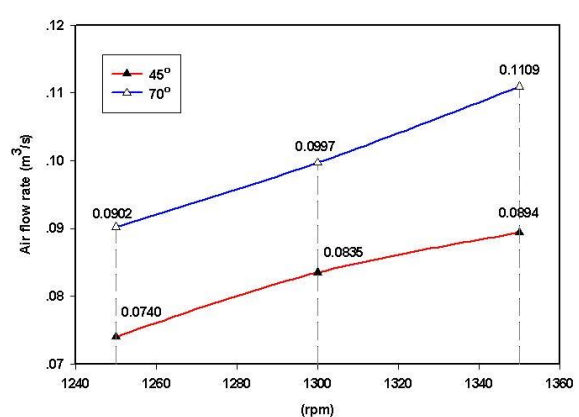


Figure 5 Relationship between motor speed (RPM) and flow rate.

จากการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์และความเร็วลมที่ได้จากพัดลมไฟฟ้า โดยใช้ใบพัดที่มีมุมเอียง 45 องศา และ 70 องศา พบว่าความเร็วรอบมอเตอร์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความเร็วลมเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จากข้อมูลใน Figure 4 พบว่าที่ความเร็วรอบ 1,250 รอบต่อนาที ใบพัดมุมเอียง 45 องศา มีความเร็วลมเฉลี่ย 4.57 เมตรต่อวินาที และที่ใบพัดมุมเอียง 70 องศา

มีความเร็วลมเฉลี่ย 5.47 เมตรต่อวินาที เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 1,300 รอบต่อนาที พบว่าความเร็วลมเพิ่มขึ้นเป็น 5.16 และ 6.16 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และที่ความเร็วรอบสูงสุดที่ทดสอบคือ 1,350 รอบต่อนาที พบว่าความเร็วลมของใบพัดที่มุม 45 องศา เพิ่มขึ้นเป็น 6.85 เมตรต่อวินาที และใบพัดที่มุม 70 องศา เพิ่มขึ้นเป็น 7.78 เมตรต่อวินาที

นอกจากนี้จากข้อมูลใน Figure 5 ที่แสดงอัตราการไหลของอากาศ พบว่าที่ความเร็วรอบ 1,250 รอบต่อนาที ใบพัดมุมเอียง 45 องศา มีอัตราการไหลของอากาศเฉลี่ย 0.0740 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และที่ใบพัดมุมเอียง 70 องศา มีค่าเฉลี่ย 0.0902 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 1,300 รอบต่อนาที อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 0.0835 และ 0.0997 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และที่ความเร็วรอบสูงสุด 1,350 รอบต่อนาที พบว่าใบพัดที่มุม 45 องศา มีอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 0.0894 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และใบพัดที่มุม 70 องศา มีอัตราการไหลของอากาศสูงสุดที่ 0.1109 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

จากผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า มุมเอียงของใบพัดที่มากกว่า (70 องศา) ให้ค่าความเร็วลมและอัตราการไหลของอากาศที่สูงกว่าใบพัดที่มุมเอียงน้อยกว่า (45 องศา) อย่างชัดเจนทุกระดับของความเร็วรอบมอเตอร์ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากใบพัดที่มีมุมเอียงมากจะมีพื้นที่ในการกวาดอากาศมากขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงลมและอัตราการไหลของอากาศที่สูงขึ้น ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานคัดแยกฟางข้าวและสิ่งเจือปน อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้มุมเอียงของใบพัดและความเร็วรอบมอเตอร์ที่เหมาะสมควรคำนึงถึงความต้องการเฉพาะของกระบวนการทำความสะอาดและคัดแยกที่เหมาะสมกับลักษณะของผลผลิต เพื่อลดการสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องเกี่ยวนวดข้าว

3.3 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของชุดพัดลมไฟฟ้าทำความสะอาด

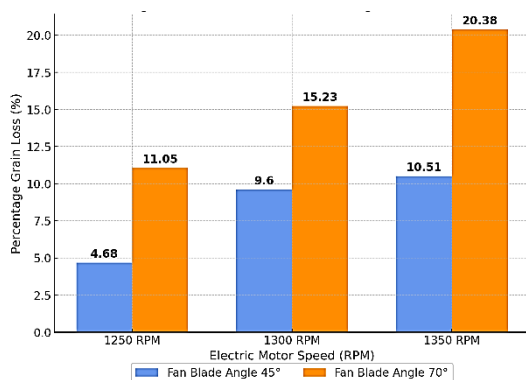


Figure 6 Percentage of Grain Loss

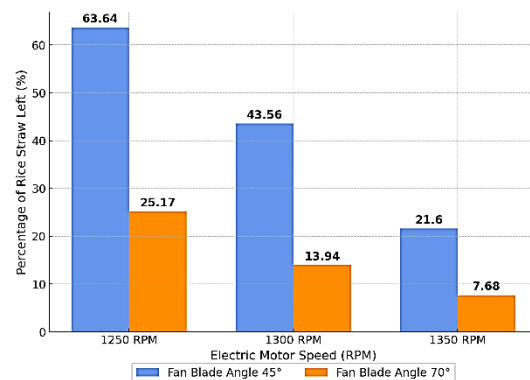


Figure 7 Percentage of Rice Straw Left in the Machine

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของชุดทำความสะอาดที่ระดับความเร็วรอบและมุมใบพัดที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าจาก 1,250 รอบต่อนาที เป็น 1,350 รอบต่อนาที ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การสูญเสียเมล็ดข้าว (Grain loss) (Figure 6) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งที่มุมใบพัด 45 และ 70 องศา โดยเฉพาะมุมใบพัดที่ 70 องศา ซึ่งมีการสูญเสียเมล็ดข้าวสูงที่สุดถึง 20.38% ที่ความเร็วรอบ 1,350 รอบต่อนาที ในขณะที่มุมใบพัด 45 องศา มีการสูญเสียเพียง 10.51% เท่านั้น จึงแนะนำให้เลือกใช้มุมใบพัดที่ต่ำกว่าเพื่อจำกัดการสูญเสียเมล็ดข้าว

ในส่วนของการตกค้างของฟางข้าว (Figure 7) พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์จาก 1,250 รอบต่อนาที ไปที่ 1,350 รอบต่อนาที ทำให้ฟางข้าวตกค้างในเครื่องลดลงอย่างชัดเจน โดยที่มุมใบพัด 45 องศา ปริมาณฟางข้าวที่ตกค้างลดลงจาก 63.64% เหลือ 21.60% ส่วนที่มุมใบพัด 70 องศา ปริมาณฟางข้าวตกค้างลดลงจาก 25.17% เหลือเพียง 7.68% แสดงให้เห็นชัดเจนว่าการเพิ่มความเร็วรอบมีผลดีในการลดการตกค้างของฟางข้าวในเครื่องเก็บเกี่ยว

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการเป่าลม (Blowing Efficiency) (Figure 8) พบว่าการเพิ่มมุมใบพัดจาก 45 เป็น 70 องศา ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเป่าลมดีขึ้นในทุกระดับความเร็วรอบอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ 1,250 รอบต่อนาที เพิ่มขึ้นจาก 36.37% เป็น 74.85% และที่ 1,350 รอบต่อนาที เพิ่มขึ้นจาก 78.41% เป็น 92.34% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการปรับมุมใบพัดมีอิทธิพลสำคัญต่อประสิทธิภาพการเป่าลมของระบบ

เมื่อสรุปภาพรวมประสิทธิภาพของชุดทำความสะอาด (Overall Efficiency) (Figure 9) พบว่ามุมใบพัด 70 องศา ที่ความเร็วรอบ 1,350 รอบต่อนาที ให้ประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 72.68% อย่างไรก็ตาม มุมใบพัดที่ 45 องศา ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ชัดเจนเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ จาก 34.2% ที่ 1,250 รอบต่อนาที ไปสู่ 65.86% ที่ 1,350 รอบต่อนาที ดังนั้น หากต้องการเน้นการประหยัดพลังงานและลดความสูญเสียเมล็ดข้าว ควรเลือกใช้มุมใบพัดที่ 45 องศา แต่หากเน้นประสิทธิภาพการเป่าลมและลดฟางข้าวตกค้าง การเลือกใช้มุมใบพัดที่ 70 องศา จะเหมาะสมมากกว่า

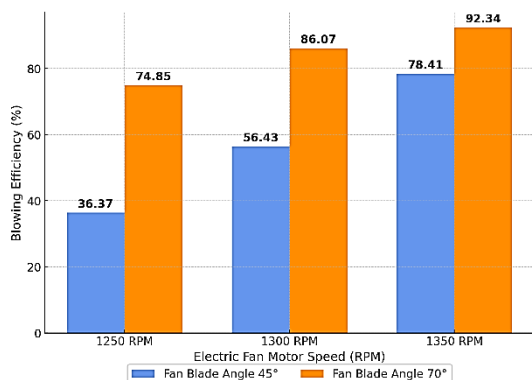


Figure 8 Blowing Efficiency of Electric Fan

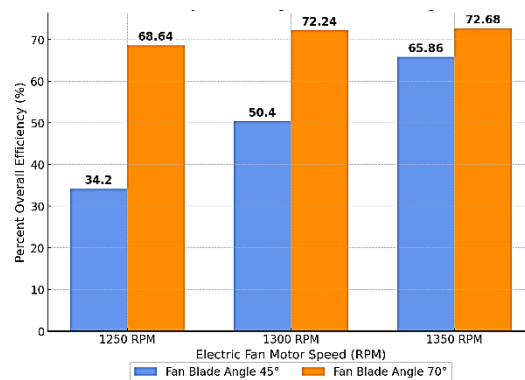


Figure 9 Percent Overall Efficiency of Cleaning Unit

จากข้อมูลทั้งหมดนี้ สามารถนำไปใช้พิจารณาปรับตั้งมุมใบพัดและระดับความเร็วรอบให้เหมาะสมกับสภาพการทำงานและเป้าหมายการเก็บเกี่ยวที่เฉพาะเจาะจงต่อไป

4. สรุป

จากผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า การใช้ใบพัดที่มีมุมเอียง 70 องศา ร่วมกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่สูง (1,350 รอบต่อนาที) จะให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกฟางและการทำความสะอาดที่สูงที่สุด อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบและมุมเอียงใบพัดส่งผลให้เกิดการสูญเสียเมล็ดข้าวสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้น ข้อเสนอแนะในการนำผลการศึกษานี้ไปใช้งานคือ ควรเลือกใช้มุมใบพัดและความเร็วรอบมอเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะและความต้องการเฉพาะของเกษตรกร โดยพิจารณาความสมดุลระหว่างการลดเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเมล็ดข้าวและการเพิ่มประสิทธิภาพการคัดแยกฟางข้าวให้ได้ดีที่สุด นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบในระยะยาวของการใช้งานต่อประสิทธิภาพและความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร รหัสโครงการ 256461 และนักศึกษาที่ทำงานนี้สำเร็จ ลุล่วง ได้แก่ นายจิรพันธุ์ ศรีกลยานิवास นายณัฐพล ทอดสนิท นายพิสิฐ เอียตระกูล นายชยุต เนตรศาสตร์ นายสุกัลย์ ประยูรหาญ นายธนพล อินทองปาน นายพันทิวา เพชรรักษ์ และนายภูมิพัฒน์ พลธิขมภู รวมถึงบุคลากรทุกท่านที่มีส่วนร่วมในโครงการนี้ และขอขอบคุณ กลุ่มวิจัยนวัตกรรมและเทคโนโลยีเกษตรภาคใต้ (Southern AgriTech & Innovation Research Unit) (SATIRU)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). FAOSTAT: Rice production in Thailand, 2018. Retrieved from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- [2] Chuan-Udom, S., and Chinsuwan, W. (2010). Operating factors affecting harvesting losses of cleaning unit of rice combine harvesters. KKKU Research Journal, 15(6), 487–495. Retrieved from <https://so01.tci-thaijo.org/index.php/APST/article/download/83231/66192/>.
- [3] Nath, B. C., Paul, S., Huda, M. D., Hossen, M. A., Bhuiyan, M. G. K., and Islam, A. S. (2022). Combine harvester: Small machine solves big rice harvesting problem of Bangladesh. Agricultural Sciences, 13(2), 201–220. <https://doi.org/10.4236/as.2022.132015>.

-
- [4] Li, D., He, Q., Yue, D., Geng, D., Yin, J., Guan, P., and Zha, Z. (2024). Research and experiment on airflow field control technology of harvester cleaning system based on load distribution. *Agriculture*, 14(5), 779. <https://doi.org/10.3390/agriculture14050779>.
- [5] Yang, L., Xiang, L., Zhang, Y., Li, B., Liang, Z., and Li, Y. (2018). Effects of throughput and operating parameters on cleaning performance in air-and-screen cleaning unit: A computational and experimental study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 152, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.07.019>.
- [6] Liang, Z., and Wada, M. E. (2023). Development of cleaning systems for combine harvesters: A review. *Biosystems Engineering*, 236, 79–102. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.10.018>.
- [7] Blowerfab. Axial vs. centrifugal industrial fans: The differences between two fans that you must know for proper application. Retrieved March 15, 2025, from <https://www.blowerfab.com/difference-between-industrial-fans/>.
- [8] ชยุต เนตรศาสตร์, สุกัลย์ ประยูรหาญ และ ธนพล อินทองปาน. 2561. การออกแบบและพัฒนาเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไร่พวงหน้าแทรกเตอร์ขนาดเล็ก: ระบบการนวด การคัดแยก และการทำความสะอาด. ปรินิพนธ์ปริญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์, ชุมพร.
- [9] จิรพันธุ์ ศรีกัลยานิवास, ณัฐพล ทอดสนิท และ พิสิฐ เอียดตระกูล. 2561. การออกแบบและพัฒนาเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไร่ต่อพวงหน้าแทรกเตอร์ขนาดเล็ก (14 แรงม้า): ระบบการตัด และระบบการป้อน. ปรินิพนธ์ปริญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์, ชุมพร.
- [10] ตฤณ เกตดำ, ปิยะณัฐ ยี่สิน และ สุขสวัสดิ์ รักเมือง. 2557. เครื่องเกี่ยวนวดข้าวไร่ต่อพวงแทรกเตอร์ขนาดเล็ก (14 แรงม้า). ปรินิพนธ์ปริญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์, ชุมพร.
- [11] พันทิวา เพชรรักษ์ และ ภูมิพัฒน์ พลีชมภู. 2562. การพัฒนาชุดทำความสะอาดในรถเกี่ยวนวดข้าวไร่ต่อพวงหน้าแทรกเตอร์ขนาดเล็ก (14 แรงม้า): ระบบทำความสะอาดและระบบคัดแยก. ปรินิพนธ์ปริญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์, ชุมพร.
-

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนการไหลของน้ำในทุเรียนโดยวิธีการกระจายความร้อน The Heat dissipation Coefficient in sap flow measurement of durian by Heat Dissipation Method

เผด็จศึก สุพรรณรัตน์^{1,2} เจษฎา โสภารัตน์³ และ สุรพล ฐิตินากุล^{1,*}

Padetsuek Supannarat^{1,2}, Jessada Soparat³ and Surapon Thititanakul^{1,*}

¹คณะนวัตกรรมเกษตร ประมง และ อาหาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี

³คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสงขลา

¹Faculty of Innovative Agriculture, Fisheries and Food, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, Surat Thani

²Faculty of Science Industrial Technology, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, Surat Thani

³Faculty of Natural Resources Prince of Songkla University, Songkla

*Corresponding author: Surapon Thititanakul, e-mail address: suraphon.t@psu.ac.th

บทคัดย่อ

การประมาณการคายน้ำโดยการวัดการไหลของน้ำในลำต้น ด้วยวิธีการกระจายความร้อน (Heat Dissipation Method) เป็นวิธีที่ประหยัด สะดวก และมีความแม่นยำสูง สามารถบันทึกข้อมูลการใช้น้ำของพืชได้ตลอด 24 ชั่วโมง แต่วิธีนี้ต้องมีการสอบเทียบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (Heat Dissipation Coefficient) ของแต่ละชนิดพืชเพื่อคำนวณหาสมการมาตรฐานของการไหลของน้ำในลำต้น ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนการไหลของน้ำในกิ่งทุเรียนหมอนทองอายุ 3, 7 และ 15 ปี ในห้องปฏิบัติการ พบว่า ค่าความหนาแน่นการไหลของน้ำ (Flow Density; F_D) และค่าดัชนีการไหลของน้ำ (Flow Index; K) มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน โดยกิ่งทุเรียนอายุ 37 และ 15 ปี มีค่าสัมประสิทธิ์ α 0.0128, 0.0416 และ 0.0643 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์ β 0.9435, 0.8048 และ 0.7362 ตามลำดับ มีค่า $R^2 = 0.8868$, 0.7876 และ 0.7506 ตามลำดับ เมื่อนำผลการสอบเทียบทั้งหมดมาสร้างกราฟความสัมพันธ์สามารถสร้างกราฟเส้นโค้งที่มีค่า $R^2 = 1$ และได้ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ $\alpha \approx 0.0146 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ และ $\beta \approx 1.6775$ ตามลำดับ เมื่อนำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการเพื่อหาปริมาณการใช้น้ำจากการคายน้ำของต้นทุเรียนพันธุ์หมอนทองอายุ 4 ปี ของเกษตรกรในพื้นที่อำเภอคลองท่อม จังหวัดกระบี่ พบว่า มีปริมาณการใช้น้ำเฉลี่ย 160 – 180 ลิตร/วัน ในการวัดปริมาณการใช้น้ำของต้นทุเรียนสามารถเป็นข้อมูลอ้างอิงให้กับเกษตรกรจัดการการให้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน, ค่าการคายน้ำ, ทุเรียน

Abstract

Estimating plant transpiration through stem water flow measurement using the Heat Dissipation Method (HDM) is a cost-effective, convenient, and highly accurate technique. This method enables continuous monitoring plant water usage for 24 hours. However, to obtain a standard equation for stem water flow, it is necessary to calibrate the heat dissipation coefficient specific to each plant species. Therefore, the objective of this study was to calibrate the heat dissipation coefficient for stem water flow in 3, 7 and 15-year old branches of *Durio zibethinus* cv. Monthong under laboratory conditions. The results showed that the flow density (F_D) and flow index (K) were positively correlated. The α coefficients for 3, 7 and 15-year-old branches were 0.0128, 0.0416, and 0.0643 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively, while the β coefficients were 0.9435, 0.8048, and 0.7362, with corresponding R^2 values of 0.8868, 0.7876, and 0.7506, respectively. When combining all calibration data, a regression curve with an R^2 value of 1 was obtained, resulting in generalized coefficients of $\alpha \approx 0.0146 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and $\beta \approx 1.6775$. These coefficients were applied to estimate the transpiration rate of a 4 years old Monthong durian tree at a durian orchard in Khlong Thom District, Krabi Province. The transpiration rate or an average water use of the tree was 160–180 liters/ day. This method provides a practical reference for farmers to effectively manage irrigation for durian cultivation.

Keywords: Heat dissipation Coefficient, Transpiration rate, Durian

1. บทนำ

ทุเรียนเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ราคาผลผลิตที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้มีเกษตรกรให้ความสนใจปลูกเพิ่มมากขึ้นทุกปี โดยทุเรียนพันธุ์หมอนทองในปี 2567 ราคาจำหน่ายเกรด AB ราคา 177.50 บาท/กก. เกรด C ราคา 127.50 บาท/กก. และตกเกรด ราคา 115 บาท/กก. ทุเรียนเป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตได้ดีในสภาพอากาศร้อนชื้น ระดับอุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส การจัดการสวนทุเรียนที่มีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญในการผลิตทุเรียนที่มีคุณภาพและปริมาณตามความต้องการของตลาด ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพและปริมาณของผลผลิตทุเรียนคือการคายน้ำของต้นทุเรียนเพราะมีบทบาทสำคัญในการลำเลียงสารอาหาร และน้ำจากรากไปยังส่วนต่างๆ ของต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการพัฒนารูปร่างของผลทุเรียน การขาดน้ำในช่วงของการพัฒนาผลในไม่ผลจะทำให้ผลมีขนาดเล็กหรือคุณภาพลดลง [1-2] นอกจากนี้ไม่ผลแล้วพืชเศรษฐกิจที่สำคัญก็ได้รับผลกระทบ เช่น ยางพารา ในช่วงที่ประสบภาวะแล้งฝนทิ้งช่วง พบว่าปริมาณน้ำยางที่กรีตได้จะลดลง [3-4] ซึ่งถ้ามีการให้น้ำจะทำให้ผลผลิตของยางพาราเพิ่มขึ้น [5] หรือการพัฒนาผลและการผสมเกสรของปาล์มน้ำมัน หากได้รับน้ำไม่เพียงพอ น้ำหนักผลจะลดลง 20% และการสร้างเกรสเพคเมียจะเหลือเพียง 30% ซึ่งถ้ามีการจัดการน้ำให้เพียงพอต่อความต้องการจะทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 50% [6] เพื่อที่จะสามารถจัดการน้ำให้เหมาะสมต่อความต้องการของพืช จึงจำเป็นต้องทราบปริมาณการใช้น้ำของพืชแต่ละชนิด

การประมาณการคายน้ำโดยการวัดการไหลของน้ำในลำต้น (sap flow measurement) ด้วยวิธีการกระจายความร้อน (Heat Dissipation Method) [7] เป็นวิธีที่ประหยัด สะดวก มีความแม่นยำสูง และสามารถเก็บข้อมูลต่อเนื่องด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลหลายชนิด (data loggers) โดยอาศัยหลักการให้ความร้อนแพร่กระจายเข้าไปสู่เนื้อไม้ผ่านท่อลำเลียงน้ำของพืช และติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเข้าไปในเนื้อไม้ เพื่อตรวจจับความร้อนในชั้นกระพี้ไม้ เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างจุด 2 จุด ความร้อนจะลดลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำในท่อน้ำ (xylem) แต่วิธีนี้ต้องคำนวณหาสมการมาตรฐานของการไหลของน้ำในลำต้นเฉพาะแต่ละพืช [8] ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (Heat dissipation Coefficient) ซึ่งผลการศึกษารุ่นนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการจัดการน้ำให้เหมาะสมตามความต้องการของทุเรียนต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 การสอบเทียบและหาค่าคงที่

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ในปี 2563 โดยใช้กิ่งทุเรียนพันธุ์หมอนทอง อายุ 3, 7 และ 15 ปี ที่มีลักษณะเรียบไม่มีข้อ ตา รอยแผลหรือกิ่งย่อย ขนาดกิ่งใกล้เคียง ตัดเป็นท่อนๆ ละ 30 เซนติเมตร ทำความสะอาดรอยตัดและตกแต่งรอยตัดเพื่อไม่ให้ท่อน้ำอุดตัน ท่อด้วยพลาสติกถนอมอาหาร แซ่เย็นในกระติกน้ำแข็งเพื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเนื้อไม้และพื้นที่หน้าตัดของเนื้อไม้ ทั้ง 2 ด้าน ด้านโคนกิ่งตัดส่วนของเปลือกไม้ออกประมาณ 1-1.5 เซนติเมตร แล้วสวมฝาครอบปิดให้แนบสนิทป้องกันน้ำรั่วไหลออกด้านข้าง ก่อนนำไปติดตั้ง Heat dissipation อุดรอยแผลเจาะและช่องว่างที่เหลือน้ำด้วยกาวดินน้ำมัน

ติดตั้ง sensor อยู่เยื้องกันและห่างกัน 15 เซนติเมตร แล้วนำกิ่งทุเรียนไปแขวนลอยเหนือวัสดุรองรับน้ำที่วางบนตาชั่งเพื่อวัดน้ำหนักน้ำที่ไหลผ่านกิ่งทุเรียนทุกๆ 3 นาที ตามวิธีการของ Granier [7] ต่อโพรบเข้ากับอุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger) ที่เชื่อมต่อไฟกระแสตรง 12V ปริมาณของกระแสไฟฟ้า 120mA (Figure 1) ทดสอบปล่อยสารละลาย KCL 0.1 mol.L⁻¹ ให้ไหลผ่านกิ่งทุเรียนโดยการปรับแรงดัน 12 ระดับๆ ละ 6 ครั้ง ใช้เวลาทดสอบการไหลจำนวน 240 นาที/ท่อน จากนั้นหยุดการปล่อยน้ำเพื่อหาค่า ΔT_{max} (สมการที่ (1)) เพื่อดูค่าความแตกต่างระหว่างที่น้ำไม่ไหล 8 ชั่วโมง โดยให้ปลายด้านล่างจุ่มอยู่ในน้ำเพื่อป้องกันท่อน้ำแห้ง นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟหาค่าคงที่จากสมการ

$$F_D = \alpha K^\beta = \alpha \left(\frac{\Delta T_{max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^\beta \dots\dots\dots(1)$$

F_D = ความหนาแน่นของการไหลของน้ำ (g.cm⁻².s⁻¹ or cm³.cm⁻².h⁻¹)

K = ดัชนีการไหลของน้ำ

ΔT_{max} = ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่แตกต่างจากโพรบที่ให้ความร้อน (T_{up}) และหัวที่ไม่ให้ความร้อน (T_{low}) เมื่อไม่มีการไหลของน้ำ (mV)

ΔT = ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างจากโพรบที่ให้ความร้อน (T_{up}) และหัวที่ไม่ให้ความร้อน (T_{low}) (mV)

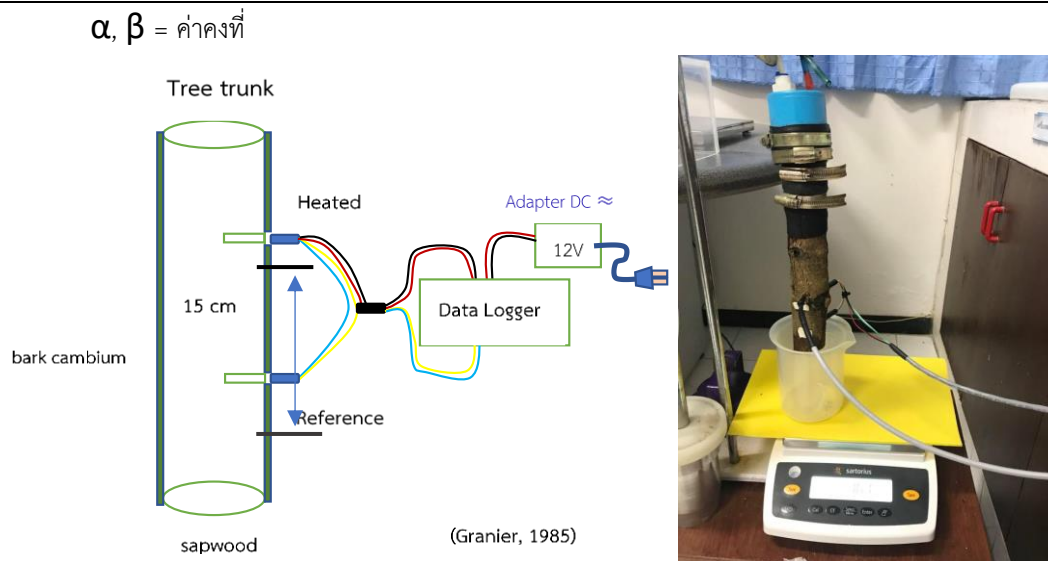


Figure 1 Heat Dissipation Method for measuring sap flow

2.2 วัดปริมาณการคายน้ำของต้นทุเรียนพันธุ์หมอนทองอายุ 4 ปี ของเกษตรกรในพื้นที่อำเภอดงหลวง จังหวัดกระบี่ วัดเส้นรอบวงของต้นทุเรียนหมอนทอง ใช้เหล็กกลวงตอกสกัดเปลือกต้นทุเรียน เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ที่ความสูง 120 เซนติเมตร และ 105 เซนติเมตร ในแนวทแยง เพื่อกำหนดจุดเจาะใส่ sensor เมื่อนำเปลือกออกแล้ววัดความหนาของเปลือกต้นทุเรียน ใช้ส่วขนาด 2 มิลลิเมตร เจาะเข้าไปในลำต้นทุเรียนแนวขนานกับพื้นผิว 3 เซนติเมตร แล้วสอดปลาย sensor เข้าไปทั้ง 2 จุด จากนั้นใส่ Heated probe ช่องบนและ Reference probe ใต้ด้านล่าง พร้อมกับนำกาวดินน้ำมันปิดช่องว่างระหว่างต้นทุเรียนและ sensor นำขวดพลาสติกมาครอบป้องกันการกระแทกกระเทือน sensor และป้องกันน้ำจากภายนอก นำฉนวนกันความร้อนมาปิดรอบต้นทุเรียน บนและล่าง sensor ออกไป 10 เซนติเมตร นำปลายอีกด้านของ sensor ต่อเข้ากับ Datalogger ที่เชื่อมต่อไฟกระแสตรง 12V ปริมาณของกระแสไฟฟ้า 120mA ตั้งค่า Data Logger ให้บันทึกข้อมูลปริมาณการไหลของน้ำผ่านเซ็นเซอร์ทุกๆ 15 นาที (Figure 2) เพื่อใช้หาปริมาณการใช้น้ำของต้นทุเรียนต่อชั่วโมง (สมการที่ (2))

$$T_C = F_D \times A_S \times 3600 \quad \dots\dots\dots(2)$$

- T_C = ระดับการคายน้ำ ($\text{cm}^3 \cdot \text{hr}^{-1}$)
 F_D = ความหนาแน่นของการไหลของน้ำ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ or $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
 A_S = พื้นที่หน้าตัดของเนื้อไม้ (cm^2)
 3600 = เปลี่ยนหน่วยจากวินาทีเป็นชั่วโมง



Figure 2 Installation of sap flow sensor in field

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

ในการสอบเทียบการกระจายความร้อนด้วยวิธี Granier [7] ของกิ่งทุเรียนเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์คงที่ พบว่า ค่า F_D (ความหนาแน่นการไหล) และค่า K (ดัชนีการไหล) มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน โดยกิ่งทุเรียนอายุ 3 7 และ 15 ปี มีค่าสัมประสิทธิ์ α 0.0128, 0.0416 และ 0.0643 $\text{g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์ β 0.9435, 0.8048 และ 0.7362 ตามลำดับ มีค่า $R^2 = 0.8868$ 0.7876 และ 0.7506 ตามลำดับ (table1) การที่กิ่งทุเรียนแต่ละอายุมีค่า R^2 น้อยเกิดจากการจัดเรียงตัวของท่อไม้ไม่สม่ำเสมอ (heterogeneous) มีขนาดอยู่ระหว่าง 150-350 ไมครอน [9] แต่เมื่อนำผลการสอบเทียบทั้งหมดมาสร้างกราฟความสัมพันธ์สามารถสร้างกราฟเส้นโค้งที่มีค่า $R^2 = 1$ และได้ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ $\alpha \approx 0.0146 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$, $\beta \approx 1.6775$ ตามลำดับ (Figure 3) มีค่าใกล้เคียงกับ พิธิษฐพรและคณะ [10] ศึกษาความสัมพันธ์คงที่ในทุเรียนพันธุ์หมอนทองอายุ 4 ปี ได้ค่า $\alpha \approx 0.0119 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$, $\beta \approx 1.231$ และเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์คงที่ α 0.0146 $\text{g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$, β 1.6775 ที่ได้ไปแทนค่าในสมการที่ (2) ได้สมการการใช้น้ำของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง (สมการที่ (3))

$$T_C = 0.0146K^{1.6775} \times A_S \times 3600 \quad \dots\dots\dots(3)$$

T_C = ระดับการคายน้ำ ($\text{cm}^3.\text{hr}^{-1}$)
 K = ดัชนีการไหลของน้ำ
 A_S = พื้นที่หน้าตัดของเนื้อไม้ (cm^2)
 3600 = เปลี่ยนหน่วยจากวินาทีเป็นชั่วโมง

นำสมการที่ (3) ใช้คำนวณหาปริมาณการใช้น้ำจากการคายน้ำของต้นทุเรียนพันธุ์หมอนทองอายุ 4 ปี ของเกษตรกรในพื้นที่อำเภอลองท่อม จังหวัดกระบี่ พบว่า ทุเรียนพันธุ์หมอนทองอายุ 4 ปี มีปริมาณการคายน้ำเฉลี่ย 160 – 180 ลิตร/วัน (Figure 4) สอดคล้องกับ สุมิตรและคณะ [11] พบว่าปริมาณการใช้น้ำของทุเรียนพันธุ์หมอนทองอายุ 7 ปี ที่ประเมินจาก sap flow มีค่าเฉลี่ย 100-270 ลิตร/วัน และพิธิษฐพรและคณะ [9] พบว่า ทุเรียนพันธุ์หมอนทองอายุ 4 ปี มีการใช้น้ำเฉลี่ย 2.64 มิลลิเมตรต่อวัน

Table 1 The calibration results of the constant coefficients α and β of the Monthong durian branches aged 3, 7 and 15 years.

