วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย **บทความวิจัย**
ปีที่ 31 ฉบับที่ 2 (2568) 1-7
ISSN 1685-408X
Available online at www.tsae.asia

การออกแบบและพัฒนาระบบนำทางด้วย GPS สำหรับเครื่องหยอดข้าว

The Design and Development of GPS Navigation for Rice Direct Seeding Machine

สมพร หงษ์กง[1]*, สุริยา โชคเพิ่มพูน[1], อมร ดอนเมือง[1], ชยุต ศรีฮาก์ญู[2]
Somporn Hongkong[1,] *, Suriya Chokphoemphun[1], Amorn Donmuang[1], Chayut Srihanoo[2]

[1]สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร, จังหวัดสกลนคร 47160
[2]สาขาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร, จังหวัดสกลนคร 47160
[1]Mechanical Engineering, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Sakonnakhon 47160
[2]Plant science, Faculty of Natural Resources, Rajamangala University of Technology Isan, Sakonnakhon 47160
*Corresponding author: Tel: +668-9570-9298, E-mail: somporn.ho@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เสนอการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องหยอดข้าวแบบอัตโนมัติที่ติดตั้งระบบการควบคุมด้วย GPS ผ่านโปรแกรม Mission Planner โดยติดตั้งระบบควบคุมการเลี้ยวของเครื่อง ด้วยการรับสัญญาณจากบอร์ด pixheak ร่วมกับ GPS module เพื่อรับพิกัดและตรวจสอบทิศทางให้ระบบประมวลผลและสั่งงานไปยังมอเตอร์ที่ควบคุมการหมุนของพวงมาลัยของเครื่องหยอดให้อยู่ในเส้นทางที่กำหนด การทดสอบการทำงานจะความแม่นยำจะกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ไว้ที่ 0.2 0.3 และ 0.4 $m{\cdot}s^{-1}$ และทดสอบระยะความผิดพลาด 2 รูปแบบ ได้แก่ การตรวจสอบระยะหยุดรถจากเริ่มต้น-สุดท้ายที่ระยะ 400 m และความผิดพลาดในแนวเส้นตรงในระยะ 100 m โดยจะเก็บข้อมูลทุกๆ 10 m ผลจากการทดสอบพบว่าการใช้ความเร็วเท่ากับ 0.2 $m{\cdot}s^{-1}$ จะส่งผลทำให้ระยะหยุดและมีค่าผิดพลาดแนวเส้นตรงน้อยสุด เนื่องจากการเคลื่อนที่ของตัวรถเป็นไปอย่างช้าๆ จะส่งผลทำให้ให้ตัวรถอยู่ในแนวเส้นที่กำหนดได้ดีมากสุด ผลเนื่องจากการปรับค่า P Control ที่ต่างกัน

คำสำคัญ: เครื่องหยอด ระบบควบคุมอัตโนมัติ เครื่องทุ่นแรงฟาร์ม

Abstract

This article presents testing of the movement control of an automatic rice planter equipped with a GPS control system through the Mission Planner program. The installation of a steering control system for the machine involves receiving signals from the Pixhawk board with the GPS module. To obtain the position and determine the direction for the system to process and control the motor, ensure the dropper's steering wheel remains on the specified path. The operation test accuracy is set to 0.2, 0.3 and 0.4 $m{\cdot}s^{-1}$ and 2 types of error distances are tested. This includes checking the starting-final stopping distance at 400 m and the straight-line error at 100 m, with data collected every 10 m. The test results showed that a speed of 0.2 $m{\cdot}s^{-1}$ results in the least stopping distance and straight-line error. Since the vehicle's movement is repetitive, it will keep the vehicle in the specified line as best as possible. Result from different P Control adjustments.

Keywords: Dripping machine, Automatic control system, Farm equipment

1 บทนำ

ข้าวเป็นพืชที่เป็นอาหารหลักของคนในประเทศและเป็นสินค้าที่ส่งออกที่สำคัญ ซึ่งการปลูกข้าวนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ทั้งแบบปลูกด้วยเมล็ดหรือการใช้ต้นกล้า ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของพื้นที่นั้นๆ (กรมการข้าวกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2566) สำหรับการปลูกด้วยเมล็ดสามารถทำได้โดยการหว่านหรือการหยอด ส่วนการปลูกด้วยต้นกล้าสามารถทำได้โดยการปักดำหรือการโยน ซึ่งการปักดำนั้นอาจจะใช้การปักดำด้วยแรงงานหรือใช้เครื่องดำนา เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตจะพบว่าการปักดำจะให้ผลผลิตที่สูงกว่าและประหยัดเมล็ดพันธุ์กว่าการปลูกด้วยเมล็ด เพราะการหว่านทั่วไปมักประสบปัญหาเรื่องวัชพืชในนาข้าว แม้ว่าการปลูกข้าวด้วยการปักดำจะให้ผลผลิตที่สูง แต่ปัญหาด้านแรงงาน รวมทั้งราคาค่าจ้างแรงงานที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้

Received: April 01, 2023
Revised: May 13, 2025
Accepted: August 26, 2025
Available online: December 22, 2025

เกษตรบางส่วนต้องใช้การหว่านแทน จึงทำให้ได้รับผลผลิตต่ำ ในส่วนบางพื้นที่มีการใช้เครื่องหยอดข้าวที่พ่วงกับรถแทรคเตอร์หรือการรากด้วยคน

การพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องจักรในการเกษตรพบทั้งในและต่างประเทศที่นำเอาระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติมาช่วยทำงาน เพื่อลดการทำงานด้วยแรงงานคน เช่น การใช้ระบบ GPS (Global Position System) ควบคุมรถแทรกเตอร์ ที่เสนอโดย เกรียงไกร แซมสีม่วง และคณะ (2560) ระบบหยอดข้าวแบบอัตโนมัติถูกนำเสนอโดย มงคล เอกปัญญาพงศ์ และคณะ (2557) เป็นต้น โดยระบบการนำทางแบบอัตโนมัติด้วยการประยุกต์ใช้ระบบ GPS มาใช้นั้นจะเข้ามาช่วยในส่วนการกำหนดทิศทาง หรือวางแผนการเคลื่อนที่ของเครื่องต้นกำลัง

ในการออกแบบเครื่องหยอดข้าวแบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วย GPS ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อาทิ เช่น การนำทางโดยใช้ประกอบกับการระบุตำแหน่งของตนเอง ประกอบกับระบบ GPS ได้มีราคาถูกลง ทำให้มีการติดตั้งบนอุปกรณ์หลายประเภทเพื่อใช้งาน ในปัจจุบันมีผู้คิดค้นยานยนต์ไร้คนขับ แต่ยังมีต้นทุนในการสร้างที่สูง และยังไม่แพร่หลายโดยเฉพาะในประเทศไทยเทคโนโลยีดังกล่าวยังไม่มีให้เห็นมากนัก สำหรับการพัฒนาระบบนำทางด้วย GPS ในประเทศไทย มีใช้อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะระบบการนำทาง ระบบติดตามรถยนต์ หรือใช้งานทางได้การเกษตรให้รถทางการเกษตรที่มีอยู่สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้นและมีประสิทธิภาพในการทำงาน (Odolinski et al., 2017)

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอการประยุกต์ใช้ระบบ GPS ที่ติดตั้งในตัวรถสำหรับเครื่องหยอดข้าว เพื่อทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่ในแปลง สำหรับเป็นแนวทางนำไปพัฒนาในเครื่องจักรกลเกษตรอื่นๆ

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง

ส่วนประกอบของการออกแบบและพัฒนาระบบนำทางด้วย GPS สำหรับเครื่องหยอดข้าวระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องหยอดการติดตั้งระบบ GPS ในตัวรถที่มีต้นกำลังขนาด 6.5 hp และมีระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ โดยอุปกรณ์และลักษณะการติดตั้งแสดงดัง Figure 1 ดังนี้

Figure 1 GPS navigation for a vehicle system.

ใน Figure 1 การควบคุมการเลี้ยวสามารถทำได้เมื่อระบบ GPS ตรวจจับตำแหน่งแล้วพบว่าตำแหน่งของรถอยู่นอกเส้นทางที่กำหนดหรือได้รับคำสั่งจากรีโมตคอนโทรลให้มีการเลี้ยว โดยบอร์ด pixhawk จะประมวลผลและส่งสัญญาณผ่านชุดควบคุมที่มีการปรับแรงดันไฟฟ้าผ่านชุดรีเลย์ให้ระบบการเลี้ยวที่มีมอเตอร์ขนาด 250 W แรงดันไฟกระแสตรง 12 V หมุนไปในทิศทางที่บังคับพวงมาลัยของตัวรถและขณะเดียวกันระบบคลัสช์

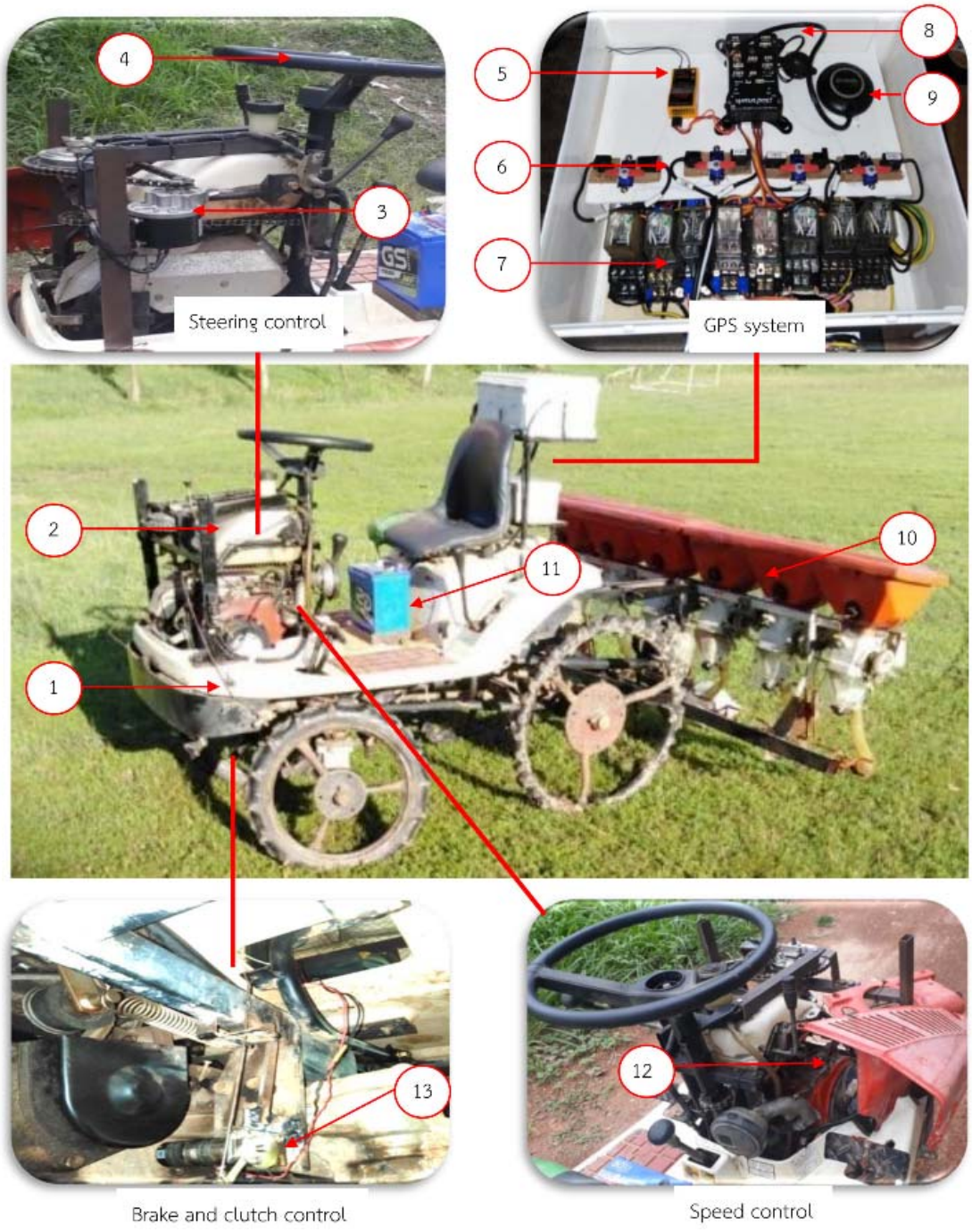


Figure 2 Position for the device installation of the machine.

แบบแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำงานเพื่อส่งถ่ายกำลังจากฟันเฟืองโซ่ที่รับจากมอเตอร์ไปยังแกนพวงมาลัยรถด้วยฟันเฟืองโซ่ที่มีอัตราทด 3:1 และระบบคลัสซ์จะหยุดทำงานเมื่อไม่มีสัญญาณเลี้ยว นอกจากนี้การเลี้ยวยังสามารถหมุนพวงมาลัยจากคนขับโดยจะไม่ส่งผลต่อมอเตอร์เพราะระบบคลัสซ์หยุดทำงาน โดยการติดของระบบควบคุมแสดงตาม Figure 2

ตำแหน่งการออกแบบต่างๆ ใน Figure 2 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. คือ โครงรถและระบบขับเคลื่อน
2. คือ เครื่องยนต์ขนาด 6.5 แรงม้า
3. คือ ระบบมอเตอร์ควบคุมการหมุนของพวงมาลัย
4. คือ พวงมาลัยบังคับด้วยมือ
5. คือ Telemetry เชื่อมต่อแบบไร้สาย
6. คือ เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง
7. คือ รีเลย์สำหรับจ่ายไฟให้มอเตอร์
8. คือ บอร์ด pixhawk
9. คือ GPS Module
10. คือ ชุดหยอดข้าวแบบ 8 แถว
11. คือ แบตเตอร์รี
12. คือ ชุดคันเร่งที่ควบคุมด้วย servo motor
13. คือ ชุดเบรกและคลัสซ์

2.2 การควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวรถ

การบังคับทิศทางของตัวรถจะสามารถทำได้อยู่ 3 วิธีการ คือ วิธีแรกจะเป็นการใช้คนขับโดยการนั่งขับที่ตัวรถ วิธีที่สองจะเป็นการควบคุมทิศทางด้วยการบังคับทางไกลด้วยชุดรีโมตคอนโทรลบังคับ สามารถสั่งเลี้ยวซ้าย-ขวา เร่งหรือหยุดรถด้วยปุ่มที่รีโมตคอนโทรล และวิธีสุดท้ายจะเป็นการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ผ่านโปรแกรม Mission Planner ด้วยการรับตำแหน่งของ GPS module ซึ่งจะส่งสัญญาณไปยังบอร์ด pixhawk ที่ใช้การตั้งค่าด้วยโปรแกรม Mission Planner เมื่อสัญญาณตำแหน่งจาก GPS ที่อยู่ในรูปแบบละติจูดและลองจิจูด ถูกส่งมาโปรแกรม Mission Planner จะคำนวณตำแหน่งปัจจุบันเปรียบเทียบกับเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ในโปรแกรมจะส่งสัญญาณออกมาผ่านบอร์ด pixhawk และสั่งให้เซอร์โวมอเตอร์แต่ละตัวทำงาน เพื่อจะให้บังคับการเลี้ยวของตัวรถที่ถูกต้องตามเส้นทาง โดยการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่แสดงใน Figure 3

Figure 3 pattern for driving a vehicle.

Figure 4 แสดงลำดับการทำงานของการควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวรถสำหรับการใช้ระบบ GPS เมื่อระบุเส้นในโปรแกรมและ GPS ตรวจจับตำแหน่งจะส่งสัญญาณไปยังระบบตวบคุมการเลี้ยวของตัวรถให้ตรงกับที่ได้ตั้งกำหนดเอาไว้

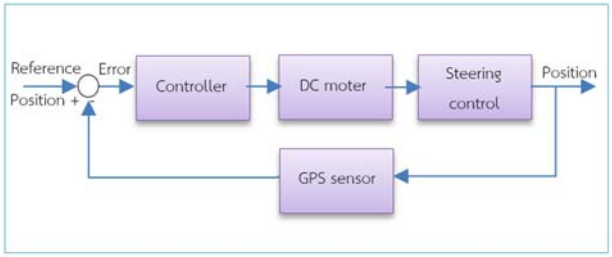


Figure 4 Automatic with GPS navigation for the vehicle.

2.3 การตั้งค่าการเคลื่อนที่ของตัวรถ

การปรับจูนระบบ PID Control (proportional integral derivative control) ในโปรแกรม Mission Planner ซึ่งจะถูกใช้สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวรถของเครื่องหยอดข้าวในงานวิจัยนี้ เมื่อตั้งค่าให้มีการเคลื่อนแบบอัตโนมัติจะพบว่า ระบบการบังคับเลี้ยวที่สั่งงานให้พวงมาลัยตัวรถมีการเลี้ยวแบบกระทันหันหรือไม่รักษาตำแหน่งเส้นทางที่ได้ถูกกำหนดไว้ ซึ่งในการแก้ไขจะต้องมีการปรับตั้งรูปแบบการควบคุมในโปรแกรม Mission Planner ซึ่งจะตั้งค่าของระบบ PID Control เป็นกระบวนการที่นำมาใช้ในระบบการควบคุม โดยสามารถแก้ไขปัญหาการเกิด Offset Error ที่สถานะคงตัวของระบบได้ โดยการปรับจูน PID ในโปรแกรมจะต้องเข้าไปตั้งค่าในโปรแกรม Mission Planner โดยเข้าไปที่หน้า config/Tunning แล้วไปที่ Basic tuning วิธีการปรับจูน PID หรือ Proportional ON-OFF Control หรือ Bang-bang Controller เป็นกระบวนการควบคุมแบบดังเดิม ซึ่งมักจะเกิดปัญหาในเรื่องของการเกิดค่า Overshoot หรือ Undershoot โดยการใช้งานตัวควบคุมแบบ On-Off Control นั้น จำเป็นต้องมีการตั้งค่า Hysteresis ในการควบคุมด้วย (อามิณฑ์ หล้าวงศ์ และคณะ. 2563)

สำหรับการตั้งค่าของ P Control (Proportional Control) ที่เป็นกระบวนการควบคุมที่ออกแบบมาเพื่อแก้ไขปัญหาของการเกิด Overshoot หรือ Undershoot ซึ่งทำให้ลดลงได้ แต่ก็ยังไม่สามารถเข้าสู่ค่า Set Point หรือตำแหน่งที่ต้องการ เนื่องจากเกิดค่า Offset Error ที่สถานะคงตัวของระบบ แสดงใน Figure 5.

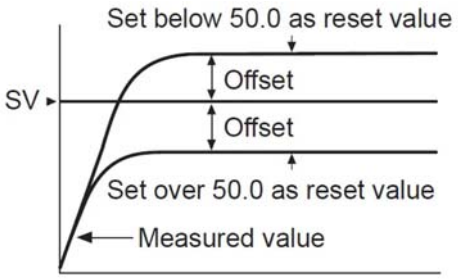


Figure 5 P Control setting with OFFSET Error.

ในการปรับระบบให้มีเสถียรภาพ ขั้นแรกให้ตั้งค่าอัตราขยายปริพันธ์ (Ki) และอัตราขยายอนุพันธ์ (Kd) เป็นศูนย์ และเพิ่มค่าอัตราขยายสัดส่วน (Kp) จนกระทั่งสัญญาณขาออกเกิดการแกว่ง (oscillate) แล้วตั้งค่า Kp ให้เหลือครึ่งหนึ่งของค่าที่ทำให้เกิดการแกว่งสำหรับการตอบสนองชนิด quarter amplitude decay แล้วเพิ่ม Kd จนกระทั่งค่า offset ถูกต้องในเวลาที่พอเพียงของกระบวนการ แต่ถ้า Kd มากไปจะทำให้ไม่ความเสถียร หากต้องการให้เพิ่มค่า Ki จนกระทั่ง loop การเคลื่อนที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่หากค่าของ Ki มากเกินไปจะเป็นเหตุให้การตอบสนองและ Overshoot เกินที่จะยอมรับได้ โดยทั่วไปการปรับ PID การเกิด Overshoot เล็กน้อยจะช่วยให้เข้าสู่จุดที่ต้องการเร็วขึ้น แต่ในบางระบบไม่สามารถยอมให้เกิด Overshoot ได้และถ้าค่า Kp น้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดการแกว่ง โดยการตั้งค่าใน Table 1 และลักษณะของทิศทางสำหรับการปรับตั้งจะแสดงใน Figure 6 โดยเมื่อรถอยู่ในแนวเส้นที่กำหนดก็จะเคลื่อนที่เรื่อยๆ และหากตรวจพบว่าทิศทางเริ่มมีการเบี่ยงไปทางซ้ายบอร์ด pixhawk จะส่งสัญญาณสั่งให้วงจรของระบบพวงมาลัยของรถให้เลี้ยวขวาแบบช้าๆ เพื่อรักษาทิศทางและไม่ให้ตัวรถเหวี่ยงเข้าเร็วเกินไป และในทางกลับกันหาตรวจพบว่าทิศทางการเคลื่นที่ของตัวรถเริ่มออกนอกเส้นทางไปทางขวาบอร์ด pixhawk ก็จะสั่งให้ตัวรถเลี้ยวซ้ายแบบค่อยๆ เข้าเส้น เพื่อรักษาความสมดุลของตัวรถเช่นกัน (Ang et al., 2005).

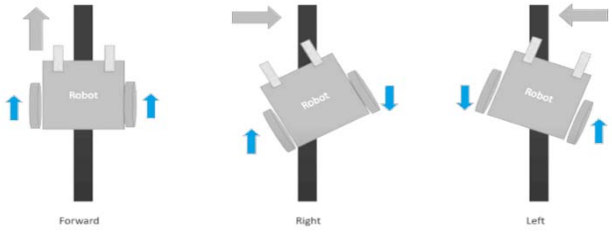


Figure 6 PID - Line follower simulation.

Table 1. P Control check result display

Closed-Loopable	Risetime	Overshoot	Setting time	Steady-state error	Stability
Increasing Kp	Decrease	Increase	Small Increase	Decrease	Degrade
Increasing Ki	Small Decrease	Increase	Increase	Large Decrease	Degrade
Increasing Kd	Small Decrease	Decrease	Decrease	Minor Change	Improve

3 การทดสอบและบันทึกผล

การทดสอบการเคลื่อนที่ของระบบนำเส้นทางด้วย GPS สำหรับเครื่องหยอดข้าวเมื่อได้ปรับจูนและการตั้งค่าการเคลื่อนที่ของตัวรถจนได้เสร็จสิ้น จากนั้นจะทำการทดสอบ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบแรกจะเป็นการวัดความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้าย รูปแบบที่สองจะเป็นการตรวจวัดระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง ซึ่งในแต่ละรูปแบบจะทำการตั้งค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ให้ตัวรถมีความเร็วเชิงเส้น 3 ระดับ 0.2 0.3 และ 0.4 m s^{-1}

3.1 ความผิดพลาดจากจุดเริ่มต้น-จุดสุดท้าย

ในการทดสอบระบบนำเส้นทางด้วย GPS สำหรับเครื่องหยอดข้าว รูปที่แรกจะทดสอบระบบระยะความผิดพลาดการเคลื่อนที่แนวเส้นตรงโดยกำหนดเส้นทางในโปรแกรม Mission Pianner เพื่อตั้งพิกัด GPS ในพื้นที่ที่กำหนดในการทดลอง เป็นระยะทาง 400 m เป็นรูปสี่เหลี่ยม การกำหนดจุดพิกัด GPS จะเริ่มต้นและจุดสุดท้ายให้เป็นจุดเดียวกัน เพื่อเช็คความแม่นยำของ GPS ซึ่งตัวรถจะกลับมาจอดจุดเดิมแล้วตรวจทำการวัด ระยะจุดจอดกับจุดเริ่มต้นระยะห่างกัน โดยการทดลองซ้ำ ทั้งหมด 5 ครั้ง แล้วบันทึกผล Figure 7. จะแสดงรูปแบบเส้นทางที่ได้กำหนดในโปรแกรม Mission Pianner

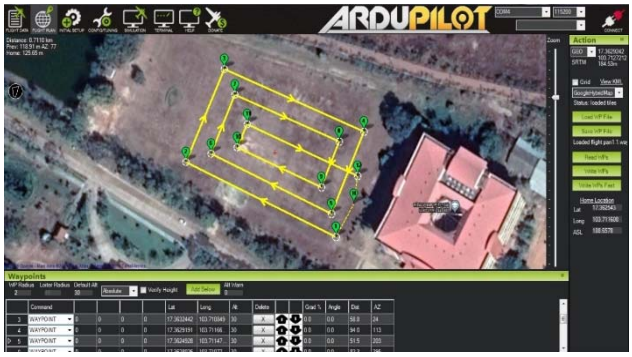


Figure 7 Pattern for testing the distance of start-stop.

3.2 ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง

การทดสอบการเคลื่อนที่ในระยะทางตรงเป็นระยะ 100 m โดยจะทำการตั้งเส้นทางให้รถวิ่งระบบอัตโนมัติ รถจะวิ่งเป็นเส้นตรงแล้วก็ทำการวัด จุดคลาดเคลื่อนซ้าย-ขวา ตามที่รถเคลื่อนที่ ทำการทดลองแบบนี้ใน 1 รอบจะได้ในการวัดระยะ ในแต่ละระยะทุกๆ 10 m จนสิ้นสุด 100 m ซึ่งในแต่ละจุดที่ห่าง 10 m จะให้เครื่องหมายในการบันทึกผลดังนี้ (+) เมื่อตัวรถอยู่ทางด้านขวาของแนวเส้นตรง และ (-) เมื่อตัวรถอยู่ทางด้านซ้ายของแนวเส้นตรง และบริเวณตำแหน่งกลางของตัวรถจะใช้ผงปูนขาวให้เครื่องหยอดโรยเพื่อแสดงแนวในการเคลื่อนที่สำหรับวัดระยะห่างที่ระยะที่ได้กำหนดเอาไว้ Figure 8 จะแสดงการตั้งรูปแบบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของตัวรถในแนวเส้นตรงและตำแหน่งการบันทึกผล

Figure 8 Pattern for straight-line error.

4 ผลและวิจารณ์

4.1 ผลการทดสอบระยะจุดเริ่มต้น – จุดสุดท้าย

การทดสอบระยะจุดเริ่มต้น–จุดสุดท้าย เมื่อมีการปรับการปรับจูนระบบเสถียรภาพของบอร์ดและการทำงานของระบบมอเตอร์ในหัวข้อ 2.3 ที่ทำให้การเข้าแนวการเคลื่อนที่มีค่าเหมาะสมแล้วนั้น ผลการทดสอบระยะห่างจากการทดสอบจากจุดเริ่มต้น - สิ้นสุด โดยใช้ความเร็วของตัวรถในการเคลื่อนที่ 0.2 0.3 และ 0.4 m s^{-1} ผลพบว่าการใช้ความเร็วมากจะมีผลต่อระยะความผิดพลาดอย่างมีนัยสำคัญคือ ที่ความเร็ว 0.2 0.3 และ 0.4 m s^{-1} มีค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนของระยะห่างทั้ง 5 ครั้ง เท่ากับ 1.48±0.19, 1.84±0.15 และ 2.50±0.25 m. ซึ่ง

ระยะห่างมากสุดจากการทดสอบจะเกิดขึ้นอยู่ที่ความเร็ว 0.4 m s^{-1} ที่ระยะ 2.8 m. และระยะห่างน้อยสุดจากการทดสอบจะมีค่าเท่ากับ 1.2 m ที่ใช้ความเร็วรถ 0.2 m s^{-1} แสดงใน Figure 9 ผลการทดสอบของระยะจุดเริ่มต้นที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อการทำงานของระบบการเคลื่อนที่ของตัวรถหยอดข้าวในลำดับการทำงานในรอบถัดๆ ไป ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้แนวของแถวในการหยอดไม่ขนานกันในแต่ละรอบ และจากระยะห่างที่เกิดขึ้นยังมีผลต่อชุดอุปกรณ์ GPS module ที่มีความแม่นยำในการระบุพิกัดไม่ละเอียดส่งผลทำให้บอร์ด pixhawk สั่งการผิดพลาดไปด้วย

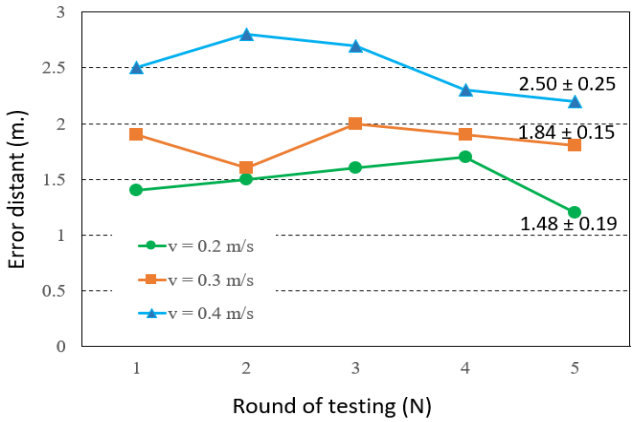


Figure 9 Result of testing for start-stop.

4.2 ผลความผิดพลาดการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง

ผลการทดสอบความแม่นยำในแนวเส้นตรงเมื่อมีการใช้ความเร็วของตัวรถที่ต่างกันพบว่า ความเร็วจะมีผลต่อการแกว่งของตัวรถในแนวเส้นตรง คือ เมื่อใช้ความเร็วต่ำในการทดสอบใช้ 0.2 m s^{-1} เส้นทางการเคลื่นที่ของตัวรถจะมีลักษณะเคลื่อนที่ในรูปแบบสลับฟันปลา โดยทิศทางของรถจะเบี่ยงซ้ายขวาสลับกันและมีระยะความผิดพลาดจากแนวเส้นตรงอยู่ในระยะต่ำ ซึ่งจากการทดสอบระยะที่ใช้ความเร็ว 0.2 m s^{-1} มีความผิดพลาดมากที่สุดที่ระยะ 55 cm ดังแสดงใน Figure 10 ซึ่งเมื่อเพิ่มความเร็วของตัวรถจาก 0.2 เป็น 0.3 และ 0.4 m s^{-1} จะส่งผลต่อการควบคุมของพวงมาลัยอย่างรวดเร็วขณะรถกำลังเคลื่อนที่และจะเกิดความผิดพลาดจากแนวเส้นตรงมากกว่าการใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถที่ช้ากว่า และยังส่งผลทำให้ตัวรถเบี่ยงออกนอกเส้นทางซ้าย หรือกว่าในระยะจุดในการวัดที่ต่อเนื่องกัน

จากผลทดสอบพบว่าการทดสอบค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของรถในงานวิจัยให้ค่าผิดพลาดสูงกว่าผลงานวิจัยของ Valentea. et al., (2020) ซึ่งผลเกิดจากระบบของยานพาหนะในงานวิจัยใช้รถที่เป็นโครงสร้างของเครื่องดำนาที่เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ จึงส่งผลต่อระยะของตำแหน่งในการทดสอบ

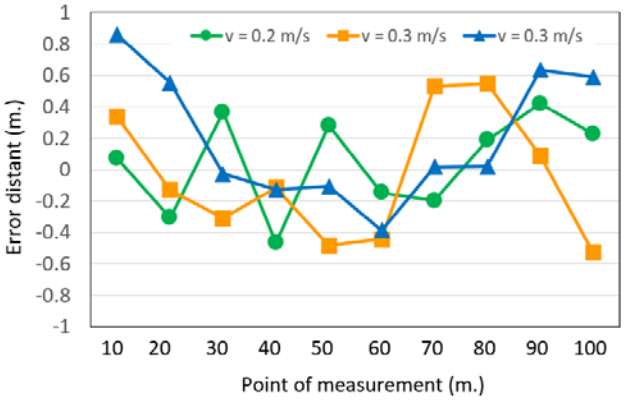


Figure 9 Result for testing of straight-line error.