Experiment	α	β	R^2
3-year-old Mon Thong durian branch	0.0128	0.9435	0.8868
7-year-old Mon Thong durian branch	0.0416	0.8048	0.7876
15-year-old Mon Thong durian branch	0.0643	0.7362	0.7506
3, 7 and 15-year-old Mon Thong durian branch	0.0146	1.6775	1

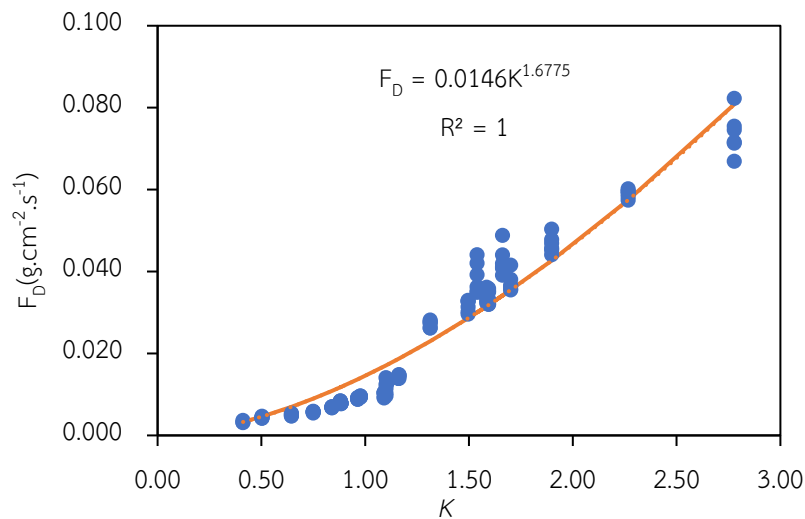


Figure 3 Plot of F_D and K represent measured data. Dashed lines are prediction lines constant calibration values.

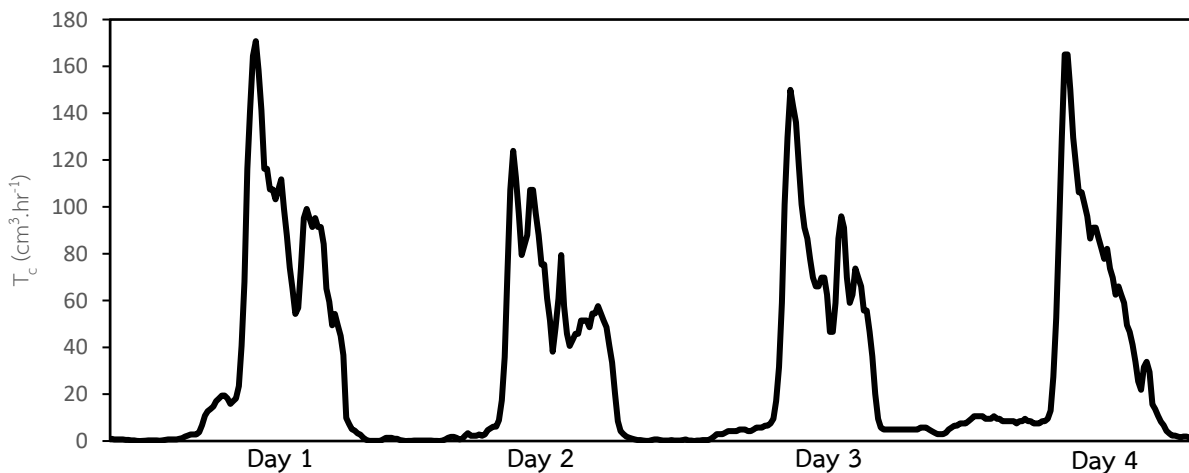


Figure 4 Comparing the rate of transpiration of durian over a day in four-year-old Monthong durians

4. สรุป

การสอบเทียบกิ่งทุเรียนหมอนทองด้วยวิธีการกระจายความร้อนในห้องปฏิบัติการ โดยใช้กิ่งทุเรียนอายุ 3 7 และ 15 ปี ซึ่งเป็นตัวแทนของทุเรียน 3 ระยะ คือ ระยะก่อนมีผลผลิต ระยะเริ่มมีผลผลิต และระยะที่มีผลผลิตเต็มที่ เพื่อนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (Heat dissipation Coefficient) ของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง ได้สมการการใช้น้ำ $T_c = 0.0146K^{1.6775} \times A_s \times 3600$ สำหรับหาปริมาณการใช้น้ำในรอบวัน ทำให้การศึกษาปริมาณการใช้น้ำของทุเรียนพันธุ์หมอนทองในช่วงอายุต่างๆ ด้วยวิธีการกระจายความร้อน (Heat Dissipation Method) สามารถใช้สมการคำนวณได้โดยไม่ต้องทำการสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนใหม่

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ในความอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่ในการทดสอบ และ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี ประจำปีงบประมาณ 2565

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Larson, K.D., and Schaffer, B. 1989. Effect of irrigation on leaf water potential, growth and yield of mango trees. Proc. Fla. State Hort. Soc. 102: 226-228.
- [2] Spreer, W., Nagle, M., Neidhart, S., Carle, R., Ongprasert, S. and Muller, J. 2007. Effect of regulated deficit irrigation and partial rootzone drying on the quality of mango fruits (*Mangifera indica* L., cv. 'Chok Anan'). Agri. Water Manag. 88: 173-180.
- [3] Gururaja Rao, G., Sanjeeva Rao, P., Rajagopal, R., Devakumar, A.S., Vijayakumar A.S. and Sethuraj M.R. 1990. Influence of soil, plant and meteorological factors on water relations and yield in *Hevea brasiliensis*. International Journal of Biometeorology. 34: 175-180.
- [4] Sanjeeva Rao, P., Saraswathyamma, C.K. and Sethuraj, M.R. 1998. Studies on the relationship between yield and meteorological parameters of para rubber tree (*Hevea brasiliensis*). Agricultural and Forest Meteorology. 90: 235-245.
- [5] จันทร์จิรา สมจันทร์ และสายัณห์ สดุดี. 2551. ผลของการให้น้ำต่อการตอบสนองทางสรีรวิทยาและผลผลิตน้ำยางของยางพาราในช่วงรอบปี. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 39(พิเศษ). 35-39.
- [6] ชีระ เอกสมทราเมษฐ์ และชีระพงศ์ จันทน์นิม. 2558. คู่มือปาล์มน้ำมัน. ห้างหุ้นส่วนสามัญ หาดใหญ่ ดิจิตอล พรินท์, สงขลา.
- [7] Granier, A. 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. Annals of Forest Science. 42: 193-200.
- [8] Smith, D.M. and Allen, S.J. 1996. Measurement of sap flow in plant stems. J. Exp. Bot. 47: 1833-1844.
- [9] สายัณห์ สดุดี และชูศักดิ์ ลิ้มสกุล. 2551. ปัจจัยที่จำกัดการวัดการไหลของน้ำโดยวิธีพลศาสตร์ความร้อนในต้นไม้ผลเขตร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์การเกษตร. 39(3). 187-190.
- [10] พิเศษภูพร ผูกศิริ, ทรงศักดิ์ ภทราวุฒิชัย และชัยศรี สุขสาโรจน์. 2562. การศึกษาการใช้น้ำของทุเรียนพันธุ์หมอนทองด้วยอุปกรณ์ Sap Flow. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16 3 - 4 ธันวาคม 2562. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. หน้า 365 - 372.
- [11] สุมิตร คุณเจตน์, ไพฑูรย์ ศรีนิล, สมบัติ ฝอยทอง, สุนทิตพย์ เกาโมรา และเอื้อน ปิ่นเงิน. 2561. การศึกษาปริมาณความต้องการน้ำและวิธีการให้น้ำที่เหมาะสมสำหรับทุเรียนพันธุ์หมอนทอง. โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา, จันทบุรี.

การศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบการอบแห้งสับประรดกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า

Comparative Study of Drying Methods for Phulae Pineapple Using a Solar Dryer Combined with an Electric Heater

เทวรัตน์ ตรีอำรรค^{1,*} สุพรรณ อาสายุทธ¹ ปรีศนา ชำนิเขตการ¹ และ กระวี ตรีอำรรค²

Tawarat Treeamruk^{1,*}, Supansa Arsayut¹, Pritsana Chamnikhetkan¹ and Krawee Treeamruk²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

¹School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

²School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author: Tawarat Treeamruk , e-mail address: tawarat@sut.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบการอบแห้งสับประรดกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า โดยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเป็นเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับแสงอาทิตย์โดยตรงทำการพัฒนาโดยการติดตั้งแท่งฮีตเตอร์อินฟราเรดขนาด 700 W จำนวนสอง 2 แท่ง และชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอากาศ ทำการทดสอบอบแห้งสับประรดกล้วยปริมาณ 3 kg ใน 3 รูปแบบคือ อบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว อบด้วยลมร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าอย่างเดียวโดยควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งไว้ที่ 50 และ 60°C และอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าโดยควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งไว้ที่ 50 และ 60°C ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60°C สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อเทียบกับการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าอย่างเดียวที่อุณหภูมิเดียวกันถึงร้อยละ 49.23 ซึ่งช่วยให้ประหยัดพลังงานจากการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว และการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าช่วยแก้ปัญหาเรื่องระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนานและคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์สับประรดอบแห้งจากการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ: สับประรดกล้วย, การอบแห้ง, เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า

Abstract

This research aims to compare different methods of drying Phulae pineapple using a solar dryer combined with an electric heater. The developed dryer is a direct solar energy system enhanced with two 700 W infrared heating rods and a temperature and humidity control system. Drying tests were conducted on 3 kg of Phu Lae pineapples using three methods: (1) solar energy drying alone, (2) hot air drying using only the electric heater at controlled temperatures of 50°C and 60°C, and (3) a combination of solar energy and electric heater drying, also at 50°C and 60°C. The results revealed that using solar energy combined with the electric heater at 60°C reduced electricity consumption by 49.23% compared to using the electric heater alone at the same temperature. Additionally, this hybrid drying method mitigates issues related to prolonged drying times and poor color quality in dried pineapple products observed when using solar energy alone.

Keywords: Phulae pineapple, Drying, Solar Dryer Combined with an Electric Heater

1. บทนำ

สับประรดพันธุ์กล้วย (Ananas comosus (L.) Merr.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญนับเป็นสิ่งปงชี้ทางภูมิศาสตร์ของจังหวัดเชียงราย (GI) [1] จัดเป็นสับประรดในกลุ่ม Queen เช่นเดียวกับพันธุ์เก็ด สับประรดกล้วยขนาดเล็ก [2] เน่าเสียวง่าย และมีอายุการเก็บรักษาสั้น [3] จึงมีความจำเป็นต้องแปรรูปสับประรดเพื่อให้มีอายุการเก็บรักษานานขึ้น ปัจจุบันมีการนำสับประรดพันธุ์กล้วยแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น สับประรดอบแห้ง ไอศกรีมสับประรด น้ำสับประรด เป็นต้น เพื่อลดปัญหาผลผลิตที่ล้นตลาดในบางฤดู และช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปแล้วนั้นสับประรดพันธุ์กล้วยผลสดจะมีราคากิโลกรัมละ 20-38 บาท หากนำมาแปรรูป

ผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งจะมีราคาเพิ่ม 500-1000 บาท โดยการแปรรูปจากวัตถุดิบ 3 กิโลกรัม จะได้สับปะรดอบแห้ง ประมาณ 500 – 700 g แต่ในบางฤดูกาลผลผลิตมีมากเกินไปความต้องการของตลาด จะส่งผลให้ราคาสับปะรดพันธุ์ภูเก็ตลดลงเป็น 18 บาท ทั้งยังทำให้เกิดปัญหาการกระจายผลผลิตไม่ทัน จึงทำให้เกิดการเน่าเสีย เกษตรกรจึงนำมาแปรรูปเพื่อลดการสูญเสียและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสับปะรดผลสด โดยส่วนใหญ่นิยมนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อบแห้ง [2] ซึ่งหนึ่งในวิธีการถนอมอาหารเพื่อเพิ่มอายุการเก็บรักษาที่ทำได้ง่าย [4]

การอบแห้งเป็นกระบวนการนำน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ซึ่งจะช่วยการยับยั้งการเติบโตของแบคทีเรีย[5] การอบแห้งเป็นกระบวนการที่สามารถดำเนินการได้หลากหลายวิธี โดยหนึ่งในวิธีที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับในอดีตคือการตากแห้ง อย่างไรก็ตามการตากแห้งแบบดั้งเดิมมักใช้ระยะเวลานาน และมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความเสี่ยงต่อการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์จากสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม เช่น ฝนตก ลมแรง ความชื้นสูง และฝุ่นละออง นอกจากนี้ยังมีความสูญเสียจากการถูกรบกวนโดยนก แมลง และสัตว์ฟันแทะ ตลอดจนปัญหาการเจริญเติบโตของเชื้อรา อีกทั้งยังต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ในการดำเนินการ [6] จึงได้มีการออกแบบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (direct type solar dryer) หรือโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (solar dryer dome) ซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องของสภาพอากาศไม่คงที่ [7] แต่อย่างไรก็ตามโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางตรงนี้ยังมีข้อจำกัดเรื่องการอบแห้งสามารถทำได้เฉพาะช่วงเวลาที่แสงอาทิตย์เท่านั้น การพัฒนาโรงเรือนอบแห้งที่สามารถลดข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาในการอบแห้งและลดปัญหาการใช้พลังงานความร้อนจากไฟฟ้า หรือเชื้อเพลิงของโรงเรือนอบแห้งแบบลมร้อนทั่วไปได้ จะเป็นการช่วยให้การทำงานของกลุ่มเกษตรกรผู้แปรรูปรายย่อยลดต้นทุนจากโรงเรือนอบแห้งลมร้อนทั่วไปและประหยัดเวลาจากการทำแห้งโดยการตากแดด

ดังนั้นเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พลังงานความร้อนเสริมด้วยความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อทำการอบแห้งสับปะรดทุเลแล้วประเมินสมรรถนะของการอบแห้งในรูปแบบต่าง ๆ

2. วิธีการศึกษา

2.1 ออกแบบและพัฒนาโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า

โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ออกแบบและพัฒนา มีส่วนประกอบดังนี้ 1) ตู้อบแห้งขนาด 1 m x 1.5 m x 0.85 m ใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตใสทำผนังเพื่อรับแสงอาทิตย์ ภายในตู้อบมีถาดสแตนเลสขนาด 0.65 m x 1 m สำหรับวางวัสดุอบแห้งจำนวน 2 ถาด ฮีตเตอร์อินฟราเรด ขนาด 700 W จำนวน 2 แห่ง และ พัดลมสำหรับหมุนเวียนและระบายอากาศขนาดกำลังไฟฟ้า 15 W, 12V จำนวน 2 ตัว ดังแสดงใน Figure 1

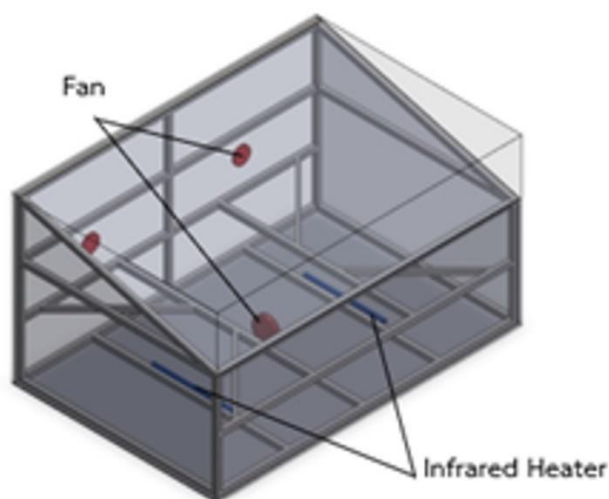


Figure 1 Solar dryer combined with electric heater

การทำงานของโรงเรือนอบแห้งถูกควบคุมด้วยตู้ควบคุม (Figure 2) ซึ่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT2 และ เทอร์โมคัปเปิล type K เพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องอบแห้งให้ได้ตามที่กำหนด

LED Display 1 shows the temperature and humidity inside the drying chamber.

LED Display 2 shows the temperature and humidity outside the drying chamber.

LCD Display 3 shows the operating status of the electric heater and fan.

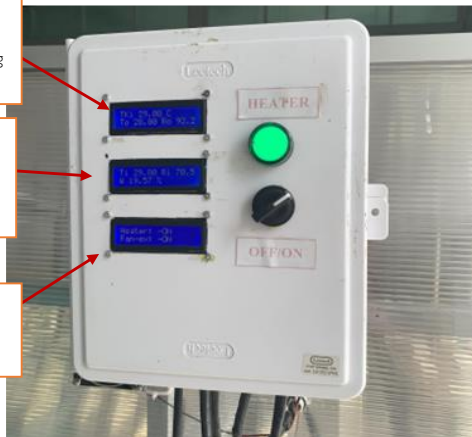


Figure 2 Control panel

2.2 การทดสอบอบแห้งสับประตูกแล

เตรียมสับประตูกแลและนำมาปอกเปลือก นำตาออก แล้วหั่นเป็นแว่นกลม ให้มีความหนาประมาณ 1 cm แล้วนำมาใส่ถาดเพื่อชั่งน้ำหนักให้ได้ 3 kg ต่อ 1 ซ้ำ ในการทดลองอบแห้ง โดยนำไปอบแห้งในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า จะอบแห้งทั้งหมด 3 รูปแบบคือ 1) ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว 2) ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ที่อุณหภูมิ 50 และ 60 °C และ 3) ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C ระหว่างการอบจะนำสับประตูกแลมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 2 ชั่วโมง เพื่อหาค่าความชื้นที่ลดลง จนค่าความชื้นของสับประตูกแลในปริมาณที่กำหนดไว้คือ 18 % และเก็บค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจากมิเตอร์ชั่วโมง มิเตอร์เมื่อทำการทดสอบแบบที่ 2 และ 3 โดยทำการทดสอบอบแห้งในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงพฤศจิกายน 2567 ซึ่งมีค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดลองประมาณ 565 W/m² (The Solar power meter model TM-20813) จากนั้นนำสับประตูกแลที่ผ่านการอบแห้งไปตรวจสอบคุณภาพ ด้านสี และเนื้อสัมผัส โดยมีวิธีวิเคราะห์หาค่าดังนี้

ความชื้นสับประตูกแล หาโดยใช้วิธีอบด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven) โดยนำตัวอย่างสับประตูกแลชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (AOAC) [7] จากนั้นคำนวณหาค่าความชื้นมาตรฐานเปิกดังแสดงใน (1)

$$M_w = \frac{m - m_d}{m} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ M_w คือความชื้น (%wb), m คือน้ำหนักเริ่มต้นของสับประตูกแล (g) m_d คือมวลแห้งของสับประตูกแล (g)

ปริมาณน้ำอิสระ นำตัวอย่างสับปะที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ มาลดขนาดให้ชิ้นเล็กกลงแล้วบรรจุใน Aw cup แล้วนำเข้าวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity meter, AquaLab Pre, METER Group, Inc, WA, USA) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

การวัดค่าสี สับประตูกแลที่ผ่านการอบแห้งจะถูกนำไปวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter, Hunter Lab, Ultra Scan VIS) ในระบบ L* a * b * โดยค่า L* หมายถึงค่าความสว่าง (Lightness) ค่า a* หมายถึงค่าความเป็นสีแดง (Redness) และค่า b* หมายถึงค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness)

การวัดเนื้อสัมผัส (Texture) สับประตูกแลที่ถูกนำไปวัดเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส ((Texture analyzer รุ่น TA-XT plus) ทำการทดสอบโดยใช้หัวทดสอบรุ่น HDP/BS (Figure 2) เพื่อวัดค่าแรงเฉือนที่ใช้ตัดชิ้นสับประตูกแลเพื่อจำลองการกัดของฟันโดย กำหนดความเร็วของหัวทดสอบ Pre-test, Test , Post- Test speed เท่ากับ 1, 1, 10 mm/s ตามลำดับ โดยมีระยะการตัด เท่ากับ 15% ของชิ้นสับประตูกแล

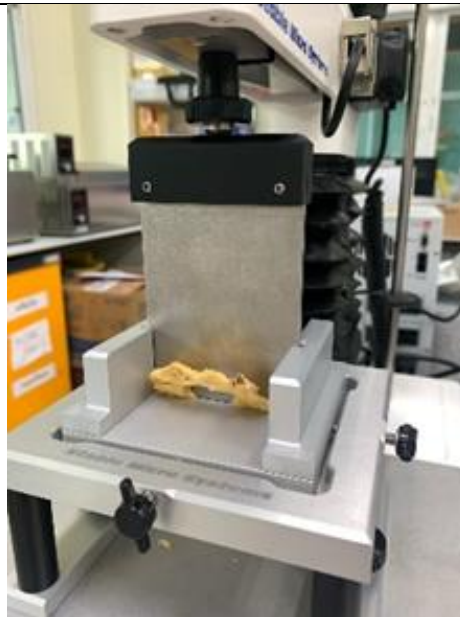


Figure 2 Measuring the texture of pineapple using texture analyzer

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลการอบแห้งสับปะรดด้วยวิธีการอบแห้งที่ต่างกัน

Figure 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของสับปะรดกับระยะเวลาในการอบแห้งพบว่า ในช่วงแรก (0-2 ชั่วโมง) ทุกวิธีการอบแห้งสามารถลดความชื้นลงได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะวิธีที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ 50°C และ 60°C เนื่องจากในช่วงแรกนั้นปริมาณความชื้นของสับปะรดนั้นยังมีอยู่มากจึงทำให้น้ำระเหยออกมาได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ต่อมาความชื้นอิสระที่บริเวณผิวของชิ้นสับปะรดเริ่มหมดไปจึงทำให้อัตราการอบแห้งเริ่มลดลง ซึ่งจาก Figure 3 จะเห็นว่าการอบแห้งด้วยฮีตเตอร์ และการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60°C สามารถลดความชื้นของสับปะรดได้เร็วที่สุด ส่วนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C ทั้ง 2 วิธีการนั้นลดลงช้ากว่า และมีลักษณะการลดลงของความชื้นไม่แตกต่างจากการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจจะแสดงให้เห็นว่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการอบแห้งนั้นสามารถทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ 50°C และการอบแห้งสับปะรดด้วยอุณหภูมิ 60°C สามารถลดความชื้นได้ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C และการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว

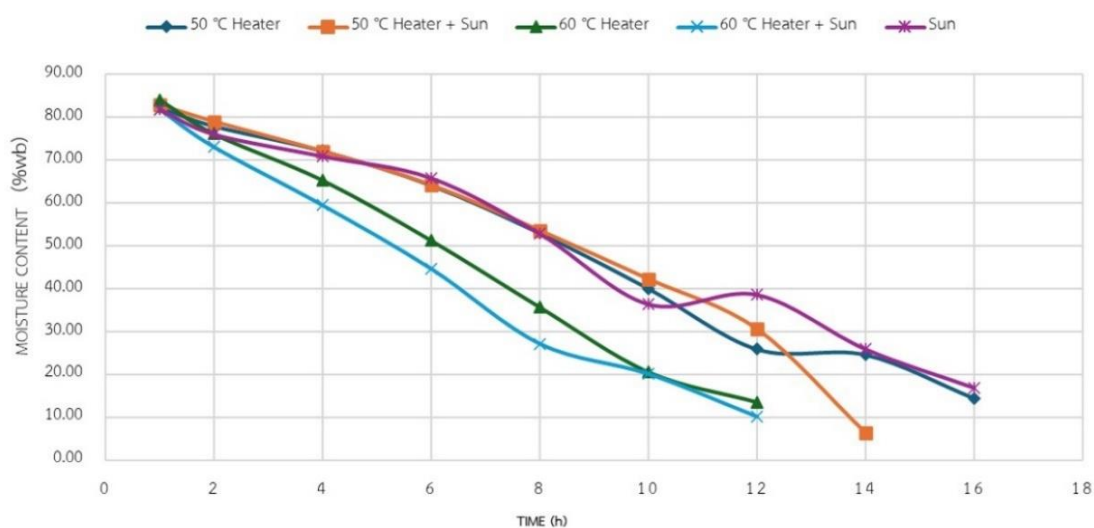


Figure 3 Relationship between pineapple moisture content and drying time

3.2 คุณภาพของสับปะรดอบแห้ง

ความชื้นและปริมาณน้ำอิสระ (a_w) จาก Table 1 พบว่าค่าความชื้นและปริมาณน้ำอิสระที่ต่ำที่สุดได้จากการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 50°C อยู่ที่ 10.33%wb และ 0.532 ตามลำดับ ซึ่งค่าปริมาณน้ำอิสระจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นที่อยู่ในอาหาร และการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวได้ปริมาณน้ำอิสระสูงที่สุดคือ 0.734 เนื่องจากความชื้นของสับปะรดมีค่าสูงสุด (17.49) อย่างไรก็ตามในทุกกระบวนการอบแห้งมีค่าปริมาณความชื้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้อบแห้งที่กำหนดไว้คือไม่เกิน 18%wb (มอก. 919-2563) [8]

ค่าสี จาก Table 1 พบว่าการอบแห้งแบบโดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 50 °C ให้ค่าความสว่างของสีน้อยที่สุด (L^*) อยู่ที่ 59.19 รวมถึงมีความแดง (a^*) และ ความเหลือง (b^*) มากที่สุด คือ 9.81 และ 25.26 ตามลำดับ ในส่วนของวิธีการอบที่ให้ความสว่าง (L^*) ของสีมากที่สุดคือการอบแห้งแบบใช้ฮีตเตอร์ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 60°C อยู่ที่ 63.77 มีค่าความแดง (a^*) และ ความเหลือง (b^*) อยู่ที่ 7.64 และ 22.70 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองจะเห็นว่าการใช้พลังงานร่วมกันนั้นทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อบได้มีความแห้งและสีที่สว่างกว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว ทำให้น่ารับประทานมากกว่าการอบในรูปแบบอื่น ๆ อย่างไรก็ตามค่าเมื่อเปรียบเทียบค่าสีของสับปะรดอบแห้งพบว่ามีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของวิภาและนันทา [10] ซึ่งทำการศึกษาลักษณะของกระบวนการผลิตต่อคุณภาพและอายุการเก็บของสับปะรดเชื่อมอบแห้งโดยทำการศึกษากับสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียพันธุ์น้ำผึ้ง

เนื้อสัมผัส จาก Table 1 จะเห็นว่า การอบแห้งแบบใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 50°C มีค่าแรงเค้นสูงสุด 95.015 N ซึ่งหมายความว่าต้องใช้แรงในการตัดให้ขาดมากที่สุด เนื่องจากสับปะรดมีค่าความชื้นเหลืออยู่มากจึงทำให้สับปะรดมีความเหนียวกว่าแบบอื่น หรือมีปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ในตอนแรกเริ่มสับปะรดมีความสุกน้อยกว่าแบบอื่นทำให้มีโครงสร้างเป็นเส้นใยที่หนาแน่นจึงทำให้มีความเหนียวมาก ในขณะที่การอบแห้งแบบใช้ Heater ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ในอุณหภูมิเดียวกัน ค่าความแข็งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นั่นแสดงว่าการใช้พลังงานร่วมทำให้เนื้อสัมผัสของสับปะรดนั้นไม่แข็งหรือเหนียวเท่าการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าหรือพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว

Table 1 Results of quality analysis of dried pineapple

Type drying	Temp (°C)	Time (h)	Moisture Content (%wb)	a_w	Color parameters			Texture
					L^*	a^*	b^*	Shear force (N)
Heater	50	14	15.56	0.646	59.19	9.81	25.26	95.015
	60	11.33	11.77	0.599	62.16	7.66	22.14	67.880
Sun +	50	13.33	10.33	0.532	62.51	7.36	20.50	49.098
Heater	60	10	13.77	0.665	63.77	7.64	22.70	76.308
Sun	-	38	17.49	0.734	62.10	7.55	18.96	52.495

3.3 อัตราการใช้พลังงาน

จาก Figure 4 จะพบว่าการใช้พลังงานในการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้านั้น สามารถประหยัดพลังงานในการอบแห้ง เมื่อทำการเปรียบเทียบการอบแห้งแบบใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามหากบริเวณนั้นมีพลังงานแสงอาทิตย์ที่สม่ำเสมอตลอดทั้งฤดูการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียวก็จะมีค่าความคุ้มค่ามากกว่าเนื่องจากเป็นพลังงานที่ได้มาฟรี แต่หากเป็นการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรที่มีผลผลิตตลอดทั้งปีการใช้เครื่องอบแห้งที่อยู่ในรูปแบบพลังงานความร้อนร่วม จะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีคุณภาพที่ดี ช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง และลดความสิ้นเปลืองพลังงาน หากใช้แหล่งความร้อนเป็นฮีตเตอร์ไฟฟ้าก็ได้ ดังเช่นผลการอบแห้งอบแห้งสับปะรดภูเก็ตที่ทำการศึกษานี้ ซึ่งเมื่อพิจารณาอัตราการใช้พลังงานที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่าสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจาก 13.67 kWh เมื่อใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าอย่างเดียวเหลือ

6.73 kWh เมื่อใช้แหล่งความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งคิดเป็นปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ลดลงร้อยละ 49.23 ซึ่งจะเห็นว่าการใช้พลังงานความร้อนร่วมจะช่วยประหยัด พลังงานไฟฟ้าลงได้

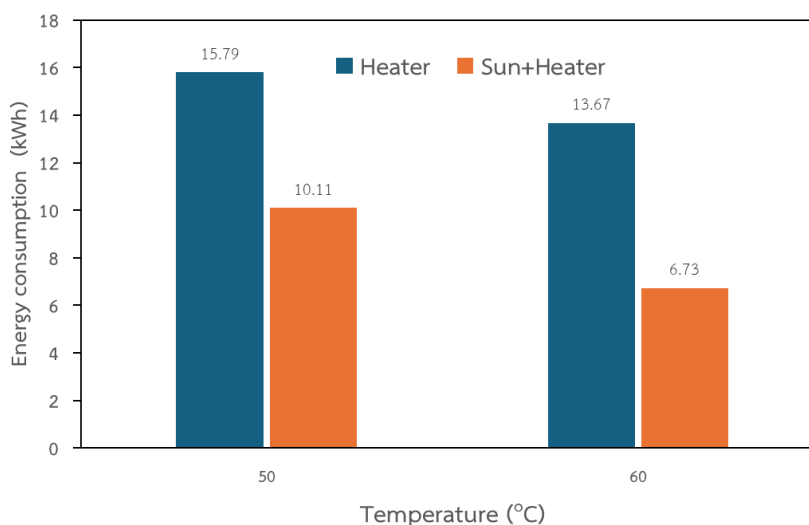


Figure 4 Energy consumption rate for drying Phulae pineapple

4. สรุป

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียวเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานมากที่สุดแต่ใช้เวลาในการอบแห้งนาน เมื่อทำการอบแห้งสับปะรดที่อุณหภูมิ 50 และ 60 °C การอบแห้งด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดคือ 15.79 และ 13.67 kW ตามลำดับ ส่วนการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะใช้พลังงานไฟฟ้า 10.11 และ 6.73 kW ตามลำดับซึ่งลดลงจากการใช้ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าการอบแห้งสับปะรดกล้วยด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60°C เป็นวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อเทียบกับการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าอย่างเดียวที่อุณหภูมิเดียวกันถึงร้อยละ 49.23 และช่วยแก้ปัญหาเรื่องระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนานของการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวโดยผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งที่ได้มีความชื้นได้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมผลไม้อบแห้งที่กำหนดไว้ว่าความชื้นไม่เกิน 18 เปอร์เซ็นต์

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทรัพย์สินทางปัญญา. 2548. ทะเบียนสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ สับปะรดภูเก็ตเชียงราย, ทะเบียนเลขที่ 49100012.
- [2] ณัฐพล ภูมิสะอาด, ละมุน วิเศษ, สุทธิวิทย์ สีทา. 2562. สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสับปะรดกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ ร่วมกับลมร้อนต้นแบบ. หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม.
- [3] บุญโชค พอตแสง. 2565. ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียโดยเครื่องอบแห้งลมร้อน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- [4] Ekka, J. P., and Kumar, D. 2023. A review of industrial food processing using solar dryers with heat storage systems. *Journal of Stored Products Research*. 101, 102090.
- [5] Kouhila, M., Moussaoui, H., Lamsyehe, H., Tagnamas, Z., Bahammou, Y., Idlimam, A., and Lamharrar, A. 2020. Drying characteristics and kinetics solar drying of Mediterranean mussel (*Mytilus galloprovincialis*) type under forced convection. *Renewable Energy*. 147, 833-844.
- [6] Mustayen, A.G.M.B., Mekhilef, S. and Saidur, R. 2014. Performance study of different solar dryers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.34, pp 463-470.

-
- [7] Thanompongchart, P., Pintana, P., and Tippayawong, N. (2022). Thermal performance enhancement in hot air and solar drying of pineapple slices with ultrasonic vibration. *Case Studies in Thermal Engineering*. 37, 102296.
- [8] AOAC. 2000. *Official Methods of AOAC International*. 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Inc. USA.
- [9] Office of Industrial Product Standards, Ministry of Industry, Bangkok. 2020. "Dried Fruit Industrial Standard," TIS. 919-2563.
- [10] วิภา ประพินอักษร และนันทา เป็งเนตร์. 2068. ผลของกระบวนการแช่แข็งต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาสับประรดแช่แข็งอบแห้ง. *วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.อีสาน*, Vol. 6(1), 1-13.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบด้วยการเสริมผงจิ้งหรีด Development of crispy rice with cricket powder

ณัฐจริย์ จิรคกุล^{1,*} และ อริยา พูลกลาง¹
Natcharee Jirukkakul^{1,*} and Areeya Phoolklang¹

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดหนองคาย

¹Department of Applied Science, Faculty of Interdisciplinary Studies, Khon Kaen University, Nong Khai

*Corresponding author: Natcharee Jirukkakul, e-mail address: pnatch@kku.ac.th

บทคัดย่อ

จิ้งหรีดจัดเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่มีศักยภาพอย่างยิ่ง การทำให้แมลงละเอียดจนเป็นผงจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยขจัดปัญหาภาพลักษณ์ที่น่ารังเกียจของแมลง และเป็นจุดเริ่มต้นของการคิดค้นอาหารใหม่ ๆ เช่น ขนมขบเคี้ยวซึ่งเป็นอาหารที่นิยมรับประทานทั่วไปทั้งเด็กและผู้ใหญ่ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพและลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีด โดยเริ่มจากการเตรียมผงจิ้งหรีดจากจิ้งหรีดสด และนำมาทดแทนแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาลีอเนกประสงค์ร้อยละ 20 ในการผลิตข้าวเกรียบ จากการวิเคราะห์สีและองค์ประกอบทางเคมีของข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีด พบว่า ข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีดมีค่าความสว่างลดลง แต่มีค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองเพิ่มขึ้นตามสีของผงจิ้งหรีด จากการวิเคราะห์องค์ประกอบอย่างหยาบของข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีดหลังทอดเทียบกับสูตรควบคุมที่ไม่มีผงจิ้งหรีดพบว่า ข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีดมีปริมาณความชื้นและไขมันลดลง แต่มีปริมาณโปรตีน เถ้า และไฟเบอร์ เพิ่มขึ้น ($p<0.05$) โดยมีปริมาณความชื้นร้อยละ 0.38 ± 0.06 ฐานเปียก มีปริมาณโปรตีน เถ้า ไขมัน และเยื่อใย ร้อยละ 4.14 ± 0.22 , 1.55 ± 0.05 , 30.07 ± 1.32 และ 1.09 ± 0.29 ฐานแห้ง ตามลำดับ การทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีดจากผู้บริโภค 30 คน พบว่า ข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีด ได้รับความพึงพอใจมากที่สุดในทุก ๆ คุณลักษณะการทดสอบ อยู่ในระดับคะแนนชอบมาก ไม่ต่างจากสูตรควบคุมที่ไม่มีผงจิ้งหรีด ($p>0.05$)

คำสำคัญ: ผงจิ้งหรีด, ข้าวเกรียบ, ลักษณะทางประสาทสัมผัส

Abstract

Crickets were considered a sustainable alternative protein source. Grinding insects into powder was one way to eliminate the negative perception of insects and serves as a starting point for developing new food products, such as snacks that were widely consumed by both children and adults. The objective of this research was to analyze the chemical and physical composition as well as the sensory characteristics of crispy rice with cricket powder. The development of crispy rice with cricket powder began with the preparation of cricket powder from fresh crickets, which was then used to replace 20% of tapioca starch and wheat flour in crispy rice production. Analyzing the color and chemical composition of the crispy rice with cricket powder revealed that their brightness decreased, while the red and yellow color values increased, aligning with the color of the cricket powder. A proximate analysis of the fried crispy rice with cricket powder compared to the control formula (without cricket powder) showed a decrease in moisture and fat content but an increase in protein, ash, and fiber content ($p<0.05$). The moisture content was $0.38\pm0.06\%$ (wet basis), while the protein, ash, fat, and fiber contents were $4.14\pm0.22\%$, $1.55\pm0.05\%$, $30.07\pm1.32\%$, and $1.09\pm0.29\%$ (dry basis), respectively. A sensory evaluation involving 30 panelists found that the crispy rice with cricket powder received the highest satisfaction ratings across all tested attributes, with scores in the like very much range, not significantly different from the control formula (without cricket powder) ($p>0.05$).

Keywords: Cricket powder, Crispy rice, Sensory evaluation

1. บทนำ

เมื่อกล่าวถึงแมลงทานได้ที่เป็นแหล่งโปรตีนคุณภาพสูงสำหรับคนและสัตว์ จิ้งหรีดจึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่มีความนิยมในการเป็นโปรตีนทางเลือก จิ้งหรีดมีการเลี้ยงเพื่อจำหน่ายเป็นอาหารเป็นจำนวนมากเนื่องจากจิ้งหรีดมีโปรตีนสูงเทียบเท่ากับปริมาณโปรตีนที่มีในเนื้อหมู เนื้อไก่ และปลา นอกจากนี้ยังมีปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายหลายชนิด นอกจากนี้ยังมีข้อดีในด้านการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และยังมีความปลอดภัยจากยาฆ่าแมลง สารเคมี โลหะหนัก และสารก่อภูมิแพ้ [1] จิ้งหรีดจัดเป็น a novel food source in Western countries [2] และเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่มีศักยภาพอย่างยิ่ง [3] Food Ingredients Asia ได้นำเสนอกระแส (Trend) อาหารและเครื่องดื่ม ปี 2020 พบว่ามีการใช้โปรตีนแทนเนื้อสัตว์และโปรตีนสายพันธุ์ใหม่ นั่นคือ โปรตีนจิ้งหรีด ซึ่งมีมูลค่าตลาดราว 6,725 ล้านบาท และมีแนวโน้มว่าจะขยายตัวร้อยละ 6.4 โดยเฉพาะการแปรรูปแมลงเพื่อใช้ทดแทนเนื้อสัตว์ซึ่งจากข้อมูลธุรกิจแมลงระดับโลก พบว่า มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงถึง 400 ล้านดอลลาร์สหรัฐ [4] และประเทศไทยถือเป็นผู้ส่งออกแมลงรายหลักของโลก เนื่องจากแมลงเป็นอาหารโปรตีนสูงที่สามารถบริโภคทดแทนเนื้อสัตว์ได้ โดยการทำให้แมลงละเอียดจนเป็นผง จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยขจัดปัญหาภาพลักษณ์ที่น่ารังเกียจของแมลง และเป็นจุดเริ่มต้นของการคิดค้นอาหารใหม่ ๆ ที่ใช้แมลงเป็นส่วนผสม โดยจิ้งหรีดผง 100 กรัม จะให้โปรตีนได้สูงถึงร้อยละ 50 ในขณะที่เนื้อสัตว์อื่น ๆ จะให้โปรตีนที่ร้อยละ 30 เท่านั้น [4] และสามารถนำแมลงมาปรุงแต่งหรือดัดแปลงเป็นส่วนหนึ่งของอาหาร เช่น ขนมอบ [5] แครกเกอร์ [6] คุกกี้ [2] snack ball [7] เป็นต้น

ในปัจจุบันผู้บริโภคต้องการขนมขบเคี้ยวที่มีความหลากหลายและต้องมีไขมัน โซเดียม และโคเรสเตอรอลต่ำ [6] ขนมขบเคี้ยวเป็นอาหารที่นิยมรับประทานทั่วไปทั้งเด็กและผู้ใหญ่ จัดเป็นอาหารที่ให้พลังงานสูง แต่ให้คุณค่าทางโภชนาการค่อนข้างน้อยเพราะอุดมไปด้วยแป้ง น้ำตาลและไขมัน แต่พลังงานเหล่านี้ปกติร่างกายได้รับเพียงพออยู่แล้วในการรับประทานอาหารปกติ ถ้ารับประทานขนมเข้าไปมากอาจทำให้ได้รับพลังงานเกินในร่างกาย ก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ตามมา เช่น โรคอ้วน โรคฟันผุ นอกจากนี้ขนมขบเคี้ยวในท้องตลาดที่มีเกลือโซเดียมเกินมาตรฐาน อาจทำให้ได้รับปริมาณโซเดียมเกิน ซึ่งจะส่งผลเสียต่อสุขภาพของเด็กได้ในอนาคต ในปัจจุบันมีขนมขบเคี้ยวที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้เหมาะสมแก่สุขภาพผู้บริโภคและพบว่าส่วนใหญ่จะเป็นขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของเมล็ดธัญพืช หรือผักผลไม้ต่าง ๆ เช่น potato crisps [8] banana crisps [9] mango crisps [10] tomato pomace crisps [11] เป็นต้น

การนำจิ้งหรีดผงมาเสริมในผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจ เหมาะสำหรับเด็กปฐมวัยและนักกีฬา การเสริมผงจิ้งหรีดส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบมีโปรตีนสูงด้วย อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่จิ้งหรีด จากที่มีการขายในรูปแบบสด แช่แข็ง แช่แข็ง หรือผงเท่านั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพและลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีด เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีด มีศักยภาพในการพัฒนาผลิตภัณฑ์สู่อุตสาหกรรมอาหารและนำสู่เชิงพาณิชย์ได้

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมผงจิ้งหรีด

นำจิ้งหรีดพันธุ์ทองดำมาล้าง จากนั้นเกลี่ยใส่ตะแกรงให้สม่ำเสมอ นำเข้าอบด้วยตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำจิ้งหรีดที่แห้งแล้วไปบด โดยใช้เครื่องบดละเอียดร่อนผ่านตะแกรง 200 เมช จะได้ผงจิ้งหรีด เก็บไว้ในตู้สุญญากาศ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทดลองสำหรับผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาลีร้อยละ 20 ด้วยผงจิ้งหรีด โดยมีผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่ไม่มีผงจิ้งหรีดเป็นสูตรควบคุม ดัง Table 1

2.2 การเตรียมผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีด

ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากผงจิ้งหรีด มีวิธีทำโดยการนำแป้งมันสำปะหลังครึ่งหนึ่งมาผสมน้ำร้อน ผสมให้เข้ากัน แล้วเติมผงจิ้งหรีด เกลือ พริกไทย กระเทียม น้ำปลา ผงชูรส ผสมให้เข้ากัน แล้วเติมแป้งมันสำปะหลังที่เหลือและแป้งสาลี นวดผสมจนเข้ากัน จนเป็นก้อน นำส่วนผสมที่ได้คลึงเป็นแท่งกลม วางลงหม้อน้ำที่ร้อนด้วยไฟตอง นำไปนึ่งด้วยน้ำเดือดจัดเป็นเวลา 25 นาที ทิ้งให้เย็น ห่อเก็บในถุงพลาสติก เก็บไว้ในตู้เย็น 1 คืน นำตัวอย่างที่เก็บไว้มาหั่นชิ้นบาง ด้วยมีด วางลงบนถาด นำไปตากแดดจนแห้งสนิท บรรจุถุงพลาสติก จะได้ข้าวเกรียบจากผงจิ้งหรีดสำเร็จรูป เมื่อนำไปทอดในน้ำมันร้อนจัด จนข้าวเกรียบพองตัว ยกออกจากเตาให้สะเด็ดน้ำมัน ทิ้งให้เย็น นำไปบรรจุถุงพลาสติก จะได้ข้าวเกรียบจากผงจิ้งหรีดพร้อมบริโภค

Table 1 Crispy rice with cricket powder formula.

Ingredients (g)	Control	Crispy rice with cricket powder
Cricket powder	-	200
Tapioca starch	835	650
Wheat flour	65	50
Sugar	15	15
Salt	5	5
Pepper powder	15	15
Garlic powder	50	50
Fish sauce	10	10
Hot water	300	300
MSG	5	5

2.3 การวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีด

การวิเคราะห์สี ด้วยเครื่องวัดสี (Color meter, JS555, China) โดยทำการวัดสีตัวอย่างละ 5 ซ้ำ ค่าที่ได้จากการวัด คือ L^* , a^* และ b^* เมื่อ L^* (The lightness factor) เป็นค่าความสว่าง ถ้าค่า L^* เข้าใกล้ศูนย์ หมายถึงวัตถุนั้นมืด ถ้าค่า L^* มีค่าเข้าใกล้ 100 แสดงว่าวัตถุนั้นมีความสว่าง a^* (The chromaticity coordinates) แสดงถึงสีแดงและสีเขียว ถ้าค่า a^* เป็นบวก (+) หมายถึงวัตถุนั้นสีแดง ถ้าค่า a^* เป็นลบ (-) แสดงว่าวัตถุนั้นสีเขียว b^* (The chromaticity coordinates) แสดงถึงสีเหลืองและสีน้ำเงิน ถ้าค่า b^* เป็นบวก (+) หมายถึง วัตถุนั้นสีเหลือง ถ้าค่า b^* เป็นลบ (-) แสดงว่าวัตถุนั้นน้ำเงิน

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย ไขมัน โปรตีน เถ้า เส้นใย และคาร์โบไฮเดรต โดยทำตามมาตรฐานการวิเคราะห์ [12] โดยวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

2.4 การทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีด

การทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัส ใช้ผู้ทดสอบทั่วไปเพื่อศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคซึ่งเป็นนักศึกษา มหาวิทยาลัยขอนแก่น วิทยาเขตหนองคาย จำนวน 30 คน ประเมินการยอมรับโดยให้คะแนนความชอบแบบ 9 Point Hedonic Scale ระดับจาก 1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 คือ ชอบมากที่สุด โดยการทดสอบคุณลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รส ความชอบ โดยรวมโดยเตรียมผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีดบรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิท ทำการประเมินในห้องปฏิบัติการภายใต้แสงสีขาว

2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลที่ได้จากการทดลองจะถูกวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยวิธี one way ANOVA test ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของชุดข้อมูลด้วยวิธี T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น $p < 0.05$ ด้วยโปรแกรม SPSS

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การวิเคราะห์ทางกายภาพ

ความสว่างและความเป็นสีแดงของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีดมีค่าลดลงจากสูตรควบคุม แต่ความเป็นสีเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มผงจิ้งหรีดที่มีสีน้ำตาล เมื่อเปรียบเทียบกับขนมขบเคี้ยวจากกะหล่ำปลีม่วง [13] พบว่าผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากผงจิ้งหรีดมีค่าความสว่างสูงกว่า และค่าความเป็นสีแดงต่ำกว่าขนมขบเคี้ยวจากกะหล่ำปลีม่วง แต่ค่าความสว่าง ความเป็นสีแดง และความเป็นสีเหลือง มีค่าสูงกว่าตำลึงแผ่น [14] ที่มีค่าความสว่าง ความเป็นสีแดง และความเป็นสีเหลือง 25.63, -5.61 และ 7.54 ตามลำดับ

3.2 การวิเคราะห์ทางเคมี

ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และเยื่อใย เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร โดยความชื้นเป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพผลิตภัณฑ์และการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารอย่างหนึ่ง เนื่องจากเมื่อความชื้นมากจะส่งผลต่อปฏิกิริยาเคมี เช่น ออกซิเดชัน และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพด้วย ตัวอย่างทั้งหมดมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 0.38-0.53 ซึ่งมีค่าน้อยมาก (ต่ำกว่าร้อยละ 13) ดังแสดงใน Table 2 จัดอยู่ในกลุ่มอาหารแห้งที่มีความปลอดภัยจากการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ [15] อย่างไรก็ตามยังคงต้องเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ที่จำกัดการแพร่ผ่านอากาศ ป้องกันการดูดความชื้นจากบรรยากาศส่งผลให้เนื้อสัมผัสอาหารเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้การสัมผัสออกซิเจนยังส่งผลให้เกิดกลิ่นหืนอีกด้วย และเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเจริญของจุลินทรีย์ตามมา โดยขนมขบเคี้ยวส่วนใหญ่มีความชื้นต่ำ เพื่อคงคุณลักษณะด้านความกรอบ เช่น ขนมขบเคี้ยวจากมะม่วง มีความชื้นร้อยละ 7 [9] ขนมขบเคี้ยวจากแครอทมีความชื้นร้อยละ 5 [16] vegetable bars มีความชื้นร้อยละ 0.3-1.2 [17] vegetable snack มีความชื้นร้อยละ 3-4 [18]

ปริมาณโปรตีนของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากผงจิ้งหรีดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มผงจิ้งหรีด เนื่องจากจิ้งหรีดมีโปรตีนสูง ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากผงจิ้งหรีดจึงมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าสูตรควบคุมและขนมขบเคี้ยวทั่วไป 2 เท่า เช่นขนมขบเคี้ยวจากข้าวโพด และ green bean มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 2.9-3.7 และร้อยละ 2.4 ตามลำดับ [19] แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากผงจิ้งหรีดเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพสำหรับผู้ที่ต้องการโปรตีน

ปริมาณไขมันลดลงตามปริมาณจิ้งหรีดผงที่เพิ่มขึ้น โดยทั้งผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากผงจิ้งหรีดและสูตรควบคุมยังคงมีปริมาณไขมันน้อยเมื่อเทียบกับขนมขบเคี้ยวอื่นๆ เช่น potato crisps ที่มีปริมาณไขมันร้อยละ 34-46 [7] โดยปริมาณไขมันจะลดลงตามอุณหภูมิน้ำมันทอดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากขนมขบเคี้ยวโดยทั่วไปเป็นการใช้น้ำมันทอดจึงส่งผลให้ปริมาณไขมันมีค่ามาก นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันด้วย

ปริมาณเถ้าบ่งบอกถึงแร่ธาตุที่อยู่ในตัวอย่าง ปริมาณเถ้าในผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากผงจิ้งหรีดมีค่าสูงกว่าสูตรควบคุม แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากผงจิ้งหรีดจึงจัดเป็นอาหารสุขภาพที่อุดมไปด้วยแร่ธาตุเหมาะสมสำหรับเด็ก หรือผู้ที่ต้องการเสริมแร่ธาตุ

ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากผงจิ้งหรีดมีปริมาณเยื่อใยประมาณร้อยละ 1.09 มีค่าสูงกว่าสูตรควบคุม และมีค่าใกล้เคียงขนมขบเคี้ยวทั่วไป เช่น ขนมขบเคี้ยวจาก bamboo shoot มีเยื่อใยร้อยละ 0.68-1.21 [20]

Table 2 Color and chemical composition of crispy rice with cricket powder.

Sample	L*	a*	b*	Moisture content (%wb)	Protein (%wb)	Ash (%wb)	Lipid (%wb)	Fiber (%wb)
Control	63.23±3.71 ^a	1.13±0.82 ^b	18.53±1.84 ^a	0.53±0.01 ^a	2.40±0.09 ^b	0.93±0.02 ^b	36.71±1.06 ^a	0.37±0.03 ^b
Crispy rice with cricket powder	49.98±5.79 ^b	5.99±1.20 ^a	21.92±1.64 ^b	0.38±0.06 ^b	4.14±0.22 ^a	1.55±0.05 ^a	30.07±1.32 ^b	1.09±0.29 ^a

The letter a and b indicates statistically significant differences ($p < 0.05$).

3.3 การทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัส

การทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากผงจิ้งหรีดจากผู้บริโภค 30 คน พบว่าผลิตภัณฑ์ทั้งหมดได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสในทุกคุณลักษณะการทดสอบในระดับชอบมาก เมื่อทดสอบแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาลี อเนกประสงค์ด้วยผงจิ้งหรีดร้อยละ 20 พบว่าความชอบด้านสีและกลิ่นลดลงเล็กน้อยจากสีน้ำตาลของผงจิ้งหรีดและกลิ่นเฉพาะของจิ้งหรีดที่คล้ายกลิ่นแมลงทอด อย่างไรก็ตามความพึงพอใจในทุกลักษณะการทดสอบมีค่าไม่แตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงดัง Figure 1

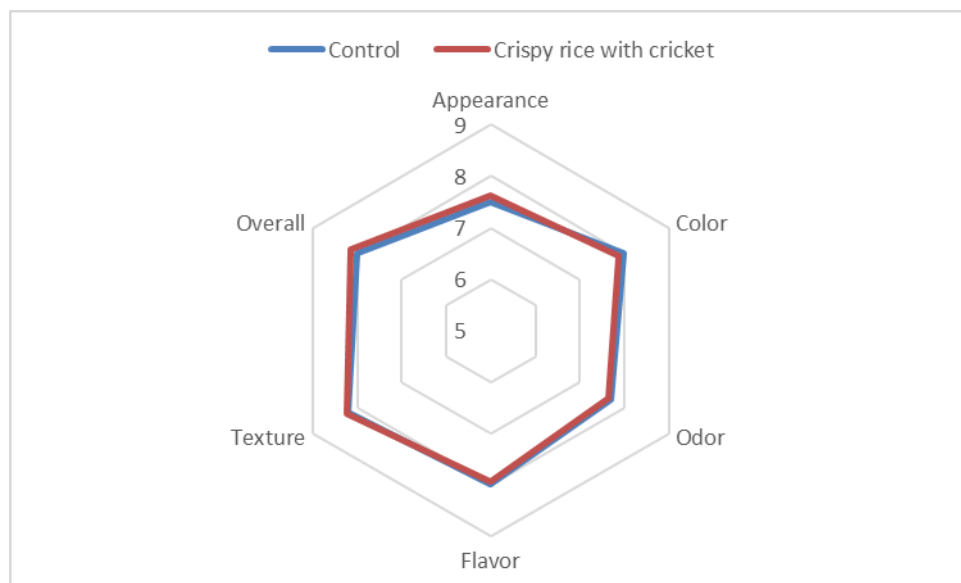


Figure 1 Sensory evaluation of crispy rice with cricket powder.