5 สรุปผล

การควบคุมการขับเคลื่อนตัวรถสำหรับพ่วงท้ายอุปกรณ์หยอดข้าว โดยใช้ระบบ GPS module ร่วมกับบอร์ด pixhawk และใช้โปรแกรม Mission Pianner ในการกำหนดค่าและทิศทางในการเคลื่อนที่ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าปัจจัยในการส่งผลในการควบคุมการเคลื่อนที่ได้แก่ ปัจจัยแรกคือ ระบบอุปกรณ์เช่น มอเตอร์บังคับการเลี้ยวซ้าย-ขวาที่ทำงานควบคู่กับระบบคลัสช์ไฟฟ้าจะต้องใช้รีเลย์ที่ทนกระแสสูง เพื่อการทำงานที่ต่อเนื่อง ปัจจัยที่สองคือ การตั้งค่าต่างๆ ในโปรแกรม Mission Pianner อย่างเช่น คือ Kp, Ki และ Kd จะต้องทำการปรับจูนให้มีความเหมาะสมจึงจะส่งผลทำให้ตัวรถมีเสถียรภาพ และปัจจัยสุดท้ายคือการตั้งค่าความเร็วในการทำงานของตัวรถที่เหมาะสมกับสภาวะของแปลงหรือสภาพพื้นผิวในการเคลื่อนที่จะทำให้ทิศทางในการเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ถูกกำหนดเอาไว้ได้อย่างแม่นยำ

อย่างไรก็ดี งานวิจัยนี้ยังเป็นต้นแบบสำหรับที่จะทำการพัฒนาต่อยอดให้สามารถทำงานได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ เพื่อเป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่จะช่วยทำงานในงานเกษตร เพื่อลดค่าใช้จ่ายหรือทดแทนปัญหาการขาดแคลนแรงงานในภาคการเกษตรได้ในอนาคต

6 กิตติกรรมประกาศ

วิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ปีงบประมาณ 2562

7 เอกสารอ้างอิง

กรมการข้าวกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2566. องค์ความรู้เรื่องพันธุ์ข้าว. แหล่งข้อมูล http://www.brrd.in.th/rkb/. เข้าถึงเมื่อ 2 มีนาคม 2566.

เกรียงไกร แซมสีม่วง มนูศักดิ์ จานทอง กระวี ตรีอานรรค วิชชาอุปภัย. 2560. การพัฒนารถแทรกเตอร์อัตโนมัติไร้คนขับนำทางด้วยระบบ GPS สำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่.วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 23(1), 39-54.

ธีรวัฒน์ เจเถื่อน ฉัตริน เรืองจอหอ มงคล คธาพันธ์ กมลชนน วงศ์สถาน พยุงศักดิ์ จุลยุเสน. การพัฒนาระบบควบคุมการ

บังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ 5(1), 1-11.

มงคล เอกปัญญาพงศ์. 2557. หุ่นยนต์หยอดข้าวอัจฉริยะ. แหล่งข้อมูล http://www.it24hrs.com/2013/dropping-machine-for-thaifarmer/. เข้าถึงเมื่อ 20 สิงหาคม 2565.

อามิณฑ์ หล้าวงศ์ ศุภกิจ เศิกศิริ. 2563. การศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมจากแบบจำลองพีไอดีโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี 8(2), 105-117.

Ang, K.H., Chong, G., Yun Li., 2005. PID control system analysis, design, and technology". IEEE Transactions on Control Systems Technology 13 (4), 559–576.

Odolinski, R., Teunissen, P.J.G., 2017. Low-cost, high-precision, single-frequency GPS–BDS RTK positioning. GPS Solut 21, 1315–1330.

Valentea, D.S.M., Mominb, A., Griftb, T., Hansenb, A., 2020. Accuracy and precision evaluation of two low-cost RTK global navigation satellite systems. Computers and Electronics in Agriculture 168, 105142.

Thai Society of Agricultural Engineering Journal Vol. 31 No. 2 (2025), 8-22

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ปีที่ 31 ฉบับที่ 2 (2568) 8-22
Available online at www.tsae.asia

บทความวิจัย

ISSN 1685-408X

การทดสอบและประเมินผลสมรรถนะของเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยสำหรับอ้อยพันธ์ แอลเค 92-11

Performance Evaluation of a Sugarcane Leaf Stripper and Trash Incorporator for the LK92-11 Cultivar

ตฤณสิษฐ์ ไกรสินบุรศักดิ์[1]*, พุทธธินันทร์ จารุวัฒน์[1], มงคล ตุ่นเฮ้า[1], ประสาท แสงพันธุ์ตา[1], อนุชา เชาว์โชติ[1], วรรธนะ สมนึก[1], รัชดา ปรัชเจริญวนิชย์[2], กันต์ธกรณ์ เขาทอง[3], แดนสรวง จงสุขไว[3]

Tinnasit Kaisinburasak[1]*, Puttinun Jaruwat[1], Mongkol Tunhaw[2], Prasat Sangphanta[1], Anucha Chaochot[1], Wanthanah Somnuek[1], Ratchada Pratcharoenwanich[2], Kunthakorn Khaothong[3], Dansuang Jongsukwai[3]

[1]สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[1]Agricultural Engineering Research Institute, Department of Agriculture, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

[2]ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรอำนาจเจริญ สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 4 จ.อุบลราชธานี กรมวิชาการเกษตร

[2]Amnat Charoen Agricultural Research and Development center, Office of Agricultural and development Region 4 (Ubon Ratchathani), Department of Agriculture

[3]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

[3]Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering at KamphaengSaen Kasetsart University Kamphaeng Saen district Nakhonpathom 73140

*Corresponding author: Tel: 081-921-7601, Fax: 02-940-5583, E-mail: tinnasit@hotmail.co.th

บทคัดย่อ

เครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยในงานวิจัยนี้ สร้างขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อช่วยให้แรงงานเข้าตัดอ้อยได้สะดวก ส่วนการพรวนกลบใบอ้อยเป็นการเพิ่มแร่ธาตุในดินจากการกลบใบอ้อย รวมถึงลดปัญหาการเผาใบอ้อยในไร่ โดยออกแบบให้การสางใบและการพรวนกลบใบอ้อยสามารถทำงานพร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยประยุกต์ใช้ระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิตขับเคลื่อนอุปกรณ์สางใบอ้อย และใช้ระบบถ่ายทอดกำลังทางกลขับเคลื่อนไถจานชนิดใช้กำลังขับสำหรับพรวนกลบใบอ้อย ทำการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยในพื้นที่ดินร่วน ความชื้นดินเฉลี่ย 14.46 %db ความหนาแน่นดินสภาวะแห้งเฉลี่ย 1.89 g cm^{-3} และความต้านทานการแทงทะลุดินเฉลี่ย 1.96 MPa ปลูกอ้อยพันธุ์ แอลเค 92-11 ใน อ.พิบูลมังสาหาร จ.อุบลราชธานี เป็นอ้อยปลูกใหม่ อายุ 10 เดือน ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 2 ระดับ คือ 1.95 และ 2.45 km h^{-1} มุมชุดจานไถ 3 ระดับคือ 36°, 40° และ 44° และความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถ 2 ระดับคือ 150 และ 180 rpm โดยมีความลึกในการไถเฉลี่ย 25 cm และความเร็วรอบการหมุนของลูกตีสางใบอ้อย 800 rpm และประเมิลผลโดยพิจารณาเลือกปัจจัยทดสอบที่เหมาะสมในการสางใบและพรวนกลบใบอ้อยจากแบบสอบถามระดับความสำคัญของผลการทดสอบ และระดับความพึงพอใจของผลการทดสอบโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนัก พบว่า ปัจจัยทดสอบที่เหมาะสมในการสางใบและพรวนกลบใบอ้อยคือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 1.95 km h^{-1} มุมชุดจานไถ 36° ความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถ 150 rpm และความเร็วรอบการหมุนของลูกตีสางใบอ้อย 800 rpm ให้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนักมากที่สุด 3.837 ใช้กำลังรวม 10.12 kW มีประสิทธิภาพในการสางใบอ้อย 83.16% ประสิทธิภาพการพรวนกลบใบอ้อย 92.41% และมีอัตราการทำงานทางทฤษฎี 2.34 rai h^{-1}

คำสำคัญ: อ้อย เครื่องสางใบอ้อย อุปกรณ์พรวนกลบใบอ้อย

Abstract

The purpose of this study was to design and develop a Sugarcane Leaf Stripper and Trash Incorporator to facilitate labor in harvesting and alleviate the effects of sugarcane burning on the sugarcane field and improve soil fertility. No equipment can simultaneously perform both processes of leaf stripping and trash incorporation. This research aimed to design equipment capable of performing both processes by applying the hydrostatic power

Received: May 24, 2025
Revised: July 06, 2025
Accepted: August 25, 2025
Available online: December 22, 2025

transmission to the Sugarcane Leaf Stripper and the mechanical power transmission to the spiral-notched disc tillage unit. It was tested with the LK 92-11 sugarcane cultivar at 10 months of age in Pibulmangsahan district, Ubon Ratchathani province. The experiments were conducted in loam soil with a moisture content of 14.46% (db), 1.89 g cm^{-3} dry bulk density, 1.96 MPa cone penetration resistance at two forward speeds (1.95 and 2.45 km h^{-1}), three gang angles (36°, 40° and 44°), two disk revolution speeds (150 and 180 rpm), a constant tillage depth of 25 mm and a fixed roller speed of 800 rpm. The optimum operating parameters were evaluated using a weighted arithmetic mean method based on user satisfaction and perceived importance. These values were then used to calculate the user satisfaction index, with the highest value of 3.837, corresponding to a forward speed of 1.95 km h^{-1}, a gang angle of 36°, and a disc speed of 150 rpm. The experimental results showed that the machine required 10.12 kW of total power, achieved a stripping efficiency of 83.16%, a trash covering efficiency of 92.4%, and a theoretical field capacity of 2.34 rai h^{-1}.

Keywords: Sugarcane, Sugarcane Leaf Stripper, Trash Incorporator

1 บทนำ

การเผาใบอ้อยในไร่เป็นปัญหาหลักที่ส่งผลอย่างรุนแรงต่อระบบนิเวศน์ในไร่อ้อยและสิ่งแวดล้อมเนื่องจากปัญหาการขาดแคลนแรงงานในการเก็บเกี่ยวอ้อยสด และค่าจ้างแรงงานสูง รวมถึงความรวดเร็วในการตัดอ้อย (กล้าณรงค์, 2546) การเผาใบอ้อยในไร่ส่งผลอย่างรุนแรงต่อสภาพโครงสร้างดิน โดยดินสูญเสียความชื้น ก้อนดินจับตัวกันแน่นและแข็ง ส่งผลให้รากอ้อยเจริญเติบโตไม่เต็มที่ นอกจากนี้ยังทำให้อินทรียวัตถุในดินลดน้อยลง เพราะเศษซากใบอ้อยถูกเผาทำลายไป ส่งผลให้ความสมบูรณ์ของดินลดลงและเกิดอาการดินเสื่อมในที่สุด นอกจากนั้นการเผาอินทรียวัตถุจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อนอีกทางหนึ่ง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

กรมวิชาการเกษตร (2547) ได้ให้ข้อแนะนำว่าใช้วิธีการสางใบก่อนการเก็บเกี่ยวอ้อย 2 เดือนล่วงหน้า เพื่อให้แรงงานคนเข้าตัดได้สะดวก โดยมุ่งหวังแก้ปัญหาการขาดแคลนแรงงานตัดอ้อยสด และลดปัญหาการเผาใบ นอกจากนี้ความสะอาดจากการสางใบทำให้แสงแดดส่องผ่าน อากาศระบายได้ดี ทำให้ปล้องอ้อยขยาย น้ำหนักอ้อยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมื่อตัดอ้อยเข้าโรงงานเกษตรกรมีรายได้สูงขึ้น นอกจากนี้ใบอ้อยที่ปกคลุมดินระหว่างร่องอ้อยจากการสางใบเมื่อมีการไถพรวนดินพร้อมการสับและฝังกลบใบอ้อยเป็นการปรับปรุงสภาพการหมุนเวียนของน้ำและอากาศในโครงสร้างดินและเพิ่มปริมาณอินทรียวัตถุในดิน อีกทั้งการพรวนดินเพื่อกลบใบอ้อยยังสามารถลดปัญหาการลุกลามของอ้อยไฟไหม้

ธัญญา และวิชัย (2554) ได้ศึกษาสมรรถนะการไถพรวนเครื่องมือไถจานชนิดใช้กำลังขับต่อพ่วงรถแทรกเตอร์ category II ในแปลงอ้อยโดยศึกษา จานไถมาตรฐาน และจานไถใบจักรแบบเกลียว (spiral-notched disk) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการไถพรวนด้วยเครื่องมือไถจานชนิดใช้กำลังขับใช้กำลังฉุดลากต่อหนึ่งหน่วยความลึกน้อยกว่าเครื่องมือไถจานหมุนอิสระ อีกทั้งการใช้จานไถใบจักรแบบเกลียวส่งผลทำให้การสับใบอ้อยที่ปกคลุมผิวดินและการคลุกเคล้าใบอ้อยในเนื้อดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ และตฤณสิษฐ์ และคณะ (2563) ได้พัฒนาเครื่องสางใบอ้อยสำหรับอ้อยตัดทำพันธุ์โดยใช้ระบบไฮดรอลิก พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถสางใบอ้อยพันธุ์ LK92-11 อู่ทอง 84-12 K95-84 กำแพงแสน 01-12 และพันธุ์ขอนแก่น 3 สำหรับตัดทำพันธุ์ได้ทั้งหมด โดยใช้ลูกตีสางใบฝั่งละ 1 ลูก เคลื่อนที่ขึ้น-ลงในแนวดิ่ง ใบอ้อยที่ได้จากการสางใบแตกปน ไม่ฟุ้งกระจาย และตกคลุมดินสม่ำเสมอ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยที่สามารถสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยได้ในการทำงานคราวเดียวกัน โดยใช้ระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิตในการขับเคลื่อนอุปกรณ์สางใบอ้อย และใช้ระบบถ่ายทอดกำลังทางกลในการขับเคลื่อนอุปกรณ์พรวนกลบใบอ้อยแบบไถจานชนิดใช้กำลังขับ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อย และวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆสำหรับเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อย ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าที่แสดงสมรรถนะของเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อย ประกอบด้วย กำลังฉุดลาก (Drawbar power) กำลังจำเพาะในการพรวนกลบใบอ้อย (Specific Power) กำลังที่เพลาอำนวยกำลัง (P.T.O power) กำลังรวม (Total power) ประสิทธิภาพการสางใบอ้อย (Stripping of Sugarcane Leaf Efficiency) และประสิทธิภาพการพรวนกลบใบอ้อย (Trash Covering Efficiency)

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 โครงสร้างและลักษณะจำเพาะของเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อย

เครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยที่ออกแบบแสดงใน Figure 1 และสร้างแสดงใน Figure 2 เป็นเครื่องต้นแบบที่พัฒนาจากเครื่องสางใบอ้อยสำหรับอ้อยตัดทำพันธุ์โดยใช้ระบบไฮดรอลิกที่ออกแบบโดย ตฤณสิษฐ์ และคณะ (2563) ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน คือโครงยึดต่อกับรถแทรกเตอร์แบบจุดพ่วง 3 จุดอิสระ โครงเครื่องมือ อุปกรณ์สางใบอ้อย และอุปกรณ์พรวนกลบใบอ้อย โดยโครงยึดต่อกับรถแทรกเตอร์เชื่อมต่อกับโครง

เครื่องมือ อุปกรณ์สางใบอ้อยประกอบด้วยลูกตีสางใบอ้อยทั้งหมด 2 ลูก มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง เส้นผ่านศูนย์กลาง 248 mm ยาว 1,000 mm วางในทิศทางขนานกับพื้นบริเวณพื้นที่ผิวติดตั้งเส้นเอ็นตัดหญ้าความยาว 400 mm. ติดตั้งห่างกัน 50 mm สามารถถอดเปลี่ยนได้เมื่อสึกหรอ ขณะทำงานลูกตีสางใบอ้อยจะหมุนรอบแกนหมุนที่ติดตั้งอยู่บนโครงเครื่องมือและทำให้เส้นเอ็นตัดหญ้าหมุนตีสางใบอ้อยลงมา ระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางลูกตีสางใบอ้อยทั้ง 2 ลูก 970 mm โดยเส้นเอ็นตัดหญ้าที่ติดตั้งบนลูกตีสางใบอ้อยทั้ง 2 ลูกติดตั้งสลับกันป้องกันความเสียหายจากการตีกันระหว่างการทำงาน

โครงเครื่องมือส่วนแรก เป็นคานในแนวขวางพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมกลวง ขนาด 100 x 110 mm ยาว 1,000 mm ส่วนที่สอง เป็นเสา 2 ต้นวางในแนวดิ่งทำด้วยเหล็กกล่อง ขนาด 65 x 158 mm หนา 2 mm สูง 2,000 mm ประกอบเป็นจุดยึดกระบอกสูบไฮดรอลิก และระบบส่งกำลังโดยใช้โซ่ลำเลียงซึ่งยึดติดกับคานในแนวตามยาว ส่วนที่สามเป็นคานในแนวตามความยาวทำด้วยเหล็กกล่อง ขนาด 65 x 158 mm หนา 2 mm ยาว 1,740 mm ประกอบเป็นคานหลักสำหรับยึดจุดหมุน และลูกตีสางใบอ้อยทั้ง 2 ลูก ส่วนที่สี่เป็นคานตามแนวความยาวทำด้วยเหล็กกล่อง ขนาด 65 x 158 mm หนา 2 mm ยาว 1,850 mm ประกอบเป็นคานหลักสำหรับยึดกล่องเกียร์ทด และระบบส่งกำลังเฟืองโซ่สำหรับอุปกรณ์พรวนกลบใบอ้อยที่ใช้ผานจานไถใบจักรแบบเกลียว (spiral-notched disk) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 in จำนวน 3 ใบ โดยมีหน้ากว้างในการทำงาน 1,200 mm

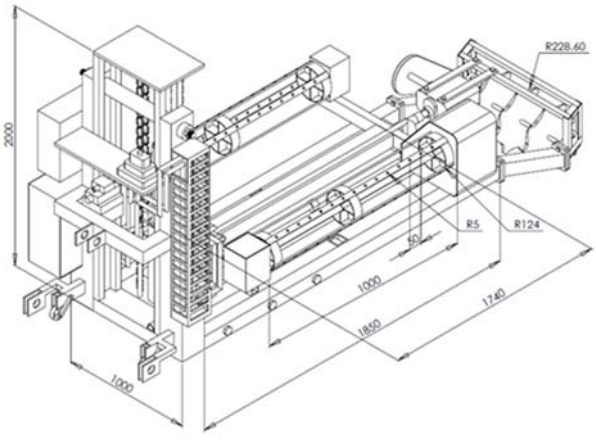


Figure 1 The isometric drawing of a Sugarcane Leaf Stripper and Trash Incorporator.

Figure 2 The prototype of a Sugarcane Leaf Stripper and Trash Incorporator.

2.2 หลักการทำงานของเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อย

เครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยใช้เพลาอำนวยกำลังของรถแทรคเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบ 540 rpm ส่งกำลังผ่านชุดเฟือง 2 ชุด ชุดเฟืองแรกอัตราทด 1:4 ขับปั๊มไฮดรอลิก 1 และ 2 ขนาด 55 cc rev^{-1} ที่ความเร็วรอบ 2,160 rpm ดึงน้ำมันจากถังไฮดรอลิก ขนาด 25 liter ผ่านตัวกรองน้ำมัน มีอัตราการไหล 98 liter min^{-1} มีวาล์วควบคุมความดันแบบปรับด้วยมือที่ 250 bar น้ำมันไฮดรอลิกถูกส่งผ่านระบบท่อไปยังวาล์วควบคุมอัตราการไหลแบบปรับด้วยไฟฟ้า 1 และ 2 โดยวาล์วควบคุมอัตราการไหลแบบปรับด้วยไฟฟ้า 1 จะ เปิด หรี่ หรือปิดวาล์วด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ และต่อไปยังกระบอกสูบไฮดรอลิกซึ่งต่อกับชุดกลไกการเคลื่อนที่ของลูกตีสางใบอ้อย ทำให้ลูกตีสางใบอ้อยเคลื่อนที่ขึ้น-ลงในแนวดิ่งตามความสูงของต้นอ้อย ส่วนวาล์วควบคุมอัตราการไหลแบบปรับด้วยไฟฟ้า 2 จะ เปิด หรี่ หรือปิดวาล์วด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy Controller) ที่ออกแบบโดย ตฤณสิษฐ์ และคณะ (2563) และต่อไปยังมอเตอร์ไฮดรอลิกขนาด 100 cc rev^{-1} แรงบิดสูงสุด 264 N-m ซึ่งต่อกับชุดกลไกการหมุนของลูกตีสางใบอ้อย น้ำมันที่ผ่านกระบอกสูบไฮดรอลิกและมอเตอร์ไฮดรอลิกจะเกิดความร้อนซึ่งแปรผันกับขนาดของภาระงานจะถูกส่งไปยังตัวระบายความร้อนแบบพัดลมระบายอากาศขนาด 250 kcal h^{-1} เพื่อระบายความร้อน และส่งกลับเข้าถังน้ำมันไฮดรอลิกหมุนเวียนตลอดการใช้งาน การทำงานของระบบไฮดรอลิกแสดงใน Figure 3 ชุดเฟืองที่สองอัตราทด 1:1 ถ่ายทอดกำลังผ่านกล่องเกียร์ทดอัตราทด 39:6 และระบบส่งกำลังเฟืองโซ่อัตราทด 21:38 ไปยังผานจานไถใบจักรแบบเกลียวสำหรับพรวนกลบใบอ้อย ส่วนการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของลูกตีสางใบด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถป้อนความเร็วที่ต้องการควบคุมผ่านตู้ควบคุมที่ติดตั้งด้านข้างของตัวเครื่องด้วยปุ่มหมุนแสดงใน Figure 4

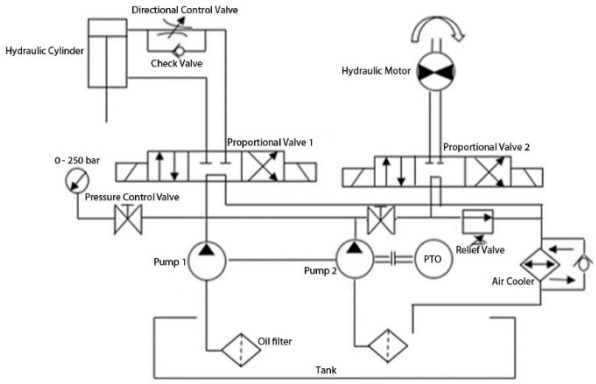
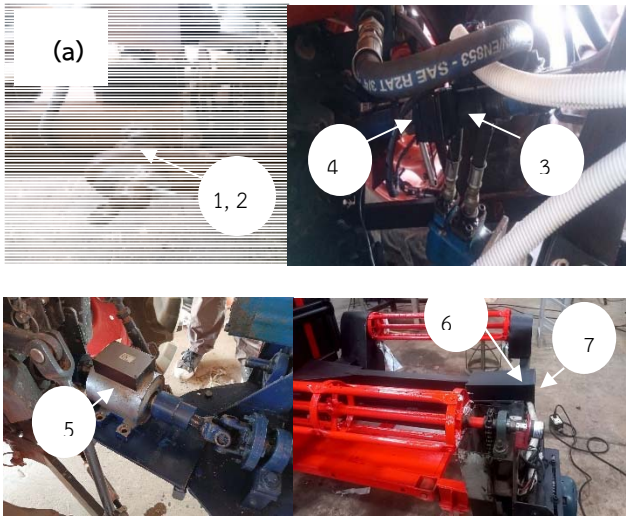


Figure 3 The schematic diagram of hydraulic system for installing on a Sugarcane Leaf Stripper and Trash Incorporator.

Figure 4 the controlling of the revolution for a stripping roller on the electrical control panel.

2.3 การติดตั้งอุปกรณ์วัด

การวัดแรงฉุดลาก (Drawbar pull) ดำเนินการโดยการติด strain gauges แบบ wheatstone bridge บน lower link pin ทั้งสองอัน (1),(2) และ top link (3) ติดตั้งตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อวัดมุมเอียงระหว่างแนวระนาบกับแนวแกน top link (4) ติดตั้ง torque transducer 3 ตัว ตัวที่ 1 และ 2 เพื่อวัดแรงบิดที่เพลาอำนวยกำลัง และวัดแรงบิดที่เพลาขับเคลื่อนอุปกรณ์ไถ (5) ตัวที่ 3 เพื่อวัดแรงบิดที่เพลาขับเคลื่อนลูกตีสางใบ (6) และติดตั้งอุปกรณ์ Rotary Encoder 3 ตัว (7) ตัวที่ 1, 2 และ 3 เพื่อวัดความเร็วรอบการหมุนของเพลาอำนวยกำลัง ความเร็วรอบการหมุนของเพลาขับเคลื่อนอุปกรณ์ไถ และความเร็วรอบการหมุนของเพลาขับเคลื่อนลูกตีสางใบ ตามลำดับ (Figure 5a) สัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องมือวัดเหล่านี้จะส่งผ่านไปยังโปรแกรมประมวลผล เพื่อคำนวณหากำลังฉุดลาก กำลังจากมอเตอร์ไฮดรอลิก กำลังจากเพลาอำนวยกำลัง และกำลังรวม ซึ่งเขียนด้วยโปรแกรม Arduino 1.6.9 ที่บอร์ดควบคุม และแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ (Figure 5b)



(1),(2) = lower link pin (3) = top link (4) = potentiometer (5),(6) = torque transducer (7) = Rotary Encoder

Figure 5 (a) Installation of the measuring equipment on a Sugarcane Leaf Stripper and Trash Incorporator.
(b) The program displays the results on the screen.

2.4 การทดสอบผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะ

ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อย ประกอบด้วย ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ มุมชุดจานไถ (gang angle) และความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถ การทดสอบเลือกใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ 2 ระดับคือ Low 1 (1.95 km h^{-1}) และ Low 2 (2.45 km h^{-1}) เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์มีผลต่อกำลังฉุดลากขณะไถพลิกกลบดินโดยอุปกรณ์ไถจานชนิดใช้กำลังขับ (ศิริศักดิ์ และคณะ, 2560) มุมชุดจานไถ 3 ระดับคือ 36°, 40° และ 44° เนื่องจากมุมจานไถมีผลต่อแรงฉุดลาก โดยมุมจานไถเพิ่มขึ้นแรงฉุดลากในแนวระดับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมุมจานไถมีขนาด 30° แรงฉุดลากในระดับเริ่มคงที่ เมื่อมุมจานไถเพิ่มขึ้นจนถึง 45° ส่งผลให้แรงฉุดลากในแนวระดับลดลง แต่แรงฉุดลากในแนวระดับต่อความกว้างในการตัดดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (Hettiarachi, 1997) และความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถ 2 ระดับคือ 150 และ 180 rpm เนื่องจากความเร็ว

รอบการหมุนที่ผานจานไถมีผลต่อการพลิกกลบดิน และกำลังที่เพลาอำนวยกำลัง โดยความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถระหว่าง 150 ถึง 180 rpm การพลิกกลบดินดีจากการแตกตัวของก้อนดินละเอียด แต่ใช้กำลังที่เพลาอำนวยกำลังเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถเพิ่มขึ้น (Hoki *et al*., 1988) โดยมีความลึกในการไถกลบใบอ้อยเฉลี่ย 25 cm เนื่องจากระบบรากของอ้อยเป็นแบบรากฝอย ความลึกที่แนะนำคือ 25-30 cm เพื่อให้รากอ้อยสามารถหาอาหารได้ง่ายและเพียงพอ ช่วยในการรักษาความชื้นในดิน ควบคุมวัชพืช และปรับปรุงคุณภาพดิน (วิมล และวรรณวิภา, 2561)

ส่วนอุปกรณ์สางใบอ้อยกำหนดเป็นค่าคงที่เนื่องจากเป็นการสางใบอ้อยเพื่อตัดเข้าโรงงาน ไม่สนใจความเสียหายของตาอ้อยและลำอ้อย แตกต่างจากการสางใบเพื่อตัดทำพันธุ์ปลูกที่ต้องใช้ตาอ้อย และลำอ้อยในการปลูก ได้แก่ความเร็วเชิงเส้นของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของลูกตีสางใบ 0.5 m s^{-1} ทิศทางการหมุนของลูกตีสางใบหมุนตีขึ้น ความสูงในการสางใบ 2.8 m และความเร็วรอบการหมุนของลูกตีสางใบอ้อย 800 rpm (ตฤณสิษฐ์ และคณะ, 2563) การทดลองทั้งหมดมี 12 กรรมวิธี ดังแสดงใน Table 1 แต่ละกรรมวิธี ทำการทดลอง 3 ครั้ง ขนาดแปลงทดสอบ 1.5 x 10 m ต่อกรรมวิธี โดยวางแผนการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ RCBD factorial รถแทรกเตอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นรถแทรกเตอร์ Kubota รุ่น B2440 ขนาด 24 hp ทำการทดลองที่บ้านท่าค้อ ต.โพธิ์ศรี อ.พิบูลมังสาหาร จ.อุบลราชธานี พันธุ์อ้อยที่ทดสอบคือ แอลเค 92-11 เป็นอ้อยปลูกใหม่ อายุ 10 เดือน ความสูงเฉลี่ย 2.8 m ชนิดของดินเป็นดินร่วน ประกอบด้วย อนุภาคดินทราย 40.1% อนุภาคดินทรายแป้ง 46.2% และอนุภาคดินเหนียว 13.7% สมบัติของดินในแปลงทดลองที่ระดับความลึก 0-60 cm มีค่าความชื้นของดินเฉลี่ย 14.46 %(db) ความหนาแน่นมวลรวมสภาวะแห้งของดินเฉลี่ย 1.89 g cm^{-3} ความต้านทานการแทงทะลุดินเฉลี่ย 1.96 MPa

Table 1. The factors for testing is shown by the treatments

Treatments	Forward speed (km/h)	gang angle (Degree)	Revolution of the spiral-notched disk (rev/min)
1	Low1	36	150
2	Low1	40	150
3	Low1	44	150
4	Low1	36	180
5	Low1	40	180
6	Low1	44	180
7	Low2	36	150
8	Low2	40	150
9	Low2	44	150
10	Low2	36	180
11	Low2	40	180
12	Low2	44	180

Note: The treatments is done 3 repetitions.

การทดสอบในแต่ละกรรมวิธีจะทำการวัดค่าต่างๆ ประกอบด้วย

2.4.1 กำลังฉุดลาก (Drawbar power, P_D) คือ ผลคูณของแรงฉุดลาก กับความเร็วรถแทรกเตอร์

$$P_D = F_D \times v \quad (1)$$

เมื่อ P_D = กำลังฉุดลาก (kW)

v = ความเร็วรถแทรกเตอร์ (m s^{-1})

F_D = แรงฉุดลาก คือ แรงที่เกิดจากผลรวมของแรงฉุดลากในแนวระดับที่ Lower link pins กับแรงดึงในแนวระดับของ Top link (kN)

2.4.2 กำลังที่เพลาอำนวยกำลัง (P.T.O power, P_{PTO}) คือ ผลคูณของแรงบิดที่เพลาอำนวยกำลัง กับความเร็วเชิงมุมของเพลาอำนวยกำลัง

$$P_{PTO} = \frac{2\pi N_{PTO} \times T_{PTO}}{60{,}000} \quad (2)$$

เมื่อ P_{PTO} = กำลังที่เพลาอำนวยกำลัง (kW)

N_{PTO} = ความเร็วรอบของเพลาอำนวยกำลัง (rpm)

T_{PTO} = แรงบิดที่เพลาอำนวยกำลัง (N-m)

2.4.3 กำลังจำเพาะในการพรวนกลบใบอ้อย (Specific Power, P_{SP}) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างกำลังขับที่เพลาขับเคลื่อนอุปกรณ์ไถต่อพื้นที่หน้าตัดการไถของผาลจานใบจักรที่ตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ พื้นที่หน้าตัดดังกล่าวคำนวณได้จากสมการคำนวณพื้นที่รับแรงดันที่นำเสนอโดย Abo El Ees and Wills (1986)

$$P_{SP} = \frac{P_{TCP}}{A_p} \quad (3)$$

เมื่อ P_{TCP} = กำลังขับที่เพลาขับเคลื่อนอุปกรณ์ไถ (kW)

A_p = พื้นที่หน้าตัดการไถของผาลจานที่ตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ (m^2)

2.4.4 กำลังที่มอเตอร์ไฮดรอลิก (motor hydraulic power, P_{Motor}) คือ ผลคูณของแรงบิดที่เพลาขับลูกตีสางใบอ้อย กับความเร็วเชิงมุมของเพลาขับลูกตีสางใบอ้อย

$$P_{Motor} = \frac{2\pi N_{SLR} \times T_{SLR}}{60{,}000} \quad (4)$$

เมื่อ P_{Motor} = กำลังที่มอเตอร์ไฮดรอลิก (kW)

N_{SLR} = ความเร็วรอบของเพลาขับลูกตีสางใบอ้อย (rpm)

T_{SLR} = แรงบิดที่เพลาขับลูกตีสางใบอ้อย (N-m)

2.4.5 กำลังรวม (total power, P_{Total}) คือ ผลรวมของกำลังฉุดลากกับกำลังที่เพลาอำนวยกำลัง

$$P_{Total} = P_D + P_{PTO} \quad (5)$$

เมื่อ P_{Total} = กำลังรวม (kW)

2.4.6 การประเมินประสิทธิภาพการพรวนกลบใบอ้อยทำได้โดยการคำนวณหาร้อยละพื้นที่การพรวนกลบใบอ้อยจากภาพถ่าย การกลบวัสดุอ้อยในกรอบเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัส 1x1 ตร.ม. คำนวณด้วยสมการที่ (6) (ศิริศักดิ์และคณะ, 2560)

$$Trash\ Covering\ Efficiency: C.E.(\%) = \frac{A_2}{A_1} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ A_1 = พื้นที่ระหว่างแนวร่องไถกับแนวอ้อยตอ (m^2)

A_2 = พื้นที่ระหว่างแนวร่องไถถึงแนวการพลิกกลบใบอ้อย (m^2)

2.4.7 ประสิทธิภาพในการสางใบอ้อย คือ การคำนวณหาร้อยละจำนวนใบอ้อยที่ได้จากการสางใบอ้อย โดยมีอัตราส่วนระหว่างจำนวนใบอ้อยที่ได้จากการสางใบอ้อยกับจำนวนใบอ้อยทั้งหมด

$$Stripping\ of\ Sugarcane\ Leaf\ Efficiency(\%) = \frac{N_2}{N_1} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ N_1 = จำนวนใบอ้อยทั้งหมด (ใบ)

N_2 = จำนวนใบอ้อยที่ได้จากการสางใบอ้อย (ใบ)

2.4.8 2.4.8 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรเชิงทฤษฎี (theoretical field capacity, TFC) หาได้จากสมการที่ 8

$$TFC = W_t \times V_t \times 2.25 \quad (8)$$

เมื่อ TFC = ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรเชิงทฤษฎี (rai h^{-1})

W_t = หน้ากว้างในการทำงานทางทฤษฎี (หน้ากว้างในการทำงานของเครื่องจักรในการทดสอบนี้คือ 1.5 m) (m)

V_t = ความเร็วเฉลี่ยในการทำงาน (m s^{-1}) มีค่าเท่ากับ ($\frac{s}{T_t}$) โดยที่

s = ระยะทางในการทำงาน (m) ในการทดสอบนี้ความยาวของแปลงทดสอบในแต่ละกรรมวิธีคือ 10 m)

T_t = เวลาที่ใช้ในทำงาน (s) โดยที่ไม่รวมเวลาสูญเสียที่ใช้ในการกลับรถ การนำเข้า และใส่ผลผลิต การเติมน้ำมัน การซ่อมแซม และปรับแต่งเครื่อง

ระหว่างการทดสอบคณะผู้วิจัยได้คัดเลือกเกษตรกรชาวไร่อ้อยจำนวน 30 คน ที่มีประสบการณ์ในการทำไร่อ้อยและใช้เครื่องจักรกลเกษตรมากกว่า 10 ปี ในพื้นที่ อ.พิบูลมังสาหารและใกล้เคียง รวมถึงนักวิชาการเกษตรของกรมวิชาการเกษตรจำนวน 15 คน ที่มีประสบการณ์ในการทำงานวิจัยเรื่องอ้อยมากกว่า 5 ปีร่วมทำการทดสอบ และตอบแบบสอบถามหลังการทดสอบเกี่ยวกับระดับความสำคัญของผลการทดสอบ และระดับความพึงพอใจต่อผลการทดสอบ เพื่อวิเคราะห์หากรรมวิธีที่เหมาะสมในการสางใบและพรวนกลบใบอ้อยโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Arithmetic Mean Method) จากสมการที่ 9

ค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนัก $(\bar{X}) = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i X_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}$ (9)

เมื่อ w_i = ระดับความสำคัญของค่าทดสอบแต่ละค่าที่ได้จากการทำแบบสอบถามของเกษตรกร และนักวิชาการเกษตร

X_i = ระดับความพอใจของค่าทดสอบแต่ละค่าที่ได้จากการทำแบบสอบถามของเกษตรกร และนักวิชาการเกษตร

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อย

3.1.1 กำลังฉุดลาก (Drawbar power)

เป็นกำลังที่รถแทรกเตอร์ใช้ขับเคลื่อนเครื่องต้นแบบขณะทำการสางใบ และพรวนกลบใบอ้อยเพื่อเอาชนะความต้านทานที่เกิดขึ้น ทั้งกรณีความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถ 150 และ 180 rpm ที่ความเร็ว 2.45 km h^{-1} รถแทรคเตอร์ต้องใช้กำลังฉุดลากสูงกว่าที่ความเร็ว 1.95 km h^{-1}กรณีรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.45 km h^{-1}เปรียบเทียบกับความเร็ว 1.95 km h^{-1} ค่ากำลังฉุดลากขณะอุปกรณ์สางใบและพรวนกลบวัสดุอ้อยจะเพิ่มขึ้น 30.12 – 30.84% และ 32.03 – 35.63% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลเนื่องจากมุมชุดจานไถ (gang angle) ทั้งกรณีผานจานใบจักรหมุนพรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยความเร็วรอบการหมุน 150 และ 180 rpm พบว่า ขณะที่อุปกรณ์สางใบและพรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยมุมชุดจานไถ 44° ค่ากำลังฉุดลากเพิ่มขึ้น 0.94 – 2.19% และ 1.25 – 2.28% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับเงื่อนไขมุมชุดจานไถ 40° และขณะที่อุปกรณ์สางใบและพรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยมุมชุดจานไถ 40° ค่ากำลังฉุดลากเพิ่มขึ้น 1.23 – 1.92% และ 0.86 – 1.69% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับเงื่อนไขมุมชุดจานไถ 36° (Figure 6a) โดยขนาดมุมชุดจานไถไม่ส่งผลทำให้กำลังฉุดลากแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่เงื่อนไขความเร็วการเดินทางเดียวกัน แต่ความเร็วการเดินทางของรถแทรกเตอร์ที่เร็วกว่าจะส่งผลทำให้กำลังฉุดลากเพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับ ศิริศักดิ์ และคณะ (2561) และ Hettiarachi, (1997)

3.1.2 กำลังที่เพลาอำนวยกำลัง (P.T.O. power)

เป็นกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฮดรอลิกเพื่อสางใบอ้อยและผาลจานใบจักรเพื่อหมุนพรวนกลบวัสดุอ้อย ทั้งกรณีความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถ 150 และ 180 rpm ที่ความเร็ว 2.45 km h^{-1} อุปกรณ์ต้องใช้กำลังที่เพลาอำนวยกำลังสูงกว่าที่ความเร็ว 1.95 km h^{-1} กรณีรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.45 km h^{-1} เปรียบเทียบกับความเร็ว 1.95 km h^{-1} ค่ากำลังที่เพลาอำนวยกำลังขณะอุปกรณ์สางใบและพรวนกลบวัสดุอ้อยจะเพิ่มขึ้น 13.26 – 21.00% และ 9.61 – 20.76% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลเนื่องจากมุมชุดจานไถทั้งกรณีผานจานใบจักรหมุนพรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยความเร็วรอบการหมุน 150 และ 180 rpm พบว่า ขนาดมุมจานไถส่งผลทำให้กำลังที่เพลาอำนวยกำลังแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่เงื่อนไขความเร็วการเดินทางเดียวกัน ขณะที่อุปกรณ์สางใบและพรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยมุม ชุดจานไถ 44° อุปกรณ์ใช้กำลังที่เพลาอำนวยกำลังเพิ่มขึ้น 10.81 – 15.43% และ 6.99 – 14.79% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับเงื่อนไขมุมชุดจานไถ 40° และขณะที่อุปกรณ์สางใบและพรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยมุมชุดจานไถ 40° อุปกรณ์ใช้กำลังที่เพลาอำนวยกำลังเพิ่มขึ้น 9.21 – 12.00% และ 8.32 – 11.23% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับเงื่อนไขมุมชุดจานไถ 36° (Figure 6b) อีกทั้งผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าการไถพรวนพลิกกลบดินที่ความเร็วรอบการหมุนผาลจานไถ 150 และ 180 rpm ปริมาณการใช้กำลังขับที่เพลาอำนวยกำลังแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และสอดคล้องกับ ศิริศักดิ์ และคณะ (2561) และ Hoki *et al*., (1988)

3.1.3 กำลังจำเพาะในการพรวนกลบใบอ้อย (Specific Power)

ทั้งกรณีความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถ 150 และ 180 rpm ที่ความเร็ว 2.45 km h^{-1} อุปกรณ์ต้องใช้กำลังจำเพาะในการพรวนกลบใบอ้อยสูงกว่าที่ความเร็ว 1.95 km h^{-1} กรณีรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.45 km h^{-1} เปรียบเทียบกับความเร็ว 1.95 km h^{-1} ค่ากำลังจำเพาะขณะอุปกรณ์พรวนกลบวัสดุอ้อยจะเพิ่มขึ้น 3.70 – 22.33% และ 10.00 – 26.81% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลเนื่องจากมุมชุดจานไถทั้งกรณีผานจานใบจักรหมุนพรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยความเร็วรอบการหมุน 150 และ 180 rpm พบว่า ขณะที่อุปกรณ์พรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยมุมชุดจานไถ 44° อุปกรณ์ใช้กำลังจำเพาะในการพรวนกลบใบอ้อยลดลง 19.75 – 34.52% และ 17.00 – 32.73% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับเงื่อนไขมุมชุดจานไถ 40° และขณะที่อุปกรณ์พรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยมุมชุดจานไถ 40° อุปกรณ์ใช้กำลังจำเพาะในการพรวนกลบใบอ้อยลดลง 6.19 – 11.50% และ 17.95 – 19.86% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับเงื่อนไขมุมชุดจานไถ 36° (Figure 6c) ค่ากำลังจำเพาะที่เพลาอำนวยกำลังมีขนาดลดลงเมื่ออุปกรณ์พรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยมุมชุดจานไถที่โตมากขึ้น สาเหตุมาจากปริมาตรดินในการพรวนกลบเพิ่มขึ้นเมื่ออุปกรณ์ไถพรวนดินด้วยมุมชุดจานไถที่โตขึ้น ความเร็วรอบหมุนของผานจานไถที่ช้ากว่าและความเร็วการเดินทางของรถแทรกเตอร์ที่เร็วกว่าจะส่งผลทำให้ปริมาตรดินต่อรอบการไถของจานไถมีปริมาณมากซึ่งส่งผลทำให้ค่ากำลังจำเพาะที่เพลาอำนวยกำลังลดลง และสอดคล้องกับ ศิริศักดิ์ และคณะ (2560)

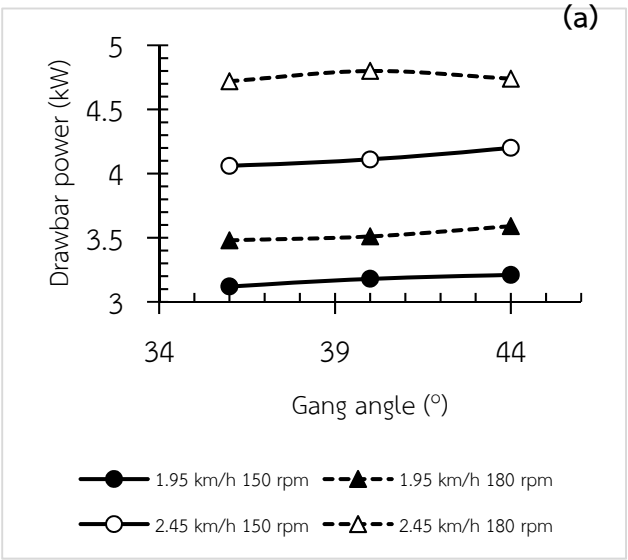
3.1.4 3.1.4 กำลังที่มอเตอร์ไฮดรอลิก (Motor hydraulic power)

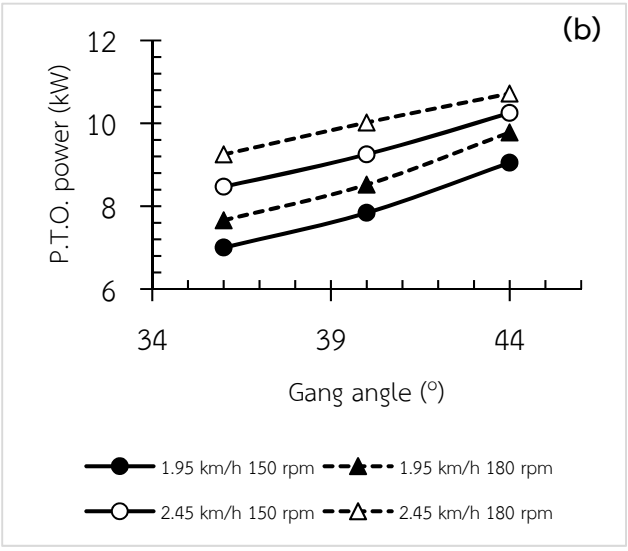
เป็นกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนลูกตีสางใบอ้อย กรณีรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.45 km h^{-1} เปรียบเทียบกับความเร็ว 1.95 km h^{-1} ค่ากำลังที่มอเตอร์ไฮดรอลิกขณะอุปกรณ์สางใบอ้อยจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 36.04% จากแรงต้านใบอ้อยที่เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วการเดินทางของรถแทรกเตอร์เพิ่มขึ้นจากภาระโหลด (ปริมาณใบอ้อย) ที่เข้ามาบริเวณลูกตีสางใบเพิ่มขึ้น

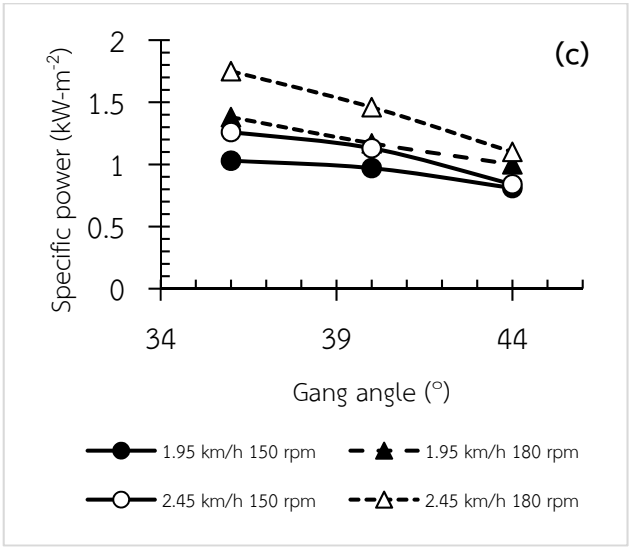
3.1.5 กำลังรวม (Total power)

เป็นผลรวมของกำลังฉุดลากกับกำลังที่เพลาอำนวยกำลัง ทั้งกรณีความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถ 150 และ 180 rpm ที่ความเร็ว 2.45 km h^{-1} ค่ากำลังรวมสูงกว่าที่ความเร็ว 1.95 km

h^{-1} กรณีรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.45 km h^{-1} เปรียบเทียบกับความเร็ว 1.95 km h^{-1} ค่ากำลังรวมจะเพิ่มขึ้น 17.86 – 23.81% และ 15.63 – 25.40% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลเนื่องจากมุมชุดจานไถทั้งกรณีผานจานใบจักรหมุนพรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยความเร็วรอบการหมุน 150 และ 180 rpm พบว่า ขนาดมุมจานไถส่งผลทำให้กำลังรวมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่เงื่อนไขความเร็วการเดินทางเดียวกัน ขณะที่อุปกรณ์สางใบและพรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยมุมชุดจานไถ 44° ค่ากำลังรวมเพิ่มขึ้น 8.16 – 11.25% และ 4.32 – 10.13% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับเงื่อนไขมุมชุดจานไถ 40° และขณะที่อุปกรณ์สางใบและพรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยมุมชุดจานไถ 40° ค่ากำลังรวมเพิ่มขึ้น 6.62 – 8.89% และ 6.08 – 8.98% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับเงื่อนไขมุมชุดจานไถ 36° (Figure 6d) อีกทั้งผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าการไถพรวนพลิกกลบดินที่ความเร็วรอบการหมุนผาลจานไถ 150 และ 180 rpm ปริมาณการใช้กำลังรวมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ







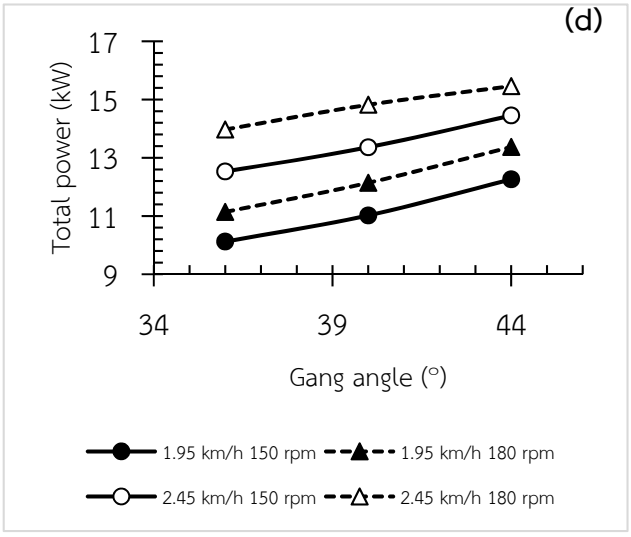


Figure 6 (a) Drawbar power at the conditions of 36°, 40° and 44°
(b) P.T.O power at the conditions of 36°, 40° and 44°
(c) Specific power at the conditions of 36°, 40° and 44°
(d) Total power at the conditions of 36°, 40° and 44°

3.1.6 ประสิทธิภาพการพรวนกลบใบอ้อย (Trash Covering Efficiency)

ที่เงื่อนไขมุมชุดจานไถ 36° ประสิทธิภาพการพรวนกลบวัสดุอ้อยในไร่อยู่ในช่วงระหว่าง 92.41 – 96.85% สำหรับกรณีมุมชุดจานไถ 40° ประสิทธิภาพการพรวนกลบวัสดุอ้อยในไร่อยู่ในช่วงระหว่าง 93.82 – 94.31% และที่เงื่อนไขมุมชุดจานไถ 44° ประสิทธิภาพการพรวนกลบวัสดุอ้อยในไร่อยู่ในช่วงระหว่าง 94.16 – 94.88% (Figure 7a) โดยประสิทธิภาพการพรวนกลบใบอ้อยมีค่าไม่ถึง 100% สาเหตุเกิดจากการออกแบบผานจานไถจำนวน 3 ใบ ให้ไถกลบวัสดุอ้อยระหว่างร่องปลูกอ้อยทำให้แนวการพลิกกลบใบอ้อยไม่ถึงแนวอ้อยตอ นอกจากนี้ศิริศักดิ์ และ

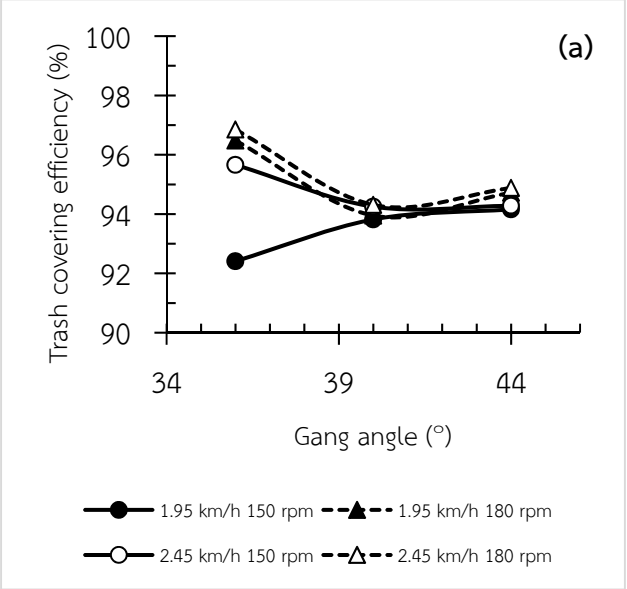
คณะ (2560) กล่าวว่า ประสิทธิภาพการพรวนกลบใบอ้อยน้อยกว่า 90% จะไม่สามารถบรรเทาปัญหาการลุกลามของไฟในไร่อ้อย ดังนั้นประสิทธิภาพการพรวนกลบใบอ้อยควรสูงกว่า 90% โดยทุกกรรมวิธีมีค่ามากกว่า 90%

3.1.7 ประสิทธิภาพการสางใบอ้อย (Stripping of Sugarcane Leaf Efficiency)

ที่ความเร็วเชิงเส้นของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของลูกตีสางใบ 0.5 m s^{-1} ทิศทางการหมุนของลูกตีสางใบหมุนตีขึ้น ความสูงในการสางใบ 2.5 m ความเร็วรอบการหมุนของลูกตีสางใบอ้อย 800 rpm ประสิทธิภาพการสางใบอ้อยในไร่อยู่ในช่วงระหว่าง 82.25 – 84.65% เนื่องจากใบบริเวณยอดลำอ้อยที่มีความสูงเกิน 2.8 m (ปริมาณใบประมาณ 15 - 20%) ไม่ได้ถูกเครื่องสางลงมา แต่ความสะอาดเพียงพอให้แรงงานคนเข้าตัด (Figure 7b) และจากการทดสอบ พบว่า มากกว่า 80% แรงงานคนเข้าตัดอ้อยได้สะดวก โดยทุกกรรมวิธีมีค่ามากกว่า 80%

3.1.8 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรเชิงทฤษฎี (Theoretical field capacity)

ขึ้นอยู่กับความเร็วของรถแทรกเตอร์ เมื่อใช้ความเร็วรถแทรกเตอร์ 1.95 km h^{-1} พบว่า มีอัตราการลื่นไถลเล็กน้อยและมีค่าเป็นบวกส่งผลให้ความเร็วของรถแทรกเตอร์ลดลงเนื่องจากการลื่นไถลของล้อแทรคเตอร์ส่วนใหญ่เกิดจากแรงต้านของดินที่กระทำต่อชุดไถมีค่ามากกว่าแรงต้านของดินที่ล้อแทรกเตอร์ และเมื่อใช้ความเร็วรถแทรกเตอร์ 2.45 km h^{-1} เปอร์เซ็นต์การลื่นไถลมีค่าลบจากการใช้ไถจานที่มีกำลังขับ ส่งผลให้ความเร็วของรถแทรกเตอร์เพิ่มขึ้นขณะทำงานส่วนใบอ้อยซึ่งเป็นภาระ (Load) ของอุปกรณ์สางใบอ้อยจะอยู่ด้านข้างของรถแทรกเตอร์ และอ้อยบางส่วนที่แตกกอจะถูกการ์ดป้องกันต้นอ้อยซึ่งติดตั้งอยู่ด้านหน้าของรถแทรกเตอร์ดันออก จึงไม่ส่งผลต่อความเร็วของรถแทรกเตอร์ และไม่ส่งผลต่ออัตราการทำงานทางทฤษฎีของเครื่อง



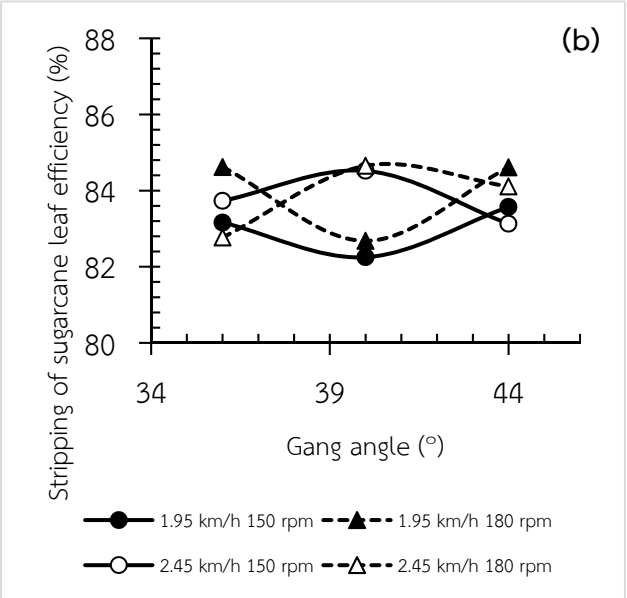


Figure 7 (a) Trash covering efficiency at the conditions of 36°, 40° and 44°
(b) Stripping of sugarcane leaves efficiency at the conditions of 36°, 40° and 44°

ผลการทดสอบทุกกรรมวิธีแสดงใน Table 2

Table 2. Results of testing Drawbar power**,** P.T.O power, Total power, Specific Power, Motor hydraulic power, Trash Covering Efficiency, Stripping of Sugarcane Leaf Efficiency and Theoretical field capacity.

Treatment	Drawbar power (kW)	P.T.O. power (kW)	Total power (kW)	Specific Power (kW-m^{-2})	Motor hydraulic power (kW)	Trash Covering Efficiency (%)	Stripping of Sugarcane Leaf Efficiency (%)	Theoretical field capacity (rai h^{-1})
1	3.12	7.00	10.12	1.03	2.68	92.41	83.16	2.34
2	3.18	7.84	11.02	0.97	2.72	93.82	82.25	2.32
3	3.21	9.05	12.26	0.81	2.87	94.16	83.57	2.31
4	3.48	7.66	11.14	1.38	2.77	96.48	84.62	2.35
5	3.51	8.52	12.14	1.17	2.92	93.95	82.68	2.34
6	3.59	9.78	13.37	1.00	2.94	94.72	84.61	2.34
7	4.06	8.47	12.53	1.26	3.66	95.66	83.73	2.81
8	4.11	9.25	13.36	1.13	3.85	94.25	84.52	2.82
9	4.20	10.25	14.45	0.84	3.98	94.28	83.13	2.80
10	4.72	9.25	13.97	1.75	3.64	96.85	82.77	2.82
11	4.80	10.02	14.82	1.46	3.87	94.31	84.65	2.83
12	4.74	10.72	15.46	1.10	3.99	94.88	84.11	2.83

Note: The results of the experiment are an average of 3 replicates.

3.2 ผลการหาปัจจัยทดสอบที่เหมาะสม (optimum) สำหรับการสางใบและพรวนกลบใบอ้อยโดยเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อย

ระดับความสำคัญของผลการทดสอบ และระดับความพึงพอใจของผลการทดสอบทั้งหมด 4 ค่า ประกอบด้วย ประสิทธิภาพการพรวนกลบใบอ้อย ประสิทธิภาพในการสางใบอ้อย กำลังรวม หรืออัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และอัตราการทำงานทางทฤษฎี โดยระดับความสำคัญของผลการทดสอบจะให้ผู้ร่วมทดสอบตอบแบบสอบถามภายหลังการทดสอบเกี่ยวกับค่าทดสอบใดมีความสำคัญเรียงลำดับสูงสุด-ต่ำสุด สำหรับการสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อย ส่วนระดับความพึงพอใจของผลการทดสอบ ผู้วิจัยแบ่งระดับของค่าทดสอบแต่ละค่าเป็น 4 ระดับ ภายหลังการทดสอบให้ผู้ร่วมทดสอบตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับระดับความพึงพอใจของผลทดสอบแต่ละค่าเรียงลำดับจากหมายเลข 1-4 (น้อยที่สุด-มากที่สุด) สำหรับค่ากำลังรวม ผู้วิจัยทำการวัดค่ากำลังรวมที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 4 ระดับ แล้ววัดน้ำมันเชื่อเพลิงที่ใช้ด้วยกระบอกตวง จากนั้นเทียบเป็นอัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงต่อไร่ เพื่อให้ผู้ร่วมทดสอบเข้าใจง่ายขึ้น ผลการตอบแบบสอบถามแสดงใน Table 3

Table 3: The level of satisfaction and significance for the results of testing.