4. สรุป

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากผงจิ้งหรีด พบว่าข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีดมีปริมาณความชื้นและไขมันลดลง แต่มีปริมาณโปรตีน เถ้า และไฟเบอร์ เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) โดยมีปริมาณความชื้นร้อยละ 0.38 ± 0.06 ฐานเปียก มีปริมาณโปรตีน เถ้า ไขมัน และเยื่อใย ร้อยละ 4.14 ± 0.22 , 1.55 ± 0.05 , 30.07 ± 1.32 และ 1.09 ± 0.29 ฐานแห้ง ตามลำดับ การทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีดจากผู้บริโภค 30 คน พบว่าข้าวเกรียบเสริมผงจิ้งหรีดได้รับความพึงพอใจมากที่สุดในทุก ๆ คุณลักษณะการทดสอบ อยู่ในระดับคะแนนชอบมากไม่ต่างจากสูตรควบคุมที่ไม่มีผงจิ้งหรีด ($p > 0.05$)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับห้องปฏิบัติการและสิ่งอำนวยความสะดวกในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Frigerio J., Agostinetto, G., Galimberti, A., Mattia, F.D., Labra, M. and Bruno, A. 2020. Tasting the differences: Microbiota analysis of different insect-based novel food. *Int. Food Res.* 137: 109426. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109426>
- [2] Ribeiro, J.C., Santos, C., Lima, R.C., Pintado, M.E. and Cunha, L.M. 2022. Impact of defatting and drying methods on the overall liking and sensory profile of a cereal bar incorporating edible insect species. *Future Foods.* 6: 100190. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100190>
- [3] Suga, N., Tsumura, E., Naito, Y., Hamaguchi, I., Matsuda, S., Kawabata, K. and Sakamoto, K. 2023. Thermal stability of cricket powder and its effects on antioxidant activity, physical, and sensory properties of rice crackers. *Lebenson. Wiss. Technol.* 186: 115267. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115267>
- [4] Sanguanprasit, C. 2019. รู้ยัง! ยา ขนมหกปีนี้นี้อาจมีส่วนผสมของแมลงอยู่ก็ได้ แล้วธุรกิจแมลงโตแค่ไหน?. Available from: <https://brandinside.asia/insect-business-future/> (Access: 25 July 2024).
- [5] Amoah, I., Cobbinah, J.C., Yeboah, J.A., Essiam, F.A., Lim, J.J., Tandoh, M.A. and Rush, E. 2023. Edible insect powder for enrichment of bakery products– A review of nutritional, physical characteristics and acceptability of bakery products to consumers. *Future Foods.* 8: 100251. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100251>

-
- [6] Han, J., Janz, J.A.M. and Gerlat M. 2010. Development of gluten-free cracker snacks using pulse flours and fractions. *Int. Food Res.* 43: 627–633. <https://doi:10.1016/j.foodres.2009.07.015>
- [7] Lier, I., Heuvel, E., Mil, E. and Havemans, R.C. 2024. The value of food innovation with children: The case of insect snack balls for kids. *Food Qual. Prefer.* 118: 105199. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2024.105199>
- [8] Kita, A. Lisin'ska, G. and Gotubowska G. 2007. The effects of oils and frying temperatures on the texture and fat content of potato crisps. *Food Chem.* 102: 1–5. <https://doi:10.1016/j.foodchem.2005.08.038>
- [9] Fuente, C.I.A. La and Lopes, C.C. (2018). HTST puffing in order to produce crispy banana - The effect of the step-down treatment prior to air-drying. *Lebenson. Wiss. Technol.* 92: 324–329. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.049>
- [10] Zotarelli, M.F., Porciuncula, B.D.A. and Laurindo, J.B. 2012. A convective multi-flash drying process for producing dehydrated crispy fruits. *J. Food Eng.* 108: 523-531. <https://doi:10.1016/j.jfoodeng.2011.09.014>
- [11] Jirukkakul N. 2017. The production and development of tomato crisp from tomato pomace. *APST.* 22(2): 120-130.
- [12] AOAC. 2000. Official Methods of Analysis of AOAC International. 17th ed. AOAC International. Maryland, USA.
- [13] Mam, S., Rudra, S.G., Kundu, A., Singh, S., Joshi, A., Bhardwaj, R. and Kumar, D. 2025. Crisps from red cabbage: Process standardi-zation for nutrients retention. *Food and Humanity.* 2025: 1000555. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100555>
- [14] Saencom, S., Chiewchan, N. and Devahastin, S. 2011. Production of dried ivy gourd sheet as a health snack. *Food Bioprod. Process.* 8(9): 414–421. <https://doi:10.1016/j.fbp.2010.09.007>
- [15] Jirukkakul, N. 2022. Physical and Antioxidant Properties of Gelatin Film Mixed with Sesame Oil, Rice Bran Oil and Coconut Oil. *Int. Food Res. J.* 29(5): 1020-1031.
- [16] Chen, J., Venkitasamy, C., Shen, Q., McHugh, T.H., Zhang, R. and Pan, Z. 2018. Development of healthy crispy carrot snacks using sequential infrared blanching and hot air drying method. *Lebenson. Wiss. Technol.* 97: 469-475.
- [17] Karwacka, M., Ciurzynska, A., Galus, S. and Janowicz, M. 2022. Freeze-dried snacks obtained from frozen vegetable by-products and apple pomace – Selected properties, energy consumption and carbon footprint. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 77: 102949. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102949>
- [18] Ciurzynska, A., Marczak, W., Lenart, A. and Janowicz, M. 2020. Production of innovative freeze-dried vegetable snack with hydrocolloids in terms of technological process and carbon footprint calculation. *Food Hydrocoll.* 108: 105993. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105993>
- [19] Ciurzynska, A., Galus, S., Karwacka, M. and Janowicz, M. 2022. The sorption properties, structure and shrinkage of freeze-dried multi-vegetable snack bars in the aspect of the environmental water activity. *Lebenson. Wiss. Technol.* 171: 114090. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114090>
- [20] Santosh, O., Bajwa, H.K., Bisht, M.S. and Chongtham, N. 2021. Antioxidant activity and sensory evaluation of crispy salted snacks fortified with bamboo shoot rich in bioactive compounds. *Appl. Food Res.* 1: 100018. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2021.100018>
-

การพัฒนาระบบการวัดสนามแม่เหล็กด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi Pico สำหรับระบบการวัดสนามแม่เหล็กแบบราคาประหยัด Development of Hall Effect Sensor with Raspberry Pi Pico Microcontroller Board for Low-cost Magnetic Field Measurement System

พระนาย สุริยาสถาพร¹ บดินทร์ ดำรงศักดิ์² และ ภัทรียา ดำรงศักดิ์^{1,*}
Phranai Suriyasathaporn¹, Badin Damrongsak², and Pattareeya Damrongsak^{1,*}

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม

¹Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

² Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University Nakhon Pathom

*Corresponding author: Pattareeya Damrongsak, e-mail address: pattareeya.da@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ระบบตรวจวัดสนามแม่เหล็กกราคาประหยัดได้รับการพัฒนาเพื่อสนับสนุนการเรียนการสอนเกี่ยวกับความเข้มของสนามแม่เหล็กของขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับปริญญาตรี ระบบนี้ประกอบด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi Pico, หน้าจอแสดงผล OLED และเซ็นเซอร์ฮอลล์เชิงพาณิชย์ ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำเสนอผลการทดลองเกี่ยวกับความแม่นยำและเสถียรภาพของการวัดสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังมีการสาธิตการวัดการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของความเข้มสนามแม่เหล็กของขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้โดยใช้โพรบฮอลล์แบบเชิงพาณิชย์ (Go Direct® 3-Axis Magnetic Field Sensor) และโพรบฮอลล์ที่สร้างจากงานวิจัยนี้ (เซ็นเซอร์ฮอลล์ เบอร์ 49E075BG) มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีและมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างสูงสุดอยู่ที่ 1.24% และ 0.10% ตามลำดับ

คำสำคัญ: ปรากฏการณ์ฮอลล์, ไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi Pico, ระบบตรวจวัดสนามแม่เหล็ก

Abstract

An inexpensive magnetic sensing system has been developed to support teaching and learning of the magnetic field strength of Helmholtz coils in undergraduate physics laboratory. The system is composed of a Raspberry Pi Pico microcontroller board, a OLED display and a commercial hall sensor. Experimental results for the precision and stability of magnetic field measurement are presented. Moreover, the measurement of the spatial distribution of the field strength of Helmholtz coils is demonstrated. The experimental results show that the magnetic field values measured using a commercial Hall probe (Go Direct® 3-Axis Magnetic Field Sensor) and the Hall probe developed in this study (49E075BG Hall Effect Sensor) are close to the values calculated from theory, with maximum percentage differences of 1.24% and 0.10%, respectively.

Keywords: Hall effect, Raspberry Pi Pico microcontroller, Magnetic sensing system

1. บทนำ

การวัดสนามแม่เหล็กมีส่วนสำคัญในการศึกษาวิชาฟิสิกส์ ที่ช่วยให้มีความเข้าใจวิทยาศาสตร์พื้นฐาน รวมไปถึงการประยุกต์ใช้งานจริง วิธีที่สะดวกและมีความน่าเชื่อถือวิธีหนึ่งคือการใช้เซ็นเซอร์ฮอลล์ (Hall Effect Sensor) ที่ทำงานโดยการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กกระทบกับวัสดุที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน [1] ซึ่งมีประโยชน์ในการศึกษางานวิจัย รวมถึงส่งเสริมการเรียนการสอนให้กับนักศึกษาในหัวข้อแม่เหล็กและไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับมหาวิทยาลัย การทดลองเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก เป็นเรื่องสำคัญที่ช่วยสอนนักศึกษาให้เข้าใจหลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้กันทั่วไปคือขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ ซึ่งเป็นขดลวดสองวงที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการและวางห่างกันในระยะเท่ากัระยะรัศมี เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอตรงกลาง [2] ซึ่งเป็นวิธีที่ดีในการศึกษาพฤติกรรมของสนามแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามอุปกรณ์วัดปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นมีราคาที่สูง สำหรับสถานศึกษาหรือห้องปฏิบัติการที่มีงบประมาณจำกัด จะสามารถเข้าถึงการใช้งานอุปกรณ์ได้ค่อนข้างยาก

การพัฒนาระบบวัดสนามแม่เหล็กแบบราคาประหยัดได้มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ศึกษาพัฒนาระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยใช้เซ็นเซอร์ฮอลล์ควบคู่กับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ซึ่งสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้ในระดับความแม่นยำปานกลาง แต่มีข้อจำกัดด้านการประมวลผลข้อมูลแบบตามเวลาจริง [3] อีกงานวิจัยหนึ่งได้นำเสนอการใช้ Raspberry Pi ในการวัดสนามแม่เหล็กโดยเน้นการใช้งานในห้องปฏิบัติการ [4] ซึ่งมีต้นทุนที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับ Raspberry Pi Pico

ทางคณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาระบบที่มีค่าใช้จ่ายต่ำแต่มีประสิทธิภาพสูง โดยการใช้เซ็นเซอร์ฮอลล์ ร่วมกับการแสดงผลผ่านจอแสดงผล OLED โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi Pico ที่ใช้งานง่ายและมีราคาถูก [5] เหมาะสำหรับใช้ในการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติการในระดับปริญญาตรี โดยเฉพาะในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คณะผู้วิจัยใช้เทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กของขดลวดเฮล์มโฮลตซ์ โดยใช้เซ็นเซอร์ฮอลล์ ที่แสดงประสิทธิภาพการทำงานได้ดีมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเซ็นเซอร์เชิงพาณิชย์ ซึ่งจะทำให้การเรียนการสอนในหัวข้อเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระดับปริญญาตรี มีความสะดวกและเข้าถึงได้ตามสถาบันต่าง ๆ มากขึ้น

2. วิธีการศึกษา

การพัฒนาระบบการวัดสนามแม่เหล็กโดยการแสดงผลผ่าน OLED โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi Pico และเซ็นเซอร์ฮอลล์ เบอร์ 49E075BG [6] วัดขนาดแรงดันไฟฟ้าขาออก และสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นกับสนามแม่เหล็ก นำสมการที่ได้ไปกำหนดให้โปรแกรมให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi Pico แสดงผลผ่านจอ OLED และเปรียบเทียบผลการวัดกับสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณผ่านทฤษฎีบทบิโอต-ซาวาร์ต และสนามแม่เหล็กที่วัดได้โดยใช้ 3-Axis Magnetic Field Sensor ของบริษัท Vernier Science Education โดยแบ่งหัวข้อการศึกษาดังต่อไปนี้:

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้
2. วิธีการทดลอง
3. การวิเคราะห์ข้อมูล

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

ขดลวดเฮล์มโฮลตซ์ (Helmholtz coils) เป็นขดลวดสองวงที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการและวางห่างกันในระยะเท่ากับระยะรัศมี เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอตรงกลาง ณ ศูนย์กลางของระบบ

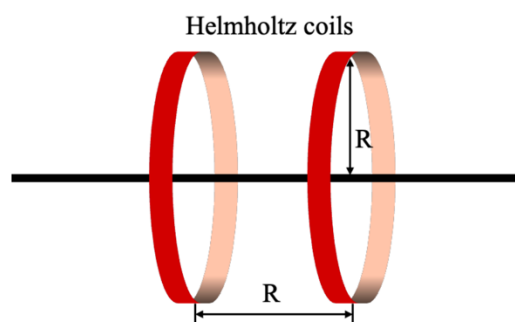


Figure 1 Illustration of Helmholtz coils system, which positioned parallel to each other with a separation equal to their radius.

สามารถพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณ จากทฤษฎีบทบิโอต-ซาวาร์ต $B = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^2}$ ดังสมการ [2]:

$$B = \frac{\mu_0 N I R^2}{2} \left[\frac{1}{\left[R^2 + \left(\frac{R}{2} + x \right)^2 \right]^{3/2}} + \frac{1}{\left[R^2 + \left(\frac{R}{2} - x \right)^2 \right]^{3/2}} \right] \quad (1)$$

ซึ่งเป็นผลรวมของสนามแม่เหล็กเนื่องจากขดลวดทั้งสองวง เมื่อ μ_0 คือ ค่าความซึมซาบได้ของสุญญากาศ มีค่าประมาณ $4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ [2]. N คือ จำนวนรอบของขดลวด ซึ่งมีค่า $N = 154$ ที่ได้จากการนับในการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดลอง I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดจากแหล่งจ่ายไฟตรง R คือ รัศมีของขดลวดเฮล์มโฮลตซ์ ในที่นี้คือ 20 เซนติเมตร ได้จากการวัดโดยใช้ตลับเมตร และ x คือ ตำแหน่งที่วัดขนาดสนามแม่เหล็กในที่นี้มีค่าเป็น 0 เนื่องจากวัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบขดลวด จะได้ว่า:

$$B = \frac{8\mu_0 NI}{\sqrt{125R}} \quad (2)$$

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi Pico เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งานง่าย มีราคาถูก สามารถใช้ในการเขียนโปรแกรมได้หลากหลายภาษา เช่น C/C++ และ Python อีกทั้งยังเป็นภาษาที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานเริ่มต้นที่มีพื้นฐานทางการเขียนโปรแกรมน้อย [7] เหมาะสำหรับใช้ในการจัดการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติการในระดับปริญญาตรี



Figure 2 The Raspberry Pi Pico microcontroller board

เซ็นเซอร์ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect sensor) เบอร์ 49E075BG ทำงานภายใต้สนามแม่เหล็ก เมื่อจ่ายไฟเลี้ยงกระแสตรงขนาด 2.3 ถึง 10 โวลต์ และทำงานภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด ± 1000 เกาส์มีค่าความไว (sensitivity) ที่ 1.4 ถึง 3.0 mV/G [6]



Figure 3 49E075BG Hall effect sensor

Go Direct[®] 3-Axis Magnetic Field Sensor เป็นเซ็นเซอร์วัดขนาดสนามแม่เหล็กแบบ 3 แกน ผลิตโดย บริษัท Vernier Science Education ใช้หลักการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก จำนวนขดลวด และกระแสไฟฟ้าที่จุดกึ่งกลางของขดลวด มีพิสัยการวัดที่ ± 50 เกาส์ ถึง ± 1300 เกาส์ ในช่วงอุณหภูมิ -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส เชื่อมต่อผ่านสาย USB หรือผ่านบลูทูธ เข้ากับแอปพลิเคชัน Vernier Graphical Analysis[®] [8]



Figure 4 Go Direct[®] 3-Axis Magnetic Field Sensor

2.2 วิธีการทดลอง

การพัฒนาระบบการวัดสนามแม่เหล็กโดยการแสดงผลผ่าน OLED โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi Pico เริ่มต้นจากการออกแบบและดำเนินการทดลองอย่างเป็นขั้นต้น เพื่อให้ได้ระบบที่สามารถวัดขนาดสนามแม่เหล็กจากขดลวดเฮล์มโฮลตซ์ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ

การพัฒนาระบบการวัดสนามแม่เหล็กโดยการแสดงผลผ่าน OLED โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi Pico เริ่มต้นจากการออกแบบและดำเนินการทดลองอย่างเป็นขั้นต้น เพื่อให้ได้ระบบที่สามารถวัดขนาดสนามแม่เหล็กจากขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ

จัดวางขดลวด 2 ชุด ให้ห่างกันระยะ 20 เซนติเมตร ซึ่งเท่ากับรัศมีของขดลวด และจ่ายกระแสไหลผ่านขดลวดทั้งสองซึ่งต่อกันแบบอนุกรม ดัง Figure 5 เนื่องจากจะทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดทั้งสองวงมีขนาดที่เท่ากัน [9] ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีขนาดเท่ากัน

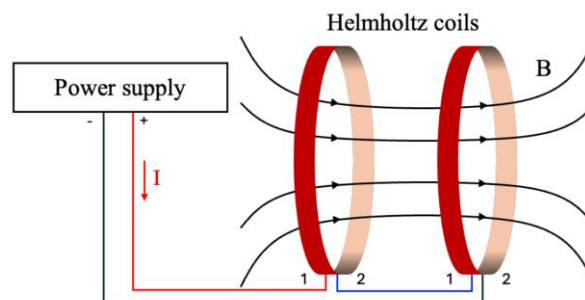


Figure 5 The connection diagram of DC power supply to the Helmholtz coil system and the direction of the magnetic field generated by the electric current.

เริ่มต้นการวัดการกระจายตัวของความเข้มสนามแม่เหล็กของขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ โดยใช้อุปกรณ์ 3-Axis Magnetic Field Sensor จากนั้นจ่ายกระแสให้ไหลผ่านขดลวด 0-3 แอมแปร์ (ปรับเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 แอมแปร์) และทำการวัดสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งกึ่งกลางของขดลวดโดยใช้ 3-Axis Magnetic Field Sensor และเซนเซอร์ฮอลล์

ต่อขา VCC ของ 49E075BG เข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 3.3 โวลต์ และขา GND กับไฟกระแสตรงขนาด 0 โวลต์ [6] จากนั้นใช้มัลติมิเตอร์วัดขนาดแรงดันขาออกของเซ็นเซอร์ (V_{out}) เทียบกับ GND ในขณะที่ยังไม่มีกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด ให้ค่าแรงดันที่ได้นี้เป็นค่าแรงดันเริ่มต้น (V_0) จากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้า 0.5 – 3 แอมแปร์ ทุก ๆ 0.5 แอมแปร์ ซ้ำเป็นจำนวน 10 ครั้ง และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกเฉลี่ยของเซ็นเซอร์ที่ได้จากการทดลองทั้ง 10 ครั้ง กับค่าสนามแม่เหล็กในหน่วยเกาส์ (G)

เชื่อมต่อ 49E075BG และ OLED เข้าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi Pico จากนั้นเขียนโปรแกรมให้แสดงผลค่าสนามแม่เหล็กโดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ผ่านมา และแสดงผลผ่าน OLED แสดงวงจรถัด Figure 6

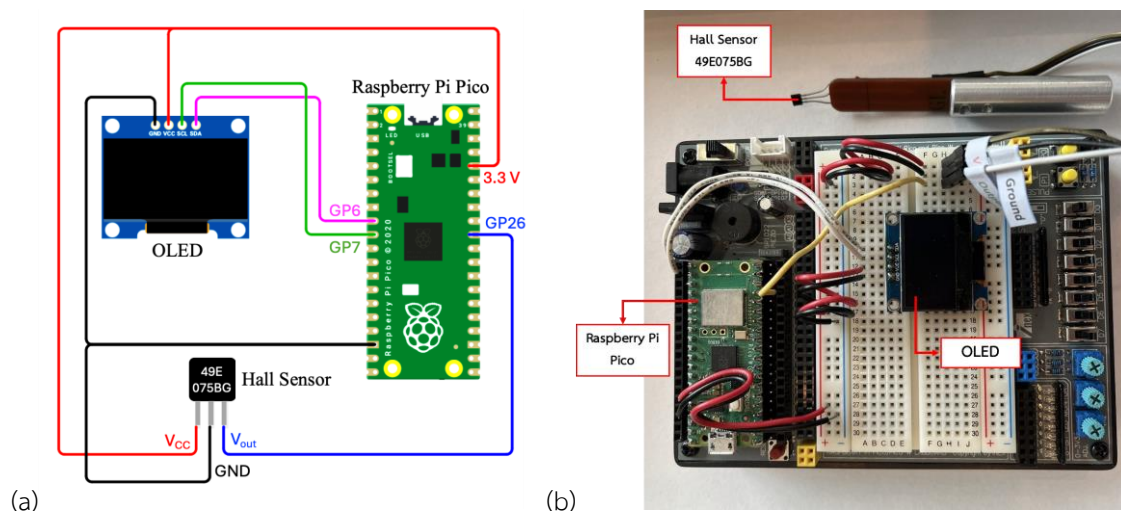


Figure 6 The figure shows: (a) a diagram, and (b) a real image of developed system.

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

คณะผู้วิจัยรวบรวมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูล โดยการทำการทดลองวัดขนาดสนามแม่เหล็กซ้ำ 10 ครั้ง ทุก ๆ ค่ากระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ ตั้งแต่ 0 ถึง 3 แอมแปร์ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในผลการทดลอง และจะนำค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการความสัมพันธ์จากการทดลองด้วย 49E075BG ($B_{\text{experimental}}$) และการทดลองด้วย 3-Axis Magnetic Field Sensor มาเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีบทบิโต์-ซาวาร์ต (สมการที่ 2) ($B_{\text{calculated}}$) โดยใช้:

$$\% \text{Difference} = \frac{2|B_{\text{calculated}} - B_{\text{experimental}}|}{B_{\text{calculated}} + B_{\text{experimental}}} \times 100\% \quad (3)$$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

เริ่มต้นด้วยการวัดการกระจายตัวของความเข้มสนามแม่เหล็กของขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ โดยใช้อุปกรณ์ 3-Axis Magnetic Field Sensor แสดงดัง Figure 7

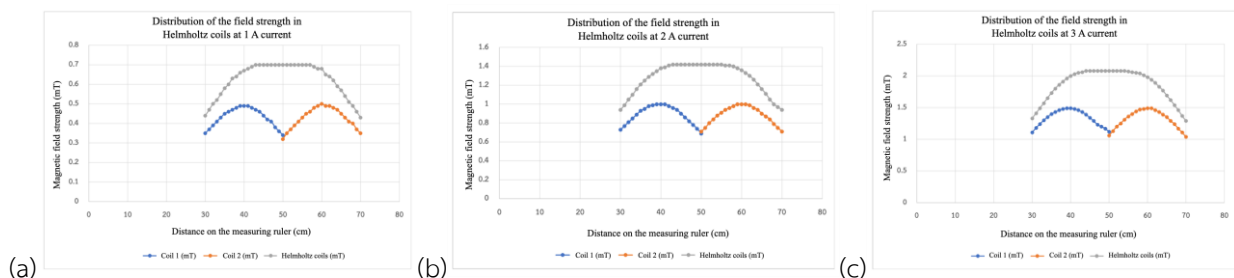


Figure 7 Distribution of the magnetic field strength. While x-axis shows the distance on the measuring ruler lies perpendicular to the center of the coils in centimeters unit, and y-axis shows the magnetic field strength in mT unit (1 mT = 10 Gauss)

จากการวิเคราะห์โดยใช้เซนเซอร์ปรากฏการณ์ฮอลล์ เบอร์ 49E075BG ทดลองวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กจำนวน 10 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัด Figure 8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก (V_{out} หรือ V_{Hall}) และค่าสนามแม่เหล็ก (B_{Hall}) และ Figure 9 แสดงค่าความแม่นยำของระบบการวัดที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ

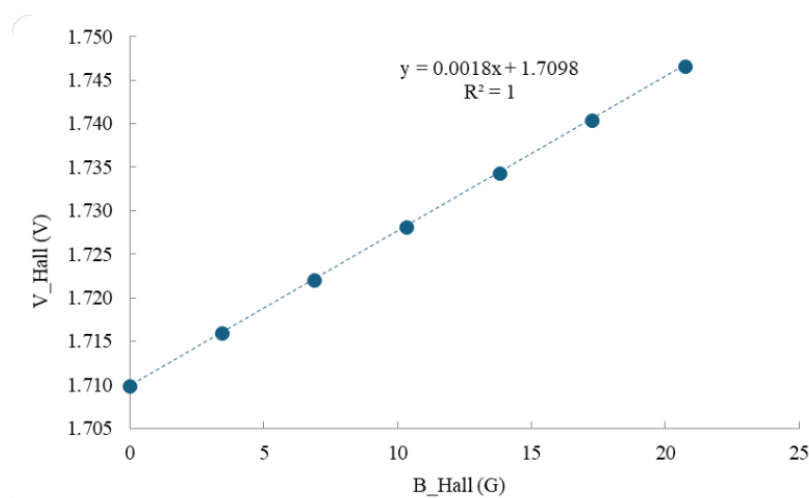


Figure 8 Output voltage (V_{Hall}) and magnetic field (B_{Hall}) of Hall magnetic sensor.

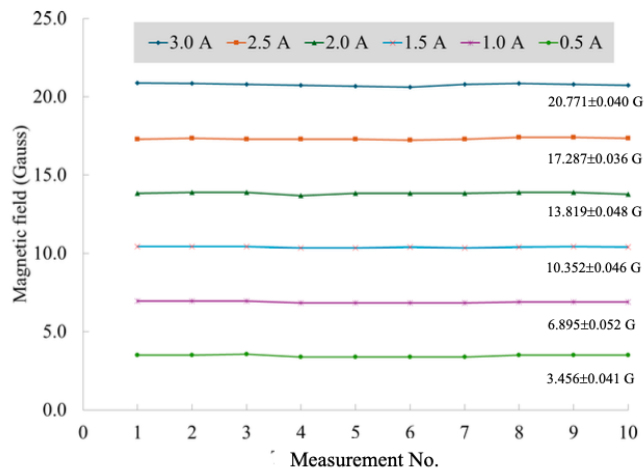


Figure 9 Magnetic field at the center of Helmholtz coils for currents ranging from 0.5 to 3.0 A.

จาก Figure 7 สามารถวิเคราะห์ความไวของเซ็นเซอร์ได้จากความชันของสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น ได้ประมาณ 1.81 mV/G ซึ่งสอดคล้องกับค่าตามในเอกสารข้อมูล [6] ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์:

$$V_H = (1.81 \times 10^{-3} \text{ V/G})B_H + V_0 \quad (4)$$

เมื่อ V_0 คือ ค่าแรงดันขาออกเริ่มต้น ที่สนามแม่เหล็ก $B_H = 0$

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเชิงทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 2 และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดลองแสดงดัง Table 2 พบว่าค่าความแตกต่างสูงสุดระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณเชิงทฤษฎีของความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ที่ประมาณ 1.24 % สำหรับ 3-Axis Magnetic Field Sensor และที่ 0.10 % สำหรับเซ็นเซอร์ฮอลล์เบอร์ 49E075BG โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้เกิดได้จากการหลายปัจจัย เช่น การใช้ขดลวดเฮล์มโฮลตซ์วงเดียวกันในการเปรียบเทียบเซ็นเซอร์และทดลอง หรืออาจเกิดขึ้นจากความไวของเซ็นเซอร์ที่แตกต่างกัน หรือแม้กระทั่งการรบกวนของสนามแม่เหล็กภายนอก เช่น สนามแม่เหล็กโลก หรือจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ใกล้เคียง

Table 1 The linear relationship of the magnetic field measured by both types of sensors compared to the calculated value graph.

Current (A)	Magnetic field magnitude (G)		
	Calculated (using Equation 2)	Experimental (using 3-Axis magnetic field sensor)	Experimental (using 49E075BG Hall sensor)
0.5	3.462	3.426	3.456
1.0	6.924	7.123	6.895
1.5	10.385	10.908	10.352
2.0	13.847	14.553	13.819
2.5	17.309	18.187	17.287
3.0	20.771	21.710	20.771

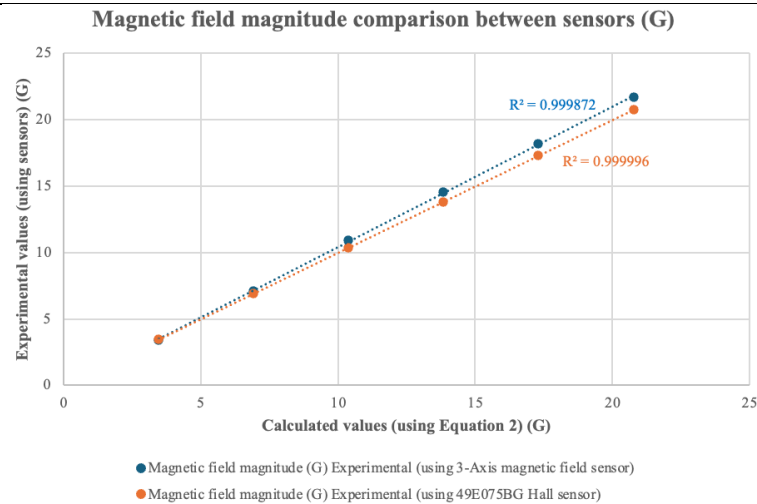


Figure 10 The comparison of the measured magnetic field magnitudes from two different sensors with the calculated values. The R-squared for the 49E075BG Hall sensor is slightly higher than that of the 3-Axis magnetic field sensor, indicating that the 49E075BG Hall sensor has a slightly better linear correlation with the calculated values.