Test results	Level	Level of satisfaction	Level of signification (%)
Trash Covering Efficiency	> 90 (%)	4	25.28
	90 - 88 (%)	3	
	88 - 85 (%)	2	
	< 85 (%)	1	
Stripping of Sugarcane Leaf Efficiency	> 80 (%)	4	28.32
	80 - 75 (%)	3	
	75 - 70 (%)	2	
	< 70 (%)	1	
Total power or Fuel consumption	< 11.0 (kW) or < 1.50 (liter/rai)	4	30..14
	12.5 – 11.0 (kW) or 1.75 – 1.50 (liter/rai)	3	
	15.0 – 12.5 (kW) or 2.0 – 1.75 (liter/rai)	2	
	> 15.0 (kW) or > 2.0 (liter/rai)	1	
Theoretical field capacity	> 2.5 (rai h^{-1})	4	16.26
	2.5 – 2.3 (rai h^{-1})	3	
	2.3 – 2.0 (rai h^{-1})	2	
	< 2.0 (rai h^{-1})	1	

Note: 4 = very good, 3 = good, 2 = medium and 1 = not good

เมื่อนำผลการทดสอบจาก Table 2 มาเปรียบเทียบกับระดับความพึงพอใจจาก Table 3 แล้วหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนักตามสมการที่ 9 จะได้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนักแสดงใน Table 4

Table 4 Weighted Arithmetic Mean of Experiments

Treatment	Trash Covering Efficiency		Stripping of Sugarcane Leaf Efficiency		Total power		Theoretical field capacity		Weighted Arithmetic Mean
	(%)	level	(%)	level	(kW)	level	(rai h^{-1})	level	
1	92.41	4	83.16	4	10.12	4	2.34	3	3.837
2	93.82	4	82.25	4	11.02	3	2.32	3	3.536
3	94.16	4	83.57	4	12.26	3	2.31	3	3.536
4	96.48	4	84.62	4	11.14	3	2.35	3	3.536
5	93.95	4	82.68	4	12.14	3	2.34	3	3.536
6	94.72	4	84.61	4	13.37	2	2.34	3	3.235
7	95.66	4	83.73	4	12.53	2	2.81	4	3.397
8	94.25	4	84.52	4	13.36	2	2.82	4	3.397
9	94.28	4	83.13	4	14.45	2	2.80	4	3.397
10	96.85	4	82.77	4	13.97	2	2.82	4	3.397
11	94.31	4	84.65	4	14.82	2	2.83	4	3.397
12	94.88	4	84.11	4	15.46	1	2.83	4	3.096

จาก Table 4 พบว่า ค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนักในกรรมวิธีที่ 1 ให้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนักมากที่สุด 3.837 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ 1.95 km h^{-1} (เกียร์ Low1) มุมชุดจานไถ 36° ความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถ 150 rpm ความเร็วเชิงเส้นของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของลูกตีสางใบ 0.5 m s^{-1} ทิศทางการหมุนของลูกตีสางใบหมุนตีขึ้น และความเร็วรอบการหมุนของลูกตีสางใบอ้อย 800 rpm เป็นปัจจัยทดสอบที่เหมาะสม (optimum) และมีสมรรถนะการทำงานสูงสุดสำหรับการสางใบและพรวนกลบใบอ้อยโดยเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยในแปลงทดสอบ นอกจากนี้ทุกกรรมวิธีมีประสิทธิภาพการพรวนกลบใบอ้อยมากกว่า 90% และประสิทธิภาพการสางใบอ้อยมากกว่า 80% ถ้าพิจารณากำลังรวมที่แปรผันตามอัตราการใช้น้ำมันเชื่อเพลิง พบว่า ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ มุมชุดจานไถ และความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถ ส่งผลกระทบต่อกำลังรวมที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยกรรมวิธีที่ 1 ใช้กำลังรวมต่ำสุด 10.12 kW เช่นกัน

4 สรุป

เครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อย เป็นเครื่องต้นแบบที่พัฒนาจากเครื่องสางใบอ้อยสำหรับอ้อยตัดทำพันธุ์โดยใช้ระบบไฮดรอลิกที่ออกแบบโดย ตฤณสิษฐ์ และคณะ (2563) ทำการออกแบบเพิ่มเติมสำหรับอุปกรณ์พรวนกลบใบอ้อย ประกอบด้วยคานสำหรับยึดกล่องเกียร์ทด และระบบส่งกำลังเฟืองโซ่ที่ใช้ผานจานไถใบจักรแบบเกลียว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 in จำนวน 3 ใบ มีหน้ากว้างในการทำงาน 1,200 mm สามารถสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยในการทำงานครั้งเดียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำการทดสอบกับอ้อยพันธุ์ แอลเค 92-11 สำหรับตัดเข้าโรงงาน การทดลองทำในพื้นที่ดินร่วนประกอบด้วย อนุภาคดินทราย 40.1% อนุภาคดินทรายแป้ง 46.2% และอนุภาคดินเหนียว 13.7% สมบัติของดินในแปลงทดลองที่ระดับความลึก 0-60 cm มีค่าความชื้นของดินเฉลี่ย 14.46 %(db) ความหนาแน่นมวลรวมสภาวะแห้งของดินเฉลี่ย 1.89 g cm^{-3} ความต้านทานการแทงทะลุดินเฉลี่ย 1.96 MPa พบว่า ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ มุมชุดจานไถ และความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถ ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรวม (ผลรวมของกำลังฉุดลากกับกำลังที่เพลาอำนวยกำลัง)ที่แปรผันตามอัตราการใช้น้ำมันเชื่อเพลิง โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบหมุนของผานจานไถ และความเร็วการเดินทางของรถแทรกเตอร์เพิ่มขึ้น รวมถึงอุปกรณ์พรวนกลบวัสดุอ้อยด้วยมุมชุดจานไถที่โตมากขึ้น สำหรับประสิทธิภาพการสางใบอ้อย สามารถสางใบเพื่อให้แรงงานคนเข้าตัดอ้อยได้สะดวก ส่วนประสิทธิภาพการพรวนกลบใบอ้อยสามารถสับและฝังกลบใบอ้อยเพื่อเพิ่มปริมาณอินทรียวัตถุในดินและบรรเทาปัญหาการลุกลามของไฟในไร่อ้อย นอกจากนี้พบว่าความเร็วการเดินทางรถแทรกเตอร์ 1.95 km h^{-1} (เกียร์ Low1) มุมชุดจานไถ 36° ความเร็วรอบการหมุนที่ผานจานไถ 150 rpm ความเร็วเชิงเส้นของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของลูกตีสางใบ 0.5 m s^{-1} ทิศทางการหมุนของลูกตีสางใบหมุนตีขึ้น และความเร็วรอบการหมุนของลูกตีสางใบอ้อย 800 rpm เป็นปัจจัยทดสอบที่เหมาะสม (optimum) และมีสมรรถนะการทำงานสูงสุดสำหรับเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อย โดยใช้กำลัง 10.12 kW มีประสิทธิภาพในการสางใบอ้อย 83.16% ประสิทธิภาพการพรวนกลบใบอ้อย 92.41% และมีอัตราการทำงานทางทฤษฎี 2.34 rai h^{-1} โดยเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยมีข้อเด่นคือสามารถสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยในการ

ทำงานครั้งเดียว เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องสางใบและเครื่องพรวนกลบใบอ้อยที่มีใช้อยู่ทั่วไปที่ต้องทำงาน 2 ครั้ง ครั้งแรกทำการสางใบอ้อย ครั้งที่สองทำการพรวนกลบใบอ้อย นอกจากนี้สามารถใช้ก่อนการใช้แรงงานคนเข้าตัด มีความสะดวก เพิ่มปริมาณอินทรียวัตถุในดิน และบรรเทาปัญหาการลุกลามของไฟในไร่อ้อยได้

5 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบการทำงานของเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยแบบภาคสนาม ซึ่งพบปัญหาและอุปสรรคในการทดสอบ เช่น ขนาดความยาวของตัวเครื่องมากเกินไปส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในกลับรถเพื่อทำงานในร่องอ้อย เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่พัฒนามาจากเครื่องสางใบอ้อยตัวเดิม นอกจากนี้ได้ทดสอบเฉพาะอ้อยพันธุ์ แอลเค 92-11 และในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี เท่านั้น จึงควรมีการศึกษาสภาพพื้นที่แปลงอื่น และพันธุ์อ้อยอื่นเพิ่มเติม โดยควรมีการศึกษาและพัฒนาลูกตีสางใบให้มีขนาดสั้นลง เพื่อลดขนาดเครื่องและเพิ่มความสามารถในการทำงาน รวมถึงการทดสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับอัตราการทำงานจริงเชิงพื้นที่ ประสิทธิภาพการทำงานเชิงพื้นที่ และการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องสางใบและเครื่องพรวนกลบใบอ้อยที่มีใช้อยู่ทั่วไปเพื่อความสมบูรณ์ของงานวิจัยต่อไป ส่วนการพิจารณาปัจจัยทดสอบที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการสางใบและพรวนกลบใบอ้อยโดยเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อย เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนักที่ได้จากแบบสอบถามเกษตรกร และนักวิชาการเกษตรในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี จึงเหมาะกับการใช้พิจารณาปัจจัยทดสอบที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการสางใบและพรวนกลบใบอ้อยในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี และจังหวัดใกล้เคียง ซึ่งมีลักษณะของดินใกล้เคียงกัน ไม่สามารถนำไปพิจารณาในพื้นที่ที่ลักษณะดินมีความแตกต่างกันได้ สำหรับอ้อยพันธุ์ แอลเค 92-11 สามารถนำไปพิจารณาใช้กับอ้อยพันธุ์อู่ทอง 84-12 และกำแพงแสน 01-12 ได้ เนื่องจากแรงดึงใบอ้อยที่ใกล้เคียงกัน (ตฤณสิษฐ์ และคณะ, 2563) ส่งผลให้ใช้กำลังที่มอเตอร์ไฮดรอลิกและกำลังรวมไม่แตกต่างกัน

6 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.ธัญญา นิยมาภา และ รศ.ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการไถพรวนด้วยเครื่องมือไถจานชนิดใช้กำลังขับ รวมถึงภาควิชาวิศวกรรมเกษตร ม.เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทดสอบอุปกรณ์ไถจานชนิดใช้กำลังขับ และเป็นพื้นฐานในการออกแบบเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณ ข้าราชการ และลูกจ้าง กรมวิชาการเกษตร ทุกท่าน ที่ได้ร่วมมือในการสร้างและทดสอบเครื่องสางใบพร้อมพรวนกลบใบอ้อยจนงานวิจัยลุล่วง

7 เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. คู่มืองดเผาตอซัง สร้างดินยั่งยืน ฟื้นสิ่งแวดล้อม. สำนักวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. แหล่งข้อมูล: https://www.ldd.go.th/manual_stump/stump.pdf เข้าถึงเมื่อ: 5 มกราคม 2568.

กรมวิชาการเกษตร. 2547. แนวทางการแก้ปัญหาการเผาใบอ้อย. เอกสารวิชาการการปลูกพืชไร่. สถาบันวิจัยพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด. กรุงเทพฯ. 332 หน้า.

กล้าณรงค์ ศรีรอต. 2546. อ้อยไฟไหม้: ผลกระทบต่ออุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย. วารสารอ้อยและน้ำตาลไทย. 10(2), 61-63.

ตฤณสิษฐ์ ไกรสินบุรศักดิ์, ดนัย ศาลทูลพิทักษ์, อนุชา เชาว์โชติ, มงคล ตุ่นเฮ้า, พุทธธินันทร์ จารุวัฒน์, ปรีชา อานันท์รัตนกุล, อนุชิต ฉ่ำสิงห์, มานพ คันธามารัตน์, รัชดา ปรัชเจริญวนิชย์, จิระวีณ์ ไกรสินบุรศักดิ์, กันต์ธกรณ์ เขาทอง. 2563. ออกแบบและพัฒนาเครื่องสางใบอ้อยสำหรับอ้อยตัดทำพันธุ์โดยใช้ระบบไฮดรอลิค. วารสารวิชาการเกษตร. 38(1), 33-49.

ธัญญา นิยมาภา และวิชัย หมอยาดี. 2554. การพัฒนาเครื่องมือไถจานชนิดใช้กำลังขับ. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 ประจำปี 2554, 1 – 6. ชลบุรี: 31 มี.ค. - 1 เม.ย. 2554, ชลบุรี.

วิมล ภูกองไชย, วรรณวิภา แก้วประดิษฐ์. 2561. การจัดการเศษซากใบอ้อยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายและปลดปล่อยไนโตรเจน. วารสารแก่นเกษตร. 46(ฉบับพิเศษ 1), 25-29.

ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล รุจิภาส คงกล่ำ, ประเทือง อุษาบริสุทธิ์. 2561. อุปกรณ์พรวนกลบวัสดุอ้อยแบบไถจานชนิดใช้กำลังขับสำหรับการจัดการอ้อยตอ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 49(4), 327-330.

ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล รุจิภาส คงกล่ำ, ประเทือง อุษาบริสุทธิ์. 2560. การพรวนกลบใบอ้อยในไร่หลังการเก็บเกี่ยวด้วยไถจานชนิดใช้กำลังขับ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 48(3), 23-26.

Abo El Ees, N.A.E.H, B.M.D. Wills. 1986. An analysis of the geometric and soil working parameters of a curved vertical disc. Journal of Agricultural Engineering Research. 35, 277-286.

Hettiaratchi, D. R. P. 1997. Prediction of soil forces acting on concave agricultural discs. Journal of Agricultural Engineering Research. 68, 51-62.

Hoki, M., T. H. Burkhardt, R. H. Wilkinson, T. Tanoue. 1988. Study of PTO driven powered disc tiller. Transaction of ASAE. 31(5), 1355-1360.

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย บทความวิจัย
ปีที่ 31 ฉบับที่ 2 (2568) 23-30
ISSN 1685-408X
Available online at www.tsae.asia

เครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรคเตอร์ขนาดเล็ก

Tractor-Mounted Cassava Cleaning Machine for Small Tractors

กฤษณะ นาวารัตน์[1*], สุรพงษ์ โซ่ทอง[1], บุราณี ระเบียบ[1], ชาญณงค์ ชูสุย[1], ชนิดา บุพตา[2]
Kritsana Navarat[1*], Surapong Sotong[1], Buranee Rabiab[1], Channarong Choosui[1], Chanida Bupata[2]

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, จันทบุรี, 22210
[1]Department of Mechanical Technology, Faculty of Agro-Industrial Technology RMUTTO, Chanthaburi, 22210
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ชลบุรี, 20110
[2]Department of Agricultural Engineering, School of Engineering and Innovation, RMUTTO, Chonburi, 20110
*Corresponding author: Tel: +66-9-5951-9952, Fax: +66-39-307-270, E-mail: kritsana_na@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์ในการสร้างและการทดสอบประเมินสมรรถนะเครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก โดยมีขนาด ความกว้าง × ความยาว × ความสูง ดังนี้ 1.20 m × 1.5 m × 1.6 m **โครงสร้างของเครื่องประกอบด้วย ต้นกำลัง ชุดถ่ายทอดกำลังและชุดทำความสะอาด โดยต้นกำลังมาจากเพลาอำนวยกำลัง(PTO) จากรถแทรกเตอร์** และทำการทดสอบโดยมีผลการทดสอบที่ความเร็วรอบของเพลาอำนวยกำลัง(PTO) 800 rpm การทำงานของเครื่องโดยการป้อนวัสดุลงในชุดทำความสะอาดและทำหมุนเมื่อครบกำหนดระยะเวลานำวัตถุดิบออกจากชุดทำความสะอาด ความเร็วรอบในการทดสอบ 15 20 และ 25 rpm เวลาในการทำความสะอาด 1 และ 2 min จากการทดสอบพบว่าด้านประสิทธิภาพในการทำความสะอาด จากการทดสอบพบที่เวลา **2 นาทีพบที่ความเร็วรอบ 20 rpm น้ำหนัก 50 kg โดยมีค่าเท่ากับ 96.44% ด้านความสามารถในการทำงานพบที่เวลา 1 min น้ำหนัก 100 kg โดยมีค่าเท่ากับ 5,220 kg h^{-1} เครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กนี้สามารถแยกสิ่งเจือปนและขูดเปลือกนอกของมันสำปะหลังได้**

คำสำคัญ: มันสำปะหลัง, การทำความสะอาด, รถแทรคเตอร์ขนาดเล็ก

Abstract

The objective of this research was to design and evaluate the performance of a tractor-mounted cassava cleaning machine for small tractors. The machine has dimensions of 1.20 m (width) × 1.5 m (length) × 1.6 m (height). Its structure consists of a power source, a power transmission system, and a cleaning unit. The power source is derived from the tractor's power take-off (PTO) shaft. The machine was tested at a PTO speed of 800 rpm. During operation, cassava is fed into the cleaning unit, which rotates for a specified period before discharging the cleaned material. The machine was tested at rotational speeds of 15, 20, and 25 rpm, and cleaning durations of 1 and 2 minutes. Test results showed the highest cleaning efficiency of 96.44%, achieved at 20 rpm, with a 2-minute cleaning time and a material weight of 50 kg. The highest working capacity was 5,220 kg h^{-1}, recorded at a cleaning time of 1 minute with a material weight of 100 kg. This cassava cleaning machine, which is mountable on a small tractor, can effectively remove impurities and scrape the outer skin.

Keywords: Cassava, Cleaning, Small Tractor

1 บทนำ

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง ในปี 2567 ประเทศไทยมีการผลิตมันสำปะหลังมากถึง 24,669,488 ตันในปี 2566 และมีสายพันธ์มันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศไทย แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ 1. ชนิดหวาน (Sweet Type) เป็นมันสำปะหลังที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิคต่ำ ไม่มีรสขมใช้เพื่อการบริโภคของ

Received: October 02, 2024
Revised: June 12, 2025
Accepted: September 05, 2025
Available online: December 22, 2025

มนุษย์ มีทั้งชนิดเนื้อร่วนนุ่ม และชนิดเนื้อแน่น เหนียว แต่มีจำนวนน้อย 2. ชนิดขม (Bitter Type) เป็นมันสำปะหลังที่มีกรดไฮโดรไซยานิคสูง เป็นพิษ และมีรสขม ไม่เหมาะสำหรับ การบริโภคของมนุษย์ หรือใช้หัวมันสำปะหลัง สดเลี้ยงสัตว์โดยตรง แต่จะใช้สำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปต่างๆเช่น แป้งมัน มันอัดเม็ด และแอลกอฮอล์ เนื่องจากมีปริมาณแป้งสูง เป็นต้น มันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศ ไทยส่วนใหญ่เป็นชนิดขมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย ,2567) ปัจจุบันมันสำปะหลังได้มีการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์โดยความสำคัญมีหลายทางด้วยกัน เช่น ทางด้านอาหาร โดยการนำมาทำข้าวเกรียบมันสำปะหลังพร้อมรับประทาน อาหารสัตว์การใช้กากไลซีนเพิ่มโปรตีนของมันสำปะหลังในอาหารโค (วงศ์ผกา, 2567; เทิดชัยและองอาจ, 2536) และทางด้านพลังงานโดยมีการนำเหง้ามันสำปะหลังมาทำเป็นถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลัง (เกรียงศักดิ์, 2567) ดังจะเห็นว่าในปัจจุบันมีประโยชน์อย่างมากอย่างเห็นได้ชัด เช่น การนำผลผลิตไปผลิตเอทานอล และก๊าซชีวภาพ มันสำปะหลังจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีอัตราการผลิตสูงเนื่องจากเป็นพืชที่มีการเพาะปลูกง่าย การบำรุงรักษาไม่ยุ่งยาก เนื่องจากปัจจุบันการปลูกมันสำปะหลังที่มีมากทำให้เกิดปัญหาคือเมื่อขุดหัวมันสำปะหลังโดยวิธีการใช้คนและการใช้เครื่องจักรกลเกษตรในการทำงานมันสำปะหลังที่ขุดนั้นจะมีดินติดมาด้วยเป็นจำนวนมากทำให้เกษตรกรต้องประสบปัญหาคือต้องคอยนำดินที่ติดมาออกจากหัวมันสำปะหลังเพราะถ้าไม่นำดินที่ติดมาจากการขุดมันสำปะหลังออกจะทำให้เกษตรกรขายหัวมันสำปะหลังได้ราคาไม่สูงและสถานที่รับซื้อหัวมันสำปะหลังต้องเสียเวลาในการทำความสะอาดทำให้สิ้นเปลืองเวลา แรงงานและค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาด เพื่อเป็นการช่วยเหลือเกษตรกรให้ขายได้ผลผลิตที่มีราคาสูงกว่าเดิมและเป็นการเพิ่มมูลค่าของหัวมันสำปะหลัง จากการศึกษาข้อมูลมีพบว่า ได้มีการสร้างเครื่องทำความสะอาดแบบแห้งและขูดผิวหัวมันสำปะหลังบางส่วน (สุกัญญาและคณะ, 2545) โดยเครื่องดังกล่าวมีขนาดใหญ่และเคลื่อนย้ายลำบาก และมีผู้พัฒนาได้ทำการออกแบบและทดสอบเครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นตะแกรงทรงกระบอกสร้างมาจากแผ่นตะแกรงเหล็กรูกลม มีครีบถูกติดตั้งไว้ภายในตะแกรงเพื่อทำหน้าที่ลำเลียงมันสำปะหลังที่ความเร็วรอบเท่ากับ 6 rpm (พยุงศักดิ์และคณะ, 2554)

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการสร้างและการทดสอบประเมินสมรรถนะเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กเพื่อใช้ในการทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังและเป็นการพัฒนาเครื่องจักรกลเกษตรขนาดเล็กให้เหมาะสมกับการใช้งานเนื่องจากในปัจจุบันนั้นเกษตรในหลายพื้นที่ส่วนมากจะมีรถแทรคเตอร์ขนาดเล็กเป็นของตนเองและสามารถนำมาเป็นต้นกำลังสำหรับเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก อันจะเป็นแนวทางและประโยชน์ในการศึกษา ตลอดจนงานวิจัยด้านอื่นๆต่อไป

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การศึกษาและสร้างเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรคเตอร์ขนาดเล็ก

1) ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องในส่วนของเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรคเตอร์ขนาดเล็ก วิธีการการทำความสะอาด ระบบการต่อพ่วงรถแทรคเตอร์ การถ่ายทอดกำลังจากรถแทรคเตอร์ อัตราการทำงาน รวมถึงการกำหนดขนาดของเครื่องต้นแบบ

2) ออกแบบเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรคเตอร์ขนาดเล็ก โดยมีข้อกำหนดในการออกแบบเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรคเตอร์ขนาดเล็ก มีดังนี้

1. เครื่องต้นแบบสามารถลดปริมาณดินทรายที่เกาะที่หัวมันสำปะหลังออกได้

2. การป้อนหัวมันสำปะหลังโดยการใช้แรงงานคนเนื่องจากเครื่องต้นแบบมีขนาดเล็กทำให้ไม่สามารถทำงานต่อเนื่องได้

3. เครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรคเตอร์ขนาดเล็กต้นแบบนั้นใช้ระบบการลากจูงด้วยรถแทรคเตอร์และใช้ต้นกำลังที่เกษตรมีอยู่ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า

4. ใช้รถแทรคเตอร์ขนาดเล็กขนาด 30.5 แรงม้าของ ยันม่าร์ โดยตัวรถมีขนาดความยาว x ความกว้าง x ความสูง (2,850 x 1,325 x 1,365 mm) เป็นต้นกำลังใช้งาน

3) ส่วนประกอบของเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรคเตอร์ขนาดเล็กดังแสดงใน Fig 1 ดังนี้

1. ถังตะแกรงร่อนแยกดินออกจากหัวมันสำปะหลัง NO 1 Fig 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 m และมีความยาว 1.5 m

2. โครงสร้างตัวรถเพื่อรองรับถังตะแกรงร่อน NO 2 Fig 1ในข้อที่ 1 และระบบลากจูง

3. ระบบต้นกำลังในการขับเคลื่อนถังตะแกรงร่อน

4. ระบบถ่ายทอดกำลังในการขับเคลื่อนถังตะแกรงล่อน NO 3 Fig 1

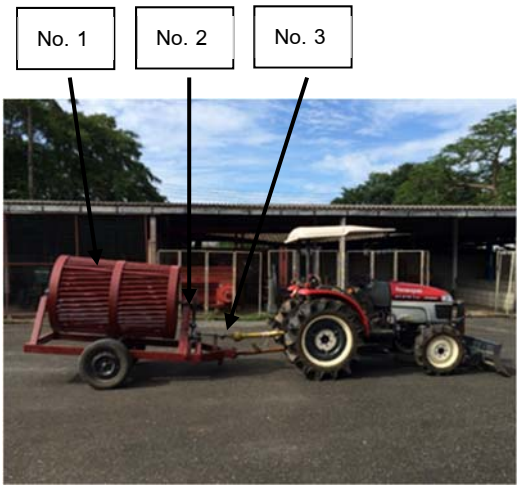


Figure 1 shows a cleaning cassava machine for a small tractor.

4) มันสำปะหลังที่ใช้ในการทดสอบเป็นสายพันธ์ระยอง 5 เป็นพันธ์ที่นิยมปลูกมีเปอร์เซ็นต์แป้งสูง และให้อัตราผลผลิตต่อพื้นที่ค่อนข้างสูง สามารถเก็บเกี่ยวในฤดูฝน ผลผลิตที่ใช้ในการทดสอบมาจากพื้นที่เดียวและเก็บในช่วงเวลาเดียวกัน

5) หลักการทำงานเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก

เครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรคเตอร์ขนาดเล็ก ออกแบบให้มีการป้อนหัวมันสำปะหลังแบบใช้แรงงานคนเนื่องจากมีขนาดเล็กและสั้นทำให้ไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยเครื่องต้นแบบนั้นอาศัยต้นกำลังจากเพลาอำนวยกำลัง(Power take of, PTO)ของรถแทรคเตอร์ขนาดเล็กจาก ที่จะขับเคลื่อนด้วยความเร็วสองระดับคือ 540 และ 800 rpm โดยการลดรอบในการขับเคลื่อนถังตะแกรงร่อนแยกทรายด้วยสายพานและโซ่ส่งกำลังและปล่อยดินที่ติดมากับหัวสำปะหลังร่วงลงสู่ด้านล่างโดยไม่มีการรองรับเนื่องจากดินที่ร่วงลงนั้นจะถูกนำกลับไปใช้งานยังพื้นที่ปลูกต่อไป

Figure 2 shows a power transmission cleaning cassava machine for a small Tractor.

2.2 ความสามารถในการทำงานของเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรคเตอร์ขนาดเล็ก

ความสามารถในการทำงาน โดยพิจารณาจากการทำงาน ได้จริงของเครื่องต่อหน่วยเวลา(kg h^{-1}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 ดังต่อไปนี้ (สหัสวรรษ และรักพงษ์, 2561)

$$Q = \frac{M}{T} \quad (1)$$

เมื่อ Q = อัตราการทำงาน (kg h^{-1})
M = น้ำหนักทั้งหมด (kg)
T = เวลาที่ใช้ทั้งหมด (h)

2.3 การหาประสิทธิภาพในการทำความสะอาด

ประสิทธิภาพในการทำความสะอาด C คือ ค่าความสะอาดที่เครื่องล้างสามารถทำได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 ดังต่อไปนี้ (นิรันดร์ และคณะ, 2567; สุกัญญา และคณะ, 2546)

$$C = \left(\frac{Ms1 - Ms2}{Ms1}\right) \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ C = ความสะอาด (%)
Ms1 = สัดส่วนน้ำหนักดินต่อน้ำหนักก่อนทำความสะอาด (g)
Ms2 = สัดส่วนน้ำหนักดินต่อน้ำหนักหลังทำความสะอาด (g)

2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ประสิทธิภาพการทำความสะอาด (ความสะอาด ความสามารถในการทำงาน) ของมันสำปะหลังถูกเปรียบทียบความแปรปวนแบบ 1 ทาง (One-way ANOVA) ด้วยวิธี Duncan' s new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2.5 วิธีการการทดสอบเบื้องต้น

การทดสอบการทำงานของเครื่องเพื่อหาสภาวะเบื้องต้นที่เหมาะสมสำหรับการทำความสะอาดหัวมันสำปะหลัง

1) การศึกษาน้ำหนักที่เหมาะสมต่อการทำงาน เป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมต่อการทำความสะอาดของเครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลัง ที่ ทำการทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักบรรจุในปริมาณที่เท่ากันจนกระทั่งความเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังจะไม่สามารถทำงานได้ ผลการทดสอบดังแสดงใน Table 1 จากการทดสอบการทำงานที่น้ำหนักต่างๆ ผลปรากฏว่า ที่ความเร็วรอบเพลาอำนวยกำลัง 540 rpm น้ำหนักมันสำปะหลัง 100 kg ไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากการแรงบิดที่เพลาอำนวยกำลังไม่เพียงพอ ที่ความเร็วรอบเพลาอำนวยกำลัง 800 rpm น้ำหนักมันสำปะหลัง 110 kg ไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากการแรงบิดที่เพลาอำนวยกำลังไม่เพียงพอ ดังนั้น ในการทดสอบสมรรถนะในการทำงานของเครื่องจึงใช้ความเร็วรอบเพลาอำนวยกำลัง 800 rpm

Table 1 The effect of cassava weight on cleaning at various PTO speeds.

Cassava weight (kg)	PTO speed 540 rpm	PTO speed 800 rpm
50	ทำงานได้	ทำงานได้
60	ทำงานได้	ทำงานได้
70	ทำงานได้	ทำงานได้
80	ทำงานได้	ทำงานได้
90	ทำงานได้	ทำงานได้
100	ไม่สามารถทำงานได้	ทำงานได้
110	ไม่สามารถทำงานได้	ไม่สามารถทำงานได้

2) การทดสอบความเร็วรอบตะแกรงที่เหมาะสม จากงานวิจัยสุกัญญาและคณะ, 2545 ได้ทดสอบเครื่องทำความสะอาดแบบแห้งและขูดผิวมันสำปะหลังบางส่วน พบว่าผลการทดสอบที่ความเร็วรอบ 20 rpm ให้ความสามารถในการทำงานสูงสุด ดังนั้นเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังที่ได้ออกแบบจึงใช้ความเร็วรอบตะแกรงหมุนที่ 20 rpm โดยใช้การทดรอบด้วยการอัตราทดสองส่วน ส่วนที่ 1 ทดรอบโดยใช้เฟืองโซ่เนื่องจากรับต้นกำลังสูงจากรถแทรกเตอร์ ส่วนที่สองทดรอบด้วยพลูเลย์เพื่อหาอัตราความเร็วรอบที่เหมาะสม จากการศึกษาข้อมูลและทำการทดสอบที่ความเร็วรอบเพลาอำนวยกำลัง (PTO) 800 rpm ผลการทดสอบดังแสดงใน Table 2 และ Fig 3 ซึ่งแสดงผลการทำความสะอาดมันสำปะหลังที่ความเร็วรอบ PTO 800 rpm สามารถทำความสะอาดได้ดีและเกิดความเสียหาย หรือการกระเทาะที่บริเวณผิวของมันสำปะหลังน้อย

Table 2 The effect of cleaning with various speeds.

Speed (rpm)	Cassava cleaned at PTO speed 800 rpm
10	ทำความสะอาดได้แต่มีดินสะสมอยู่ที่ผิวเปลือกค่อนข้างเยอะ
15	ทำความสะอาดได้แต่มีดินสะสมอยู่พอสมควร
20	ทำความสะอาดได้และมีปริมาณดินติดสะสมอยู่เพียงเล็กน้อย
25	ทำความสะอาดได้แต่เปลือกเกิดกะเทาะบางส่วนและเห็นเนื้อด้านใน
30	ทำความสะอาดได้แต่เปลือกเกิดกะเทาะมากจนเกินไปจนถึงเนื้อในทำให้ความเสียหาย

Figure 3 Cassava cleaning by the testing at 1 minute.

3) การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดหัวมันสำปะหลัง เพื่อหาความสามารถในการทำงานและเวลาในการทำความสะอาดที่เหมาะสม ได้ดังแสดงใน Table 3 และ Fig 4 แสดงผลความเสียหายที่เกิดจากการทำความสะอาดมันสำปะหลังที่เวลา 2.5 min ขึ้นไป ซึ่งจะเกิดการแตกหักจากการกะเทาะมากขึ้น

Figure 4 Cassava damaged by the testing at 2.5 minutes.

Table 3 Results of cleaning cassava at a time.

Time (min)	Cleaning at PTO speed 800 rpm
0.5	ทำความสะอาดได้แต่ยังมีดินติดอยู่ที่หัวมันสำสำปะหลังพอสมควร
1.0	ทำความสะอาดได้แต่ยังมีดินติดอยู่ที่หัวมันสำสำปะหลังเล็กน้อย
1.5	ทำความสะอาดได้แต่ยังมีดินติดอยู่ที่หัวมันสำสำปะหลังเล็กน้อย
2.0	สามารถทำความสะอาดได้แต่อัตราการแยกดินออกจากหัวมันสำปะหลังเหลือส่วนน้อย
2.5	สามารถทำความสะอาดได้แต่อัตราการแยกดินออกจากหัวมันสำปะหลังคงที่และหัวมันสำปะหลังเริ่มมีการแตกหัก
3.0	สามารถทำความสะอาดได้แต่อัตราการแยกดินออกจากหัวมันสำปะหลังคงที่และหัวมันสำปะหลังเริ่มมีการแตกหัก

2.6 การออกแบบการทดลอง

จากผลการทดสอบเบื้องต้นนำมาออกแบบวิธีการทดสอบความสามารถในการทำงาน โดยมี 2 ปัจจัยในการทดสอบคือ ความเร็วรอบถังตะแกรงร่อนที่ 15 20 และ 25 rpm เวลาในการทดสอบที่ 1 และ 2 min และน้ำหนักมันสำปะหลัง 50 80 และ 100 kg ทดสอบที่ความเร็วรอบ PTO 800 rpm

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการทดสอบต่อคุณภาพการทำความสะอาด

เมื่อได้เงื่อนไขการทำความสะอาดจากจากผลการทดลองเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กเบื้องต้น โดยได้กำหนดความเร็วรอบเพลาอำนวยกำลัง(PTO) 15 20 และ 25 rpm เวลาในการทดสอบ 1 และ 2 min และน้ำหนักมันสำปะหลัง 50 80 และ 100 kg

Table 4 Results testing cleaning cassava machine for append small tractor.

Speed (rpm)	Time (min)	Weight (kg)	Cleanliness (C) (%)	Capacity (kg h^{-1})
15	1	50	60.00^{o}	2,910^{g}
		80	16.67^{r}	4,512^{d}
		100	68.33^{n}	5,220^{a}
	2	50	73.68^{l}	1,410^{p}
		80	20.00^{q}	2,220^{m}
		100	42.86^{p}	2,700^{j}
20	1	50	83.57^{h}	2,832^{h}
		80	80.72^{j}	4,416^{e}
		100	84.62^{f}	5,100^{b}
	2	50	96.44^{a}	1,392^{p}
		80	76.22^{k}	2,178^{n}
		100	89.44^{c}	2,490^{k}
25	1	50	95.38^{b}	2,766^{i}
		80	83.71^{g}	4,266^{f}
		100	86.78^{e}	4,956^{c}
	2	50	70.59^{m}	1,347^{q}
		80	81.34^{i}	2,190^{o}
		100	88.10^{d}	2,400^{l}

*Significant at P $\leq$ 0.05.

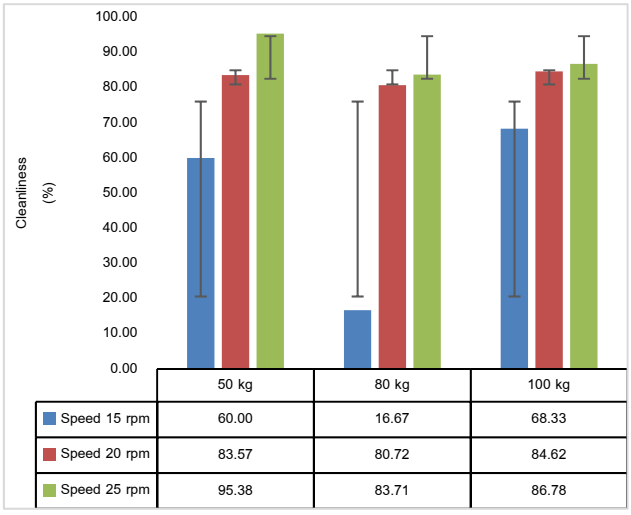


Figure 5 Compare Cleanliness at 1 min.

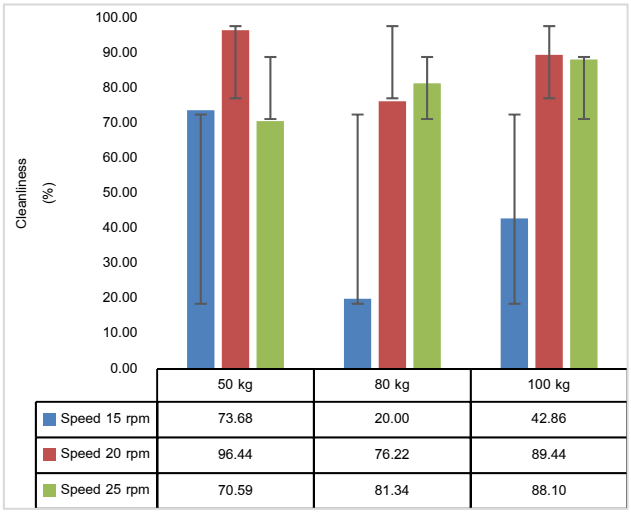


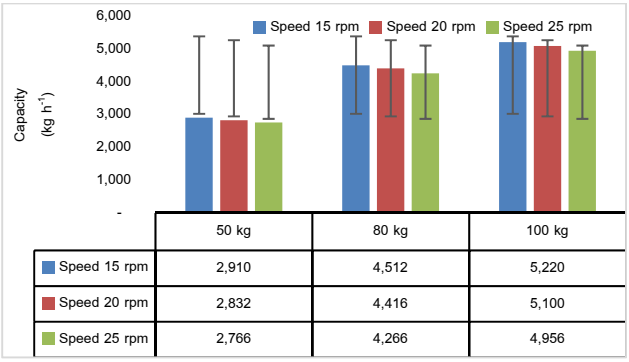
Figure 6 Compare **Cleanliness** at 2 min.

ผลการทดสอบใน Table 4 แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบของตะแกรง ระยะเวลา และน้ำหนักของมันสำปะหลังส่งผลต่อความสะอาดของมันสำปะหลัง พบว่าทุกสภาวะมีความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยที่ความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสะอาดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ที่ความเร็วรอบ 20 และ 25 rpm สามารถทำความ สะอาดมากกว่า 70% ขึ้นไป แต่ที่ความเร็วรอบอาจจะมีผลกระทบต่อคุณภาพของมันสำปะหลัง คือ เกิดการกระเทาะของเนื้อที่มากขึ้น เมื่อพิจารณาระยะเวลาการทำความสะอาดและน้ำหนักของมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดสอบพบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสะอาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงใน Fig 5 และ Fig 6 สำหรับปริมาณของมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดสอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสะอาดเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจาก กระบวนการทำความสะอาดเกิดจากการเสียดสีของมันสำปะหลังกับตะแกรง และการเสียดสีระหว่างมันสำปะหลังที่อยู่ภายในตะแกรง ทั้งนี้ ความเร็วรอบตะแกรงหมุน 25 rpm น้ำหนัก มันสำปะหลังที่ 50 kg เวลา 1 min นั้นให้ค่าประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงสุดที่ 95.38 % และที่เวลา 2 min น้ำหนักมันสำปะหลัง 50 kg เวลา 2 min ให้ค่าประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงสุดที่ 96.44 % ดัง Fig 7 ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับแนวคิดของการทำความสะอาดแบบใช้แรงกล ซึ่งเน้นกลไกการเสียดสีและแรงกลิ้ง เช่นในงานของพยุงศักดิ์และคณะ, 2561 ที่ระบุว่าการเพิ่มความเร็วรอบมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพ แต่ต้องควบคุมไม่ให้เกิดการสูญเสียเนื้อหัวมันมากเกินไป ขณะเดียวกัน การทดลองของ สุกัญญาและคณะ, 2546 สามารถแยกทรายออกได้ 88.4% ซึ่งต่ำกว่าผลการศึกษานี้ อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของระบบทำความสะอาดหรือสภาพหัวมันที่แตกต่างกัน เนื่องจากในการทดลองนั้นมีปัจจัยจากสภาพของดินที่ติดมากับมันสำปะหลังในแต่ละรอบ ความชื้นในดิน ลักษณะของดินในพื้นนั้น น้ำหนักของมันสำปะหลังที่ใส่ชุดตะแกรงทำความสะอาดพบว่าน้ำหนักมันสำปะหลังมากขึ้น ความสามารถในการทำความสะอาดลดลง ในส่วนของความเร็วรอบพบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นความสามารถในการทำความสะอาดมากขึ้นเมื่อตรวจสอบพบว่ามีการกะเทาะของเปลือกและเนื้อผสมออกมา จากผลการทดสอบแสดงค่าความสามารถในการทำงานของเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังภายใต้เงื่อนไขความเร็วรอบและน้ำหนักหัวมัน ค่าความแปรปรวน (Error Bar) ดังแสดงใน Fig 5 และ Fig 6 พบว่า ที่น้ำหนักหัวมัน 50 กิโลกรัม ทุกระดับความเร็วรอบมีค่า Error Bar ที่ค่อนข้างยาว ความแปรปรวนของข้อมูลสูง อันอาจเกิดจากการเคลื่อนที่ไม่สม่ำเสมอของหัวมันภายในระบบเนื่องจากปริมาณน้อย ทำให้เกิดผลการทำงานที่ไม่แน่นอน ในระดับน้ำหนัก 80 และ 100 กิโลกรัม ค่า Error Bar มีความยาวลดลง โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบ 25 รอบต่อนาที ซึ่งแสดงถึง ความเสถียรของกระบวนการทำงานที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบ เทียบกันระหว่างความเร็วรอบ จะเห็นได้ว่าในน้ำหนักเท่ากัน ความเร็วรอบ 15 รอบต่อนาที มักให้ค่า ค่าความแปรปรวน (Error Bar) สั้นที่สุด ซึ่งอาจแสดงถึงการทำงานที่มีเสถียรมากกว่าภายใต้สภาวะน้ำหนักที่เท่ากัน

Figure 7 Good quality cassava cleaning effect.

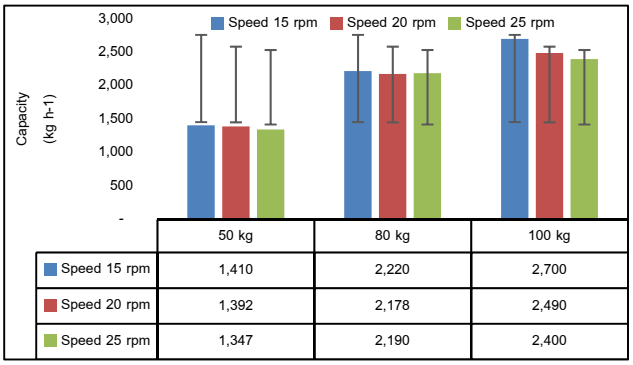
3.2 ผลการทดสอบความสามารถในการทำงาน

จากเงื่อนไขการทดสอบในข้อ 3.1 ผลการทดสอบเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรคเตอร์ขนาดเล็ก ดังแสดงใน Table 4 พบว่า ระยะเวลาในการทำความสะอาดและน้ำหนักมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดสอบ ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานของเครื่องทำความอาด อย่างมี**นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)** โดยที่ระยะเวลา 1 min ได้ผลแสดงใน Fig 7 ที่ความเร็วรอบตะแกรงหมุน 15 rpm น้ำหนักมันสำปะหลัง 50 kg ความสามารถในการทำงาน 2,910 kg h^{-1} ที่น้ำหนัก 80 kg ความสามารถในการทำงาน 4,512 kg h^{-1} น้ำหนัก 100 kg ความสามารถในการทำงาน 5,220 kg h^{-1} ที่ระยะเวลา 2 min แสดงใน Fig 8 ที่ความเร็วรอบตะแกรงหมุน 15 rpm น้ำหนักมันสำปะหลัง 50 kg ความสามารถในการทำงาน 1,410 kg h^{-1} ที่น้ำหนัก 80 kg ความสามารถในการทำงาน 2,220 kg h^{-1} น้ำหนัก 100 kg ความสามารถในการทำงาน 2,700 kg h^{-1} ความเร็วรอบต่ำนั้นให้ค่าความสามารถเชิงวัสดุสูงที่สุดเนื่องจากมีการกะเทาะเอาดินออกน้อยทำให้ดินยังติดอยู่กับหัวมันสำปะหลัง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า น้ำหนักของหัวมันสำปะหลังที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีผลโดยตรงต่อค่าความสามารถในการทำงานของเครื่อง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มน้ำหนักของหัวมันในแต่ละรอบความสามารถในการทำงาน (kg h^{-1}) เพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากมีปริมาณวัสดุมากขึ้นในช่วงเวลาคงที่ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำความสะอาดจาก 1 เป็น 2 นาที ความสามารถในการทำงานต่อชั่วโมงกลับลดลง แม้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ซึ่งสะท้อนถึงความจำเป็นในการเลือกระยะเวลาที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน หากเน้นปริมาณการผลิต ความเร็วรอบต่ำและเวลาสั้นจะให้ค่าความสามารถเชิงปริมาณสูงกว่า ความเร็วรอบตะแกรงหมุนที่ต่ำ 15 รอบต่อนาที แม้ให้ความสามารถเชิงปริมาณสูง แต่คุณภาพของการทำความสะอาดไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะในน้ำหนักที่สูง เนื่องจากแรงเสียดสีและการกระเทาะของดินยังไม่เพียงพอ ทำให้ดินยังคงติดอยู่กับหัวมันอาจไม่เป็นที่ต้องการในบางกรณี



	50 kg	80 kg	100 kg
Speed 15 rpm	2,910	4,512	5,220
Speed 20 rpm	2,832	4,416	5,100
Speed 25 rpm	2,766	4,266	4,956

Figure 7 Compare Capabilities at 1 min.



	50 kg	80 kg	100 kg
Speed 15 rpm	1,410	2,220	2,700
Speed 20 rpm	1,392	2,178	2,490
Speed 25 rpm	1,347	2,190	2,400

Figure 8 Compare Capabilities **at 2 min.**

จากผลการทดลองที่แสดงใน Fig 7 และ Fig 8 พบว่า ความเร็วรอบของตะแกรงหมุนและน้ำหนักของหัวมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดสอบมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำความสะอาดอย่างชัดเจน โดยค่าความสะอาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่สูงขึ้นในทุกระดับของน้ำหนักหัวมัน ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของแรงเสียดสีและการกระแทกที่เพิ่มขึ้นในระบบทำความสะอาดแบบหมุน ส่งผลให้สิ่งเจือปนและเปลือกนอกหลุดออกจากหัวมันได้มากขึ้น สำหรับน้ำหนักหัวมัน 50 กิโลกรัม พบว่า ที่ความเร็วรอบ 25 rpm ให้ค่าความสะอาดสูงสุดที่ 95.38% ขณะที่ความเร็วรอบ 15 rpm ให้ค่าความสะอาดเพียง 60% และมีความแปรปรวนสูง (Error Bar) แสดงให้เห็นว่าการทำความสะอาดในความเร็วต่ำยังไม่เสถียรและไม่เพียงพอในด้านแรงกระทำต่อหัวมัน ในน้ำหนัก 80 กิโลกรัม พบว่าความเร็วรอบต่ำสุดให้ค่าความสะอาดต่ำมาก 16.67% ซึ่งสะท้อนว่าในปริมาณวัสดุที่มากขึ้น หากความเร็วรอบไม่สูงจะทำให้แรงเคลื่อนที่และแรงเสียดสีไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความเร็วเป็น 20 และ 25 rpm ค่าความสะอาดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และ ความแปรปรวนสั้นลง แสดงถึงความสม่ำเสมอของผลการทดลองที่ดีขึ้น ในน้ำหนัก 100 กิโลกรัม ความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบ 20 และ 25 rpm มีไม่มากนัก โดยค่าความสะอาดอยู่ระหว่าง 84.62% ถึง 86.78% ซึ่งบ่งชี้ว่าในสภาวะโหลดสูง เครื่องสามารถรักษาประสิทธิภาพได้ดี โดยเฉพาะในระดับความเร็วรอบที่สูงกว่า ค่าความแปรปรวนมีแนวโน้มลดลงในเงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูง โดยเฉพาะในความเร็วรอบ 25 rpm ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอแนะของงานวิจัยที่ชี้ว่า การเพิ่มแรงกระทำจากระบบกลสามารถลดความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ในการทำความสะอาดได้ ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานของ กัญญาและคณะ, 2546 ที่ระบุว่า ความเร็วรอบที่สูงมีผลอย่างมากต่อการเสียดสีและการขจัดสิ่งสกปรกบนผิวหัวมันสำปะหลัง ทั้งนี้ การเลือกใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสมควรพิจารณาร่วมกับปัจจัยด้านพลังงานที่ใช้ ความเสียหายต่อวัตถุดิบ และปริมาณการทำงาน

4 สรุป

จากการทดสอบเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรคเตอร์ขนาดเล็กสรุปผลได้ดังนี้ ที่ความเร็ว 20 rpm โดยใช้เวลาเวลาในการทำความสะอาด 2 min น้ำหนักบรรจุมันสำปะหลัง 50 kg ประสิทธิภาพในการทำความสะอาด 96.44 % เป็นสภาวะที่เหมาะสมเนื่องจากให้ความสามารถในการทำงานและประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงสุด

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6 เอกสารอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ เขียวมั่ง. 2567. ถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังเพื่อการออกแบบผลิตภัณฑ์ดูดซับกลิ่น. Academic Journal of Industrial Technology Innovation. 2(2), 32-43.

เทิดชัย เวียรศิลป์, องอาจ อินทร์สังข์. 1993. การใช้กากไลซีนเพิ่มโปรตีนของมันสำปะหลังในอาหารโค. วารสารเกษตร. 9(2), 162-176.

นิรันดร์ พรมเกษา, วิเชียร ดวงสีเสน, ดวงทิพย์ ฤคณีย์. 2567. การพัฒนาเครื่องล้างข่าเหลืองอ่อนแนวตั้งแบบกึ่งอัตโนมัติ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 30(2), 8-8.

พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, คธา วาทกิจ, พรรษา ลิบลับ, เทวรัตน์ ทิพยวิมล, วีรชัย อาจหาญ. 2554. การออกแบบและทดสอบเครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลัง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 42(3 พิเศษ), 501-504.

มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. 2567. มันสำปะหลัง. แหล่งข้อมูล: https://tapiocathai.org/C.html. เข้าถึงเมื่อ 29 สิงหาคม 2567.

วงศ์ผกา วงศ์รัตน์, กมลพร มีหนองใหญ่, ชนิตา ประสิทธิ์-กาญจน์, ณัฐริกา สัปคง, สยุมพร รัตนพันธ์. 2024. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบมันสำปะหลังพร้อมรับประทานด้วยวิธีไมโครเวฟ. วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร. 41(2), 145-156.

สุกัญญา จัตตุพรพงษ์ อุทัย คันโธ วิลาวัณย์ ประจวบวัน และไชยยงค์ หาราช, การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 ประจำปี 2546, วิศวกรรมเกษตร

และเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน วันที่ 13-14 มีนาคม 2546. ณ เคยู โฮม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ. เลขหน้า 75. (666 หน้า)

สหัสวรรษ ภูจีระ, รักพงษ์ ขันธวิธิ. 2564. เครื่องล้างทำความสะอาดหัวข่าแบบกึ่งอัตโนมัติ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี. 9(3), 1-16.

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ปีที่ 31 ฉบับที่ 2 (2568) 31-x
Available online at www.tsae.asia

บทความวิจัย

ISSN 1685-408X

การพัฒนาเครื่องตรวจวัดไนเตรทในดินแบบพกพาอัตโนมัติสำหรับการทำแผนที่ดินโดยการใช้ Nitrate Ion Selective Electrodes (ISEs)

Development of a Portable Automated Detector of Soil Nitrate for Mapping Using Nitrate Ion-Selective Electrodes

ประสาท แสงพันธุ์ตา[1*], ตฤตฤณสิษฐ์ ไกรสิณบุรศักดิ์[1], มงคล ตุ่นเฮ้า[1], วิชัย โอภานุกุล[1], อนุสรณ์ เทียนศิริฤกษ์[2], พุทธธินันทร์ จารุวัฒน์[1], สิทธิชัย ดาศรี[1]

Prasat Sangphanta[1*], Trinnasith Kaisinburasak[1], Mongkol Tunhouse[1], Wichai Opanukoon[1], Anusorn Tiansiriroek[2], Puttinun Charuwat[1], Shittichai Dhasi[1]

[1]สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพมหานคร, 10900

[1]Agricultural Engineering Research Institute, Department of Agriculture, Bangkok, 10900

[2]กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพมหานคร, 10900

[2]Soil Science Research Group, Department of Agriculture, Bangkok, 10900

*Corresponding author: Tel.: +66-8-6623-7536, E-mail: Poa56@yahoo.com

บทคัดย่อ

การจัดการธาตุอาหารพืชให้เหมาะสมกับสภาพดิน ในแต่ละพื้นที่ย่อยเฉพาะของแปลง (Site-Specific Management, SSM) นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการผลิตพืชอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากการใส่ปุ๋ยที่มากเกินความจำเป็นนั้น นอกจากจะทำให้ต้นทุนในการผลิตพืชของเกษตรกรสูงขึ้นแล้ว ยังทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของดินและการปนเปื้อนในแหล่งน้ำใต้ดิน การวิเคราะห์ดินด้วยการใช้เซนเซอร์นั้นมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ตัวอย่างดินจำนวนมาก ๆ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำ ทำงานได้รวดเร็ว และสามารถนำไปใช้งานในแปลงเกษตรได้ วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาเครื่องมือวัดความเข้มข้นไนเตรทในดินด้วยการใช้เซนเซอร์แบบ Nitrate Ion-Selective Electrode (Nitrate-ISE) ร่วมกับระบบบันทึกตำแหน่งพิกัดดาวเทียม (GPS) มีการทำงานและบันทึกข้อมูลลงในการ์ดจัดเก็บข้อมูล (SD card) แบบอัตโนมัติ ควบคุมการทำงานด้วยบอร์ดสมองกลฝังตัว (Arduino mega 2560) โดยประกอบด้วยการทำงาน 5 ระบบ ได้แก่ 1.การสกัดดิน 2.การวัดค่า 3.การทำความสะอาด 4.การระบุพิกัดดาวเทียม และ 5.การควบคุมและบันทึกผล ใช้น้ำประมาณ 0.5 ลิตรและเวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 5 นาทีต่อตัวอย่าง อัตราส่วนผสมระหว่างดิน-น้ำ ที่เหมาะสม คือ 1:10 ระยะเวลาที่ใช้ในการวัด 30 s สามารถวิเคราะห์ได้อย่างความถูกต้องเฉลี่ยมากกว่า 80 % โดยมีค่า R^2 = 0.80 และค่า RMSE = 1.44 เทียบกับวิธีทางห้องปฏิบัติการ ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ดินลง 5-6 เท่า ข้อมูลที่ได้จากเครื่องต้นแบบนี้ สามารถนำมาสร้างเป็นแผนที่ดิน ช่วยเกษตรกรให้สามารถตัดสินใจสำหรับการจัดการปุ๋ยไนโตรเจนของแปลงเพาะปลูกให้เหมาะสมต่อไป

คำสำคัญ: ไนเตรท, เซนเซอร์วัดดิน, แผนที่ดิน

Abstract

Management of plant nutrients to suit soil conditions in each specific sub-area of a plot (Site-Specific Management, SSM) is crucial for efficient crop production. Excessive fertilizer application not only increases production costs for farmers but also leads to soil degradation and contamination of groundwater sources. Soil analysis using sensors is suitable for analyzing a large number of soil samples due to its low cost, quick operation, and applicability in agricultural fields. The main objective of this research is to develop a tool for measuring nitrate concentration in soil using a Nitrate Ion-Selective Electrode (Nitrate-ISE) along with a GPS system for automatic data recording on a secure digital card (SD card). The system is controlled by an Embedded Board (Arduino mega 2560) and consists of five main operations: 1. Soil extraction, 2. Measurement, 3. Cleaning, 4. Satellite coordinate detection, and 5. Controller and data logger. The analysis requires approximately 0.5 liters of clean water, and the

Received: June 03, 2024
Revised: June 05, 2025
Accepted: September 05, 2025
Available online: December 22, 2025

time for each sample is around 5 minutes. The optimal soil-water ratio is 1:10, and the measurement time is 30 seconds. The average accuracy of the measurements is more than 80%, with an R^2 = 0.80 and RMSE = 1.44 compared to laboratory methods. This prototype reduces soil analysis costs by 5-6 times, providing reliable data for creating soil maps. This information can be used to support farmers in making decisions for nitrogen fertilizer management in subsequent crop cultivation.

Keywords: Nitrate, Soil Sensors, Soil Map

1 Introduction

Soil is a critical factor for plant growth and agriculture because it provides a foundation for plant roots, moisture, and essential nutrients for growth. It acts as a medium that supports plant roots, retains water, and supplies essential nutrients necessary for plant development. Without healthy soil, plants cannot thrive, which in turn affects agricultural productivity and food security. However, in modern commercial agriculture, chemical or organic fertilizers are commonly used to supplement essential nutrients like nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K). These fertilizers are vital in enhancing soil fertility and ensuring that crops receive the nutrients required for optimal growth and yield.

The global use of nitrogen fertilizers has continuously increased between 1961 and 2014 (FAO, 2019), with Asia experiencing the highest increase compared to other regions. This trend reflects the intensification of agricultural practices aimed at boosting crop yields to meet the demands of growing populations and improving food security. In Thailand, for instance, fertilizers are typically applied at the same rate across entire fields, despite variations in nutrient levels and soil conditions within different areas of a field. This uniform application method is often inefficient and can lead to several adverse outcomes, both economically and environmentally.

Inefficient fertilizer use not only increases agricultural production costs, making it difficult to compete globally, but also leads to nutrient runoff, which pollutes surface and groundwater sources, and long-term soil degradation. Excessive fertilizer application can result in the leaching of nitrates into groundwater, posing health risks such as methemoglobinemia or "blue baby syndrome," and contributing to environmental hazards like eutrophication. Proper fertilizer application in specific sub-areas within a field can help plants grow uniformly, increase yields, and improve soil organic matter and fertility over time (Haneklaus et al., 2010; Pamapolino et al., 2007). By tailoring fertilizer applications to the specific needs of different parts of a field, farmers can optimize resource use, enhance crop performance, and protect the environment.

However, appropriate fertilizer application requires soil analysis to assess nutrient concentrations. Traditional laboratory methods, while accurate, are expensive, require skilled operators, and are not economically viable for analyzing large numbers of soil samples. This reduces farmers' acceptance of precision agriculture practices (Heiniger et al., 2003). Additionally, there are costs associated with maintaining soil sample integrity during transportation and storage. The logistical challenges of collecting, transporting, and analyzing numerous soil samples can be prohibitive for many farmers, particularly those with limited resources or access to laboratory facilities.

Nitrate ions (NO_3^-) are a form of inorganic nitrogen in soil, easily dissolved in water, making them readily available for plant uptake (Soil Science Faculty, 2005). Nitrate is a crucial nutrient for plant growth, influencing protein synthesis and overall plant health. The presence or absence of nitrate nitrogen (NO_3^-–N) in the topsoil at a depth of approximately 30 cm often indicates whether plants can absorb enough nitrogen from the soil and how they will respond to additional fertilization (Fox et al., 1989). Generally, NO_3^-–N in soil is absorbed by plants first (Schröder et al., 2000), making it a reliable indicator of soil fertility and the effectiveness of fertilization strategies.

Given the problems of improper fertilization and the limitations of laboratory soil analysis, the Agricultural Engineering Research Institute has developed a portable electrochemical device for nitrate concentration mapping using Ion-Selective Electrode (ISE) sensors. These sensors are commercially available and known

for their simplicity, reliability, and rapid response. The developed device integrates an Embedded Board for controlling its operations and data logging. This innovative approach aims to provide a cost-effective, accurate, and user-friendly solution for farmers to monitor soil nitrate levels rapidly, facilitating more precise and efficient fertilizer application. By enabling farmers to quickly and accurately assess the nitrate levels in their soil, this device helps to optimize fertilization practices, reduce environmental impact, and improve crop yields. The integration of GPS technology also allows for precise mapping of nitrate concentrations across different areas of a field, further enhancing the ability to apply fertilizers in a targeted manner.

2 Materials and Methods

2.1 Prototype Development

The prototype was developed with a focus on automating the entire process of nitrate concentration measurement in soil samples. The device integrates multiple components to perform soil extraction, measurement, cleaning, satellite coordinate detection, and data logging. The detailed design of the prototype's operational cycle is shown in Figure 1.

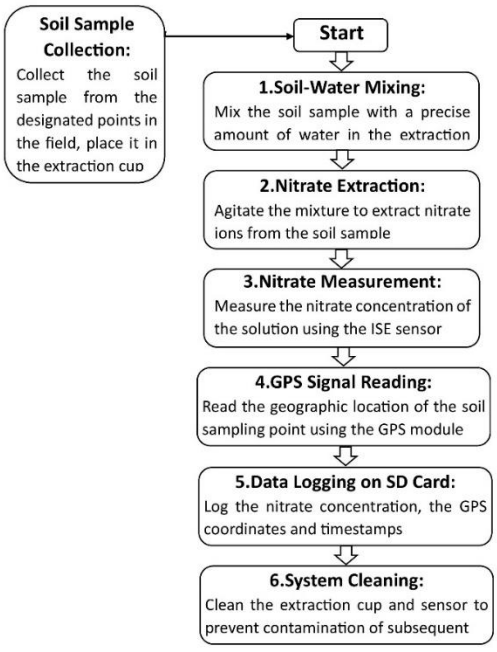


Figure 1 Workflow Chart of the prototype.

The core of the prototype's control system is an Arduino Mega 2560 microcontroller, chosen for its versatility and ample input/output capabilities. This microcontroller coordinates the functions of various components, including pumps, sensors, and data storage devices.

Key Components and Their Functions:

1. Soil Extraction System: This system involves a mechanism for mixing soil samples with water to extract nitrate ions. The soil sample is placed in an extraction cup, and a precise amount of water is added. The mixture is then agitated to ensure thorough extraction of nitrates. The extraction process is critical for ensuring that the nitrate ions are sufficiently dissolved in the water for accurate measurement.

2. Measurement System: The core measurement component is the Sentek UK Nitrate 3021 Combination Ion Selective Electrode (ISE). This solid-state sensor is durable, easy to maintain, and provides rapid and reliable measurements. The sensor is connected to a 16-bits of analog-to-digital converter (ADC) before to the Arduino board, which digitizes the voltage readings. The Nitrate-ISE sensor operates based on the principle of ion-selective permeability, which allows it to specifically measure the concentration of nitrate ions in the soil extract.

3. Cleaning System: After each measurement, the extraction cup and electrode must be cleaned to prevent contamination of subsequent samples. The cleaning system includes a water pump and nozzles that thoroughly rinse the components. This step is automated to ensure consistency and efficiency, reducing the likelihood of cross-contamination and maintaining the integrity of subsequent measurements.

4. Satellite Coordinate Detection: A GPS module is integrated to record the geographic location of each soil sample. This data is crucial for creating precise nitrate concentration maps. The GPS coordinates are logged along with the nitrate concentration data, allowing for the creation of spatially accurate nutrient maps that can guide site-specific fertilizer application.

5. Controller and Data Logger: All operations are controlled by the Arduino board (Arduino mega 2560), which also logs data onto a secure digital (SD) card. The logged data includes point number, nitrate concentration (voltage, mV), GPS coordinates, and timestamps. The data logging system ensures that all relevant information is captured and stored for further analysis and mapping.

2.2 Sensor Calibration

Before deployment, the Nitrate ISE sensor is required for calibration with standard nitrate solutions of known concentrations. Solutions with concentrations of 1 ppm, 10 ppm, and 100 ppm were prepared. The voltage readings from the sensor for each solution were recorded, and a calibration curve was plotted.

The calibration curve is based on the Nernst equation (Morf, 1981; Adumchuk et al., 2002) as indicated by equation (1):

$$E = E_0 + Slog(A) \quad (1)$$

where E is the measured voltage (mV), E_0 is the standard constant potential, S is the slope (related to the sensor's sensitivity), and A is the activity (concentration) of the nitrate ions. This calibration curve allows conversion of voltage readings from soil samples into nitrate concentrations. The calibration process is essential to ensure that the sensor readings are accurate and reliable across the range of expected nitrate concentrations.