Table 2 The calculated magnetic fields at the center of the coils calculated by using Equation 2 and the experimental results:

(a) By using 3-Axis magnetic field sensor

Current (A)	Magnetic field magnitude (G)		Percentage Difference (%)	Percentage Error (%)	Standard Deviation (G)
	Calculated (using Equation 2)	Experimental (using sensor)			
0.5	3.462	3.426	0.26	1.02	-
1.0	6.924	7.123	0.71	2.88	-
1.5	10.385	10.908	1.23	5.03	-
2.0	13.847	14.553	1.24	5.10	-
2.5	17.309	18.187	1.24	5.07	-
3.0	20.771	21.710	1.11	4.52	-

(b) By using 49E075BG Hall effect sensor

Current (A)	Magnetic field magnitude (G)		Percentage Difference (%)	Percentage Error (%)	Standard Deviation (G)
	Calculated (using Equation 2)	Experimental (using sensor)			
0.5	3.462	3.456	1.02	0.97	0.081
1.0	6.924	6.895	2.88	1.14	0.151
1.5	10.385	10.352	5.03	0.88	0.244
2.0	13.847	13.819	5.10	0.82	0.309
2.5	17.309	17.287	5.07	0.75	0.387
3.0	20.771	20.771	4.52	0.72	0.460

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ งานวิจัยนี้มีการปรับปรุงในแง่ของต้นทุนและความแม่นยำในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก ใน [3] พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงถึง 5% ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถปรับปรุงในส่วนนี้ได้ ส่วนใน [4] มีความแม่นยำที่ได้ใกล้เคียงกับในงานวิจัยนี้ แต่มีต้นทุนที่สูงและใช้พลังงานมากกว่าในส่วนของการประมวลผล อย่างไรก็ตาม ใน [4] มีช่วงการวัดของสนามแม่เหล็กที่มากกว่า (สูงสุด 1000 G)

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงการออกแบบและพัฒนาระบบการวัดขนาดความเข้มสนามแม่เหล็กของระบบขดลวดเฮล์มโฮลทซ์โดยการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ฮอลล์กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi Pico เพื่อใช้ในการแสดงผล ซึ่งมีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่า และได้แสดงถึงปริมาณทางการวัด เช่น ความเป็นเชิงเส้น ความไวในการวัด ความเที่ยงตรง และความแม่นยำในการวัด ค่าแรงดันขาออกของเซ็นเซอร์มีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของสนามแม่เหล็ก และพบว่าผลการทดลองที่ได้แสดงผลความแตกต่างจากค่าสนามแม่เหล็กเชิงทฤษฎีมีค่าน้อยกว่า 0.10 % ซึ่งความแตกต่างนี้เกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ความไวของเซ็นเซอร์ หรือวิธีการสอบเทียบเครื่องมือ ซึ่งหากมีการการศึกษา ปรับปรุง และพัฒนาระบบการวัดสนามแม่เหล็กและคุณลักษณะของเซ็นเซอร์ จะสามารถช่วยในการอธิบายความแตกต่างนี้ได้ดียิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ขาณณรงค์ น้อยบางยาง. 2562. การตรวจวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ HALL EFFECT SENSORS. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)
- [2] อัญญพ นิลกำจร, พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริ, เสริมสุข รัตเร่ง, วิวัฒน์ เครือวงศ์, รุติพงศ์ เครือหงส์, ณัฐนรี ธรรมเนตร, มณฑา เอี่ยมสมบูรณ์ และสร้อยรส พงษ์ธรรม. 2553. การคำนวณเชิงตัวเลขและสร้างขดลวดสนามแม่เหล็กแบบเฮล์มโฮลทซ์
- [3] Wissarut Puaypung and Suttida Rakkapao. 2018. A low-cost Arduino microcontroller for measuring magnetic fields in a solenoid. J. Phys.: Conf. Ser. 1144 012125.
- [4] Natarajan Shriethar, Narmadha Chandramohan and Chandramohan Rathinam. 2022. Raspberry Pi-based Sensor Network for Multi-purpose Nonlinear motion detection in laboratories using MEMs. Revista de Fisica, No. 65.
- [5] Eve, K. and Matthew, C. 2022. Evaluating the Use of MicroPython and the Raspberry Pi Pico in Laboratory Activities for Undergraduate Classes in Engineering Electromagnetics. American Society for Engineering Education.
- [6] YANGZHOU POSITIONING TECH. CO., LTD. 49E Hall-Effect Linear Position Sensor. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://p.globalsources.com/IMAGES/PDT/SPEC/440/K1139513440.pdf> (เข้าถึงเมื่อ 14 มีนาคม 2568).
- [7] IoT Engineering Education. 2566. การเขียนโปรแกรม MicroPython สำหรับบอร์ด Raspberry Pi Pico / Pico-W#. เข้าถึงได้จาก : https://iot-kmutnb.github.io/blogs/micropython/micropython_rpi_pico/#raspberry-pi-pico (เข้าถึงเมื่อ 14 มีนาคม 2568)
- [8] Vernier Science Education. Go Direct® 3-Axis Magnetic Field Sensor. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ https://www.vernier.com/product/go-direct-3-axis-magnetic-field-sensor/?srsltid=AfmBOOrNnnrtE9jn401KaxRjITfcxpQmrmY4MEVxf1ctxwOPyABAXi_i (เข้าถึงเมื่อ 15 มีนาคม 2568)
- [9] Accel Instruments. Helmholtz Coil Techniques for Producing High-Frequency AC Helmholtz Application Note เข้าถึงได้จาก : <https://www.accelinstruments.com/Helmholtz-Coil/Helmholtz-Coil.html> (เข้าถึงเมื่อ 14 มีนาคม 2568).

การประเมินฤทธิ์ทางชีวภาพด้านเวชสำอางของเห็ดหลินจือป่าในประเทศไทยที่เจริญบนวัสดุเพาะแตกต่างกัน Evaluation of Bioactive Activities Related to Cosmeceuticals of Wild Thailand *Ganoderma* Mushrooms Grown under Different Cultivating Substrates

จิรนนท์ ภิรมย์ฤทธิ์¹ เยาวภา อร่ามศิริจุฑา¹ และ ชุรภา ธีรภัทรสกุล^{1,*}

Jiranan Piromrit¹, Yaovapa Armsirujit¹ and Churapa Teerapatsakul^{1,*}

¹ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร

¹Department of Microbiology, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok

*Corresponding author: Churapa Teerapatsakul, e-mail address: fscipt@ku.ac.th

บทคัดย่อ

เห็ดเป็นแหล่งอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและมีสรรพคุณทางยา โดยเฉพาะเห็ดหลินจือซึ่งเป็นเห็ดที่มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น ต้านจุลินทรีย์ ต้านอนุมูลอิสระ และต้านการอักเสบ งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพด้านเวชสำอางและปริมาณผลผลิตของดอกเห็ดหลินจือป่าจากประเทศไทย ที่เจริญบนวัสดุเพาะเชื้อเลี้ยงที่เตรียมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ชี้เลื่อยไม้ทุเรียน ชี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส ชี้เลื่อยไม้สน และชี้เลื่อยไม้สัก ปรับสัดส่วนด้วยชี้เลื่อยไม้ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 ผลการทดลองพบว่าเห็ดหลินจือป่าที่เพาะเลี้ยงบนก้อนวัสดุเพาะที่มีชี้เลื่อยไม้ทุเรียนผสมกับชี้เลื่อยไม้ยางพาราในอัตราส่วน 25:75 ให้ปริมาณผลผลิตดอกเห็ดสูงสุด ในขณะที่สารสกัดจากดอกเห็ดที่เพาะเลี้ยงบนก้อนวัสดุเพาะชนิดชี้เลื่อยไม้ทุเรียนผสมกับชี้เลื่อยไม้ยางพาราในอัตราส่วน 75:25 มีฤทธิ์ทางชีวภาพดีที่สุด โดยแสดงฤทธิ์ต้านแบคทีเรียก่อสิวชนิด *Cutibacterium acnes*, *Staphylococcus epidermidis* และ *S. aureus* นอกจากนี้ยังแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างเม็ดสีเมลานิน ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าเห็ดหลินจือป่าในประเทศไทยมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นสารออกฤทธิ์ทางเวชสำอางที่มาจากธรรมชาติ ซึ่งมีศักยภาพที่จะนำไปต่อยอดในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางต่อไป ชี้เลื่อยไม้ทุเรียนยังสามารถนำมาใช้ทดแทนหรือใช้ร่วมกับชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่มีราคาแพง และผลผลิตเห็ดที่ได้มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีสมบัติดีกว่าเดิม

คำสำคัญ: เห็ดหลินจือ, ชี้เลื่อยไม้, ฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย, ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ, ฤทธิ์ต้านไทโรซิเนส

Abstract

Mushrooms are high nutrition and possess medicinal properties, particularly *Ganoderma* sp., which contains bioactive compounds with antimicrobial, antioxidant, and anti-inflammatory properties. This study aimed to investigate bioactive activities related to cosmeceuticals of wild Thailand *Ganoderma* Mushrooms grown under different cultivating substrates from agricultural waste materials, including durian wood sawdust, eucalyptus wood sawdust, pine wood sawdust, and teak wood sawdust, with varying proportions adjusted with rubber wood sawdust at 25%, 50%, 75%, and 100%. The results showed that *Ganoderma* sp. cultivated on a substrate containing durian and rubber wood sawdust at a 25:75 ratio yielded the highest fruiting body production. The extracts from fruiting bodies grown on durian and rubber wood sawdust at 75:25 ratio exhibited the greatest bioactivities, with high antibacterial activity against acne-causing bacteria including *C. acnes*, *S. epidermidis*, and *S. aureus*. Additionally, the extracts displayed significant antioxidant activity and tyrosinase inhibition, which are crucial for melanogenesis regulation. These findings highlight the potential of *Ganoderma* sp. as a natural bioactive ingredient for cosmeceutical applications. Durian wood sawdust can be used as an alternative substrate to replace or use as co-substrate with an expensive rubber wood sawdust, yielding the mushroom fruiting bodies with improved biological activities.

Keywords: Antibacterial activity, Antioxidant activity, *Ganoderma* sp., Sawdust, Tyrosinase inhibition

1. บทนำ

เห็ดเป็นแหล่งอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายและอุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการที่สำคัญหลากหลายชนิด ไม่เพียงแต่ประโยชน์ทางด้านอาหารเท่านั้น เหดยังมีสรรพคุณทางการแพทย์และเภสัชกรรม เนื่องจากมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ เช่น สารต้านจุลินทรีย์ สารต้านอนุมูลอิสระ และสารต้านการอักเสบ ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวทำให้สารสกัดจากเห็ดถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เวชสำอาง ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม และยา [1] ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีความอุดมสมบูรณ์และมีความหลากหลายทางชีวภาพ สามารถพบการเจริญเติบโตของเห็ดได้ในพื้นที่ป่าทั่วประเทศ เป็นที่ทราบดีของกลุ่มนักวิจัยเห็ดว่ายังมีเห็ดป่าอีกจำนวนมากที่ยังไม่เคยนำมาศึกษาอย่างจริงจังเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ ส่งผลให้ขาดการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในการนำเห็ดป่าสายพันธุ์พื้นเมืองมาวิจัยและพัฒนาต่อยอดเพื่อผลิตเป็นสายพันธุ์ทางการค้า ตลอดจนการทดลองนำมาสกัดเพื่อนำสารสกัดที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพมาพัฒนาต่อยอดเพื่อเป็นอาหารเสริม ยา และเครื่องสำอางนั้นมีอยู่น้อย ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการวิจัยและพัฒนาทางการสกัดสารจากเห็ดเพื่อนำมาทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพมากขึ้นก็ตาม แต่เห็ดส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นเห็ดสายพันธุ์ที่มีการผลิตขายในท้องตลาดและหลายสายพันธุ์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ มีรายงานวิจัยพบว่าเห็ดป่ามีคุณสมบัติเกี่ยวกับการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าเห็ดที่เพาะเลี้ยงในโรงเรือน

มีรายงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของวัสดุเพาะที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตดอกเห็ดและองค์ประกอบของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในเห็ด โดยเฉพาะสารสำคัญในกลุ่มโปรตีนและโพลีแซ็กคาไรด์ มีรายงานการศึกษาเปรียบเทียบการเพาะเห็ดนางรมหัว หรือ *Pleurotus tuber-regium* บนวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ฟางข้าว ชานอ้อย แกลบ และขี้เลื่อย พบว่าการเพาะเห็ดนางรมหัวบนวัสดุฟางข้าวให้ผลผลิตดอกเห็ดสูงที่สุด และดอกเห็ดที่เจริญบนวัสดุฟางข้าวยังมีปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตสูงกว่าดอกเห็ดที่เจริญบนวัสดุเพาะชนิดอื่นอีกด้วย [2] ดังนั้นงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาเห็ดหลินจือป่า หรือ *Ganoderma* spp. ที่เก็บตัวอย่างได้จากป่าในประเทศไทย นำมาเพาะเลี้ยงบนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ เพื่อเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับผู้ประกอบอาชีพเพาะเห็ด และมีวัสดุทดแทนขี้เลื่อยไมยางพาราที่ปัจจุบันมีราคาแพง จะเป็นการลดต้นทุนการผลิตและนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ขี้เลื่อยไม้ทุเรียน ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส ขี้เลื่อยไม้สน และขี้เลื่อยไม้สัก โดยใช้ขี้เลื่อยไมยางพาราเป็นวัสดุหลักในการปรับสัดส่วนเพื่อเตรียมเป็นก้อนวัสดุเพาะเลี้ยง ในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 ทำการศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพด้านเวชสำอางของสารสกัดจากเห็ดหลินจือป่าที่เจริญบนวัสดุเพาะแตกต่างกัน ฤทธิ์ทางเวชสำอางที่ศึกษา ได้แก่ ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียก่อสิว ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส

2. วิธีการศึกษา

สายพันธุ์เห็ดป่า และการเตรียมก้อนวัสดุเพาะเลี้ยงเห็ด

เชื้อเห็ดหลินจือป่าไอโซเลท TAFRS018 และ TAFRS036 ที่คัดแยกให้บริสุทธิ์ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ นำมาเพาะเลี้ยงบนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ขี้เลื่อยไม้ทุเรียน ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส ขี้เลื่อยไม้สน ขี้เลื่อยไมยางพารา และขี้เลื่อยไม้สัก ทำการเตรียมก้อนวัสดุเพาะเลี้ยงแต่ละชนิดให้อยู่ในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยใช้ขี้เลื่อยไมยางพาราเป็นตัวปรับสัดส่วนสูตรอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงเห็ดหลินจือประกอบด้วย ขี้เลื่อยไม้ 100 กิโลกรัม รำละเอียด 1.5 กรัม และติเกลือ 200 กรัม

การเตรียมหัวเชื้อเห็ด

นำเส้นใยเห็ดบริสุทธิ์ที่เจริญบนอาหาร Potato dextrose agar (PDA) เพาะลงในขวดที่บรรจุเมล็ดข้าวฟ่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นาน 15 นาที เมื่อเส้นใยเจริญเต็มขวดเมล็ดข้าวฟ่างแล้วจึงนำหัวเชื้อที่ได้ไปเพาะเลี้ยงในก้อนวัสดุเพาะที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแล้ว จากนั้นนำไปบ่มในโรงเรือนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2-3 เดือน ทำการเก็บดอกเห็ดมาชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

การเตรียมสารสกัดจากดอกเห็ด

นำดอกเห็ดมาสกัดด้วยสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้น 95% เขย่าบน Rotary shaker ที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบาง นำสารละลายของเหลวที่ได้ไประเหยเอาเอทานอลออกด้วยเครื่องระเหยแบบสุญญากาศ (Rotary evaporator) และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยเอทานอลที่เหลือออกจนได้

เป็นสารสกัดที่แห้ง จากนั้นเก็บสารสกัดที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้ในการตรวจสอบฤทธิ์ทางชีวภาพด้านเวชสำอางต่อไป โดยฤทธิ์ทางเวชสำอางที่ศึกษา ได้แก่ ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียก่อสิว ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส

การเตรียมกล้าเชื้อแบคทีเรียก่อสิว

นำแบคทีเรีย *C. acnes* มาเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว Mueller Hinton broth (MHB) บ่มใน Anaerobic jar ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเตรียมเป็นกล้าเชื้อเริ่มต้น โดยเทียบความขุ่นให้เท่ากับความขุ่นมาตรฐาน McFarland No. 0.5 (1.5×10^8 CFU/mL)

สำหรับแบคทีเรีย *S. epidermidis* และ *S. aureus* เพาะเลี้ยงในอาหารเหลว Tryptic soy broth (TSB) และ Nutrient broth นำไปเขย่าที่ความเร็ว 350 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60-180 นาที จากนั้นนำมาเตรียมเป็นกล้าเชื้อเริ่มต้น โดยเทียบความขุ่นให้เท่ากับความขุ่นมาตรฐาน McFarland No. 0.5

การทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรียก่อสิด้วยวิธี Agar disc diffusion

นำกล้าเชื้อที่เตรียมไว้มาเพาะลงบนอาหารแข็งด้วยวิธี Swab technique โดยแบคทีเรีย *C. acnes* เพาะเลี้ยงบนอาหาร MHA และบ่มใน Anaerobic jar ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง สำหรับ *S. epidermidis* และ *S. aureus* เพาะเลี้ยงบนอาหาร TSA และ NA บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง จากนั้นวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย (Inhibition zone) ตัวควบคุมเชิงบวก ได้แก่ ยาปฏิชีวนะชนิด Tetracycline และ Clindamycin ที่ความเข้มข้น 0.15 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และยา Benzoyl peroxide ที่ความเข้มข้น 1.25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตัวควบคุมเชิงลบคือ น้ำกลั่นและเอทานอล

การหาความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งและฆ่าแบคทีเรีย (MIC และ MBC) โดยวิธี Broth microdilution

เตรียมสารสกัดในช่วงความเข้มข้น 0.25-20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปิเปตสารสกัดปริมาตร 100 ไมโครลิตร และกล้าเชื้อแบคทีเรียปริมาตร 100 ไมโครลิตร ใส่ลงใน 96-well plate โดยแบคทีเรีย *S. epidermidis* และ *S. aureus* บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง สำหรับแบคทีเรีย *C. acnes* บ่มใน Anaerobic jar ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 ชั่วโมง วัดความขุ่นด้วย Microplate reader ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ใช้ยาปฏิชีวนะชนิด Benzoyl peroxide, Tetracycline และ Clindamycin เป็นชุดควบคุมเชิงบวก และให้อาหารเลี้ยงเชื้อเป็นชุดควบคุมเชิงลบ

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแบคทีเรียด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำตัวอย่างสารสกัดและตัวควบคุมเชิงบวกที่หาค่า MIC ของสารแต่ละชนิดและตัวควบคุมเชิงลบ แช่ใน Glutaraldehyde ความเข้มข้น 2% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ล้างด้วย 0.1 M Phosphate buffer pH 7.2 จำนวน 3 รอบ และแช่ไว้นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นแช่ในเอทานอลที่ความเข้มข้น 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 99 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นละ 15 นาที และแช่เย็นนาน 120 นาที นำไปทำให้แห้งด้วยวิธี Critical point drying (CPD) และเคลือบด้วยทองคำ ก่อนนำไปศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การตรวจสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ทำการตรวจสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH [3] ทำโดยนำตัวอย่างสารสกัดปริมาตร 20 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลาย DPPH 180 ไมโครลิตร ใน 96-well plate แล้วนำไปบ่มในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร คำนวณเปอร์เซ็นต์การต้านอนุมูลอิสระ โดยใช้ Ascorbic acid เป็นสารมาตรฐาน

การตรวจสอบฤทธิ์ต้านกระบวนการสร้างเม็ดสีเมลานิน

ทำการผสมสารสกัดปริมาตร 20 ไมโครลิตร กับ Phosphate buffer (20 mM, pH 6.8) ปริมาตร 140 ไมโครลิตร และ Tyrosinase enzyme (204 U/mL) ปริมาตร 20 ไมโครลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมสาร L-DOPA (2.5 mM) ปริมาตร 20 ไมโครลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 492 นาโนเมตร แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส โดยใช้ Kojic acid เป็นสารมาตรฐาน [3]

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ลักษณะทางสัณฐานของดอกเห็ดและผลผลิตดอกเห็ดที่เพาะเลี้ยงบนก้อนวัสดุเพาะที่แตกต่างกัน

ลักษณะของดอกเห็ดเห็ดหลินจือแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ โดยลักษณะดอกเห็ดเห็ดหลินจือไอโซเลท TAFRS036 มีดอกเรียวยาว ขนาด 11 เซนติเมตร ปลายดอกสีขาวครีม โคนสีน้ำตาล ผิวลื่นและมันวาว ในขณะที่ดอกเห็ดเห็ดหลินจือไอโซเลท TAFRS018 มีลักษณะแข็งคล้ายเนื้อไม้ ดอกกว้าง 6 เซนติเมตร สีขาวครีม และมีผิวดอกที่หยาบร่วน จากการเปรียบเทียบน้ำหนักดอกเห็ดที่ได้จากการเพาะเลี้ยงบนก้อนวัสดุเพาะที่แตกต่างกันพบว่า ดอกเห็ดเห็ดหลินจือที่เพาะเลี้ยงบนก้อนวัสดุเพาะที่มีเชื้อเลี้ยงไม่ฟูเรียนผสมกับเชื้อเลี้ยงไม่ฟูเรียนพาราในอัตราส่วน 25:75 ให้ผลผลิตของดอกเห็ดที่สูงที่สุด ดังแสดงใน Table 1 เชื้อฟูเรียนเป็นไม้เนื้ออ่อนที่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นแหล่งของสารอาหารที่มีความสำคัญต่อการเจริญของเส้นใยเห็ดและการสร้างดอกเห็ด [4] การใช้วัสดุเพาะที่เหมาะสมสามารถเพิ่มผลผลิตของดอกเห็ดได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hassan และคณะ [5] ที่ได้ศึกษาชนิดและสัดส่วนของวัสดุเพาะที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงเห็ดแครง การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นวัสดุเพาะยังเป็นแนวทางที่จะช่วยลดต้นทุนในการเพาะเห็ด และเป็นการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ประโยชน์

จากการตรวจสอบฤทธิ์ทางชีวภาพในเบื้องต้นพบว่า สารสกัดจากดอกเห็ดเห็ดหลินจือที่เพาะเลี้ยงบนวัสดุเพาะชนิดเชื้อเลี้ยงไม่ฟูเรียนผสมกับเชื้อเลี้ยงไม่ฟูเรียนพาราในอัตราส่วน 75:25 ตรวจพบฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาที่ทดสอบทุกด้าน โดยแสดงฤทธิ์ต้านแบคทีเรียก่อสิว ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส ในขณะที่สารสกัดจากดอกเห็ดเห็ดหลินจือที่เพาะเลี้ยงบนวัสดุเพาะชนิดอื่น มีเพียงฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันเท่านั้น ไม่พบฤทธิ์ต้านแบคทีเรียก่อสิว ดังนั้นผู้วิจัยเลือกสารสกัดจากดอกเห็ดเห็ดหลินจือที่เพาะเลี้ยงบนเชื้อเลี้ยงไม่ฟูเรียนผสมกับเชื้อเลี้ยงไม่ฟูเรียนพาราเพื่อใช้ในการศึกษาฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาต่อไป

Table 1 Dry weight of *Ganoderma* sp. fruiting bodies grown on different cultivating substrates.

Mushroom isolates	Sawdust ratio	Dry weight of fruiting bodies (g) grown on different substrates			
		DS:RS	ES:RS	TS:RS	PS:RS
<i>Ganoderma</i> sp. TAFRS018	0:100	175.8 ± 1.7 ^b	175.8 ± 0.7 ^b	175.8 ± 0.7 ^b	175.8 ± 0.7 ^b
	25:75	408.5 ± 2.9 ^a	166.3 ± 1.3 ^b	n.d.	139.3 ± 2.5 ^c
	50:50	388.1 ± 1.8 ^a	n.d.	n.d.	141.4 ± 3.2 ^c
	75:25	223.8 ± 0.8 ^b	n.d.	57.3 ± 0.2 ^c	245.5 ± 3.5 ^b
	100:0	162.3 ± 2.7 ^b	n.d.	n.d.	n.d.
<i>Ganoderma</i> sp. TAFRS036	0:100	200.9 ± 2.5 ^b	200.9 ± 2.5 ^b	200.9 ± 4.5 ^b	200.9 ± 2.8 ^b
	25:75	275.3 ± 2.5 ^b	n.d.	214.8 ± 0.4 ^b	227.8 ± 3.5 ^a
	50:50	169.3 ± 0.9 ^b	n.d.	65.4 ± 0.3 ^c	245.7 ± 0.3 ^b
	75:25	186.5 ± 1.8 ^b	n.d.	52.2 ± 0.2 ^c	261.8 ± 2.9 ^b
	100:0	121.3 ± 1.2 ^c	n.d.	n.d.	n.d.

All data are presented as mean values ± standard deviation (n = 5).

In the same column, the means followed by different letters indicate significant differences (α =0.05, ANOVA, Tukey's HSD test).

n.d. = not detected.

DS = Durian wood sawdust; ES = Eucalyptus wood sawdust; TS = Teak wood sawdust; PS = Pine wood sawdust; RS = Rubber wood sawdust.

3.2 การศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรียก่อสิวโดยวิธี Agar disc diffusion

จากการศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย *C. acnes* ซึ่งเป็นแบคทีเรียหลักที่ทำให้เกิดสิวอักเสบ พบว่าสารสกัดจากดอกเห็ดหลินจือที่เพาะเลี้ยงบนก้อนวัสดุเชื้อไม้มะยมผสมกับขี้เลื่อยไม้มะยมพาราแสดงฤทธิ์ต้านแบคทีเรียสูงกว่าสารสกัดจากเห็ดที่เพาะเลี้ยงบนก้อนวัสดุเพาะชนิดอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Inhibition zone พบว่าไอโซเลท TAFRS036 ที่เพาะเลี้ยงบนวัสดุเพาะเชื้อไม้มะยมผสมกับขี้เลื่อยไม้มะยมพาราในอัตราส่วนเท่ากับ 75:25 และ 50:50 มีขนาด Inhibition zone เท่ากับ 3.7 และ 3.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 2 ในขณะที่ไอโซเลท TAFRS018 ที่เพาะเลี้ยงบนขี้เลื่อยไม้มะยมผสมกับขี้เลื่อยไม้มะยมพาราในอัตราส่วน 75:25 ให้ขนาด Inhibition zone เท่ากับ 3.3 เซนติเมตร ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากเห็ดหลินจือที่เพาะเลี้ยงบนก้อนอาหารที่มีขี้เลื่อยไม้มะยมเป็นองค์ประกอบหลักมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียสูง

Table 2 Antibacterial activity against *Cutibacterium acnes* of the extracts from *Ganoderma* sp. fruiting bodies grown on different cultivating substrates.

Ratios of DS:RS	Diameter of inhibition zone (cm)	
	<i>Ganoderma</i> sp. TAFRS036	<i>Ganoderma</i> sp. TAFRS018
0:100	2.8 ± 0.7 ^b	1.4 ± 0.1 ^c
25:75	2.7 ± 0.2 ^b	1.5 ± 0.5 ^c
50:50	3.5 ± 0.2 ^a	1.2 ± 0.3 ^c
75:25	3.7 ± 0.1 ^a	3.3 ± 0.2 ^a
100:0	2.9 ± 0.4 ^b	3.2 ± 0.5 ^a

All data are presented as mean values ± standard deviation ($n = 3$). In the same column, the means followed by different letters indicate significant differences ($\alpha = 0.05$, ANOVA, Tukey's HSD test).

DS = Durian wood sawdust; RS = Rubber wood sawdust.

3.3 การหาค่า MIC และ MBC ของสารสกัดจากดอกเห็ดหลินจือ

จากผลการทดลองหาค่า MIC และ MBC พบว่าสารสกัดจากดอกเห็ดหลินจือไอโซเลท TAFRS036 ที่เพาะเลี้ยงบนก้อนวัสดุเชื้อไม้มะยมผสมกับขี้เลื่อยไม้มะยมพารา ในอัตราส่วนเท่ากับ 75:25 มีประสิทธิภาพในการต้านแบคทีเรียก่อสิวทั้ง 3 ชนิดได้ดีที่สุด โดยมีค่า MIC ต่อแบคทีเรีย *C. acnes*, *S. aureus* และ *S. epidermidis* เท่ากับ 0.1, 0.75 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 3 จากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าสารสกัดดังกล่าวสามารถยับยั้งแบคทีเรีย *C. acne* ซึ่งเป็นแบคทีเรียหลักที่ทำให้เกิดสิวอักเสบได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยให้ค่า MIC ที่ต่ำที่สุด

3.4 การศึกษาฤทธิ์ของสารสกัดต่อการเปลี่ยนแปลงของเซลล์แบคทีเรีย

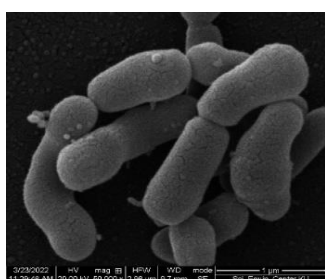
ทำการศึกษาเบื้องต้นเพื่ออธิบายกลไกการออกฤทธิ์ต้านแบคทีเรียก่อสิว *C. acne* ของสารสกัดจากดอกเห็ดหลินจือไอโซเลท TAFRS036 ที่เพาะเลี้ยงบนก้อนวัสดุเชื้อไม้มะยมผสมกับขี้เลื่อยไม้มะยมพารา ในอัตราส่วนเท่ากับ 75:25 โดยใช้กล้อง SEM ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเซลล์จากแบคทีเรีย จากผลทดลองที่หาค่า MIC ซึ่งแบคทีเรียถูกยับยั้งการเจริญมาแล้วนาน 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับหลอดชุดควบคุมเชิงลบคือ เซลล์แบคทีเรียที่เจริญตามปกติในอาหารเลี้ยงเชื้อ ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงให้เห็นว่าสารสกัดดังกล่าวทำให้เกิดการฉีกขาดของเยื่อหุ้มเซลล์ และผนังเซลล์ของแบคทีเรีย (Figure 1) มีรายงานว่าสารประกอบฟีนอลิกและโพลีแซ็กคาไรด์ที่พบในเห็ดออกฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย โดยทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ เกิดการรั่วไหลของไซโตพลาสซึมจนเซลล์สลายและตายในที่สุด [6,7] จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ในเบื้องต้นว่า สารสกัดจากดอกเห็ดหลินจือไอโซเลท TAFRS036 ที่เพาะเลี้ยงบนก้อนวัสดุเชื้อไม้มะยมผสมกับขี้เลื่อยไม้มะยมพารา มีฤทธิ์ในการยับยั้งแบคทีเรียทั้งสองชนิดโดยการทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรีย

Table 3 The MIC and MBC values of fruiting body extracts of *Ganoderma* sp. grown on different cultivating substrates against acne-causing bacteria.

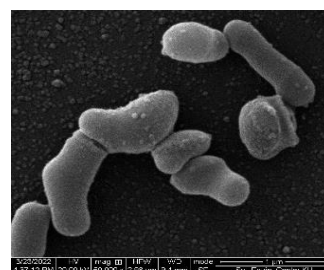
Mushroom isolates	Ratios of DS:RS	Susceptibility of bacteria to extracts (mg/mL)					
		<i>C. acnes</i>		<i>S. aureus</i>		<i>S. epidermidis</i>	
		MIC	MBC	MIC	MBC	MIC	MBC
<i>Ganoderma</i> sp. TAFRS036	0:100	0.1	1	2.5	17.5	15	>20
	25:75	10	20	0.75	17.5	10	5
	50:50	0.25	20	0.75	17.5	2.5	15
	75:25	0.1	1	0.75	10	0.5	12.5
	100:0	0.25	20	1.25	17.5	17.5	12.5
<i>Ganoderma</i> sp. TAFRS018	0:100	0.1	1	2.5	17.5	5	>20
	25:75	25	20	10	20	5	>20
	50:50	7.5	20	2.5	10	2.5	15
	75:25	7.5	10	17.5	20	12.5	>20
	100:0	7.5	10	2.5	17.5	5	>20
Antibiotics							
- Benzoyl peroxide		0.5	3.5	3.0	4.0	2.5	4.5
- Tetracycline		0.2	1.2	0.2	0.3	0.2	0.3
- Clindamycin		0.2	1.2	0.2	0.2	0.1	0.1

All data are presented as mean values ($n = 3$) and standard deviation were less than 5%

DS = Durian wood sawdust; RS = Rubber wood sawdust



(A)



(B)

Figure 1 Scanning electron micrograph images of *Cutibacterium acnes* after exposure to Mueller Hinton broth (A) and fruiting body extract of *Ganoderma* sp. TAFRS036 (B) for 24 h, Enlargement: For 50,000X.

3.5 การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสของสารสกัดจากดอกเห็ด

จากการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH พบว่า สารสกัดจากดอกเห็ดหลินจือไอโซเลท TAFRS036 ที่เพาะเลี้ยงบนก้อนวัสดุขี้เลื่อยไม้ทุเรียนผสมกับขี้เลื่อยไม้ยางพารา ในอัตราส่วนเท่ากับ 75:25 มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ สูงสุดเท่ากับ 93.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารสกัดที่เพาะเลี้ยงบนวัสดุเพาะชนิดอื่น การตรวจสอบฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างเม็ดสีเมลานิน โดยใช้วิธี Dopachrome method ซึ่งอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชันของสาร L-DOPA ซึ่งมีเอนไซม์ไทโรซิเนสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยน L-DOPA เป็น L-Dopaquinone และเปลี่ยนไปเป็น Dopachrome ซึ่งจะปรากฏเป็นสารละลายสีส้มแดง ผลการทดสอบพบว่าสารสกัดจากดอกเห็ดหลินจือ TAFRS036 ที่เพาะเลี้ยง

บนก้อนวัสดุเชื้อเพลิงไม้ทุเรียนผสมกับเชื้อเพลิงไม้ยางพารา ในอัตราส่วนเท่ากับ 75:25 มีฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสเท่ากับ 62.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าการสกัดจากดอกเห็ดที่เพาะเลี้ยงบนวัสดุเพาะชนิดอื่น

สารสกัดจากดอกเห็ดหลินจือไอโซเลท TAFRS036 ที่เพาะเลี้ยงบนก้อนวัสดุเชื้อเพลิงไม้ทุเรียนผสมกับเชื้อเพลิงไม้ยางพารา ในอัตราส่วนเท่ากับ 75:25 แสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและสามารถยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสได้อย่างมีประสิทธิภาพในเวลาเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าสารสกัดจากดอกเห็ดหลินจือ *Ganoderma lucidum* และเห็ดแครง *Schizophyllum commune* มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส โดยมีสารสำคัญที่ออกฤทธิ์คือ สารประกอบฟีนอลและสารปีต้ากลูแคน [8, 9] ในขณะที่สารสกัดจากดอกเห็ดหูหนู *Auricularia polytricha* และเห็ดนางรม *Pleurotus ostreatus* มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ แต่ไม่พบฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส [9] ทั้งนี้ความแตกต่างของฤทธิ์ที่พบอาจขึ้นอยู่กับสายพันธุ์เห็ด วิธีการสกัด และชนิดของวัสดุเพาะซึ่งมีผลต่อปริมาณและชนิดของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในดอกเห็ด [10]

Table 4 Antioxidant and anti-tyrosinase activities of fruiting body extracts of *Ganoderma* sp. grown on different cultivating substrates.

Mushroom isolates	Sawdust Ratio	Antioxidant activity (% inhibition)				Anti-tyrosinase activity (% inhibition)			
		DS:RS	ES:RS	TS:RS	PS:RS	DS:RS	ES:RS	TS:RS	PS:RS
<i>Ganoderma</i> sp. TAFRS018	0:100	82.8	82.8	82.8	82.8	27.0	27.0	27.0	27.0
	25:75	92.8	52.7	n.d.	n.d.	52.8	29.7	n.d.	n.d.
	50:50	92.9	n.d.	n.d.	n.d.	48.8	n.d.	n.d.	n.d.
	75:25	71.8	n.d.	2.6	2.7	46.1	n.d.	14.1	14.3
	100:0	25.6	n.d.	n.d.	n.d.	13.5	n.d.	n.d.	n.d.
<i>Ganoderma</i> sp. TAFRS036	0:100	91.0	91.0	91.0	91.0	1.3	1.3	1.3	1.3
	25:75	92.7	n.d.	62.7	72.9	14.7	n.d.	18.9	2.7
	50:50	92.9	n.d.	29.9	72.8	14.8	n.d.	8.7	18.2
	75:25	93.1	n.d.	n.d.	83	62.9	n.d.	n.d.	8.7
	100:0	91.2	n.d.	n.d.	n.d.	12.1	n.d.	n.d.	n.d.

All data are presented as mean values ($n = 3$) and standard deviation were less than 5%.

n.d. = not detected.

DS = Durian wood sawdust; ES = Eucalyptus wood sawdust; TS = Teak wood sawdust; PS = Pine wood sawdust; RS = Rubber wood sawdust.

3.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดจากดอกเห็ดด้วยเครื่อง LC-MS/MS

ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดจากดอกเห็ดหลินจือไอโซเลท TAFRS036 ที่เพาะเลี้ยงบนก้อนวัสดุเชื้อเพลิงไม้ทุเรียนผสมกับเชื้อเพลิงไม้ยางพารา ในอัตราส่วนเท่ากับ 75:25 โดยใช้เครื่อง LC-MS/MS ผลของโครมาโทแกรมพบพีคของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิดที่มีศักยภาพในการต้านแบคทีเรียก่อสิว ด้านออกซิเดชัน และยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส จากผลการวิเคราะห์พบว่า สารสำคัญที่พบในปริมาณสูงสุด คือ สาร 4-(Aminomethyl)benzoic acid ซึ่งมีค่า $m/z = 152.05$ ที่ retention time เท่ากับ 0.91 นาที ซึ่งมีรายงานว่า มีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียก่อสิว ด้านออกซิเดชัน และยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส (Table 5)

นอกจากนี้ ยังพบสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิด Helvolic acid และ Echionocystic acid ซึ่งเป็นสารสำคัญที่มีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาหลายด้าน รวมทั้งสามารถออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ได้ [11, 12] ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า สารสกัดจากดอกเห็ดหลินจือ TAFRS036 ที่เพาะเลี้ยงบนวัสดุเชื้อเพลิงไม้ทุเรียนผสมกับเชื้อเพลิงไม้ยางพารา ในอัตราส่วนเท่ากับ 75:25 มีศักยภาพที่จะนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีประโยชน์ในด้านสุขภาพและความงาม ช่วยชะลอริ้วรอยแห่งวัย ลดรอยดำ และต้านแบคทีเรียก่อสิวในเวลาเดียวกัน

Table 5 Bioactive compounds identified in fruiting body extract of *Ganoderma* sp. TAFRS036 grown on a substrate containing durian and rubber wood sawdust at a 75:25 ratio.

Analyte peak name	Retention time	Molecular formula	Found at mass	Reference
4-(Aminomethyl)benzoic acid	0.91	C ₅ H ₅ N ₅ O	152.05	[13, 14]
Helvolic acid	15.99	C ₂₇ H ₅₂ O ₈ S ₂	569.31	[12]
Echionocystic acid	17.24	C ₃₂ H ₅₂ N ₄ O ₆ S ₂	657.36	[11, 12, 15]

4. สรุป

เชื้อเห็ดไม้มะยมสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเพาะเห็ดหลินจือทดแทนการใช้เชื้อเห็ดไม้มะยมพาราได้เป็นอย่างดี สามารถลดต้นทุนในการซื้อเชื้อเห็ดไม้มะยมพาราได้ สารสกัดจากดอกเห็ดหลินจือไอโซเลท TAFRS036 มีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาสูงที่สุดในด้านฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ฤทธิ์ด้านการสร้างเม็ดสีเมลานิน และฤทธิ์ต้านแบคทีเรียก่อสิว สามารถใช้เชื้อเห็ดไม้มะยมผสมกับเชื้อเห็ดไม้มะยมพาราในการเพาะเลี้ยงเห็ดได้ ทำให้ได้ดอกเห็ดที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพด้านเภสัชวิทยาสูง การศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากหลินจือที่ได้จากการเพาะเลี้ยงบนวัสดุเพาะสูตรใหม่นี้ มีศักยภาพสูงในการเป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากธรรมชาติ ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เวชสำอาง หรือส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ดูแลผิวที่ช่วยต้านอนุมูลอิสระ ลดการเกิดสิว และยับยั้งกระบวนการสร้างเม็ดสีเมลานิน อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาต่อยอดในด้านกลไกการออกฤทธิ์ ความปลอดภัย และประสิทธิภาพในระดับเซลล์และสัตว์ทดลอง ก่อนการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประเทศไทย ในการสนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Heleno, S. A., Barros, L., Martins, A., Queiroz, M. J. R., Santos-Buelga, C. and Ferreira, I. C. 2012. Fruiting body, spores and *in vitro* produced mycelium of *Ganoderma lucidum* from Northeast Portugal: A comparative study of the antioxidant potential of phenolic and polysaccharidic extracts. Food Res. Int. 46: 135-140.
- [2] Aswathy, S., Shyamalagowri, S., Hari, S., Kanimozhi, M., Meenambiga, S. S., Thenmozhi, M., Karthiyayini, R., Suresh, D. and Manjunathan, J. 2024. Comparative studies on the cultivation, yield, and nutritive value of an edible mushroom, *Pleurotus tuber-regium* (Rumph. ex Fr.) Singer, grown under different agro waste substrates. 3 Biotech. DOI: 10.1007/s13205-024-03968-x.
- [3] Vajrobal, N., Taengphan, W. and Teerapatsakul, C. 2024. Enhancement of mycelial biomass production and bioactive properties related to cosmeceuticals of *Calocybe indica* (Milky Mushroom) by optimization of submerged culture conditions. Chiang Mai J. Sci. DOI: 10.12982/CMJS.2024.075.
- [4] Zamakshshari, N. H., Ahmed, I. A., Nasharuddin, M. N. A., Zaharudin, N. S., Hashim, N. M. and Othman, R. 2023. Comparative study on biological activities and chemical profiling of mushroom (*Pleurotus pulmonarius* (Fr.) Quel.) cultured on lignocellulosic agro-wastes. Chem. Biodivers. 20: e202300111.
- [5] Hassan, S. A. M., Ting, S. S., Zulkepli, N. N. and Kasim, F. H. 2022. Physicochemical characterization of rubberwood sawdust, mushroom spent medium, rice husk, and rice husk ash as potential growth substrates for wild *Schizophyllum commune* cultivation. Malays. J. Microsc. 18: 225-236.
- [6] Ren, L., Hemar, Y., Perera, C. O., Lewis, G., Krissansen, G. W. and Buchanan, P. K. 2014. Antibacterial and antioxidant activities of aqueous extracts of eight edible mushrooms. Bioact. Carbohydr. Diet. Fibre. 3: 41-51.

-
- [7] Taofiq, O., Heleno, S. A., Calhelha, R. C., Alves, M. J., Barros, L., Barreiro, M. F. and Ferreira, I. C. 2016. Development of mushroom-based cosmeceutical formulations with anti-inflammatory, anti-tyrosinase, antioxidant, and antibacterial properties. *Molecules*. 21: 1372.
- [8] Vaithanomsat, P., Boonlum, N., Chaiyana, W., Tima, N., Anuchapreeda, S., Trakunjae, C., Apiwatanapiwat, W., Janchai, P., Boondaeng, A., Nimitkeatkai H. and Jarerat, 2022. A Mushroom β -glucan recovered from antler-type fruiting body of *Ganoderma lucidum* by enzymatic process and its potential biological activities for cosmeceutical applications. *Polymers*. 14: 4202.
- [9] Razak, D. L. A., Jamaluddin, A., Rashid, N. Y. A., Sani, N. A. and Manan, M. A. 2020. Assessment of cosmeceutical potentials of selected mushroom fruitbody extracts through evaluation of antioxidant, anti-hyaluronidase and anti-tyrosinase activity. *J. Multidiscip. Sci. J.* 3: 329-342.
- [10] Sujarit, K., Suwannarach, N., Kumla, J. and Lomthong, T. 2020. Mushrooms: Splendid gifts for the cosmetic industry. *Chiang Mai J. Sci.* 48: 699-725.
- [11] Chua, R. W., Song, K. P. and Ting, A. S. Y. 2024. Characterization and identification of antimicrobial compounds from endophytic *Fusarium incarnatum* isolated from *Cymbidium orchids*. *Int. Microbiol.* 27: 977-992.
- [12] Fawole, O. A., Makunga, N. P. and Opara, U. L. 2012. Antibacterial, antioxidant and tyrosinase-inhibition activities of pomegranate fruit peel methanolic extract. *BMC Complement. Altern. Med.* 12: 1-11.
- [13] Kucera, K., Zenzola, N., Hudspeth, A., Dubnicka, M., Hinz, W., Bunick, C. G. and Light, D. Y. 2024. Benzoyl peroxide drug products form benzene. *Environ. Health Perspect.* 132: 037702.
- [14] Li, Y., Hu, X., Dong, G., Wang, X. and Liu, T. 2024. Acne treatment: research progress and new perspectives. *Front. Med.* 11: 1425675.
- [15] Yucharoen, R., Srisuksomwong, P., Julsrigival, J., Mungmai, L., Kaewkod, T. and Tragoolpua, Y. 2023. Antioxidant, anti-tyrosinase, and anti-skin pathogenic bacterial activities and phytochemical compositions of corn silk extracts, and stability of corn silk facial cream product. *Antibiotics*. 12: 1

การทำนายปริมาณความชื้นของเม็ดอาหารสัตว์ด้วยแบบจำลองการอบแห้งที่หลากหลาย

Moisture content prediction of animal feed pellets with different drying models

จตุพัฒน์ ไม้แก้ว¹ ธัชพล จุ่งเจริญ² นฤบดี ศรีสังข์² ศิริวรรณ ศรีสังข์² ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล^{2,*} และ นิตยา จันกา³
Jatuphat Maikaew¹, Thatchapol Chungcharoen², Naruebodee Srisang², Siriwan srisang², Chaiwat rattanamechaiskul^{2,*}
and Nittaya Junka³

¹นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160

²ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160

³สาขาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม 73000

¹Doctoral student, Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon, 86160

²Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon, 86160

³Division of Crop Production Technology, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, 73000

*Corresponding author: Chaiwat rattanamechaiskul, e-mail address: chaiwat.ra@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

เทคนิคการอบแห้งเป็นเทคนิคที่ถูกใช้ในการเพิ่มระยะเวลาเก็บรักษาให้กับอาหารจากการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราหรือแบคทีเรียในอาหาร การลดปริมาณความชื้นส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆ เช่น ปริมาณโภชนาการ และควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อรา อย่างไรก็ตามในเทคนิคการอบแห้งอย่างฟลูอิดIZED BED (fluidized bed) มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และมีความเหมาะสมในการอบแห้งวัสดุแบบเม็ด ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลองการอบแห้งเม็ดอาหารสัตว์จากเศษขยะอินทรีย์เหลือทิ้งในสถานะอุณหภูมิของวัสดุคงที่ ซึ่งใช้แบบจำลองเชิงทฤษฎี และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข พร้อมทั้งศึกษารูปทรงที่แตกต่างกัน ได้แก่ รูปทรงกลม และรูปทรงกระบอก นอกจากนี้ยังกำหนดค่าพลังงานการกระตุ้นและค่า Arrhenius factor (D_0) ที่ได้จากการ trial และ error โดยประเมินตัวแบบจำลองจากค่า R^2 และ RMSE จากการศึกษาค้นพบว่าแบบจำลองเชิงทฤษฎีรูปทรงกระบอกมีค่า R^2 ที่สูงและค่า RMSE ที่น้อยกว่ารูปทรงกลม อย่างไรก็ตามในแบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสามารถอธิบายพฤติกรรมการแพร่ของความชื้นได้แม่นยำกว่าแบบจำลองเชิงทฤษฎีทั้ง 2 รูปทรง และในแบบจำลองนี้ยังแสดงให้เห็นถึงการแพร่ของความชื้นภายในของวัสดุโดยมีค่า R^2 ที่ 0.9903

คำสำคัญ: แบบจำลองการอบแห้ง, เม็ดอาหารสัตว์, สภาวะอุณหภูมิคงที่, เศษขยะอินทรีย์, ฟลูอิดIZED BED

Abstract

Drying technology is crucial in extending food storage life because it prevents the growth of fungi or bacteria. While drying affects various properties, such as nutrient content and fungal growth. However, the fluidized bed drying technique stands out for its energy efficiency, particularly when drying granular materials. This study focuses on developing a drying model for animal feed pellets made from organic waste under isothermal conditions. It investigates theoretical and numerical models, analyzing the diffusion behaviour of moisture within the materials. The study examines two pellet shapes: circular and cylindrical. Furthermore, it determines critical parameters such as activation energy and the Arrhenius factor (D_0) using a trial-and-error approach. The optimal model is evaluated based on R^2 and RMSE values. Results show that the cylindrical theory model achieved a higher R^2 and lower RMSE than the circular theory model. However, numerical models can explain the diffusion behaviour of moisture more accurately than theoretical models of both shapes and show moisture diffusion inside the material R^2 of 0.9903.

Keywords: Drying modeling, Animal pellet, Iso-thermal, Organic waste, Fluidized bed

1. บทนำ

การผลิตเม็ดอาหารสัตว์นั้นเป็นการอัดรวมโภชนาการต่างๆของในแต่ละส่วนประกอบเข้ามามีด้วยกัน ดังนั้นจำเป็นจะต้องใช้น้ำเป็นส่วนประกอบหลักเพื่ออัดเม็ดพร้อมทั้งน้ำจากส่วนประกอบต่างๆ เช่น น้ำมันปลา รำข้าว ปลาป่น ข้าวโพด เลือดปลา

เป็นต้น เม็ดอาหารสัตว์จึงมีปริมาณน้ำที่สูงโดยส่วนใหญ่จะเฉลี่ยอยู่ที่ 22 – 30% [1] นอกจากนี้ในการมีปริมาณน้ำหรือความชื้นในเม็ดอาหารที่สูงนั้นส่งผลต่อการเก็บรักษา และการขนส่งอย่างมาก [2] ทำให้การใช้งานเทคโนโลยีการอบแห้งร่วมกับการผลิตเม็ดอาหารได้รับความนิยมที่เพิ่มขึ้นทำให้เม็ดอาหารสามารถเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้นเนื่องจากการมีกิจกรรมของน้ำที่ลดลงทำให้การเจริญเติบโตของเชื้อราเป็นไปได้ช้า [3] และมีน้ำหนักที่น้อยลงง่ายต่อการขนส่ง ทั้งนี้การใช้เทคนิคการอบแห้งอย่าง การอบแห้งแบบถาด (tray dry) ฟลูอิดไรซ์เบด (fluidized bed) ไมโครเวฟ (microwave) เป็นต้น มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง จนพบได้ว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดมีความเหมาะสมกับการอบแห้งแบบเม็ดมากที่สุด เนื่องจากการใช้พลังงานในการอบแห้งที่น้อย [4] อย่างไรก็ตามเม็ดอาหารที่ดีควรมีโภชนาการ ความแข็งแรง คงทนที่สูง และในเม็ดอาหารสัตว์นั้นจำเป็นต้องมีความสามารถในการละลายน้ำที่ต่ำ โดยการลดลงของความชื้นส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลเหล่านี้ [5]

ในการสร้างโมเดลการอบแห้งสามารถทำนายคุณสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปได้ดี โดยในงานวิจัยของ Rattanamechaikul, Junka [6] ได้ทำการศึกษการสร้างแบบจำลองการอบแห้งในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของข้าวจากการอบแห้งด้วยฟลูอิดไรซ์เบดแบบอุณหภูมิต่ำไม่คงที่ และรูปทรงกระบอก พบว่าแบบจำลองที่สามารถทำนายการลดความชื้น และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเม็ดข้าวได้ดีซึ่งมีค่า R^2 ที่เหมาะสม ทำให้ตัวแบบจำลองสามารถทำนายเงื่อนไขที่ส่งผลให้คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสที่เหมาะสมได้ อย่างไรก็ตามในกระบวนการอบแห้งของเม็ดอาหารสัตว์ที่มีสูตรที่เฉพาะเจาะจงจะแตกต่างกันไปตามพื้นที่ และการใช้งานในสัตว์แต่ละประเภท เช่น เม็ดอาหารไก่ [7] อาหารปลา [5, 8] เป็นต้น จำเป็นจะต้องทำการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากตัวแปรอย่างพลังงานที่ใช้กระตุ้นเพื่อการระเหยความชื้น (Activation energy) และการแพร่ของอุณหภูมิแตกต่างกันไปตามวัสดุ [9, 10] ทั้งนี้ในเม็ดอาหารเป็นวัสดุที่มีการผสมกันขององค์ประกอบหลากหลายจึงมีความเฉพาะเจาะจงที่สูง โดยในงานนี้ได้ใช้เทคนิคการอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบด ซึ่งได้ตั้งสมมติฐานให้อุณหภูมิของวัสดุคงที่ และอากาศร้อนคลุกเคล้ากับวัสดุได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในงานนี้จึงมีจุดมุ่งหมายในการสร้างแบบจำลองในการทำนายการอบแห้งเม็ดอาหารสัตว์ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อเป็นการประยุกต์ใช้งานได้ในอุตสาหกรรมที่ไม่ซับซ้อน โดยการใช้แบบจำลองเชิงทฤษฎีและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งกำหนดรูปทรงในการศึกษาเป็นทรงกลมและทรงกระบอกเพื่อประเมินถึงความแตกต่างระหว่างทรงกลมและทรงกระบอก โดยเม็ดอาหารทำมาจากเศษขยะอินทรีย์เหลือทิ้ง (เปลือกกุ้ง เปลือกปู และสาหร่ายทะเล) เป็นวัตถุดิบหลัก ทั้งนี้ในการสร้างแบบจำลองเหล่านี้เป็นกรณีศึกษาถึงการกระจายตัวของความชื้นภายในเม็ดอาหารเพื่อนำไปพัฒนาต่อยอดในการสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติ และการหาคุณสมบัติทางกายภาพที่ต้องการ เป็นต้น

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมเม็ดอาหาร

วัตถุดิบในเม็ดอาหารส่วนใหญ่ใช้เปลือกกุ้ง เปลือกปู และสาหร่ายที่ไม่ได้ถูกใช้ประโยชน์ ซึ่งได้ผสมน้ำมันปลา วิตามินรวม น้ำ และสารเหนียว พร้อมทั้งใช้กระบวนการผลิตคล้ายกับงานก่อนหน้า [11] เมื่ออัดเสร็จแล้วได้กองเม็ดอาหารดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 3.782 mm และความยาวเท่ากับ 8.284 mm โดยมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล 17.11 mm นอกจากนี้เม็ดอาหารมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 25% (d.b.)



รูปที่ 1 กองเม็ดอาหารสัตว์จากขยะอินทรีย์เหลือทิ้ง

2.2 กระบวนการอบแห้งด้วยฟลูอิดไชน์เบด

การทดลองดำเนินการตาม Maikaew, Phetkeri [11] นำเม็ดอาหารเข้าในหีบอบแห้ง ครั้งละ 2 kg โดยมีความสูงเบด 11 cm โดยใช้ความเร็วลมอยู่ที่ 10.3 m/s ทำให้เกิดการฟลูอิดเซชันภายในหีบอบแห้ง โดยกำหนดอุณหภูมิของเครื่องทำความร้อน (heater) ที่ 70 90 และ 110 °C หลังจากอบแห้งในแต่ละอุณหภูมิที่เวลา 5 10 15 20 และ 25 min นำเม็ดอาหารแห้งในแต่ละช่วงเวลาหาปริมาณความชื้น (moisture content; MC) โดยชั่งน้ำหนักแห้งที่สุ่มหยิบขึ้นมา (W_w) เป็นน้ำหนัก 15 g ใส่ในถ้วยความชื้นอูมิเมียม (moisture can) และนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิคงที่ในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 104 °C เป็นเวลา 24 h หรือจนกว่าความชื้นจะหมด เมื่อครบเวลาแล้วนำเม็ดอาหารมาชั่งหาน้ำหนักที่หลงเหลืออยู่ (W_b) แล้วคำนวณหาปริมาณความชื้นตามสมการที่ 1 อย่างไรก็ตามปริมาณความชื้นได้นำมาจากผลการทดลองในปริภูมิตฤษฎีของจุดพัฒนา และลักษณะพจน์ [12]

$$MC(\%) = \frac{W_w - W_b}{W_b} \times 100 \quad (1)$$

2.3 การสร้างแบบจำลองการอบแห้ง

การสร้างแบบจำลองการอบแห้งได้ศึกษาการใช้แบบจำลองเชิงทฤษฎี และระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะถูกแบ่งได้ตามรูปทรงของวัสดุที่อบแห้งซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป ในการจำลองการอบแห้งนี้ได้ตั้งสมมติฐานในการจำลองการอบแห้งเม็ดอาหารรูปทรงกลม และทรงกระบอก โดยกำหนดให้ไม่มีแหล่งทำความร้อนในวัสดุ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพคงที่ เม็ดอาหารไม่มีการหดหรือขยายตัวระหว่างการอบแห้ง พิจารณาให้เม็ดอาหารและอากาศร้อนมีการคลุกเคล้ากันอย่างดี และกำหนดให้กระบวนการอบแห้งนี้เป็นแบบอุณหภูมิคงที่ อย่างไรก็ตามในการสร้างแบบจำลองการอบแห้งจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพของแต่ละวัสดุ ดังแสดงในสมการที่ 2 ซึ่งการหาพารามิเตอร์อย่างค่าคงที่อาร์เรเนียสและพลังงานกระตุ้นของวัสดุมีหลากหลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมใช้คือ วิธีการสุ่มค่าลองผิดลองถูก (Trial and Error) เป็นวิธีที่ไม่มีความซับซ้อน งานนี้ได้ใช้ค่า D_0 และ E_a ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ทั้งนี้สมการทั้งหมดนำมาจากหนังสือแบบจำลองการอบแห้งวัสดุชีวภาพของชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล [9] และได้มีการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นในการหาความชื้น ซึ่งคือความชื้นเริ่มต้นของเม็ดอาหารถูกพิจารณา โดยในการคำนวณทั้งหมดใช้โปรแกรม Matlab R2023b®

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{R_g T}\right) \quad (2)$$

โดยที่ D_0 คือค่าคงที่อาร์เรเนียส (Arrhenius Factor, m^2/s)
 E_a คือพลังงานกระตุ้น (Activation Energy, J/mol)
 R_g คือค่าคงที่ของก๊าซ ($J/mol \cdot K$) และ
 T คืออุณหภูมิของวัสดุ (K)

ตารางที่ 1 แสดงค่า D_0 และ E_a ที่ใช้ในแต่ละแบบจำลองที่รูปทรงแตกต่างกัน

แบบจำลอง	รูปทรง	D_0	E_a
เชิงทฤษฎี	ทรงกลม	6×10^{-6}	21800
	ทรงกระบอก	6×10^{-6}	19000
ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	ทรงกลม	6×10^{-6}	17855
	ทรงกระบอก	6×10^{-6}	22000

2.3.1 แบบจำลองเชิงทฤษฎี

แบบจำลองเชิงทฤษฎีสามารถหาความชื้นเฉลี่ยของเม็ดอาหารได้จากผลเฉลยเชิงวิเคราะห์จากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุด้วยกฎของฟิกซ์

2.3.1.1 ทรงกลม

การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงทฤษฎีของทรงกลมการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะถูกกำหนดให้เกิดขึ้นเฉพาะตาม
แนวรัศมีดังแสดงในสมการที่ 3:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\pi^2 n^2 \frac{D_{eff} t}{R^2}\right) \quad (3)$$

โดยที่ D_{eff} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)

MR คืออัตราส่วนความชื้น (-)

n คือจำนวนเทอมตั้งแต่ 1 ถึง ∞

R คือรัศมีของวัสดุ (m) และ

t คือระยะเวลาอบแห้ง (min)

2.3.1.2 ทรงกระบอก

การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงทฤษฎีของทรงกระบอกของการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะถูกกำหนดให้เกิดขึ้น
เฉพาะตามแนวรัศมี (ทรงกระบอกมีความยาวอนันต์) ดังแสดงในสมการที่ 4:

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\beta_n^4} \exp\left(-\beta_n^2 \frac{D_{eff} t}{R^2}\right) \quad (4)$$