2.3 Testing for Key Factors in Laboratory

2.3.1 Optimal Soil-Water Ratio

To determine the optimal soil-to-water ratio for accurate nitrate extraction, 45 soil samples were collected from agricultural plots. Each sample was tested with three different soil-to-water ratios: 1:5, 1:10, and 1:20. Each sample was divided into two parts: one for testing with the prototype and one for standard laboratory analysis using 1.0 M KCl as the extractant. The results from the prototype were compared to the standard method to evaluate accuracy. This comparison ensured that the prototype's measurements were reliable and comparable to established laboratory methods.

2.3.2 Repeatability Testing

The repeatability of the prototype was tested by analyzing three soil samples, each divided into five portions. The soil-to-water ratio was set at 1:10, and the extraction time was 30 seconds. The consistency of voltage readings across replicates was evaluated to ensure reliable performance. High repeatability indicates that the prototype can produce consistent results under the same conditions, which is crucial for its practical application in the field.

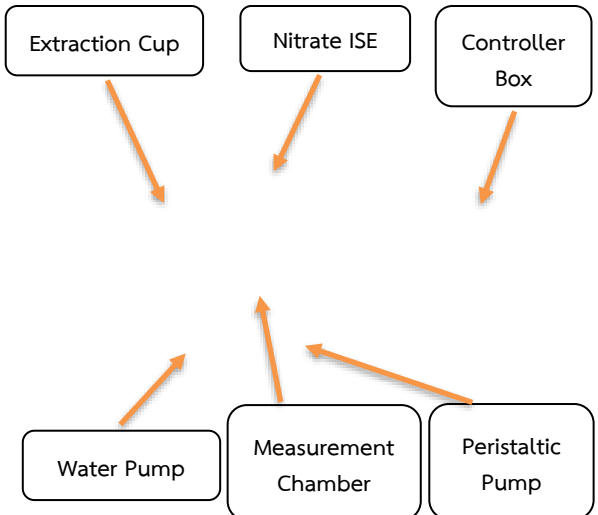
2.4 Field Testing

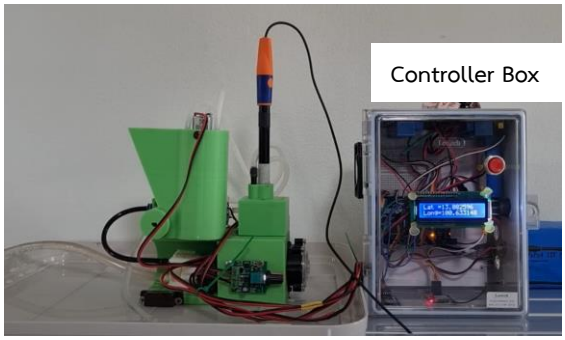
The field testing was conducted in a 1.6-hectare sugarcane field in U Thong District, Suphan Buri Province, Thailand. Measurement points were spaced approximately 15-30 meters apart. Soil samples were collected at a depth of 15-30 cm, homogenized, and divided into two parts: one for laboratory analysis and one for prototype testing. Each 10 g soil sample was mixed with 100 ml of clean water in the prototype, which then automatically performed the extraction, measurement, GPS recording, and data logging. The system cleaned itself after each sample to ensure accuracy for subsequent tests. Field testing in a real agricultural setting was essential to evaluate the prototype's performance under practical conditions and to identify any potential issues that might arise during actual use.

3 Results and Discussion

3.1 Prototype Design and Construction

The prototype's design was created using SolidWorks, and components were manufactured using a 3D printer. The assembly of the prototype for field testing is shown in Figures 2 and 3. The modular design allows easy assembly and maintenance. The use of 3D printing for component fabrication enabled rapid prototyping and iterative improvements, ensuring that the final design was both functional and practical for field use.





Figures 2 The extraction and measurement systems and controller box.

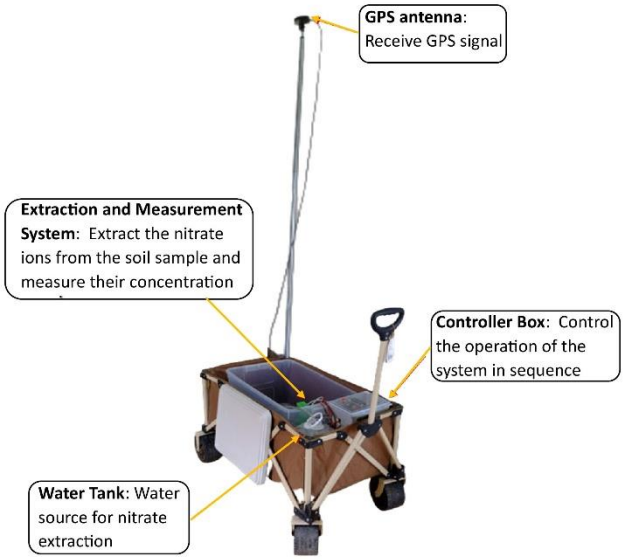


Figure 3 The prototype for field testing.

3.2 Sensor Calibration Results

Calibration with standard nitrate solutions showed a linear relationship between the measured voltage and the logarithm of nitrate concentration (Figure 4). The calibration equation derived from these results was used for converting voltage readings to nitrate concentrations during field and laboratory tests. The calibration curve demonstrated the sensor's ability to accurately measure nitrate concentrations across a wide range, providing confidence in the prototype's measurements.

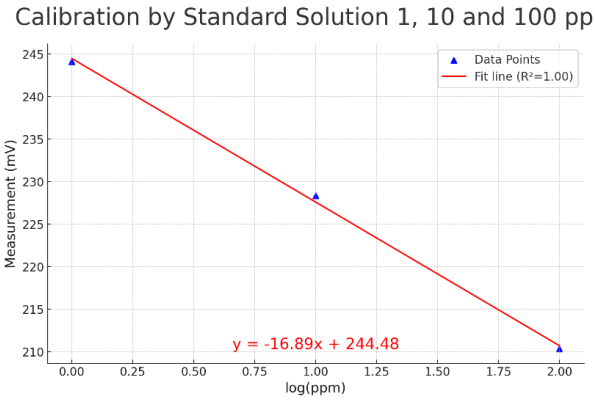
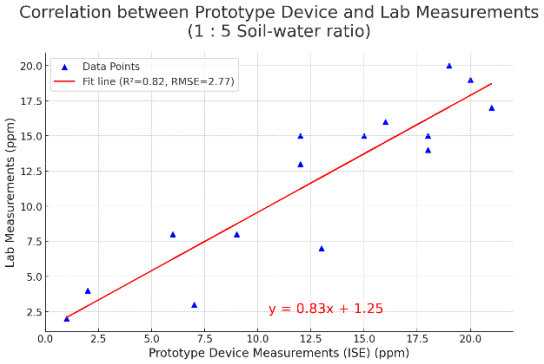
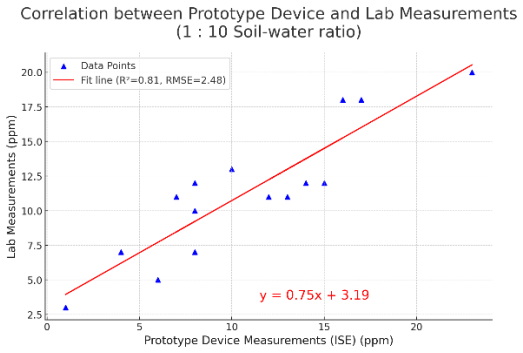


Figure 4 Nitrate-ISE calibration curve.

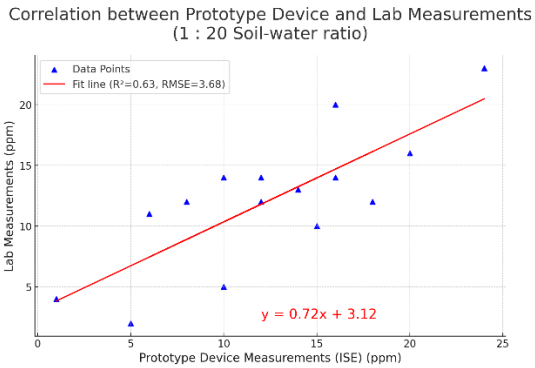
3.3 Optimal Soil-Water Ratio



(a)



(b)



(c)

Figure 5 Comparison of soil: water ratio in the extraction process (a) 1:5 (b) 1:10 and (c) 1:20.

It can be seen from these figures that the analysis of the provided graphs elucidates the relationship between the prototype's nitrate concentration measurements and standard laboratory measurements for soil-to-water ratios of 1:5, 1:10, and 1:20. Each ratio was meticulously examined to ascertain the optimal balance between measurement accuracy and practical usability. The 1:5 ratio, characterized by the equation y=0.83x+1.25 and an R^2 value of 0.82, demonstrates a very strong correlation between the prototype's readings and the reference measurements, with a Root Mean Square Error (RMSE) of 2.77. This high accuracy indicates reliable performance; however, the elevated soil concentration complicates the cleaning process, rendering it less practical for repeated use in field settings where operational efficiency is paramount.

In contrast, the 1:10 ratio, represented by the equation y=0.75x+3.19 and an R^2 value of 0.81, also exhibits a strong correlation, nearly matching the accuracy observed with the 1:5 ratio. It has a lower RMSE of 2.48, indicating improved precision. This ratio is particularly noteworthy because it balances accuracy with practicality, maintaining reliable measurement precision while simplifying the cleaning and maintenance process. Consequently, the 1:10 ratio is more suitable for field conditions where ease of operation and time efficiency are critical considerations.

Conversely, the 1:20 ratio, depicted by the equation y=0.72x+3.12 and an R^2 value of 0.63, exhibits a significantly weaker correlation compared to the other two ratios. With the highest RMSE of 3.68, this ratio highlights its lower precision and reliability for nitrate detection. The increased dilution of the soil sample at this ratio adversely affects the accuracy of nitrate detection, rendering it less reliable for precise nutrient management. This reduced accuracy is likely due to the diminished concentration of nitrate ions in the solution, potentially falling below the sensitivity threshold of the sensor.

Therefore, considering both the accuracy of the measurements and the practicality of use, the 1:10 ratio emerges as the optimal choice for the prototype. It offers a robust correlation with reference measurements, ensuring reliable data collection, while also facilitating easier and quicker cleaning procedures, which are essential for efficient field operations. The lower RMSE at this ratio indicates greater precision in nitrate measurement. This balance of accuracy and practicality underscores the suitability of the 1:10 ratio for authentic agricultural applications in actual field conditions.

3.4 Repeatability Testing

The prototype demonstrated high repeatability with consistent voltage readings across five replicates for each of the three soil samples. The standard deviation was low, indicating reliable performance (Table 1). High repeatability is essential for any analytical device, as it ensures that the results are consistent and reproducible, which is crucial for building confidence in the measurements and their subsequent use in decision-making.

Table 1 Testing for repeatability of the prototype.

	Measured Voltage (mV)		
	Samp.1	Samp.2	Samp.3
Rep. 1	233	230	233
Rep. 2	234	230	232
Rep. 3	231	230	235
Rep. 4	232	231	234
Rep. 5	230	231	235
Mean	232	230	234
Standard Deviation	1.58	0.55	1.30
Degree of freedom	4	4	4
Repeatability (pooled standard deviation)	1.22		

3.5 Field Testing Results

Field testing results showed good agreement between the prototype's measurements and laboratory analysis, with an accuracy of R^2=0.80 and RMSE = 1.44. The average accuracy was approximately 80%, confirming the prototype's reliability in practical applications (Figures 7). This high level of agreement between the prototype and laboratory measurements indicates that the device can consistently produce accurate results, making it a valuable tool for farmers and agricultural professionals.

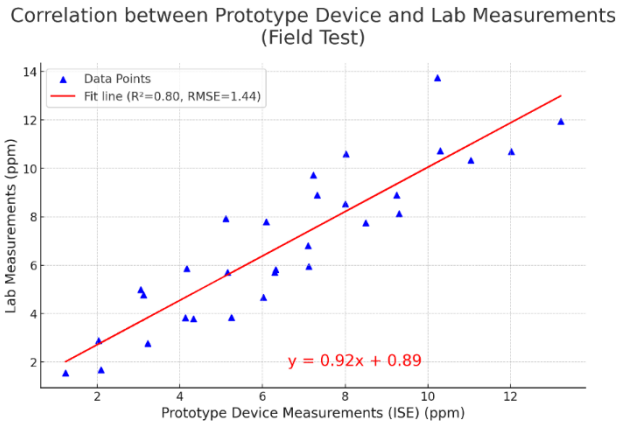
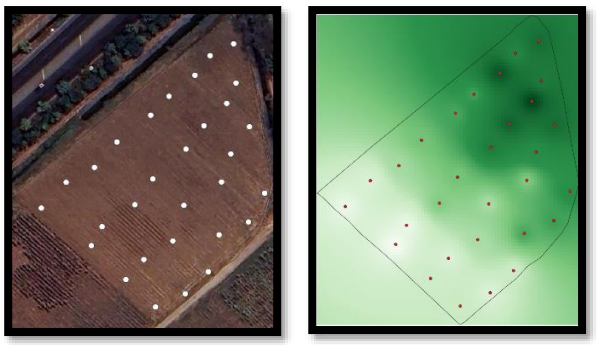


Figure 7 field test result.

The field-testing process involved collecting soil samples from a 1.6-hectare sugarcane field, ensuring that the prototype could handle large-scale operations. This was particularly important because the prototype allows for the flexibility to set the distance between sampling points as needed. By being able to specify the distance between each sampling point, we could ensure a comprehensive analysis of the field's nutrient distribution. This capability allows for tailored data collection strategies, accommodating the unique needs of different crops and field layouts.

Each sample was carefully analyzed, and the data were logged for comparison with traditional laboratory methods. The results not only validated the accuracy of the prototype but also showcased its efficiency in terms of time and cost savings. The quick operation time for obtaining results from the prototype allows for timely decision-making, which is essential for effective nutrient management.

Furthermore, the integration of GPS technology in the prototype provided precise location data for each soil sample. This feature enabled the creation of detailed nitrate concentration maps, which are invaluable for site-specific management practices as shown in figure 8. By using these maps, farmers can apply fertilizers more efficiently, targeting specific areas that require additional nutrients and reducing the overall amount of fertilizer needed. This targeted approach helps to minimize environmental impact, conserve resources, and optimize crop yields.



(a) (b)

Figure 8 (a) measuring points in the field and (b) nitrate concentration maps generated by the dataset from the prototype.

4 Conclusion

The research successfully developed a portable automated nitrate concentration meter using Ion-Selective Electrodes (ISEs) for nitrate concentration mapping in soil. The prototype integrates an Embedded Board for automated operation and data logging, providing reliable and rapid nitrate measurements. The compact design allows easy field use, enabling farmers to make timely and informed decisions on nitrogen fertilizer management. Compared to traditional laboratory methods, the prototype significantly reduces analysis time and costs, enhancing the feasibility of precision agriculture practices.

The device’s development and field testing indicate that it can effectively support precision nutrient management in agriculture. Future improvements may include enhancing sensor sensitivity, reducing sample preparation time, and integrating additional functionalities for comprehensive soil health monitoring. Potential advancements could also involve the development of a multi-parameter sensor system that could simultaneously measure other critical soil nutrients, further enhancing the tool's utility for precision agriculture.

5 Acknowledgements

This research was funded by Thailand Science Research and Innovation (TSRI). Thank you for research team extends their gratitude to the Agricultural Inputs Research and Development Division for their assistance and guidance in soil analysis. Special thanks to the Suphan Buri Field Crops Research Center for providing the test field. Finally, many thanks to all colleagues at

the Agricultural Engineering Research Institute for their advice, feedback, and support throughout the research project. The collaborative efforts and support from various stakeholders were instrumental in the successful completion of this research.

6 References

Adamchuk, V. I. 2002. Feasibility of on-the-go mapping of soil nitrate and potassium using ion-selective electrodes. ASAE Paper No. 021183. St. Joseph, Mich.: ASAE.

FAO. 2019. World Fertilizer Trends and Outlook to 2022. Rome. Available at: FAO Document Card

Fox, R.H., G.W. Roth, K.V. Iverson, W.P. Piekielek. 1989. Soil and tissue tests compared for predicting soil nitrogen availability to corn. Agron. J. 81, 971–974.

Haneklaus, S., K. Panten, H. Lilienthal, E. Schnug. 2010. Precision Application of Nutrients on a Site-specific Basis. Landbauforschung Völkenrode Special Issue 340.

Heiniger, R., R.G. McBride, and D.E. Clay. 2003. Using Soil Electrical Conductivity to Improve Nutrient Management. Agronomy Journal. 95, 508–519.

Kasetsart University, Bangkhen Campus, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science. 2005. Basic Soil Science. 10th ed. Bangkok: Kasetsart University.

Morf W.E. 1981. The principles of ion-selective electrodes and of membrane transport. Elsevier Scientific Publishers Co. 2, 1-433.

Pamapolino, M.F., I.J. Manguiat, S. Ramanathan, H.C. Gines, P.S. Tan, T.T.N. Chid, R. Rajendran, R.J. Buresh. 2007. Environmental impact and economic benefits of site-specific nutrient management (SSNM) in irrigated rice systems. Agricultural Systems. 93, 1-24.

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ปีที่ 31 ฉบับที่ 2 (2568) 40-59
Available online at www.tsae.asia

บทความวิจัย

ISSN 1685-408X

การปรับสภาพชีวมวลลิกโนเซลลูโลสด้วยวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้ง: แนวทางการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อการผลิตแก๊สชีวภาพอย่างยั่งยืน

Lignocellulosic Biomass Pretreatment with Spent Mushroom Substrate: An Agricultural Residue Valorization Approach for Sustainable Biogas Production

ปฐมพร พูลสวัสดิ์[1], ปัญนกฤช ลาภบริสุทธิ์[1]*

Patomporn Pulsawad[1], Pannagrit Lapborisut[1]*

[1]สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, จังหวัดปทุมธานี 12120

[1]Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR), 35 Mu 3 Technopolis, Tambon Khlong Ha, Amphoe Khlong Luang, Pathum Thani 12120, THAILAND

*Corresponding author: Tel.: +66-8-55648289, E-mail: pannagrit@hotmail.com

บทคัดย่อ

การใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อผลิตพลังงานทดแทนสามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและเพิ่มมูลค่าให้กับทรัพยากรชีวมวลที่มีอยู่ในประเทศ วัสดุเหลือทิ้งชีวมวลประเภทใบอ้อยจัดเป็นแหล่งชีวมวลที่สำคัญ แต่การนำมาใช้ผลิตแก๊สชีวภาพยังมีข้อจำกัดสำคัญจากโครงสร้างที่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในสัดส่วนสูง ส่งผลให้การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักเกิดขึ้นได้ช้าและมีประสิทธิภาพต่ำ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการใช้วัสดุเพาะเห็ดนางรมเหลือทิ้งเป็นแหล่งจุลินทรีย์และเอนไซม์ธรรมชาติสำหรับการปรับสภาพใบอ้อยก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก เพื่อเพิ่มอัตราการย่อยสลายและประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ

การทดลองได้นำใบอ้อยมาผ่านกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการผสมกับวัสดุเพาะเห็ดนางรมเหลือทิ้งในอัตราส่วน 1:1 และเปรียบเทียบกับใบอ้อยที่ไม่ได้รับการปรับสภาพรวมถึงเปรียบเทียบความสามารถในการปรับสภาพของเส้นใยราเหลือทิ้งเปรียบเทียบกับหัวเชื้อบริสุทธิ์ที่เตรียมใหม่ทั้งในสภาวะปราศจากเชื้อและสภาวะที่มีเชื้อธรรมชาติเจือปน วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสรวมถึงน้ำตาลรีดิวซ์และความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ รวมทั้งการวิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนโดยอาศัยตะกอนจุลินทรีย์จากโรงงานบำบัดน้ำเสียในระบบไร้ออกซิเจน ผลการทดลองพบว่าการปรับสภาพระยะเวลา 30 วัน ใบอ้อยที่ผสมกับวัสดุเพาะเห็ดนางรมเหลือทิ้งสามารถปลดปล่อยแก๊สชีวภาพสะสมได้ 26.6±5.8 L kg^{-1} VS สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทั้งในด้านปริมาณแก๊สมีเทน ความเร็วในการเริ่มต้นกระบวนการหมัก รวมถึงประสิทธิภาพโดยรวมของการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นแก๊สชีวภาพเมื่อเปรียบเทียบกับใบอ้อยเพียงอย่างเดียวที่ 3.3±3.4 L kg^{-1} VS นอกจากนี้การใช้วัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้งเพื่อการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนได้ใกล้เคียงกับการหัวเชื้อบริสุทธิ์ในการปรับสภาพที่ 29.0±5.5 L kg^{-1} VS อีกทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับสภาพได้ดีแม้ว่าจะมีเชื้อจุลินทรีย์อื่นในธรรมชาติอยู่ด้วย ในขณะที่การใช้หัวเชื้อบริสุทธิ์ในสภาวะปนเปื้อนเชื้อธรรมชาติประสิทธิภาพผลิตแก๊สมีเทนลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่ 9.2±2.7 L kg^{-1} VS ภายในระยะเวลาการผลิตมีเทน 25 วัน

ผลการศึกษาระบุถึงศักยภาพของการนำวัสดุเพาะเห็ดนางรมเหลือทิ้งมาใช้เป็นแหล่งจุลินทรีย์และเอนไซม์สำหรับการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยเฉพาะใบอ้อยที่มีปริมาณมากในภาคการเกษตรไทย ไม่เพียงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ แต่ยังเป็นแนวทางในการจัดการของเสียอย่างครบวงจร ลดภาระสิ่งแวดล้อม และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรชีวมวลอย่าง

Received: September 12, 2025
Revised: October 07, 2025
Accepted: October 14, 2025
Available online: December 22, 2025

คุ้มค่า งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญในการพัฒนาระบบพลังงานทดแทนที่ยั่งยืน และสามารถประยุกต์ใช้ในระดับชุมชนและอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานในอนาคต

คำสำคัญ: ลิกโนเซลลูโลส, การปรับสภาพกระบวนการทางชีวภาพ, แก๊สชีวภาพ

Abstract

The utilization of agricultural residues for renewable energy production offers a dual benefit of reducing environmental impacts and enhancing the value of domestic biomass resources. Sugarcane leaves are an abundant lignocellulosic residue in Thailand but their recalcitrant structure, rich in cellulose, hemicellulose, and lignin, limits microbial degradation and results in low biogas yields. This study investigated the potential of spent oyster mushroom substrate (SMS) as a natural source of microorganisms and enzymes for pretreating sugarcane leaves prior to anaerobic digestion. Pretreatment was performed by mixing sugarcane leaves with SMS at a 1:1 ratio and compared with untreated leaves. The performance of residual fungal mycelia in SMS was further evaluated against newly prepared pure inocula under both sterile and non-sterile conditions. Lignocellulosic composition, reducing sugars, and chemical oxygen demand (COD) were analyzed, and methane potential was assessed using anaerobic sludge from a wastewater treatment plant. Results revealed that SMS pretreatment significantly enhanced biogas production, with higher methane yield at 26.6±5.8 L kg^{-1} VS, faster digestion onset, and improved organic matter conversion efficiency compare to sole sugarcane leaf at 3.3±3.4 L kg^{-1} VS. Remarkably, SMS achieved methane productivity comparable to pure inoculum at 29.0±5.5 L kg^{-1} VS and retained efficiency under natural microbial contamination, while pure inoculum showed reduced performance in non-sterile conditions at 9.2±2.7 L kg^{-1} VS. These findings demonstrate that SMS can serve as an effective, low-cost pretreatment agent for lignocellulosic biomass, particularly sugarcane leaves, thereby enhancing methane production while simultaneously contributing to sustainable waste management. The approach supports circular bioeconomy principles and offers a scalable solution for improving energy security at community and industrial levels.

Keywords: Lignocellulosic materials, Biological pretreatment, Biogas production

1 บทนำ

สถานการณ์ด้านพลังงานในปัจจุบันมีความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มของจำนวนประชากรและการเติบโตทางเศรษฐกิจ จากการคาดการณ์ถึงปริมาณการใช้พลังงานทดแทนเพื่อเป็นพลังงานทางเลือกเพิ่มสูงขึ้น 85% ในปี 2050 (Abraham et al., 2020) ตัวอย่างของพลังงานทางเลือกได้แก่ ลม แสงแดด น้ำ และชีวมวลของพืชพลังงานรวมทั้งวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เนื่องด้วยประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมส่งผลให้มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก ได้แก่ ฟางข้าว ซังข้าวโพด ชานอ้อยและใบอ้อย ดังนั้นจึงสร้างแนวความคิดในการใช้นวัตกรรมในการจัดการวัสดุเหลือทิ้งเพื่อนำมาเป็นแหล่งพลังงานทดแทนจากแหล่งพลังงานที่ได้จากฟอสซิล แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชีวมวลมูลค่าเพิ่ม เช่นการนำไปผลิตเป็นชีวมวลอัดแท่งเพื่อใช้เป็นพลังงาน การนำเข้าระบบเผาไหม้เพื่อให้ได้แก๊สพลังงาน (Gasification) หรือการใช้เทคโนโลยีการย่อยสลายชีวมวลด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ

ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกอ้อยรวมทั้งสิ้น 11,125,480 ไร่ การทำเกษตรไร่อ้อยที่ผ่านมาซึ่งโดยเฉลี่ยไร่อ้อยมีใบสดประมาณ 1.56 ตันต่อไร่ และ 2.45 ตันใบแห้งต่อไร่ (ชัยวัฒน์ และปาจรีย์, 2554) เนื่องด้วยลักษณะของใบอ้อยที่มีความสาก คม จึงเป็นอุปสรรคสำคัญในการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการจัดการ เกษตรกรใช้วิธีการจัดการวัสดุเหลือทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวด้วยการเผาในพื้นที่เพาะปลูก อย่างไรตามการเผาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้ก่อให้เกิดความร้อนและฝุ่นละอองลอยตัวกระจายในอากาศสูงกว่า 2,250 เมตร สามารถลอยไปได้ไกลถึง 16 กิโลเมตร เป็น

สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดฝุ่นละออง (สำนักคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2565) โดยเฉพาะฝุ่นขนาดเล็ก (PM 2.5) ซึ่งเป็นสาเหตุที่สำคัญของมลพิษทางอากาศ ส่งผลอย่างต่อเนื่องกับปัญหาสุขภาพของประชาชนในบริเวณโดยรอบ ในปัจจุบันได้มีมาตรการจากรัฐบาลในการกำหนดนโยบายเรื่องการกำจัดมลพิษทางอากาศเพื่อลดปริมาณการเผาอ้อยสดรวมถึงสนับสนุนการเพิ่มมูลค่าให้กับทรัพยากรชีวภาพเช่นการอัดก้อนใบอ้อยสดและส่งขายให้กับโรงไฟฟ้าชีวมวล การประยุกต์ใช้เป็นสารตั้งต้นของการผลิตพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร รวมทั้งสนับสนุนส่งเสริมเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพ

การผลิตแก๊สชีวภาพโดยอาศัยเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นกระบวนการสลายสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ เช่น แป้ง ไขมัน โปรตีน ให้มีขนาดเล็กลง กระบวนการอะซิโดจีนีซิส (Acidogenesis) สารอินทรีย์ขนาดเล็กที่ถูกสลายในกระบวนการไฮโดรไลซิส เช่น กรดไขมัน กรดอะมิโน น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ประเภทต่างๆ เช่น กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid: VFA) กระบวนการอะซิโตจีนีซิส (Acetogenesis) เป็นการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่ได้จากขั้นอะซิโดจีนีซิสให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ขนาดเล็ก ได้ผลิตภัณฑ์ส่วนมากเป็นกรดอะซิติก และแก๊สไฮโดรเจน เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการสุดท้ายเมทาโนจีนีซิส (Methanogenesis) โดยจุลินทรีย์กลุ่มหลักที่ทำหน้าที่ผลิตแก๊สมีเทน ได้แก่ เมทาโนเจน (Methanogen) อาศัยกรดอินทรีย์ขนาดเล็กหรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตแก๊สมีเทน (Meegoda et al., 2018) แต่ด้วยลักษณะวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือแม้กระทั่งพืชพลังงานซึ่งมีองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสที่มีโครงสร้างซับซ้อน ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่มัดรวมกันเกิดเป็นโครงสร้างเส้นใยที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบชั้นนอกสุด ด้วยโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเกิดจากโมเลกุลของน้ำตาลต่อกันเป็นสายพอลิเมอร์ จุลินทรีย์สามารถนำโมเลกุลเหล่านั้นไปใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ แต่การเข้าถึงเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจุลินทรีย์จำเป็นที่จะต้องย่อยสลายลิกนินที่เปรียบเสมือนโครงสร้างป้องกัน โครงสร้างของลิกนินเกิดจากสารประกอบฟีนอลจับตัวกันเป็นสายพอลิเมอร์ที่มีความซับซ้อนสูง มีเพียงจุลินทรีย์บางสายพันธุ์ที่สามารถย่อยสลายลิกนินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงกระนั้นการย่อยสลายลิกนินต้องอาศัยระยะเวลาที่ยาวนานภายใต้สภาวะตามธรรมชาติ (Kannah et al., 2021) รวมถึงการย่อยสลายโครงสร้างซับซ้อนของสายพอลิเมอร์ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเพื่อให้ได้น้ำตาลพร้อมใช้สำหรับจุลินทรีย์ (Khan et al., 2022) ไม่ว่าอาศัยกระบวนการทางกายภาพ เคมีหรืออาศัยเอนไซม์ก็ตาม ส่งผลให้กระบวนการไฮโดรไลซิสองค์ประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลสเป็นขั้นตอนสำคัญที่กำหนดอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ (Rouches et al., 2016)

ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสสูง จึงได้มีการพัฒนาวิธีการการปรับสภาพวัสดุ (Pretreatment) เพื่อให้จุลินทรีย์สามารถใช้ประโยชน์จากวัสดุชีวมวลได้ง่ายยิ่งขึ้น การปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสมีหลายวิธี เช่น ทางกายภาพโดยกระบวนการตัดบดเพื่อลดขนาดของวัสดุเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสให้แก่เอนไซม์ เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Pommier et al., 2010) นอกจากนี้ยังมีการกระบวนการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมีเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สำหรับการปรับสภาพวัสดุชีวมวลที่มีองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสสูงเพื่อส่งเสริมกระบวนย่อยแบบไร้อากาศในการผลิตแก๊สชีวภาพ (Fox et al., 2003; Teghammar et al., 2010) รายละเอียดดังแสดงใน Table 1

Table 1 Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass with High Structural Complexity Prior to Anaerobic Digestion for Biogas Production

Process	Effects on Biomass	Considerations	Process
Physical pretreatment	- Mechanical operations (milling, chopping, shredding) - Radiation (gamma, microwave, etc.) - Other processes such as heat, steam pressure,	- Reduces particle size and increases surface area - Decreases cellulose crystallinity - Reduces polymer bond strength	- High energy consumption - Ineffective in lignin removal - Limited industrial application - No chemical reagents required
Chemical and physico-chemical pretreatment	- Explosion processes: steam explosion, ammonia fiber explosion, CO_2 explosion, SO_4 explosion - Alkali treatment (NaOH, NH_4OH, $(NH_4)_2SO_4$) - Acid treatment (H_2SO_4, HCl, H_3PO_4) - Gas treatment (ClO_2, NO_2, SO_2) - Oxidizing agents (H_2O_2, O_3)	- Enhances surface area - Effective lignin removal - Reduces cellulose crystallinity - Weakens polymer bonding - Promotes efficient hemicellulose hydrolysis	- Widely applied at industrial scale - Rapid pretreatment rate - Requires harsh operational conditions - Involves chemical usage
Biological pretreatment	- Microorganisms - Enzymatic treatment	- Degrades lignin - Reduces polymer bonding - Facilitates hemicellulose hydrolysis	- Low energy requirement - No chemical input - Environmentally friendly - Relatively slow process - Limited industrial application

ที่มา: (Dobre et al. 2014; Taherzadeh and Karimi 2008)

อย่างไรก็ตามวิธีการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี มีข้อจำกัดในเรื่องการใช้พลังงานที่สูง รวมทั้งการใช้สารเคมีที่ก่อให้เกิดของเสีย ทั้งยังเพิ่มต้นทุนค่าใช้จ่ายทั้งการผลิตและการจัดการของเสีย ดังนั้นการพัฒนาวิธีการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางชีวภาพ มุ่งเน้นการลดค่าใช้จ่ายในการจัดการและการใช้พลังงานที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทางกายภาพและกระบวนการทางเคมี ทั้งยังก่อให้เกิดสารเคมีที่เป็นมลพิษปนเปื้อนในระบบน้อย นับว่าเป็นประเด็นสำคัญของกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในการจัดการวัสดุชีวมวลธรรมชาติที่มีปริมาณลิกโนเซลลูโลสสูง (Usman et al., 2020; Usman et al., 2021)

รายงานการวิจัยระบุว่าเชื้อราสายพันธุ์ต่างๆ เช่น ราในกลุ่มราผุขาว (White-rot fungi) ได้แก่ *Trametes versicolor, Phanerochaete chrysosporium*, *Pleurotus ostreatus* และ *Ceriporiopsis subvermispora* มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกนินได้โดยผ่านกระบวนการใช้เอนไซม์ (Extracellular peroxidase และ Laccase) (Bugget et al., 2011) มีรายงานวิจัยพบเอนไซม์และจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสได้ในวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้ง (Spent mushroom substrate: SMS) สามารถนำมาต่อยอดใช้งานได้หลากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นการนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ เป็นวัสดุเพาะเห็ดรอบต่อไป ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน แหล่งของสารสกัดที่สำคัญทางชีวภาพ ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ แอลกอฮอล์ ไฮโดรเจน เป็นต้น (Ma et al., 2025)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งจากการเพาะเห็ดนางรม *Pleurotus ostreatus* เป็นแหล่งจุลินทรีย์สำหรับปรับสภาพเศษวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทใบอ้อยและยอดอ้อยด้วยกระบวนการและเทคนิคทางชีวภาพเพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ เป็นแนวทางการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชีวมวลมูลค่าเพิ่มในรูปพลังงานทางเลือกซึ่งสามารถนำมาเป็นพลังงานหมุนเวียนใช้ในระบบ ลดปัญหาจากการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งที่ผิดวิธี ส่งเสริมให้เกิดการทำการเกษตรอย่างครบวงจรซึ่งเป็นรูปแบบของการทำการเกษตรอย่างยั่งยืน

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 *การสำรวจและเก็บตัวอย่างในพื้นที่*

ตัวอย่างใบอ้อยได้รับความอนุเคราะห์จากไร่อ้อยในพื้นที่บ้านหนองตอนไทย อำเภอภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ เป็นอ้อยสายพันธุ์ขอนแก่น 3 ระยะเวลาปลูกประมาณ 8 เดือน ผ่านการเก็บเกี่ยวโดยอาศัยแรงงานคนตัด ลักษณะใบอ้อยมีใบเรียวยาวและยังคงมีความสดอยู่ การเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ โดยการตากให้ใบอ้อยแห้งตามธรรมชาติ ใบอ้อยที่แห้งถูกนำมาปั่นบดหยาบให้ได้ขนาดประมาณ 0.5-2 mm (ดังแสดงใน Figure 1) ถูกจัดเก็บที่อุณหภูมิห้องก่อนการใช้งาน วัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะเห็ดนางรมได้รับความอนุเคราะห์จากฟาร์มเห็ดในจังหวัดลพบุรี สภาพก้อนเห็ดถูกเปิดดอกเห็ดแล้ว ก้อนเห็ดถูกนำมาเพาะเลี้ยงต่อให้ออกดอกอีกประมาณ 2-3 รอบ ใช้ระยะเวลาประมาณ 2-3 สัปดาห์ ก้อนเห็ดถูกนำมาตัดบดหยาบๆ ให้มีขนาดเล็กลง (ดังแสดงใน Figure 2) จัดเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C ตัวอย่างใบอ้อยและวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งนำมาวิเคราะห์ Proximate analysis, Ultimate analysis ตามมาตราฐาน ASTM D 7582, D 5373, D 4239, D 5865 และวิเคราะห์องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสด้วยวิธีการทดสอบ Neutral detergent fiber (NDF), Acid detergent fiber (ADF) และ Acid detergent lignin (ADL) (Mertens, 2002., Möller, 2009., AOAC, 2000)

Figure 1 Dried sugarcane leaves after chopping and grinding.

Figure 2 Spent oyster mushroom substrate after cultivation.

Table 2 Physicochemical composition of Sugarcane Leaves and Spent Mushroom Substrate.

Parameters	Sugarcane leaves	Spent Mushroom Substrate
Moisture (%)	8.03 ± 0.05	67.73 ± 0.16
Total solids (% wet weight)	91.97 ± 0.05	32.27 ± 0.16
Volatiles (% wet weight)	85.08 ± 0.11	29.84 ± 0.23
Ash (% wet weight)	6.89 ± 0.07	2.43 ± 0.16
pH	5.74 ± 0.08	5.53 ± 0.03

Table 2 Physicochemical composition of Sugarcane Leaves and Spent Mushroom Substrate (continue).

Parameters	Sugarcane leaves	Spent Mushroom Substrate
Carbon (% dry weight)	45.41	80.13
Hydrogen (% dry weight)	6.24	1.35
Nitrogen (% dry weight)	0.72	0.86
Oxygen (% dry weight)	39.11	8.96
Sulfur (% dry weight)	0.14	0.09
Cellulose (% dry weight)	49.32 ± 1.15	56.21 ± 2.33
Hemicellulose (% dry weight)	17.16 ± 1.46	7.39 ± 2.33
Lignin (% dry weight)	13.75 ± 1.35	13.74 ± 1.43

2.2 *การเตรียมตะกอนจุลินทรีย์จากระบบย่อยแบบไร้อากาศ*

ตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดสอบศักยภาพการผลิตมีเทนได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของโรงงานผลิตขนมปังฟาร์มเฮ้าส์ โรงงานลาดกระบัง 2 แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง (ดังแสดงใน Figure 3) ตะกอนจุลินทรีย์ถูกเก็บรักษาในถังแกลลอนทึบปิดสนิท และทำการบีบไล่อากาศทุกครั้งก่อนนำตะกอนออกจากถังแกลลอน เพื่อรักษาไม่ให้เกิดแรงดันสะสม นำตัวอย่างตะกอนวิเคราะห์ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ ตามมาตราฐาน APHA, ISO 21656, ISO 21656

Figure 3 Sludge derived from the wastewater treatment of a farmhouse bakery industry.

2.3 *การเตรียมหัวเชื้อเห็ดนางรมบริสุทธิ์*

การนำชิ้นส่วนดอกเห็ดนางรมจากดอกเห็ดที่เจริญบนถุงเพาะเชื้อเห็ดทำความสะอาดด้วย 70% แอลกอฮอล์ ตัดดอกเห็ดออกเป็นชิ้นเล็กๆ วางลงบนอาหาร PDA เพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 28 ℃ เป็นเวลา 7-8 วัน เมื่อเกิดเส้นใยสีขาวบริสุทธิ์ ตัดอาหารเลี้ยงพร้อมเส้นใยขนาดประมาณ 0.5x0.5 cm 4 ชิ้น นำชิ้นส่วนดอกเห็ดใส่ในอาหาร PDB ที่ฆ่าเชื้อแล้วปริมาตร 100 ml จากนั้นนำไปบ่มและเขย่าที่ 150 rpm อุณหภูมิ 28 ℃ เป็นเวลา 8 วัน เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อบริสุทธิ์สำหรับการทดลอง (ดังแสดงใน Figure 4)

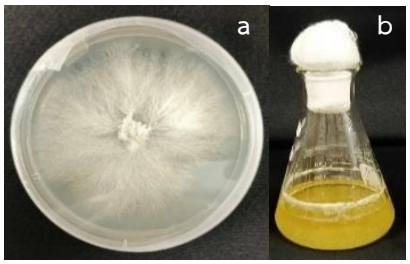


Figure 4 Pure mycelium of oyster mushroom (Pleurotus ostreatus) (a), Liquid inoculum of oyster mushroom (Pleurotus ostreatus) after 8 days of incubation (b).

2.4 *การปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทใบอ้อยโดยอาศัยวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกเห็ดนางรมเพื่อเป็นแหล่งจุลินทรีย์*

การจัดเตรียมชุดการทดลอง 6 สภาวะประกอบด้วย

1) วัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้ง (W)

2) ใบอ้อย + วัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (LW)

3) ใบอ้อย (L)

4) ใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLI)

5) ใบอ้อย + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (LI)

6) ใบอ้อยฆ่าเชื้อ + วัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (CLW)

นำวัสดุตัวอย่างทั้ง 6 สภาวะ ประมาณ 30 g ใส่ลงในขวดเพาะเลี้ยงขนาด 350 ml ที่เจาะฝาแล้วปิดด้วยแผ่นกรองอากาศ เติมน้ำกลั่นปราศจากเชื้อ ปรับความชื้นให้ได้ประมาณ 70% สำหรับชุดการทดลองที่มีการใส่หัวเชื้อบริสุทธิ์ใส่หัวเชื้อปริมาตร 7.5 ml ปริมาณหัวเชื้อที่ใช้นำไปคิดคำนวณรวมกับปริมาณน้ำกลั่นสำหรับปรับความชื้น (ดังแสดงใน Figure 5) ทุกชุดการทดลองทำซ้ำ 3 ซ้ำ

Figure 5 Experimental setup for pretreating sugarcane leaves with spent oyster mushroom substrate under aerated conditions.

ชุดการทดลองทุกสภาวะนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 28 ºC เป็นระยะเวลา 30 วัน (Mustafa et al., 2016) ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 5 วัน เพื่อวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ ตามมาตราฐาน ISO 21656, ISO 21656 และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณลิกโนเซลลูโลสโดยอาศัยวิธีการทดสอบหา Neutral detergent fiber (NDF), Acid detergent fiber (ADF) และ Acid detergent lignin (ADL) การคำนวณหาปริมาณสารแทรก เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน และเถ้าตามสมการ (1) ถึง (9)

$$\%aNDF = \frac{W_{aNDF} - C_{aNDF}}{S} \times 100 \quad (1)$$

$$\%Extracted = \left(\frac{S - (W_{aNDF} - C_{aNDF})}{S} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$\%Extracted = 100\% - \%aNDF \quad (3)$$

$$\%ADF = \frac{W_{ADF} - C_{ADF}}{S} \times 100 \quad (4)$$

$$\%Hemicellulose = \%aNDF - \%ADF \quad (5)$$

$$\%ADL = \frac{W_{ADL} - C_{ADF}}{S} \times 100 \quad (6)$$

$$\%Cellulose = \%ADF - \%ADL \quad (7)$$

$$\%Ash = \frac{W_{Ash} - C}{S} \times 100 \quad (8)$$

$$\%Lignin = \%ADL - \%Ash \quad (9)$$

เมื่อ C_{aNDF} คือ น้ำหนักถ้วยกรองแบบแก้วสำหรับการสกัด NDF ที่อบแห้งแล้ว (g)

C_{ADF} คือ น้ำหนักถ้วยกรองแบบแก้วสำหรับการสกัด ADF ที่อบแห้งแล้ว (g)

C คือ น้ำหนักถ้วยกระเบื้องเคลือบที่เผาแล้ว (g)

W_{aNDF} คือ น้ำหนักตัวอย่างพร้อมถ้วยกรองหลังการสกัด NDF ที่อบแห้งแล้ว (g)

W_{ADF} คือ น้ำหนักตัวอย่างพร้อมถ้วยกรองหลังการสกัด ADF ที่อบแห้งแล้ว (g)

W_{ADL} คือ น้ำหนักตัวอย่างพร้อมถ้วยกรองหลังการสกัด ADL ที่อบแห้งแล้ว (g)

W_{Ash} คือ น้ำหนักตัวอย่างพร้อมถ้วยกระเบื้องหลังการเผาแล้ว (g)

S คือ น้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น (g)

นำตัวอย่างประมาณ 5 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml ทำการเติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 ml เขย่าที่ 150 rpm เป็นเวลา 3 hr เพื่อสกัดองค์ประกอบที่ละลายน้ำ ตัวอย่างน้ำวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง pH หลังการวิเคราะห์ pH ดูดตัวอย่างปริมาตร 0.5 ml เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยใส่ตัวอย่างในหลอดทดลองเติม 3,5 dinitrosalicylic acid (DNSA) ปริมาตร 1 ml ผสมให้เข้ากัน นำไปต้มที่อุณหภูมิ 90 ºC เป็นเวลา 15 min ปล่อยตัวอย่างเย็นก่อนเติมน้ำกลั่นปริมาตร 4 ml วิเคราะห์ค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm เปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์กับกราฟมาตรฐานกลูโคส (Manmai et al., 2020)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ด้วยระบบปิด (Close reflux) และวิเคราะห์หาปริมาณ COD ด้วยชุดตรวจช่วงความเข้มข้นสูง 0-15,000 mg l^{-1} ของบริษัท HANNA Instruments ตามคู่มือการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียรุ่น HI8314

2.5 *การทดสอบศักยภาพการผลิตมีเทน (Biological Methane Potential; BMP)*

การจัดเตรียมชุดการทดลองทั้งหมด 9 สภาวะ ประกอบด้วย

1) วัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้ง + ตะกอนจุลินทรีย์ (W)

2) ใบอ้อย + วัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้ง + ตะกอนจุลินทรีย์ (LW)

3) ใบอ้อย + ตะกอนจุลินทรีย์ (L)

4) ใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ด + ตะกอนจุลินทรีย์ (CLI)

5) ใบอ้อย + หัวเชื้อเห็ด + ตะกอนจุลินทรีย์ (LI)

6) ใบอ้อยฆ่าเชื้อ + วัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้ง + ตะกอนจุลินทรีย์ (CLW)

7) ตะกอนจุลินทรีย์ (S) (Blank)

8) Avecil cellulose + ตะกอนจุลินทรีย์ (SC) (Positive control)

9) ใบอ้อยก่อนการปรับสภาพไม่ทำอะไรเลย + ตะกอนจุลินทรีย์ (NL)

การเตรียมชุดทดลองเพื่อประเมินศักยภาพในการผลิตมีเทนโดยการผสมตะกอนจุลินทรีย์จำนวน 65 g กับตัวอย่างวัสดุเข้าด้วยกันในขวด Duran ขนาด 250 ml สัดส่วน VS 1:1 ผสมให้เข้ากัน เติมน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อให้ได้ปริมาตรสุดท้ายประมาณ 200 ml ต่อขวด ประกอบชุดบ่มเข้ากับชุดกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 M ปลายท่อต่อหัวทรายเพื่อช่วยให้แก๊สกระจายตัวเป็นฟองขนาดเล็ก ต่ออุปกรณ์เข้ากับชุดแทนที่ด้วยน้ำเพื่อเช็ครอยต่อปิดให้สนิทป้องกันการรั่วไหลของแก๊ส หลังทดสอบการรั่วของชุดอุปกรณ์ ปั๊มแก๊สไนโตรเจนที่ผ่านตัวกรองฆ่าเชื้อเข้าขวดชุดอุปกรณ์ด้วยอัตรา 25 ml min^{-1} เป็นเวลา 5 min เพื่อไล่ออกซิเจนออกจากระบบ ดังแสดงแบบจำลองระบบใน Figure 6 และชุดทดสอบการผลิตมีเทนดังในแสดงใน Figure 7

การทดลองบ่มเพาะที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 °C เขย่าวันละรอบ วัดปริมาณน้ำที่ถูกแทนที่ทุกวันเป็นเวลา 30 วัน หรือจนกว่าปริมาณการผลิตแก๊สมีปริมาณลดลงหรือระบบหยุดการผลิตแก๊ส (ณัฐพล และคณะ, 2566) ทุกชุดการทดลองทำซ้ำ 3 ซ้ำ

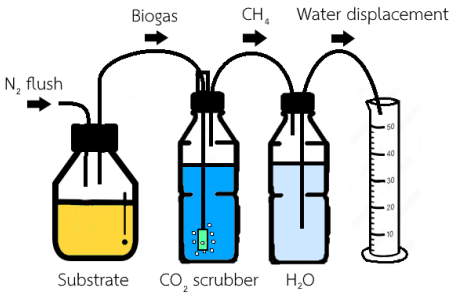


Figure 6 Schematic model of the experimental setup for assessing methane production potential.

Figure 7 Experimental setup for assessing biological methane potential (BMP).

2.6 *การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ*

การวิจัยทำการทดสอบทั้งหมด 3 ซ้ำทุกชุดการทดลอง วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ Completely randomized design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ปรียบเทียบความแตกต่างของสองชุดข้อมูลโดยวิธี t-test และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.0 ($p < 0.05$)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 *การเปลี่ยนแปลงของใบอ้อยและวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งหลังปรับสภาพ*

ผลการทดสอบปรับสภาพวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสสูง (ใบอ้อย) ที่สภาวะตัวอย่างต่างกัน ๆ (ดังแสดงใน Figure 8) พบว่าวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้ง (W) สังเกตเห็นเส้นใยสีขาวเจริญบนพื้นผิวมากขึ้น เส้นใยของเห็ดนางรมจากก้อนเชื้อเพาะเห็ดเหลือทิ้งมีเส้นใยสีขาวเจริญเติบโตอยู่เต็ม แต่บริเวณพื้นผิวสัมผัสกับอากาศโดยตรงทำให้เห็นการเจริญของเส้นใยสีขาวชัดเจนบริเวณพื้นผิว เมื่อก้อนเพาะเชื้อเห็ดถูกนำมาบดตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศเพิ่มขึ้นทำให้เห็นเส้นใยสีขาวยิ่งขยายชัดเจน (Shakir and Ahmad, 2024)

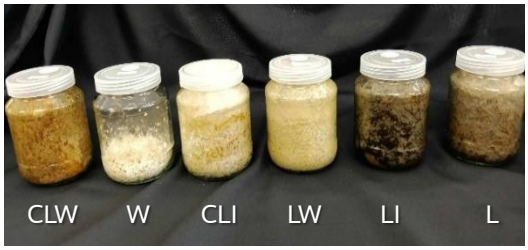


Figure 8 pH changes over 30 days in six pretreatment groups: CLW (sterilized sugarcane leaves + spent mushroom substrate, 1:1), W (spent mushroom substrate), CLI (sterilized sugarcane leaves + pure mushroom inoculum), LW (sugarcane leaves + spent mushroom substrate, 1:1), LI (sugarcane leaves + pure mushroom inoculum), and L (sugarcane leaves).

ชุดการทดลองใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLI) ผลการทดสอบสังเกตเห็นการเจริญของเส้นใยสีขาวทั่วทั้งใบอ้อยเร็วที่สุดโดยปกคลุมทั่วพื้นผิวภายในระยะเวลา 10 วัน สังเกตลักษณะใบอ้อยมีสีซีดซึ่งแสดงถึงการย่อยสลายลิกนินเหลือเป็นโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสเป็นลักษณะเด่นในการย่อยสลายวัสดุลิกโนเซลลูโลสโดยราผุขาว (Blanchette, 1991)

ชุดการทดลองใบอ้อย + วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (LW) สังเกตพบการเจริญเติบโตของเส้นใยสีขาวทั่วพื้นที่ปกคลุมใบอ้อยภายในระยะเวลา 15 วัน ระยะเวลาการเจริญเติบโตที่นานกว่าและลักษณะการเจริญของเส้นใยเกาะกลุ่มกันบริเวณที่มีเศษวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งมากกว่าชุดการทดลองใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ โดยลักษณะใบอ้อยสังเกตพบสีซีดเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นถึงความสามารถของเชื้อเห็ดนางรมที่สามารถเจริญแข่งกับจุลินทรีย์อื่นบนใบอ้อยและขึ้นเป็นจุลินทรีย์หลักได้ จากการที่เส้นใยเจริญอยู่เต็มที่แล้วแต่แรกบนวัสดุเพาะเห็ดเพิ่มโอกาศในการแข่งขันกับจุลินทรีย์ชนิดอื่น แต่สำหรับชุดการทดลองใบอ้อย + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (LI) ไม่สังเกตพบเส้นใยสีขาวเจริญปกคลุมเต็มที่บนใบอ้อยแต่สังเกตพบเส้นใยขาวสีเทาเจริญอยู่บาง สันนิษฐานว่าเป็นกลุ่มของเชื้อราตามธรรมชาติบนใบอ้อย แสดงให้เห็นชัดเจนว่าหัวเชื้อเห็ดนางรมบริสุทธิ์ไม่สามารถเจริญเติบโตแข่งกับจุลินทรีย์ตามธรรมชาติแล้วขึ้นเป็นจุลินทรีย์หลักได้ นอกจากนี้ลักษณะใบอ้อยพบว่ามีสีเข้มขึ้นตรงข้ามกับชุดการทดลองที่มีเชื้อเห็ดนางรมเจริญเติบโตเต็มที่ ระบุได้ว่าการที่จุลินทรีย์บนใบอ้อยอาศัยอาหารเลี้ยงเชื้อของหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการเจริญซึ่งจุลินทรีย์ตามธรรมชาติมีความสามารถในการเจริญได้รวดเร็วกว่าเห็ดนางรมและทำการย่อยสลายใบอ้อยแทน จึงสังเกตพบลักษณะใบอ้อยเป็นสีดำใกล้เคียงกับการย่อยสลายของเศษซากพืชตามธรรมชาติ (Khademimoshgenani & Green, 2023) นอกจากนี้สังเกตพบว่าความแตกต่างในการย่อยสลายของจุลินทรีย์จากใบอ้อยได้โดยเปรียบเทียบกับชุดการทดลองใบอ้อย (L) ที่แม้ว่าจะพบจุลินทรีย์ในธรรมชาติเหมือนกันแต่สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่าเนื่องจากปริมาณอาหารที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้มีปริมาณน้อย ทำให้จุลินทรีย์ในธรรมชาติเจริญเติบโตได้ช้ากว่า

สำหรับชุดการทดลองใบอ้อยฆ่าเชื้อ + วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (CLW) สังเกตพบการเจริญของเส้นใยขาวอยู่เป็นกลุ่มๆ ไม่ปกคลุมทั่วใบอ้อย ในบริเวณที่เส้นใยปกคลุมสีใบอ้อยมีลักษณะซีดขึ้นกว่าเดิมแสดงให้เห็นว่าเกิดการย่อยสลายขององค์ประกอบลิกนิน เพื่อเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพการย่อยสลายของใบอ้อยของชุดการทดลองนี้กับชุดการทดลองใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLI) เปรียบเสมือนชุดควบคุมที่คาดว่าจะเกิดการย่อยสลายดีที่สุด แต่ผลการทดสอบพบว่าชุดการทดลอง (CLW) เส้นใยเจริญเติบโตเพียงบางส่วน เนื่องจากสังเกตว่าอายุของวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งที่อายุมากส่งผลการทดสอบ การทดสอบนี้ระบุชี้ให้เห็นถึงผลของอายุวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสสูง

3.2 *การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายของวัสดุชีวมวลที่มีปริมาณลิกโนเซลลูโลสสูง*

3.2.1 ความชื้น

ในการทดลองทุกชุดการทดลองได้ปรับสัดส่วนความชื้นให้มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นประมาณ 70% ซึ่งเป็นปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อเห็ดนางรม (Wiesnerová et al., 2023) และปริมาณของแข็งทั้งหมดเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณความชื้นเพื่อใช้สำหรับการควบคุมสัดส่วนของแข็งในการปรับสภาพ จากผลการทดลองสังเกตการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นแสดงดัง Figure 9

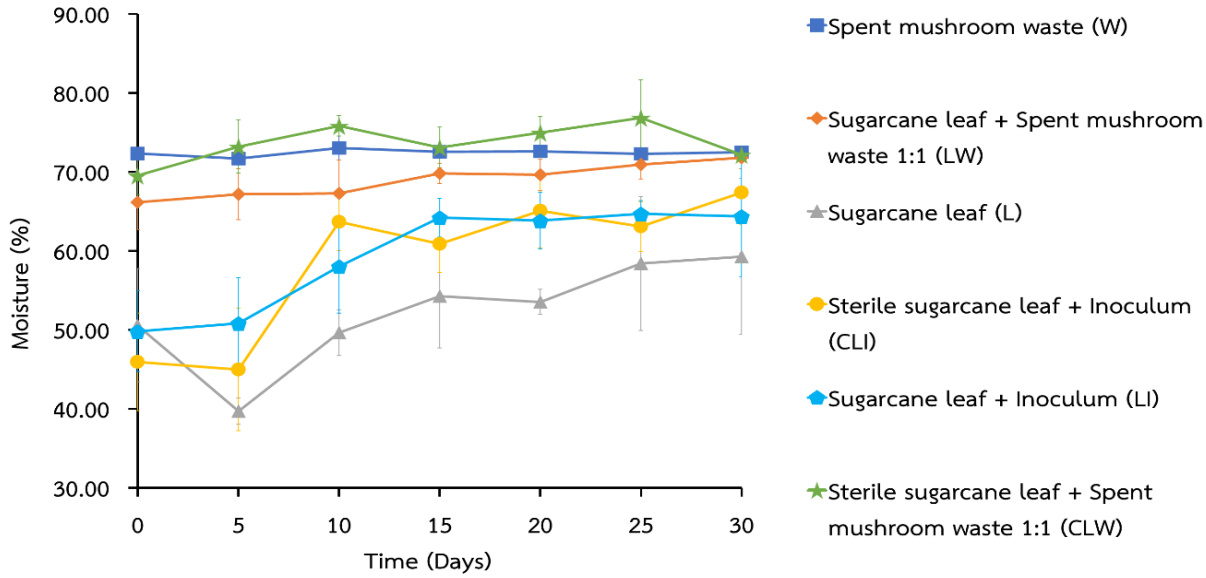


Figure 9 The comparative changes in moisture content of the six experimental treatments.

ผลการทดลองระบุว่าชุดการทดลองที่มีการใส่วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งความชื้นของวัสดุมีค่าใกล้เคียงกับที่ปรับไว้ตั้งแต่เริ่มต้น ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่มีการใส่วัสดุเพาะเห็ดนั้นมีปริมาณความชื้นต่ำกว่าที่ตั้งไว้ที่ประมาณ 50% แล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นมีค่าความชื้นใกล้เคียงกับที่ปรับไว้ ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการอุ้มน้ำที่ต่ำของใบอ้อยที่มีขนาดประมาณ 0.5-2 cm ทำให้ปริมาณความชื้นกระจายได้ไม่สม่ำเสมอ เมื่อจุลินทรีย์มีการเจริญเติบโต ใบอ้อยเกิดการย่อยสลายเพิ่มขึ้น เพิ่มความอ่อนนุ่ม ส่งผลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณความชื้นในใบอ้อยสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ในการผลิตวัสดุเพาะเห็ดส่วนมากมักจะเป็นเศษขี้เลื่อยที่มีขนาดเล็กมีความสามารถในการอุ้มน้ำที่สูง ทำให้ปริมาณความชื้นกระจายได้ดีทั่ววัสดุ ส่งผลดีต่อการควบคุมสัดส่วนความชื้นเมื่อต้องการขยายขนาดการทดลอง

3.2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสของวัสดุชีวมวล (ใบอ้อย)

1. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารแทรก เป็นตัวแทนขององค์ประกอบอื่นๆ ภายในเซลล์นอกเหนือจากลิกโนเซลลูโลส เช่น โปรตีน น้ำตาล ลิพิด (Lipid) การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารแทรกสามารถบ่งชี้ถึงถึงการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสรวมไปถึงการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ ดังแสดงใน Figure 10 ทุกชุดการทดลองมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารแทรกแสดงให้เห็นว่ามีการย่อยสลายหรือเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ โดยการเปลี่ยนแปลงสูงสุดในกลุ่มที่มีการฆ่าเชื้อบนใบอ้อยได้แก่ใบอ้อยฆ่าเชื้อ + วัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (CLW) ที่ 86.02±25.02% และใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLI) ที่ 84.35±5.18% ที่ระยะเวลาปรับสภาพ 30 วัน

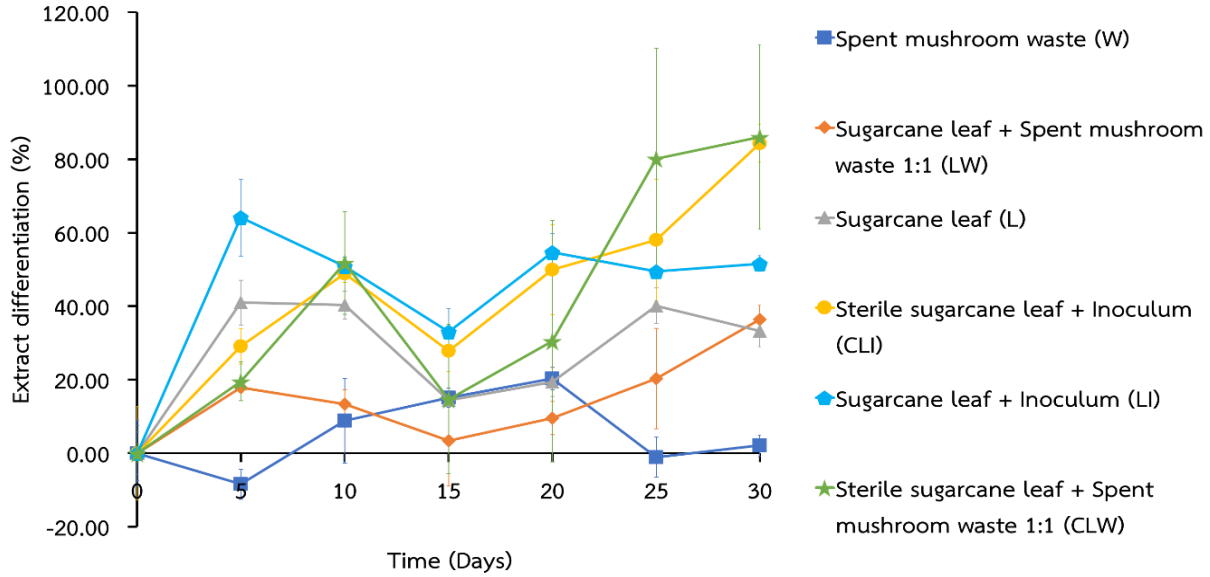


Figure 10 The comparative changes in extractable compound content of six experimental treatments.