โดยที่ β คือรากของฟังก์ชันเบสเซล (Bessel Function)

2.3.2 แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

แบบจำลองเชิงระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสามารถหาความชื้นของวัสดุในแต่ละจุดที่กำหนดได้ โดยในการสร้างแบบจำลองการ
อบแห้งแบบอนุกรมวัสดุคงที่ ทำให้สมการอนุพันธ์พลังงานและสมการการนำความร้อนไม่ถูกพิจารณา และในแต่ละรูปทรงกำหนด
Node เท่ากับ 8

2.3.2.1 ทรงกลม

สมการการแพร่ความชื้นของพิกัดทรงกลมสมมาตรมีการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีและสัมประสิทธิ์การแพร่เป็น
ค่าคงที่ ดังแสดงในสมการที่ 5:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (5)$$

โดยที่ M คือความชื้นของวัสดุ (%)

r คือรัศมีตามแนวแกน (m)

โดยมีการกำหนดสภาวะขอบเขตที่ $t > 0$ ซึ่งความชื้นภายในเริ่มมีการแพร่มีค่าเท่ากับการพาที่บริเวณพื้นผิวสู่
ชั้นขอบเขต โดยความชื้นของชั้นขอบเขตมีค่าเท่ากับความชื้นสมดุลของวัสดุ ดังแสดงในสมการที่ 6 – 7:

$$r = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

$$r = R, \quad -D_{eff} \frac{\partial M}{\partial r} \Big|_{r=R} = h_m (M_s - M_e) \quad (7)$$

เมื่อ h_m คือสัมประสิทธิ์การมวล (m/s)

M_e คือความชื้นสมดุล (kg/kg dry basis)

M_{in} คือความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (kg/kg dry basis)

M_s คือความชื้นที่ผิวของวัสดุ (kg/kg dry basis) และ

R คือรัศมีสมมูล (m)

การหาผลเฉลยของสมการควบคุมนี้จะใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ด้วยระเบียบวิธีชัดแจ้ง เป็นการประมาณค่าอนุพันธ์
จากการแบ่งย่อยไปข้างหน้า และการแบ่งย่อยแบบตรงกลาง สุดท้ายนี้การหาค่าความชื้นเฉลี่ยเพื่อทำการตรวจสอบ

ความชื้นที่ได้มาจากการทำนาย เนื่องจากการหาความชื้นด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็นแบบตำแหน่งของเม็ด ซึ่งสามารถหาได้จากการคำนวณโดยใช้การหาค่าเฉลี่ยความชื้นด้วยอินทิกรัลจะเกิดขึ้นหลังจากการหาปริมาณความชื้นในวัสดุที่กระจายอยู่แต่ละตำแหน่งดังแสดงในสมการที่ 8 ทั้งนี้สามารถใช้กฎเศษหนึ่งส่วนสามของซิมป์สันในการประมาณค่าอินทิกรัลได้

$$\overline{M}(t) = \frac{1}{R} \int_0^R f(r) dr \quad (8)$$

2.3.2.2 ทรงกระบอก

สมการการแพร่ความชื้นของพิกัดทรงกระบอกสมมาตรมีการแพร่ความชื้นในแนวรัศมี มีความยาวเป็นอนันต์และสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นค่าคงที่ สามารถเขียนได้ในสมการที่ 9:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right] \quad (9)$$

โดยที่ z คือระยะตามแนวแกน (m)

เช่นเดียวกับแบบจำลองทรงกลมมีการกำหนดสภาวะขอบเขตที่ $t > 0$ ซึ่งความชื้นภายในเริ่มมีการแพร่มีค่าเท่ากับค่าที่บริเวณพื้นผิวสู่ชั้นขอบเขต โดยความชื้นของชั้นขอบเขตมีค่าเท่ากับค่าความชื้นสมดุลของวัสดุ เพียงแต่ทรงกระบอกมีการพิจารณาระยะตามแนวแกน z เพิ่มขึ้นมา ทั้งนี้ในการหาผลเฉลยของสมการควบคุมนี้จะใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ด้วยระเบียบวิธีชัดแจ้ง โดยมีแกน i และ j ที่ถูกพิจารณา พร้อมทั้งคำนวณระยะตามแนวแกน เช่นเดียวกันกับแบบจำลองทรงกลมในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการหาค่าเฉลี่ยของความชื้นทั้งหมดด้วยการอินทิกรัลดังแสดงในสมการที่ 11:

$$\overline{M}(t) = \frac{\pi r}{V} \int_0^L \int_0^R f(r, z) dr dz \quad (11)$$

โดยที่ V คือปริมาตรของวัสดุ

2.4 การตรวจสอบแบบจำลอง

ค่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) ดังแสดงในสมการที่ 12 โดยยังมีค่าเข้าใกล้ 1 แบบจำลองจะยังมีความเหมาะสม และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรากที่สอง (Root mean square error: RMSE) ยังมีค่าน้อยบ่งบอกได้แบบจำลองนั้นมีความเที่ยงตรงที่สูง ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งน้อยมาก ซึ่งคำนวณจาก ดังแสดงในสมการที่ 13

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2} \right) \quad (12)$$

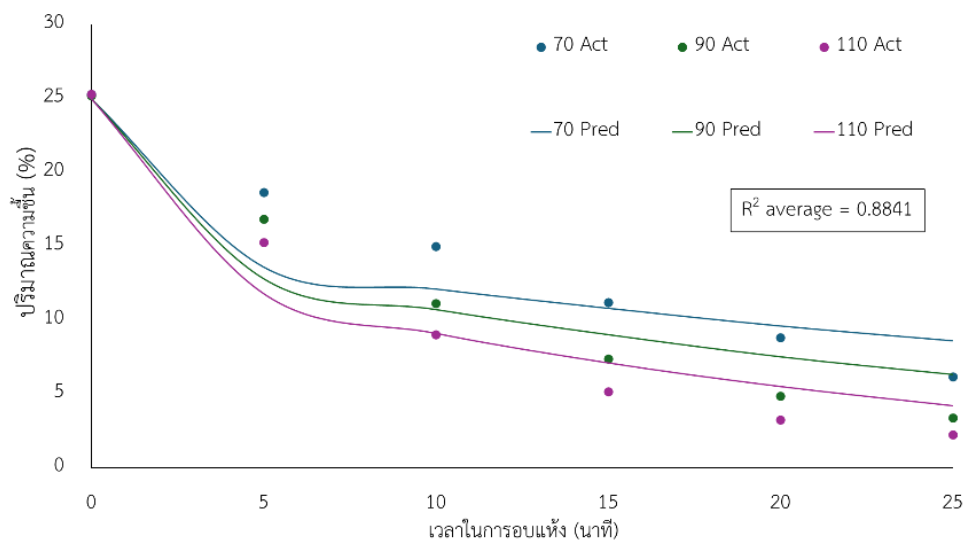
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum (\hat{y} - y)^2} \quad (13)$$

โดยที่ $\hat{y}$ คือค่าการทำนายจากแบบจำลอง
 y คือค่าที่ได้จากการทดลองจริง

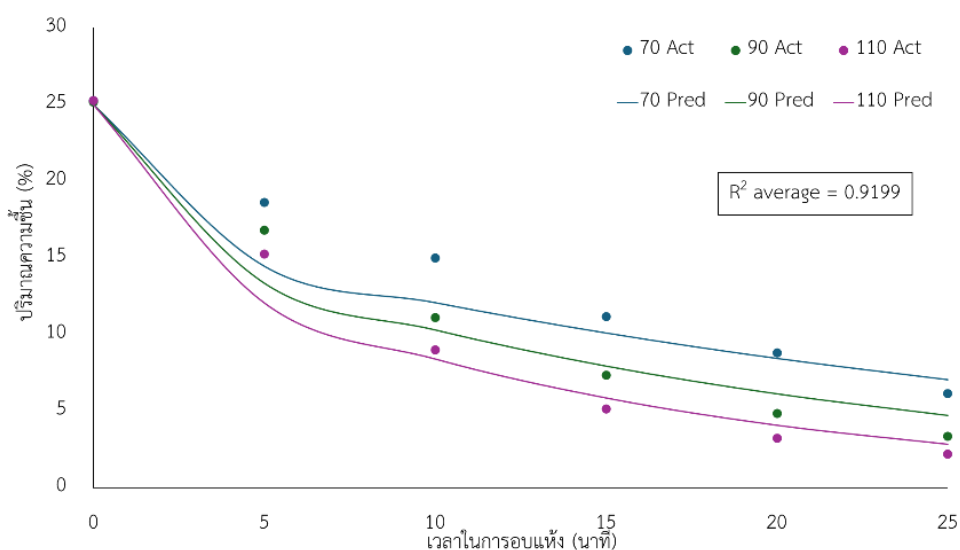
3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 แบบจำลองเชิงทฤษฎี

รูปที่ 2 และ 3 ได้แสดงผลของการตรวจสอบการทำนายความขึ้นเฉลี่ยทรงกลมและทรงกระบอกตามลำดับด้วยแบบจำลองเชิงทฤษฎี พบว่าเส้นความขึ้นที่ทำนายในแบบจำลองกับการทดลองไม่ได้พอดีกัน ส่งผลต่อการทำนายความขึ้นในแต่ละอุณหภูมิ [13] อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบพบว่าค่า R^2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และ RMSE มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2 เนื่องจากเส้นทำนายที่อุณหภูมิการอบแห้งสูงมีความใกล้เคียงกับจุดการทดลองจริง ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของแบบจำลองการอบแห้งของอุณหภูมิทั้ง 3 สังเกตได้ว่ารูปทรงกระบอกมีค่าเฉลี่ย R^2 ที่สูงกว่าของรูปทรงกลม พร้อมทั้งค่าเฉลี่ย RMSE ก็เช่นเดียวกันที่มีค่าน้อยกว่า ส่งผลทำให้แบบจำลองรูปทรงกระบอกที่มีความใกล้เคียงกับรูปทรงจริงมีการทำนายความขึ้นที่แม่นยำมากกว่า [14] แต่อย่างไรก็ตามการทำนายของทั้ง 2 รูปทรงในช่วงเวลาที่มากกว่า 0 ถึง 5 นาที ซึ่งเป็นช่วงที่ผลของการทำนายความขึ้นนั้นจะมีค่าที่ต่ำกว่าความขึ้นจริง หรือบ่งบอกได้ว่าการแพร่ของความขึ้นที่เร็วเกินไปแต่ค่าตอบเริ่มมีการลู่เข้าในช่วงเวลาที่ 10 นาที แต่ค่าตอบก็เริ่มลู่ออกอีกครั้งในช่วงเวลาดังแต่ 15 นาทีขึ้นไป ซึ่งพบว่ามีค่าที่แปรปรวนสูงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการใช้สมการจากผลเฉลยเชิงวิเคราะห์เป็นการหาความขึ้นแบบเฉลี่ยทั้งวัสดุ



รูปที่ 2 ผลการตรวจสอบการทำนายสถานะความขึ้นรูปทรงกลมด้วยวิธีเชิงทฤษฎี



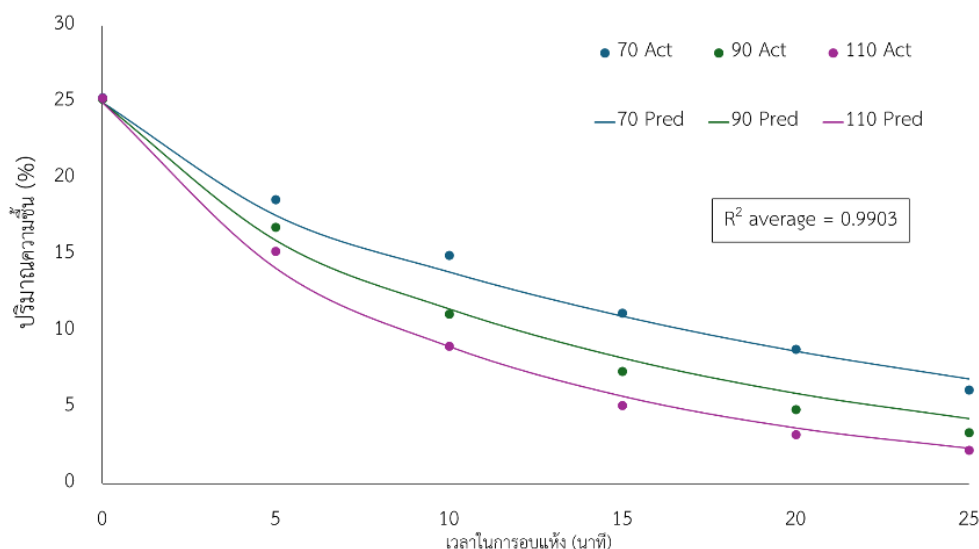
รูปที่ 3 ผลการตรวจสอบการทำนายสถานะความขึ้นรูปทรงกระบอกด้วยวิธีเชิงทฤษฎี

ตารางที่ 2 ค่า R^2 และ RMSE ในแบบจำลองการอบแห้งเชิงทฤษฎีแต่ละอุณหภูมิ

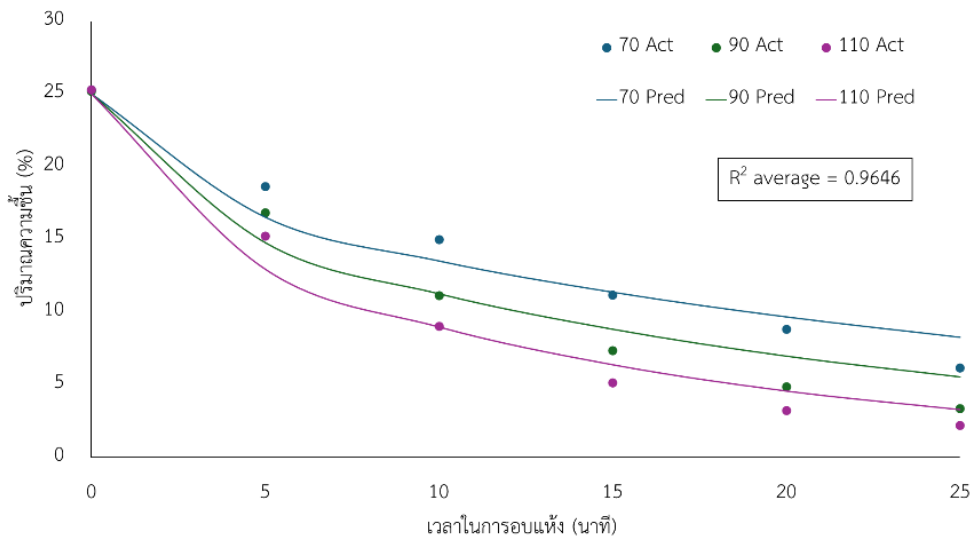
รูปทรง	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	R^2	RMSE
ทรงกลม	70	0.8095	2.4
	90	0.9063	2.1
	110	0.9366	1.9
	เฉลี่ย	0.8841	2.1
ทรงกระบอก	70	0.8484	2.1
	90	0.9470	1.6
	110	0.9642	1.4
	เฉลี่ย	0.9199	1.7

3.2 แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

รูปที่ 4 และ 5 แสดงถึงแบบจำลองจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจากรูปทรงกลมและทรงกระบอกตามลำดับ เมื่อเทียบกับแบบจำลองการอบแห้งด้วยทฤษฎีแล้วจะพบว่ามี R^2 ที่ใกล้เคียง 1 มากกว่าทั้ง 2 รูปทรง พร้อมทั้ง RMSE ก็น้อยกว่า เนื่องมาจากการทำนายค่าความชื้น ซึ่งแบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีความละเอียดในการหาความชื้นที่มีความซับซ้อนโดยสามารถปรับตัวให้มีความเหมาะสมได้เป็นอย่างดี [15, 16] แตกต่างจากแบบจำลองทฤษฎีที่อธิบายการระเหยของความชื้นได้บนพื้นฐานทางทฤษฎีของฟิลิกส์ [17] เช่นเดียวกันเมื่อแยกดูค่า R^2 พบว่ามียิ่งอุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นของค่า R^2 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบจาก 2 รูปทรงที่ทำนายค่าความชื้นจากแบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข จากผลการตรวจสอบโดยใช้ค่า R^2 และ RMSE พบว่าแบบจำลองการอบแห้งรูปทรงกลมมีค่า R^2 เฉลี่ยจากทั้ง 3 อุณหภูมิใกล้เคียง 1 มากที่สุด วัสดุเม็ดอาหารมีแนวโน้มในการระเหยตัวของความชื้นออกจากวัสดุได้เป็นอย่างดีในแนวรัศมีซึ่งมาจากเส้นผ่านศูนย์กลางการสมมูลของเม็ดอาหาร ถึงรูปทรงกระบอกที่มีความใกล้เคียงกับรูปทรงเม็ดอาหารจริงจะมีค่า R^2 ที่น้อยกว่ารูปทรงกลมเป็นเพราะการระเหยออกของน้ำในเม็ดอาหารในแนวความยาวมีแนวโน้มที่จะถูกอธิบายได้ยังไม่ดีพอเท่ากับในแนวรัศมี แต่อย่างไรก็ตามในแบบจำลองทรงกระบอกมีค่า R^2 มีมากกว่า 0.95 ถือเป็นที่น่ายอมรับในการนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองการอบแห้ง [18] สุดท้ายนี้ในการสร้างแบบจำลองการอบแห้งเม็ดอาหารสัตว์จากขยะอินทรีย์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขรูปทรงกลมแบบวัสดุอุณหภูมิในวัสดุคงที่ให้ความเหมาะสมที่ดี ซึ่งส่งผลต่อการควบคุมใช้งานในทางอุตสาหกรรมโดยโมเดลที่มีค่า R^2 ที่ใกล้เคียง 1 ช่วยเพิ่มคุณภาพและประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ [19]



รูปที่ 4 ผลการตรวจสอบการทำนายสถานะความชื้นรูปทรงกลมด้วยวิธีเชิงตัวเลข



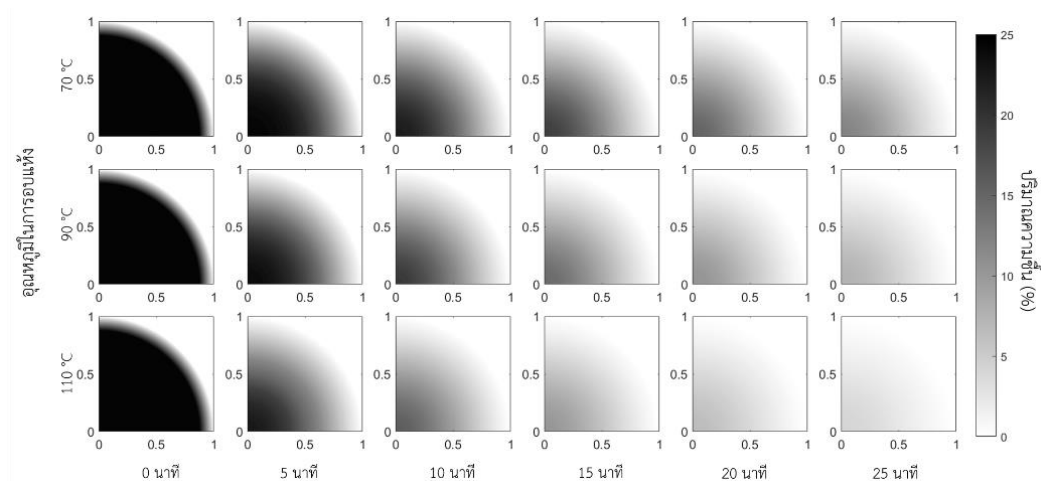
รูปที่ 5 ผลการตรวจสอบการทำนายสถานะความชื้นรูปทรงกระบอกด้วยวิธีเชิงตัวเลข

ตารางที่ 3 ค่า R^2 และ RMSE ในแบบจำลองการอบแห้งระยะเปียกวิธีเชิงตัวเลขแต่ละอุณหภูมิ

รูปทรง	อุณหภูมิ (°C)	R^2	RMSE
ทรงกลม	70	0.9866	0.6
	90	0.9901	0.7
	110	0.9943	0.6
	เฉลี่ย	0.9903	0.6
ทรงกระบอก	70	0.9587	1.1
	90	0.9612	1.3
	110	0.9739	1.2
	เฉลี่ย	0.9646	1.2

3.3 การแพร่ความชื้นในเม็ดอาหาร

การกระจายตัวของความชื้นถูกนำเสนอในแผนภาพคอนทัวร์ (contour plot) ดังแสดงในรูปที่ 6 มีการกระจายตัวของความชื้นตามแนวรัศมีรูปแบบในการจำลองในส่วนหนึ่งในสี่ตามสมมติฐานที่กำหนด จากแบบจำลองระยะเปียกวิธีเชิงตัวเลขที่สร้างขึ้นซึ่งสร้างมาจากตัวโมเดลที่มีความเหมาะสมในการอธิบายพฤติกรรมการระเหยของความชื้น โดยสามารถเห็นการกระจายตัวของความชื้นภายในวัสดุได้ดี ในระยะเวลาเริ่มต้นที่ 0 นาที่เม็ดอาหารมีความชื้นเฉลี่ยทั้งหมด 25% เมื่อเริ่มทำการอบแห้งความชื้นบริเวณพื้นผิวจะเริ่มลดลงในช่วงเวลาตั้งแต่ 5 นาที่ และเมื่อระยะเวลาเริ่มเพิ่มขึ้นระดับความชื้นก็แพร่ออกไปมากขึ้น ซึ่งความชื้นลดลงไล่จากพื้นผิวตามกลไกการแพร่ความชื้นหรือถ่ายโอนมวล [20] ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอบแห้งมีแนวโน้มที่จะส่งผลให้การแพร่ของความชื้นเร็วมากขึ้นจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง และคุณสมบัติด้านต่างๆ นอกจากนี้แบบจำลองที่ได้สามารถใช้ในการทำนายหาคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปตามการแพร่ของความชื้นได้ เช่น ค่าสีของแผ่นยางพาราที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาในการอบแห้ง [21] และการควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อราในข้าว [22] เป็นต้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยในอนาคตควรศึกษาแบบจำลองของเม็ดอาหารในสถานะที่อุณหภูมิไม่คง (Non-isothermal) เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีสร้างโมเดลแบบนี้ พร้อมทั้งการหาคุณสมบัติที่สำคัญที่เปลี่ยนแปลงไปในกระบวนการอบแห้ง เช่น ค่าความคงทน การลอยตัวในน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ หรือระดับโภชนาการในเม็ดอาหาร เป็นต้น



รูปที่ 6 สภาวะการลดความชื้นในเม็ดอาหารรูปทรงกลมในแต่ละอุณหภูมิที่เวลาแตกต่างกัน

4. สรุป

การศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อการสร้างแบบจำลองการอบแห้งที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ โดยในการเลือกรูปแบบการสร้างแบบจำลองทั้ง 2 แบบ ได้แก่ แบบทฤษฎี และระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้ค้นพบถึงข้อแตกต่างในการทำนายความชื้นที่แตกต่างกัน โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีความเหมาะสมในการทำนายการแพร่ความชื้นของวัสดุที่ซับซ้อนได้ดีกว่า นอกจากนี้การกำหนดรูปทรงในการสร้างแบบจำลองส่งผลต่อความแม่นยำแต่ยังอยู่ในจุดที่ยอมรับได้ ในแบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในรูปทรงกลมมีค่า R^2 สูงถึง 0.9903 ในการได้รับแบบจำลองที่เหมาะสมแล้วสามารถสร้างสภาวะการลดความชื้นภายในวัสดุ ซึ่งสามารถที่จะเห็นรูปแบบการแพร่ของความชื้นในช่วงเวลา และอุณหภูมิเพื่อนำไปศึกษาต่อเกี่ยวกับคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงต่อความชื้นได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษานี้ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง [KREF016510]

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lambert C, Cartailier J, Rouhouse S, Almeida G, Courtois F. Characterization and modeling of cooling and drying of pellets for animal feed. *Drying Technology*. 2018;36(3):255-66.
- [2] Ahmed I, Ali A, Ali B, Hassan M, Hussain S, Hashmi H, et al. Pelletization of biomass feedstocks: effect of moisture content, particle size and a binder on characteristics of biomass pellets. 2021.
- [3] Laei K, Alizade H, Kianmehr M. The Effects of Moisture Content, Temperature, and Compaction Pressure on the Compressibility of Animal Feed Pellets Produced From Green Pistachio Shell Residues. 2023.
- [4] Phu PQ, Thanh BT, editors. A Review on Pulsed Fluidized Bed Dryer. *Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2020)*; 2021 2021//; Cham: Springer International Publishing.
- [5] Samuelsen TA, Haustveit G, Kousoulaki K. The use of tunicate (*Ciona intestinalis*) as a sustainable protein source in fish feed – Effects on the extrusion process, physical pellet quality and microstructure. *Animal Feed Science and Technology*. 2022;284:115193.
- [6] Rattanamechaiskul C, Junka N, Prachayawarakorn S, Soponronnarit S. Modeling the improved textural properties of purple waxy rice dried through fluidization. *Drying Technology*. 2018;36(9):1061-75.

-
- [7] Abu M, Alabi O, Jiya E. Pellet Versus marsh: assessing the impact of feed forms on growth performance, nutrient digestibility, carcass characteristics and health of broiler chickens–A Review. *Nigerian Journal of Animal Science and Technology (NJAST)*. 2023;6(1):52-64.
- [8] Wang H, Ma S, Yang J, Qin Y, Cheng H, Xue M, et al. Optimization of the process parameters for extruded commercial sinking fish feed with mixed plant protein sources. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(1):e13599.
- [9] ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล. การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ (ฉบับปรับปรุง). ชุมพร: ซีเ็ดยูเคชั่น; 2567.
- [10] Malekjani N, Emam-Djomeh Z, Hashemabadi SH, Askari GR. Modeling Thin Layer Drying Kinetics, Moisture Diffusivity and Activation Energy of Hazelnuts during Microwave-Convective Drying. *International Journal of Food Engineering*. 2018;14(2).
- [11] Maikaew J, Phetkeri C, Polnakarn C, Katpimol N, Srisang N, Srisang S, editors. *Fish Food Pellet Characteristics After Coating Using Fluidized Bed Technique*. IAMBEST; 2023.
- [12] จตุพัฒน์ ไม้แก้ว, ฤทธิพงษ์ ปรามศรีอรุณ. เครื่องผลิตอาหารปลาจากขยะอินทรีย์ในชุมชนชายฝั่งทะเล: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์; 2564.
- [13] Junka N, Rattanamechaikul C, Wongs-Aree C, Soponronnarit S. Drying and mathematical modelling for the decelerated rancidity of treated jasmine brown rice using different drying media. *Journal of Food Engineering*. 2021;289:110165.
- [14] Prakash B, Pan Z. Effect of Geometry of Rice Kernels on Drying Modeling Results. *Drying Technology*. 2012;30(8):801-7.
- [15] Vu HT, Tsotsas E. Mass and Heat Transport Models for Analysis of the Drying Process in Porous Media: A Review and Numerical Implementation. *International Journal of Chemical Engineering*. 2018;2018(1):9456418.
- [16] Zhao J, Fu Z, Jia X, Cai Y. Modeling conventional drying of wood: Inclusion of a moving evaporation interface. *Drying Technology*. 2016;34(5):530-8.
- [17] Hii CL, Chiang CL, Putranto A. Modelling heat and mass transfer processes during drying: Empirical, theoretical and reaction engineering approach. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2586(1).
- [18] Lopes S, Santos R, Wessel D, Brás I, Silva ME, Ferreira T, Pereira C, editors. *Mathematical Modeling of a Sustainable Dewatering Process for Blueberries and Raspberries Preservation*. Sustainable Development with Renewable Energy; 2024 2024//; Cham: Springer Nature Switzerland.
- [19] Kemp IC. Application of mechanistic drying models in pharmaceuticals and other industries. *Drying Technology*. 2019;37(5):600-11.
- [20] Junka N, Rattanamechaikul C. Mathematical modelling to control fungal growth in paddy dried using fluidisation. *Biosystems Engineering*. 2021;204:312-25.
- [21] Junka N, Rattanamechaikul C, Prachayawarakorn S, Soponronnarit S. Drying guideline to control colour quality of para rubber sheet by computation method. *Biosystems Engineering*. 2018;176:151-61.
- [22] Junka N, Rattanamechaikul C. Optimization modeling of fluid bed drying and coating technique to control fungal growth and aflatoxin content in paddy. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022;46(1):e16135.
-

อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างโปรตีนถั่วเหลืองและกลูเตนข้าวสาลีต่อสมบัติทางกายภาพ
ของลูกชิ้นเลียนแบบเนื้อสัตว์จากพืชThe effect of soy protein and wheat gluten ratio on physical properties
of plant-based meat ball analogueชญชิตา พุ่มตาก้อง¹ และ ประสงค์ ศิริวงศ์ไธชาต^{1,*}Chanunchida Pumtakong¹ and Prasong Siriwongwilaichat^{1,*}¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม 73000¹Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000

*Corresponding author: Prasong Siriwongwilaichat, e-mail address: deersong1@yahoo.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างโปรตีนถั่วเหลือง (X_1) และกลูเตนข้าวสาลี (X_2) ต่อสมบัติทางกายภาพของลูกชิ้นเลียนแบบเนื้อสัตว์ (PMB) โดยออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) พบว่าปัจจัยทั้ง 2 ไม่มีผลต่อค่าสีของ PMB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) พบความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ปัจจัยกับสมบัติทางกายภาพของ PMB พบว่ามีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง (Linear) กับ Gumminess และมีความสัมพันธ์แบบสมการกำลังสอง (Quadratic) กับ Chewiness ($p \leq 0.05$) และมีความสัมพันธ์แบบสมการกำลังสาม (Cubic) กับความสามารถในการอุ้มน้ำ (WHC) ซึ่งเมื่อนำสมการที่มีความสัมพันธ์กันทั้ง 3 ไปทำนายพบว่าอัตราส่วนปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองและกลูเตนข้าวสาลีที่เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาต่อ คือ ใช้โปรตีนถั่วเหลือง (X_1) เท่ากับ 20 ส่วน และกลูเตนข้าวสาลี (X_2) เท่ากับ 30 ส่วน

คำสำคัญ: โปรตีนถั่วเหลือง, กลูเตนข้าวสาลี, โปรตีนทดแทนจากพืช, สมบัติทางกายภาพ, ความสามารถในการอุ้มน้ำ

Abstract

The purpose of this study was to investigate the influence of the ratio between soy protein (X_1) and wheat gluten (X_2) on physical properties of plant-based meat ball analogue (PMB) using mixture design. It was found that the two factors had no significant effect on the color value of PMB ($p > 0.05$). The relationship between the two factors and physical properties was found to have a linear equation with gumminess, a quadratic equation with chewiness ($p \leq 0.05$), and cubic equation with the water holding capacity (WHC). These equation was then used for predicting the optimum X_1 and X_2 . It was found that the optimum ratio was $X_1 : X_2$ at 20.0 : 30.0 which was suitable for further development.

Keywords: Soy protein, Wheat gluten, Plant-based analogue, Physical properties, Water holding capacity

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเนื่องมาจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และเกิดภาวะโลกร้อน ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางอาหาร เนื่องจากการผลิตโปรตีนจากสัตว์ใช้ทรัพยากรในการผลิตมากกว่าอาหารจากพืช 3-4 เท่า สิ่งนี้นำไปสู่การสำรวจกลยุทธ์ต่างๆ โดยนักวิจัยและอุตสาหกรรมอาหารเพื่อพัฒนามัน เนื้อสัตว์ และผลิตภัณฑ์ไฮทางเลือกจากแหล่งพืชต่างๆ โดยใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรมในการผลิตโปรตีนจากพืช มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากเป็นโปรตีนที่หาได้ง่าย ราคาไม่แพง [4] ขณะเดียวกันกลุ่มผู้บริโภคแบบ Flexitarian มีมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของจำนวนกลุ่มผู้รับประทานมังสวิรัตและผู้รับประทานมังสวิรัตที่มีความยืดหยุ่น จะเป็นกลุ่มผู้บริโภคหลักที่ช่วยขับเคลื่อนการใช้โปรตีนจากพืชในผลิตภัณฑ์อาหาร [6] อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้โปรตีนจากพืช มีข้อจำกัดหลายประการต่อการยอมรับของผู้บริโภค รวมถึงกลิ่นพืชตระกูลถั่ว ความกังวลเกี่ยวกับอาหารดัดแปลงพันธุกรรม ต้นทุน ความไม่เพียงพอทางด้านโภชนาการที่เกี่ยวข้องกับสารอาหารรอง การไม่มีกฎระเบียบด้านความปลอดภัย และการเติมส่วนผสมที่ขัดต่อจุดประสงค์ในการส่งเสริมสุขภาพ ปัจจุบันการลงทุนพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ใช้โปรตีนจากพืชมีศักยภาพที่จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วไปสู่การบริโภคอาหารที่ยั่งยืนและดีต่อสุขภาพในวงกว้างในอนาคตอันใกล้ [10] ผลิตภัณฑ์กลุ่มทดแทนเนื้อสัตว์ส่วนใหญ่

มักจะพบปัญหาในด้านของลักษณะเนื้อสัมผัส ซึ่งสารไฮโดรคอลลอยด์จะสามารถช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสได้ สารไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน ส่วนประกอบหลักของผลิตภัณฑ์ทดแทนเนื้อสัตว์ คือ โปรตีนสกัดจากพืช แต่ละแบรนด์ก็จะเลือกใช้วัตถุดิบที่ต่างกันออกไป แต่ที่นิยมมักเป็น โปรตีนถั่วเหลือง (Soy protein isolate หรือ Soy protein concentrate) โปรตีนข้าวสาลี (Wheat protein) โปรตีนถั่วลันเตา (Pea protein isolate) หรืออาจใช้โปรตีนพืชมากกว่าหนึ่งชนิดผสมกัน ผงโปรตีนดังกล่าวจะถูกนำมาผสมกับน้ำมันพืช เกลือ วิตามิน แร่ธาตุ โยอาหาร เครื่องเทศ สีที่สกัดจากธรรมชาติหรือสารที่มีโครงสร้างคล้ายกระดูกที่ใส่ในเนื้อสัตว์ กลิ่นรส สารที่ช่วยในการอุ้มน้ำ วัตถุเจือปนอาหารที่ช่วยในการขึ้นรูปและการปรับเนื้อสัมผัส สารต้านออกซิเดชัน/สารป้องกันการหืน สารต้านจุลินทรีย์ ซึ่งชนิดและปริมาณที่ใช้ก็แตกต่างกันตามสูตรของแต่ละแบรนด์ ผลิตภัณฑ์บางชนิดก็นำส่วนผสมไปผ่านกระบวนการที่ช่วยขึ้นรูปให้ส่วนผสมมีลักษณะเป็นเส้น ๆ คล้ายกับเส้นใยในชิ้นเนื้อสัตว์ (Muscle fiber) และยังมีค่าขึ้นใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ คือ 50-70% ซึ่งวัตถุเจือปนอาหารและกระบวนการผลิตนี้เอง ที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์ทดแทนเนื้อสัตว์ มีรสชาติและเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงกับเนื้อสัตว์มากกว่า โปรตีนเกษตร โปรตีนเกษตรทำจากถั่วเหลืองที่สกัดน้ำมันออกแล้วมาผ่านกระบวนการอัดพองที่ความชื้นต่ำ (Low-moisture extrusion) ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะพองๆ และต้องแช่น้ำก่อนนำมาปรุงอาหาร (ความชื้น < 8%) [3] จึงเป็นที่มาในการเลือกศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโปรตีนถั่วเหลืองและกลูเตนข้าวสาลีว่ามีผลต่อลักษณะด้านกายภาพของลูกชิ้นอย่างไร อีกทั้งวัตถุดิบที่เลือกใช้ในการศึกษานั้นหาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพงและเป็นวัตถุดิบที่ใกล้เคียงกับการผลิตในท้องตลาด จึงมีโอกาสนำเข้าสู่ตลาดและพัฒนาต่อยอดได้เพิ่มขึ้นในอนาคต

1.1 ขอบเขตการวิจัย

1.1.1 ศึกษาทดลองอัตราส่วนระหว่างโปรตีนถั่วเหลือง (X_1) และกลูเตนข้าวสาลี (X_2) ในการพัฒนาลูกชิ้นเลียนแบบเนื้อสัตว์จากพืชตามการออกแบบการทดลองแบบผสม

1.1.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี วัดคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเลียนแบบเนื้อสัตว์จากพืชโดยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) วัดแบบ TPA ได้แก่ Hardness, Adhesiveness, Springiness, Cohesiveness, Gumminess และ Chewiness และวัดความสามารถในการอุ้มน้ำ

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

กลูเตนข้าวสาลีและโซเดียมไทรโพลฟอสเฟต จากบริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด ผงบุก จากบริษัท พรีเมอ เทคดิง จำกัด โซเดียมไบคาร์บอเนต ยี่ห้อ McGarrett และโปรตีนถั่วเหลือง แป้งมันสำปะหลัง เนยขาว ซีอิ๊วขาว เกลือ พริกไทยขาวป่น จากตลาดท้องถิ่นและห้างสรรพสินค้าภายในอำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม

2.2 การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมโปรตีนถั่วเหลือง เตรียมได้จากใช้โปรตีนจากถั่วเหลือง ตรา โปรตีนเกษตร ผลิตโดย สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยซื้อจากตลาดท้องถิ่น (ตลาดล่าง) อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม วิธีการเตรียมให้นำโปรตีนถั่วเหลือง (X_1) แช่น้ำอุณหภูมิห้องนาน 1 ชั่วโมง แล้วปั่นน้ำออก ปั่นหยาบด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ BLENDFORCE (TEFAL, Model BL478B66, France) ความเร็วรอบระดับ 1 นาน 20 วินาที จากนั้นจึงเก็บไว้ในภาชนะเพื่อรอนำไปใช้งาน

2.3 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

ชั่งน้ำหนักกลูเตนข้าวสาลี (X_2) แป้งมันสำปะหลัง ผงบุก เกลือ โซเดียมไบคาร์บอเนต พริกไทยขาวป่นและฟอสเฟต ร่อนผ่านตะแกรงลงในโถปั่นของเครื่องปั่นน้ำผลไม้ BLENDFORCE (TEFAL, Model BL478B66, France) จากนั้นชั่งโปรตีนถั่วเหลือง (X_1) ที่เตรียมไว้ เนยขาว ซีอิ๊วขาว และน้ำมันบางส่วนใส่ลงในโถปั่น ปั่นด้วยความเร็วรอบระดับ 1 จับเวลา 30 วินาที จากนั้นเติมน้ำส่วนที่เหลือ และปั่นต่ออีก 1 นาที จากนั้นนำส่วนผสมที่ปั่นเสร็จเรียบร้อยแล้วมานวดต่อในชามผสมแป้งหรือกะละมัง นวดจนส่วนผสมเนียนเป็นเนื้อเดียวกัน ตัดแบ่งออกมาชั่งน้ำหนัก 8.0-8.5 กรัม แล้วปั้นหรือจับให้มีรูปทรงเป็นวงกลมเช่นเดียวกับลูกชิ้น พักไว้ในกล่องประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำมวลลงในน้ำเดือดอุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เวลา 3 นาที จากนั้นนำไปพักในน้ำเย็นอุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำขึ้นพักบนตะแกรง จากนั้นจึงนำไปศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ

2.4 การออกแบบการทดลอง

ทำการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ในรูปแบบ D-Optimal ซึ่งเหมาะสมกับช่วงของระดับปัจจัยที่ทำการศึกษา ซึ่งไม่ได้กำหนดค่าเริ่มต้นจาก 0 [7] โดยในการศึกษานี้ มีปัจจัยการทดลอง คือ โปรตีนถั่วเหลือง (X_1) และ กลูเตนข้าวสาลี (X_2) โดยมีช่วงการผสมของโปรตีนถั่วเหลือง (X_1) 20.0-30.0 % และกลูเตนข้าวสาลี (X_2) 20.0-30.0 % จากนั้นทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์โดยการสร้างสมการถดถอย (Regression model) ของอัตราส่วนผสมทั้ง 2 เพื่อพยากรณ์อัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมต่อสมบัติทางกายภาพ โดยใช้โปรแกรม Design-Expert โดยมีการออกแบบการทดลอง ทั้งหมด 9 สูตร แสดงดัง Table 1

Table 1 Experimental runs for plant-based meat ball analogue formulation generated according to D-Optimal mixture design

Plant-based meat ball analogue sample runs	Variable level (%)	
	Soy protein (X_1)	Wheat gluten (X_2)
1★	20.0	30.0
2	27.5	22.5
3	22.5	27.5
4●	25.0	25.0
5●	25.0	25.0
6★	20.0	30.0
7■	30.0	20.0
8■	30.0	20.0
9■	30.0	20.0

The symbol ★ ● ■ represent duplicated experiments according to D-Optimal mixture design.

Other ingredients include water, shortening, tapioca starch, soy sauce, sodium bicarbonate, konjac powder, salt, ground white pepper. and sodium tripolyphosphate There is the same amount in every formula.

2.5 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเลียนแบบเนื้อสัตว์จากพืช

2.5.1 การวิเคราะห์คุณภาพเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเลียนแบบเนื้อสัตว์จากพืช (Texture Profile Analysis)

วัดค่าแรงกดด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyser, Model TA-XT2i, Stable Micro System, UK) พร้อมหัววัดเนื้อสัมผัสชนิด Cylinder probe เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร วัด Texture Profile Analyser (TPA) เป็นวิธีทดสอบเพื่อวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของอาหารโดยใช้แรงกดด้วยหัวทดสอบแบบแผ่นแบน มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่กว่าลูกชิ้น กดลงบนลูกชิ้น 2 ครั้ง เพื่อจำลองการใช้ฟันบดอาหาร โดยใช้ค่าความยืดหยุ่นของอาหารเมื่อออกแรงกดแล้วกลับคืนรูปได้ ไม่ยืดตัวหรือเสียรูปทรง (Springiness) ใช้หัววัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร กำหนด Pre-test speed เท่ากับ 3 มิลลิเมตร/วินาที Test speed เท่ากับ 1 มิลลิเมตร/วินาที Post-test speed เท่ากับ 3 มิลลิเมตร/วินาที และกดลงไปร้อยละ 60 ของความสูงตัวอย่าง [1] ตัดตัวอย่างให้มีขนาด 12x12x12 มิลลิเมตร โดยวัดค่าตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ทำการบันทึกค่าความแข็ง (Hardness) การยึดติดของอาหาร (Adhesiveness) ความสามารถในการเกาะตัว (Cohesiveness) ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ค่าที่อาหารกึ่งแข็งที่แตกตัวออกจนพร้อมที่จะกลืนได้ (Gumminess) และความยากง่ายในการเคี้ยวตัวอย่าง (Chewiness) นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ผลทางสถิติ

2.5.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านสีของผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเลียนแบบเนื้อสัตว์จากพืช

การวิเคราะห์ค่าสีของผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเลียนแบบเนื้อสัตว์จากพืช โดยการทดสอบค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) ค่าสีเหลือง (b^*) ของตัวอย่างลูกชิ้นเลียนแบบเนื้อสัตว์จากพืช เครื่องวัดค่าสีในระบบ CIE LAB (L^* a^* b^*) โดยใช้เครื่องวัดสีสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Colorimeter) (ยี่ห้อ Konica Minolta รุ่น CM-5, Japan) ด้วยการสุ่มตัวอย่าง ลูกชิ้นจำนวน 5 ลูกต่อสูตร วางตัวอย่างในจานรอง (Plate) ที่ละ 1 ลูก แล้ววางบนเครื่องวัดสีครอบด้วยกระบอกทึบแสง จากนั้นทำการวัดค่า อ่านค่า และบันทึกผล ตัดแปลงวิธีจาก ตรีชฎา [2]

โดย L^* หมายถึง ความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (ดำ) จนถึง 100 (ขาว)

$+a^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีแดง และ $-a^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีเขียว

$+b^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีเหลือง และ $-b^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีน้ำเงิน

2.5.3 การทดสอบการอุ้มน้ำ (Water holding capacity, WHC)

การทดสอบการอุ้มน้ำ (Water holding capacity, WHC) ดัดแปลงจากวิธีการของ Tee and Siow [11] โดยนำตัวอย่างลูกชิ้นวางระหว่างกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ด้านบน 2 แผ่น ด้านล่าง 2 แผ่น กดด้วยน้ำหนัก 5 กิโลกรัม เป็นเวลา 2 นาที ชั่งน้ำหนักลูกชิ้นก่อนกดและหลังกด

$$\text{สูตรคำนวณ \% WHC} = ((\text{น้ำหนักลูกชิ้นก่อนกด} - \text{น้ำหนักลูกชิ้นหลังกด}) / \text{น้ำหนักลูกชิ้นก่อนกด}) \times 100$$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ PMB ทั้ง 9 สูตร โดยเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 1 พบว่าสูตรที่ 7[■], 8[■] และ 9[■] ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง $X_1 : X_2$ เท่ากับ 30.0 : 20.0 มีปริมาณความแฉะที่บริเวณพื้นผิวมากที่สุด สูตรที่ 2 มีอัตราส่วนระหว่าง $X_1 : X_2$ เท่ากับ 27.5 : 22.5 มีความแฉะที่พื้นผิวรองลงมา ส่วนสูตรที่มีความชื้นแฉะที่พื้นผิวน้อย ได้แก่ สูตรที่ 1[★], 6[★] ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง $X_1 : X_2$ เท่ากับ 20.0 : 30.0 รองลงมาได้แก่สูตรที่ 4[●] และ 5[●] มีอัตราส่วนระหว่าง $X_1 : X_2$ เท่ากับ 25.0 : 25.0 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับอัตราส่วนของส่วนผสมพบว่าสูตรที่ประกอบด้วยส่วนผสมของโปรตีนถั่วเหลือง (X_1) มากกว่าร้อยละ 25 ขึ้นไป และมีปริมาณกลูเตนข้าวสาลี (X_2) ต่ำกว่าร้อยละ 25 จะมีลักษณะแฉะที่พื้นผิวภายนอกมากกว่าสูตรที่ประกอบด้วยส่วนผสมของ X_1 ต่ำกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 25 และมีปริมาณ X_2 มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 25 Singh and Singh [9] รายงานว่าโครงสร้างโปรตีนและการมีส่วนประกอบอื่นๆ มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ และน้ำมันของกลูเตน ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าปริมาณของ X_2 มีความสำคัญต่อลักษณะทางกายภาพของ ซึ่งปริมาณของ X_2 มากขึ้นจะทำให้ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ PMB มีความแฉะน้อยลง

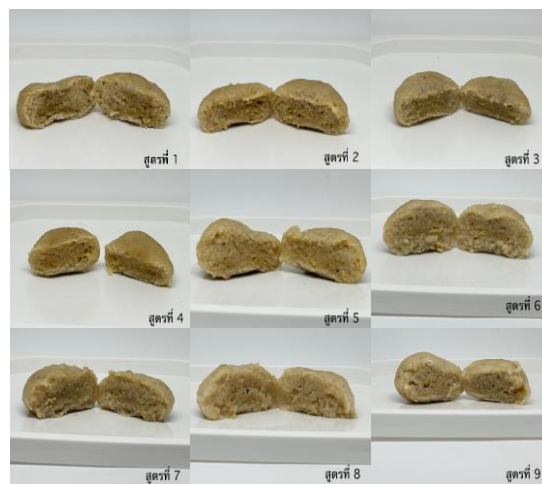


Figure 1 The appearance characteristics of experimental plant-based meat ball analogue samples

ผลการทดสอบคุณภาพทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของ PMB ด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสอาหาร แสดงผลดัง Table 2 พบว่าค่า Hardness, Adhesiveness, Springiness และ Cohesiveness ไม่ได้มีความสัมพันธ์กับปริมาณวัตถุดิบทั้งสอง (X_1, X_2) อย่างชัดเจน ในขณะที่ค่า Gumminess และ Chewiness มีความสัมพันธ์กับตัวแปรทั้งสองอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยที่ผลิตภัณฑ์ PMB สูตรที่ 1[★] กับ 6[★] มีค่าเฉลี่ย Gumminess สูงที่สุด ส่วนสูตรที่ 4[●] กับ 5[●] มีค่าเฉลี่ย Gumminess สูงในระดับรองลงมา ซึ่งค่า Gumminess คือลักษณะที่อาหารกึ่งของแข็งแตกตัวออกจนถึงสภาวะที่จะกลืนได้หมายความว่า PMB สูตรที่ 1[★] กับ 6[★] และสูตรที่ 4[●] กับ 5[●] ต้องใช้แรงในการเคี้ยวอาหารให้แตกตัวออกจากกันมากจึงจะสามารถกลืนได้ ดังนั้นจึงมีลักษณะเนื้อสัมผัสแน่นมากกว่า PMB สูตรอื่น นอกจากนี้ค่า Chewiness ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้เคี้ยวอาหารแข็งจนถึงขั้นพร้อมที่จะกลืน

หมายความว่า PMB สูตรที่ 1* กับ 6* และสูตรที่ 4* กับ 5* ต้องใช้แรงในการเคี้ยวมากกว่าอาหารจึงจะสามารถแตกตัวได้ นั่นคือ PMB สูตรที่ 1* กับ 6* และสูตรที่ 4* กับ 5* มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็ง และแน่นมากกว่าสูตรอื่น จากผลการทดสอบ ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของ X_1 และปริมาณ X_2 มีผลต่อคุณภาพทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของ PMB โดยเมื่อปริมาณ X_2 เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ PMB มีความแข็งและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

Table 2 Texture parameters of experimental plant-based meat ball analogue samples

Plant-based meat ball analogue sample runs	Texture Parameters					
	Hardness (g)	Adhesiveness (g.sec)	Springiness	Cohesiveness	Gumminess* (g)	Chewiness* (g)
1	1230.95 ± 30.20	-571.49 ± 107.07	0.68 ± 0.09	0.64 ± 0.04	697.38 ± 156.51	467.96 ± 72.24
2	669.85 ± 84.14	-414.03 ± 60.59	0.80 ± 0.03	0.65 ± 0.01	434.66 ± 49.76	345.70 ± 42.51
3	920.93 ± 75.87	-328.99 ± 64.85	0.73 ± 0.02	0.66 ± 0.01	602.83 ± 42.27	437.43 ± 43.24
4	1164.17 ± 111.71	-532.77 ± 121.13	0.75 ± 0.01	0.60 ± 0.04	569.41 ± 92.25	428.09 ± 71.14
5	1098.76 ± 84.93	-456.14 ± 111.80	0.67 ± 0.05	0.57 ± 0.02	666.03 ± 58.84	442.64 ± 64.53
6	1047.06 ± 27.10	-495.00 ± 240.10	0.67 ± 0.05	0.61 ± 0.03	636.37 ± 31.88	451.61 ± 14.51
7	775.68 ± 135.01	-450.51 ± 75.39	0.65 ± 0.02	0.57 ± 0.00	330.53 ± 14.83	214.99 ± 15.82
8	770.02 ± 55.89	-346.49 ± 85.08	0.64 ± 0.09	0.58 ± 0.04	417.04 ± 41.96	251.64 ± 11.95
9	859.61 ± 32.35	-304.26 ± 82.60	0.57 ± 0.10	0.54 ± 0.04	455.15 ± 91.82	298.47 ± 12.23

*Significant difference at $p \leq 0.05$

ผลการทดสอบค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) ค่าสีเหลือง (b^*) ของ PMB ด้วยเครื่องวัดค่าสี แสดงผลดัง Table 3 ไม่พบความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 2 ต่อด้านสี ($p > 0.05$) ในด้านคุณสมบัติในการอุ้มน้ำพบความสัมพันธ์ ($p \leq 0.05$) ซึ่งความสามารถในการอุ้มน้ำ (WHC) หมายถึง ความสามารถในการอุ้มน้ำของผลิตภัณฑ์เมื่อถูกแรงตัดหรือแรงกด [11] ทั้งนี้ X_1 และ X_2 ต่างมีความสามารถในการอุ้มน้ำ โครงสร้างของโปรตีนถั่วเหลืองมีผลกระทบอย่างมากต่อความสามารถในการกักเก็บน้ำ โปรตีนถั่วเหลืองที่ไม่ถูกบดจะกักเก็บน้ำได้มากกว่าโปรตีนถั่วเหลืองแบบบด [5] ในส่วนของกลูเตนข้าวสาลีเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะมี ความสามารถในการดูดซับน้ำที่สูงขึ้นของกลูเตน ซึ่งจะสามารถบ่งชี้ได้ว่ามีปริมาณแป้งสูง [8]

Table 3 Color parameters and water holding capacity (WHC) of experimental plant-based meat ball analogue samples

Plant-based meat ball analogue sample runs	Color Parameters			WHC (%)
	L*	a*	b*	
1	58.43 ± 1.04	-0.07 ± 0.03	9.47 ± 0.41	5.83 ± 0.73
2	57.17 ± 0.77	-0.29 ± 0.03	9.92 ± 0.53	7.78 ± 0.60
3	57.48 ± 0.82	-0.19 ± 0.01	9.80 ± 0.37	2.73 ± 0.31
4	57.20 ± 1.09	-0.24 ± 0.10	10.01 ± 0.66	5.26 ± 0.32
5	54.14 ± 1.19	0.20 ± 0.15	8.14 ± 0.62	3.96 ± 0.87
6	54.50 ± 0.39	0.13 ± 0.03	8.93 ± 0.60	4.20 ± 0.88
7	50.89 ± 0.80	0.95 ± 0.40	8.91 ± 0.53	3.79 ± 0.75
8	54.23 ± 0.99	0.22 ± 0.10	10.07 ± 0.26	5.27 ± 0.61
9	54.44 ± 0.10	0.20 ± 0.06	10.30 ± 0.93	4.04 ± 0.76

จากการวิเคราะห์หาสมการทำนาย พบว่าสมการความสัมพันธ์ที่สามารถนำไปใช้ทำนายหาปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองและกลูเตนข้าวสาลีที่เหมาะสม ได้แก่ สมการความสัมพันธ์เชิงตัวแปรทั้งสองที่ ($p \leq 0.05$) กับ Gumminess, Chewiness และ Water holding capacity โดยรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนถั่วเหลืองและกลูเตนข้าวสาลี มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง (Linear) Gumminess มีความสัมพันธ์แบบสมการกำลังสอง (Quadratic) กับ Chewiness และมีความสัมพันธ์แบบสมการกำลังสาม (Cubic) กับ WHC เมื่อกำหนดเกณฑ์เพื่อประมาณอัตราส่วนระหว่าง $X_1 : X_2$ ที่เหมาะสมจากค่า Gumminess ที่ 600-690 Chewiness ที่ 430-460 และ WHC ที่ 4-5% สามารถทำนายอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ $X_1 = 20.45\%$ และ $X_2 = 29.55\%$ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับสูตรที่ 1[★] และ 6[★] ของการศึกษานี้ โดยมีค่า $X_1 = 20.00\%$ และ $X_2 = 30.00\%$ แต่ผลผลิตก็ยังต้องมีการปรับปรุงสมบัติด้านความยืดหยุ่นให้มากขึ้นต่อไป

Table 4 Regression coefficients of the predictive models explaining the relationship between response variables and independent variables

Variable	Estimated coefficients response		
	Gumminess	Chewiness	Water holding capacity
Model	Linear*	Quadratic*	Cubic*
X_1	410.75	254.54	4.40
X_2	688.91	456.71	5.06
X_1X_2	-	273.15	0.69
$X_1X_2(X_1-X_2)$	-	-	28.71
Lack of fit (p-value)	0.43	0.68	0.49
R^2	0.7911	0.9381	0.7735
R^2 (adjusted)	0.7613	0.9174	0.6376

X_1 : Soy Protein, X_2 : Wheat gluten

*Significant difference at $p \leq 0.05$

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างโปรตีนถั่วเหลืองและกลูเตนข้าวสาลี ไม่มีผลต่อสีอย่างชัดเจน แต่มีผลต่อความยากง่ายในการเคี้ยวตัวอย่าง (Chewiness) ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบสมการกำลังสอง (Quadratic) ส่วนแรงในการเคี้ยวให้แตกตัวจนถึงสถานะที่จะกลืนได้ (Gumminess) มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง (Linear) และความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity) มีความสัมพันธ์แบบสมการกำลังสาม (Cubic) จากการทำนายโดยใช้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าว พบว่าอัตราส่วนที่มีแนวโน้มในความเป็นไปได้ที่จะนำไปพัฒนาต่อได้แก่ $X_1 : X_2$ เท่ากับ 20.0 : 30.0

5. Recommendation

ผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเลียนแบบเนื้อสัตว์จากพืชที่ได้จากการศึกษานี้ยังต้องนำไปพัฒนาต่อทางด้านการปรับปรุงเนื้อสัมผัสให้มีความละเอียดลง และเพิ่มความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะอาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้การสนับสนุนการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ คุณธนกร จวงสันทัต ผู้ช่วยกรรมการผู้จัดการ บริษัท เซน ไบโอเทค จำกัด ที่อนุเคราะห์วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับการสนับสนุนการดำเนินการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] จันทรเพ็ญ ขำมิน, วันวิสาข์ ยวงโย และวัชรีย์ คงรัตน์. 2563. การพัฒนาคุณภาพเนื้อสัมผัสลูกชิ้นปลาแช่เยือกแข็งจากซูริมิปลาชัง. เอกสารวิชาการกองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ. 1-40.
- [2] ตรีชฎา อุทัยดา. 2563. การพัฒนาลูกชิ้นหมูและศึกษาอายุการเก็บรักษาด้วยการเปรียบเทียบชนิดของบรรจุภัณฑ์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 22(1). 45-51.
- [3] ยุวเรศ มลิลลา. 2567. Plant-based meat alternatives. สมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหารแห่งประเทศไทย.
- [4] ศุภรัตน์ ลั่นขันธุ์. 2567. การบริโภค Plant-Based Food อาหารจากพืชที่ดีต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม Consuming plant-based foods is beneficial for both health and the environment. บทความวิชาการกองการแพทย์ทางเลือก กรมการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก.
- [5] Esbroeck, T. V., Sala, G., Stieger, M. and Scholten, E. 2024. Effect of structural characteristics on functional properties of textured vegetable proteins. Food Hydrocolloids. 149: 109529.
- [6] Ismail, B. P., Lenagala, L. S., Stube, A. and Brackenridge, A. 2020. Protein demand: review of plant and animal proteins used in alternative protein product development and production. Animal Frontiers. 10(4): 53-63.
- [7] National Institute of Standards and Technology. 2012. e-Handbook of Statistical Methods. NIST/SEMATECH. USA.
- [8] Kaushik, R., Kumar, N., Sihag, M. K. and Ray, A. 2015. Isolation, characterization of wheat gluten and its regeneration properties. J Food Sci Technol. 52(9): 5930-5937.
- [9] Singh, B., and Singh, N, 2006. Physico-chemical, water and oil absorption and thermal properties of gluten isolated from different Indian wheat cultivars. Journal of Food Science and Technology (Mysore). 43(3): 251-255.
- [10] Tachie, C., Nwachukwu, I. D., and Aryee, A. N. A. 2023. Trends and innovations in the formulation of plant-based foods. Food Production. Processing and Nutrition. 5:16.
- [11] Tee, E. T., and Siow, L. F. 2017. Effect of tapioca and potato starch on the physical properties of frozen spanish mackerel (*Scomberomorus guttatus*) fish balls. International Food Research Journal. 24(1): 182-190.