2. การเปลี่ยนแปลงเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน เป็นตัวแปรสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพในการปรับสภาพวัสดุชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสเพื่อให้เป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพ จาก Figure 11 ในกลุ่มชุดการทดลองที่มีการใส่เส้นใยเห็ดนางรมได้แก่ ใบอ้อย + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (LI), ใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLI) และ ใบอ้อยฆ่าเชื้อ + วัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (CLW) พบการลดลงของปริมาณเฮมิเซลลูโลสในช่วงแรกเด่นชัดกว่าชุดการทดลองอื่น เนื่องจากการย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลสโดยเห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*) มีแนวโน้มเกิดขึ้นได้เร็วกว่า (Nie et al., 2020) มีรายงานการวิจัยระบุว่าราในกลุ่มราผุขาวมีการแสดงออกของเอนไซม์ในกลุ่ม Endoxylanase หลากหลายชนิด ส่งผลให้การย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลสได้ดี (Isroi et al., 2011) อย่างไรก็ตามชุดการทดลองใบอ้อย + วัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (LW) และชุดการทดลองใบอ้อย + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (LI) มีสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสเพิ่มสูงขึ้นในช่วงหลังและมีสัดส่วนเซลลูโลสลดต่ำลง เมื่อสังเกตจาก Figure 12 ชุดการทดลองใบอ้อย + วัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (LW), ใบอ้อย + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (LI) รวมถึงชุดการทดลองใบอ้อย (L) ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่มีเส้นใยเห็ดนางรมและเชื้อธรรมชาติเจือปนมีการลดลงของเซลลูโลสเด่นชัดที่ 27.27±1.01%, 26.23±1.02% และ 25.50±1.71% ตามลำดับ มากกว่าชุดการทดลองใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLI) และใบอ้อยฆ่าเชื้อ + วัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (CLW) ที่มีแต่เส้นใยเห็ดนางรมที่ 6.88±1.72% และ 15.81±1.24% ตามลำดับ สาเหตุคาดว่าเกิดจากเอนไซม์ที่ย่อยสลายเซลลูโลส (Exo/Endo glucanase, β-glucosidases) ที่มีอยู่แล้วในวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งรวมกับเชื้อธรรมชาติที่ปนเปื้อนบนใบอ้อยที่สามารถใช้น้ำตาลกลูโคสได้เร็วกว่าเห็ดนางรม ซึ่งกลูโคสเป็นหนึ่งในตัวยับยั้งปฏิกิริยาขั้นสุดท้าย (End product inhibitor) ของเอนไซม์ในกลุ่มเซลลูเลสที่ทำหน้าที่ย่อยสลายเซลลูโลสทำให้มีการย่อยสลายที่ลดลง (Agrawal et al., 2021) เมื่อน้ำตาลกลูโคสถูกใช้ทำให้เอนไซม์ในกลุ่มเซลลูเลสสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพมากกว่า เกิดการย่อยสลายเซลลูโลสได้เร็วและด้วยการคำนวณสัดส่วนลิกโนเซลลูโลสให้ได้ครบ 100% เมื่อเซลลูโลสและองค์ประกอบส่วนอื่นลดลงมากกว่า ส่งผลให้องค์ประกอบส่วนที่เหลือในที่นี้คือเฮมิเซลลูโลสแสดงให้เห็นเป็นลักษณะสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น

จาก Figure 13 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณลิกนิน ชุดการทดลองใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLI) มีการลดลงของปริมาณลิกนินสูงที่สุดที่ 54.22±1.97% แสดงให้เห็นความสามารถของราในกลุ่มราผุขาวในการย่อยสลายลิกนินที่ดี (Durán-Aranguren et al., 2021) เมื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายลิกนิน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของชุดการทดลองใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLI) จะเห็นได้ชัดเจนว่ามีการย่อยสลายลิกนินที่ดีกว่า ในงานวิจัยของ Pandey and Singh (2014) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยของเห็ดนางรมในช่วงการเจริญทั่วไป (Vegetative growth) มีการย่อยสลายลิกนินสูงกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ในขณะที่ช่วงใกล้ออกดอกเห็ด (Fructification) มีการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่สูงกว่าลิกนิน ซึ่งอาจเป็นเหตุผลที่ชุดการทดลองใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัว

เชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLI) และใบอ้อย + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (LI) ที่อาศัยหัวเชื้อเตรียมใหม่มีช่วงการย่อยสลายลิกนินที่สูงกว่าชุดการทดลองที่อาศัยเส้นใยจากวัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้งหลังการออกดอกแล้ว รวมถึงการเจริญของเส้นใยเห็ดนางรมที่ต้องแข่งขันกับเชื้อจากธรรมชาติในชุดการทดลองใบอ้อย + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (LI) ส่งผลให้ไม่สามารถเจริญเติบโตได้เต็มที่ทำให้เกิดการย่อยสลายลิกนินได้ไม่ดีเทียบเท่าชุดการทดลองใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLI)

3. การเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้า ผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้น (ดังแสดงใน Figure 14) แสดงให้เห็นถึงการลดลงของสารอินทรีย์บ่งชี้ถึงการย่อยสลายขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลและถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่และปลดปล่อยออกมาในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งสอดคล้องกับชุดการทดลองที่สังเกตเห็นการเจริญของจุลินทรีย์บนวัสดุรวมถึงการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบต่างๆ ที่ได้กล่าวมา

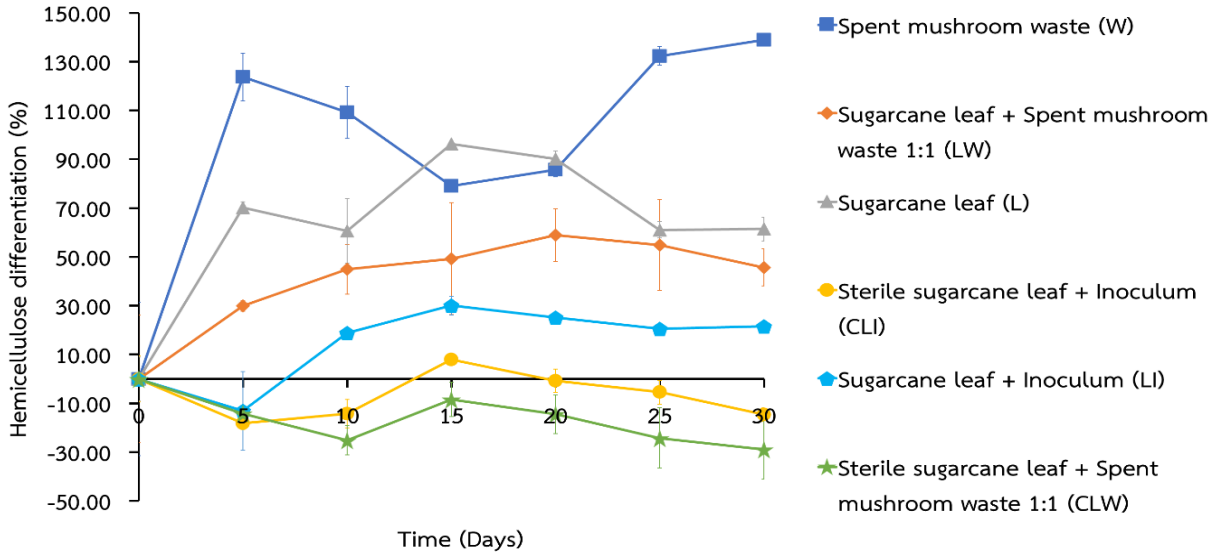


Figure 11 The comparative changes in hemicellulose content of six experimental treatments.

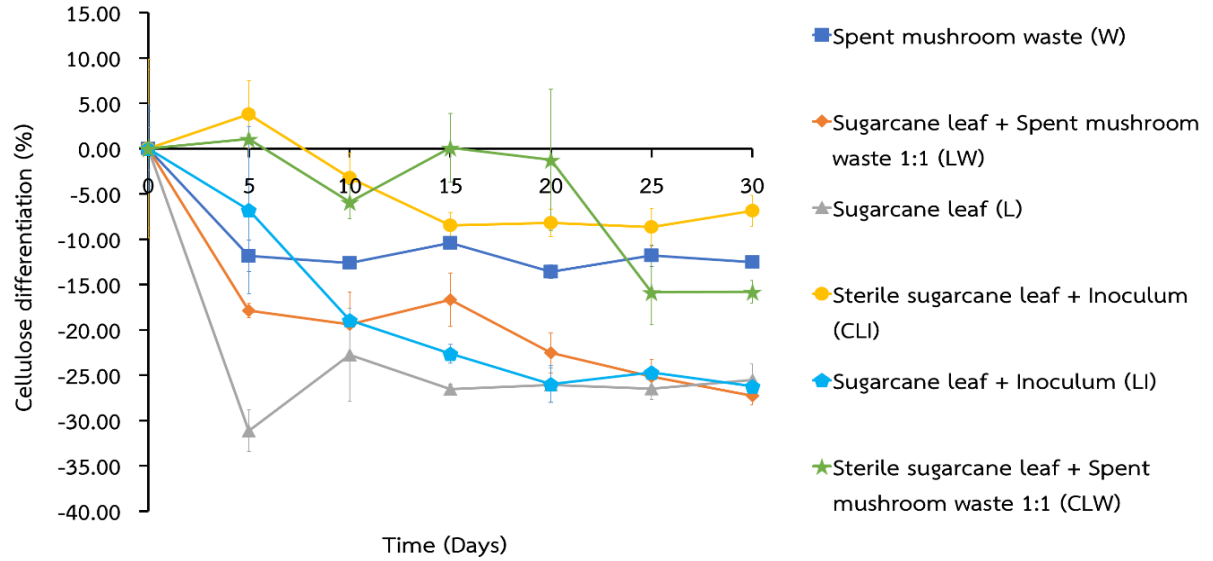


Figure 12 The comparative changes in cellulose content of six experimental treatments.

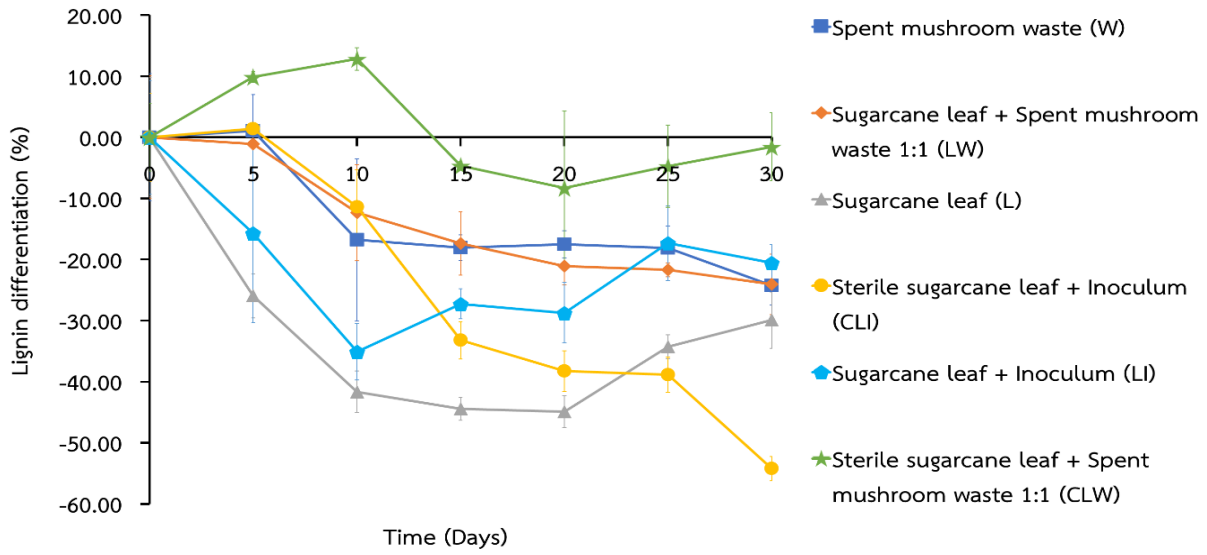


Figure 13 The comparative changes in lignin content of six experimental treatments.

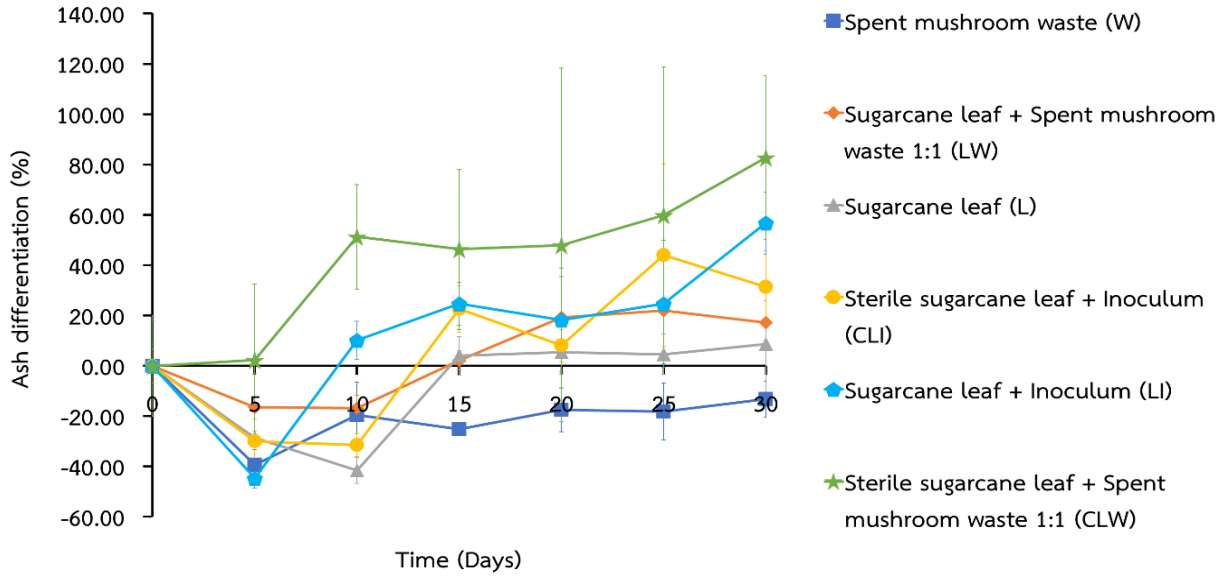


Figure 14 The comparative changes in lignin content of six experimental treatments.

3.2.3 การเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ (ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD)

ชุดการทดลองที่สังเกตเห็นการเจริญของเส้นใยเห็ดนางรมเด่นชัดได้แก่ ใบอ้อยฆ่าเชื้อ + วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (CLW), ใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLI) และใบอ้อย + วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (LW) สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของ pH ในทิศทางลดลงไปอยู่ที่ประมาณ 5.5 ดังแสดงตาม Figure 15 และพบการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และความต้องการออกซิเจนทางเคมีดังแสดงใน Figure 16 และ 17 บ่งชี้ถึงความสามารถในการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสของเส้นใยเห็ดนางรมให้กลายเป็นน้ำตาล และน้ำตาลดังกล่าวสามารถถูกนำไปใช้ต่อให้ได้เป็นกรดอินทรีย์ (Durán-Aranguren et al., 2021) โดยชุดการทดลองใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLW) และใบอ้อย + วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (LW) มีการเพิ่มขึ้นสูง ผลการทดลองตรวจพบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ 44.36±11.34% และ 43.66±16.69% ตามลำดับและความต้องการออกซิเจนทางเคมีที่ 66.11±1.85% และ 84.27±22.27% ตามลำดับ

ชุดการทดลองวัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้ง (W) ค่า pH มีค่าต่ำตั้งแต่แรกตลอดทั้งการทดลอง ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงเล็กน้อยและความต้องการออกซิเจนทางเคมีเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่ามีการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสของวัสดุปลูกเห็ดเช่นขี้เลื้อยตั้งแต่แรกในขณะที่ทำการเพาะเห็ดทำให้ มีการ

เปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยจากการที่เส้นใยที่ยังมีชีวิตอยู่อาศัยน้ำตาลที่มีอยู่ในการเจริญ ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เห็นการเจริญของเส้นใยเห็ดนางรมชัดเจนได้แก่ ใบอ้อย + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (LI) และชุดการทดลองใบอ้อย (L) พบว่า pH มีค่าเป็นกลางประมาณ 7.0-7.5 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และความต้องการออกซิเจนทางเคมีลดลง บ่งชี้ว่าการสร้างกรดที่ต่ำสื่อถึงการย่อยสลายที่ต่ำของกลุ่มจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ ไม่สามารถเปลี่ยนลิกโนเซลลูโลสให้กลายเป็นน้ำตาลได้ทันการใช้งานของจุลินทรีย์

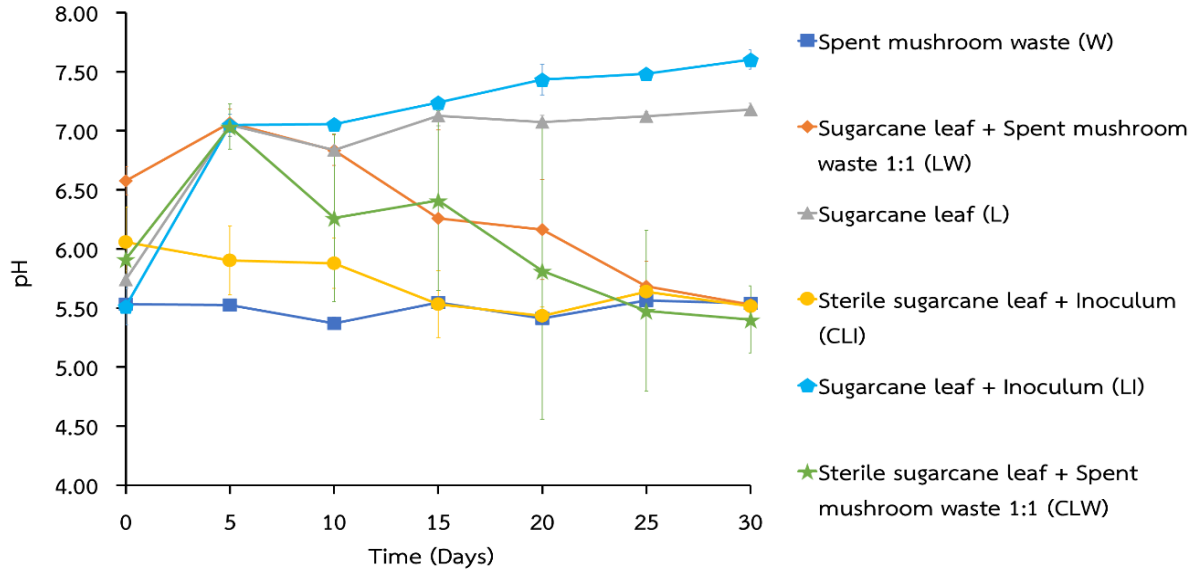


Figure 15 The comparison of pH variations among the six experimental treatments.

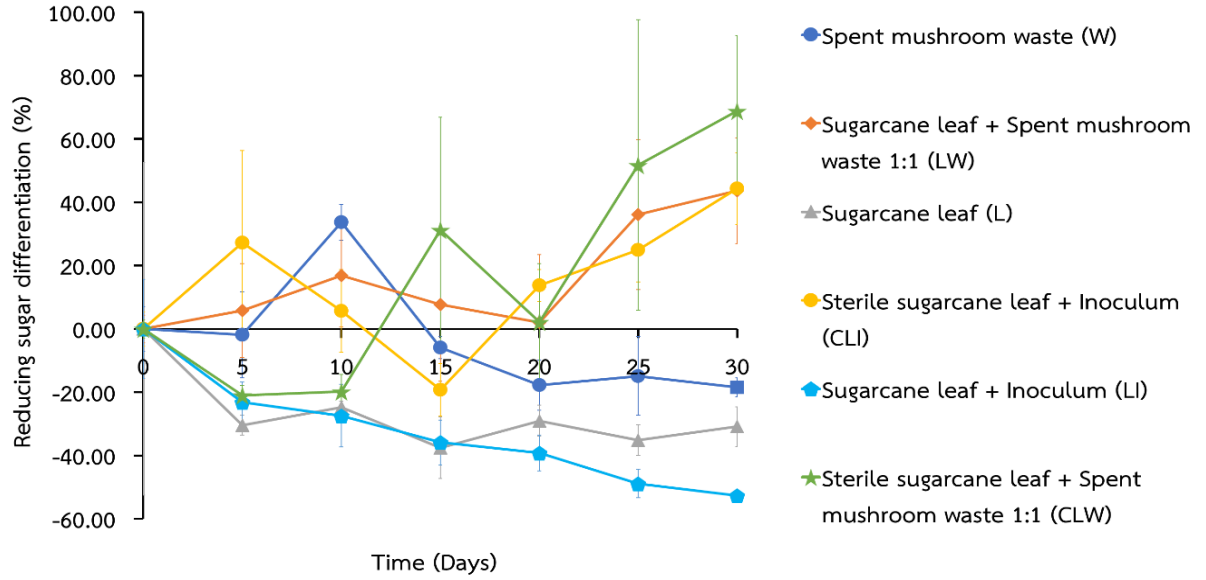


Figure 16 The comparative changes in reducing sugar content of six experimental treatments.

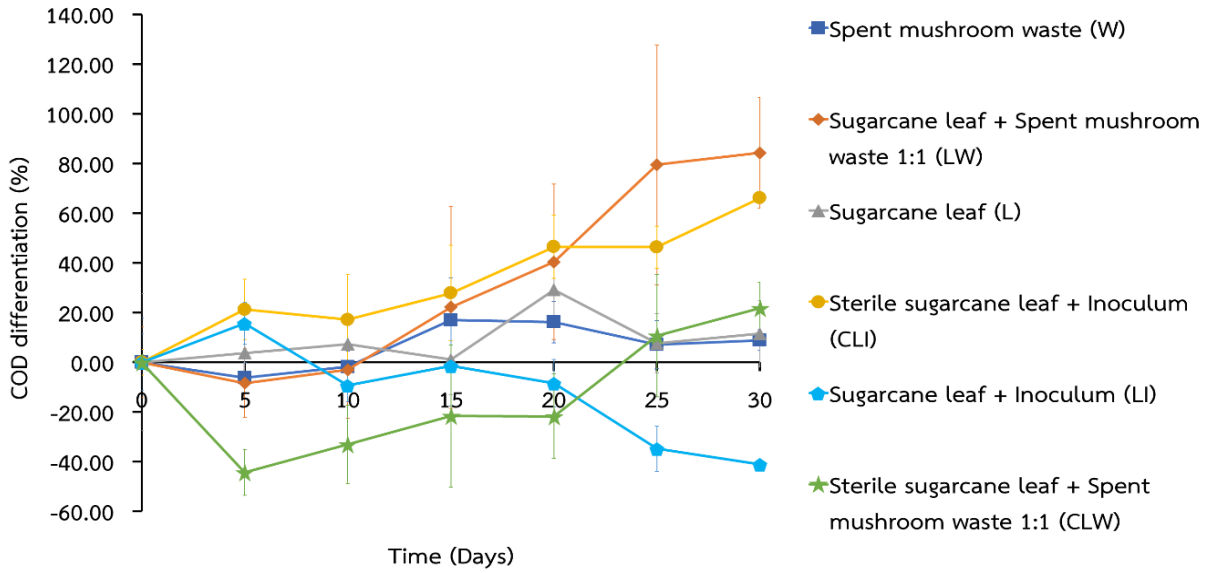


Figure 17 The changes in chemical oxygen demand (COD) of six experimental treatments.

3.3 *ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนของใบอ้อยและวัสดุปลูกเห็ดเหลือทิ้งหลังปรับสภาพ*

การผลิตแก๊สมีเทนตามทฤษฎีเซลลูโลส 1 g VS สามารถเปลี่ยนเป็นมีเทนได้ 415 ml แต่ในทางปฏิบัติคาร์บอนส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นโครงสร้างของเซลล์และพลังงานเคมีจะสูญเสียไปในรูปของความร้อน ทำให้ในการผลิตมีเทนจากเซลลูโลสจะได้ผลผลิตประมาณ 80% จากทฤษฎีหรือประมาณ 332 ml g^{-1} VS (Filer, Ding, & Chang, 2019) สำหรับชุดการทดลอง Avecil cellulose + ตะกอนจุลินทรีย์ (SC) (ชุดควบคุม) เพื่อเช็คประสิทธิภาพของตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตมีเทน ซึ่งปริมาณมีเทนสะสมสามารถผลิตได้ 114.9±45.12 ml g^{-1} VS คิดเป็น 27.6% จากทฤษฎี สาเหตุที่ประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนต่ำกว่าทฤษฎีซึ่งคาดว่าเกิดจากอายุของตะกอนจุลินทรีย์ที่ถูกเก็บไว้นานประมาณ 9 เดือน อายุตะกอนจุลินทรีย์มากขึ้นส่งผลให้กระบวนการทางชีวเคมีของจุลินทรีย์ลดลง มีผลให้การผลิตมีเทนในภาพรวมมีปริมาณที่ต่ำลงไปด้วย ดังนั้นเพื่อให้การผลิตมีเทนได้ใกล้เคียงกับค่าตามทฤษฎี ดังนั้นปัจจัยเรื่องอายุตะกอนจุลินทรีย์เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ควรคำนึงถึง หรือทำการกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์โดยการใส่สารอาหารเพื่อกระตุ้นจุลินทรีย์เก่าให้กลับมาทำงานก่อนนำไปใช้ทดสอบการผลิตมีเทน

การทดลองเพื่อประเมินศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพเมื่อทำการปรับสภาพใบอ้อยของชุดการทดลองใบอ้อย + วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (LW) เปรียบเทียบความแตกต่างกับชุดการทดลองใบอ้อย (L) (โดยวิธี t-test) พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p = 4.56E-14 ; < 0.05) และเมื่อเปรียบเทียบศักยภาพการผลตแก๊สชีวภาพระหว่างชุดการทดลองใบอ้อย + หัวเชื้อเห็ดนางรม (LI) กับใบอ้อย (L) พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p = 7.82424E-13; <0.05) และเมื่อนำข้อมูลของชุดการทดลองการปรับสภาพใบอ้อยของชุดการทดลองใบอ้อย + วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (LW) เปรียบเทียบกับชุดการทดลองใบอ้อย + หัวเชื้อเห็ดนางรม (LI) พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p = 3.33893E-06; <0.05) และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณแก๊สมีเทนที่ผลิตขึ้นบ่งชี้ว่าชุดการทดลองที่มีการปรับสภาพใบอ้อยด้วยกระบวนการทางชีวภาพมีศักยภาพในการผลิตมีเทนได้ปริมาณมากกว่าใบอ้อยชุดการทดลองที่ไม่ได้มีการปรับสภาพ (L) และศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนของชุดใบอ้อย + วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (LW) สามารถตรวจวัดปริมาณแก๊สมีเทนในปริมาณสูงกว่าชุดการทดลองใบอ้อย + หัวเชื้อเห็ดนางรม (LI)

การผลิตแก๊สมีเทนจากวัสดุชีวมวลที่มีการปรับสภาพชุดการทดลองใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLI) และใบอ้อย + วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (LW) ให้ผลผลิตมีเทนสูงที่ 29.0±5.5 L kg^{-1} VS และ 26.6±5.8 L kg^{-1} VS ได้ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 18 เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสองชุดข้อมูล (ด้วยวิธี t-test) พบว่าไม่มีความความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P = 0.99 ; > 0.05) ระบุได้ว่าชุดการทดลองทั้งสองชุด มีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนได้ใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลรีดิวซ์ ความต้องการออกซิเจนทางเคมี และการเปลี่ยนแปลงลิกโนเซลลูโลส นอกจากนี้พบว่าการใช้วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งสามารถเป็นแหล่งจุลินทรีย์เพื่อวัสดุปรับ

สภาพกับวัสดุชีวมวลที่มีการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ในธรรมชาติได้ดีกว่าการใช้หัวเชื้อบริสุทธิ์ (LI) ที่สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้เพียง 9.2±2.7 L kg^{-1} VS

ชุดการทดลองใบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ (NL) ผลิตมีเทนได้ปริมาณสูงสุดที่ 38.3±2.0 L kg^{-1} VS ชุดการทดลองใบอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเป็นตัวแทน (Blank) ของการใช้วัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสโดยตรงในการผลิตมีเทน ผลการทดลองพบว่าสามารถผลิตมีเทนได้ดีกว่าชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพก่อนเข้าระบบผลิตมีเทน รวมถึงชุดการทดลองใบอ้อย (L) ที่ทดสอบในสภาวะเดียวกันกับการปรับสภาพในชุดการทดลองอื่นๆ ให้ปริมาณแก๊สมีเทนน้อยกว่าที่ 3.3±3.4 L kg^{-1} VS สาเหตุเนื่องจากใบอ้อยเหล่านี้ได้มีการจัดเก็บที่อุณหภูมิห้องในพื้นที่เปิดเป็นระยะเวลาประมาณ 18 เดือน ย่อมเกิดสภาวะการย่อยสลายตามธรรมชาติ (การปรับสภาพทางกายภาพ) ทั้งยังตรวจพบเชื้อราตามธรรมชาติเจริญเติบโตอยู่ จุลินทรีย์ตามธรรมชาติแม้จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสที่ต่ำแต่ด้วยระยะเวลากักเก็บนานส่งผลให้เกิดการปรับสภาพใบอ้อยทางชีวภาพด้วย และเมื่อทำการทดลองทำการปรับสภาพความชื้นที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ เป็นขบวนการกระตุ้นการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในธรรมชาติให้เจริญเติบโตได้ดีขึ้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของชุดการทดลองใบอ้อย (L) ดังแสดงใน Figure 16 ระบุได้ว่าจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตบนใบอ้อยมีการใช้น้ำตาลที่เกิดขึ้นเพื่อการเจริญเติบโต ส่งผลให้กลุ่มจุลินทรีย์จากตะกอนเหลือปริมาณน้ำตาลสำหรับนำไปใช้ในการผลิตมีเทนน้อยลง เมื่อเทียบกับชุดการทดลองใบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ (NL) เป็นชุดการทดลองที่เก็บตัวอย่างใบอ้อยไว้ในสภาวะอุณหภูมิปกตินาน 18 เดือน ก่อนทดสอบประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพโดยตรง ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในใบอ้อยชุดนี้ถูกเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาตินำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตได้ในปริมาณน้อย จึงเหลือปริมาณน้ำตาลอย่างเพียงพอสำหรับกระตุ้นให้ตะกอนจุลินทรีย์เกิดกระบวนการทางชีวเคมีเพื่อผลิตแก๊สมีเทนได้สูงกว่า นอกจากนี้ชุดตัวอย่างที่ทำการทดสอบหลังการปรับสภาพวัสดุชีวมวลก่อนเข้าระบบประเมินศักยภาพในการผลิตมีเทนถูกเก็บรักษาสภาพตัวอย่างในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C ก่อนดำเนินการทดสอบ ด้วยเหตุนี้แม้ว่าจุลินทรีย์อยู่ในระยะชะลอการเจริญเติบโต แต่ก็บางส่วนสามารถใช้น้ำตาลอย่างต่อต่อเนื่องทำให้ปริมาณน้ำตาลที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้เพื่อผลิตมีเทนจึงมีปริมาณลดลง

การผลิตแก๊สชีวภาพด้วยวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสต้องผ่านกระบวนการควบคุมสภาวะและปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ ทั้งการควบคุมสัดส่วน C/N สภาวะความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) เป็นต้น โดยเฉพาะกระบวนการเมทาโนจีนีซิสที่เกิดขึ้นได้ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน pH ที่เป็นกลางประมาณ 6.5-7.5 สัดส่วน C/N ประมาณ 30:1 – 25:1 อุณหภูมิขึ้นอยู่กับจุลินทรีย์ในกลุ่มของเมทาโนเจนที่เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic archaea) อุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 30-37 °C (Meegoda et al., 2018) ด้วยสภาวะเริ่มต้นที่เป็นกรดของชุดการทดลองใบอ้อยฆ่าเชื้อ + หัวเชื้อเห็ดบริสุทธิ์ (CLI) และใบอ้อย + วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งอัตราส่วน 1:1 (LW) และผลการปรับสภาพที่เกิดขึ้นอาจก่อให้เกิดการหมักน้ำตาลจนกลายเป็นกรดเร็วเกินไปทำให้เสียสมดุลการผลิตแก๊สมีเทน ในขณะที่ใบอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพลิกโนเซลลูโลส (NL) ลักษณะของใบอ้อยมีคุณสมบัติที่จุลินทรีย์ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากน้ำตาลได้ง่ายทำให้ค่อยๆมีการปลดปล่อยน้ำตาลออกมาและรักษาสมดุลในการผลิตมีเทนได้ดี

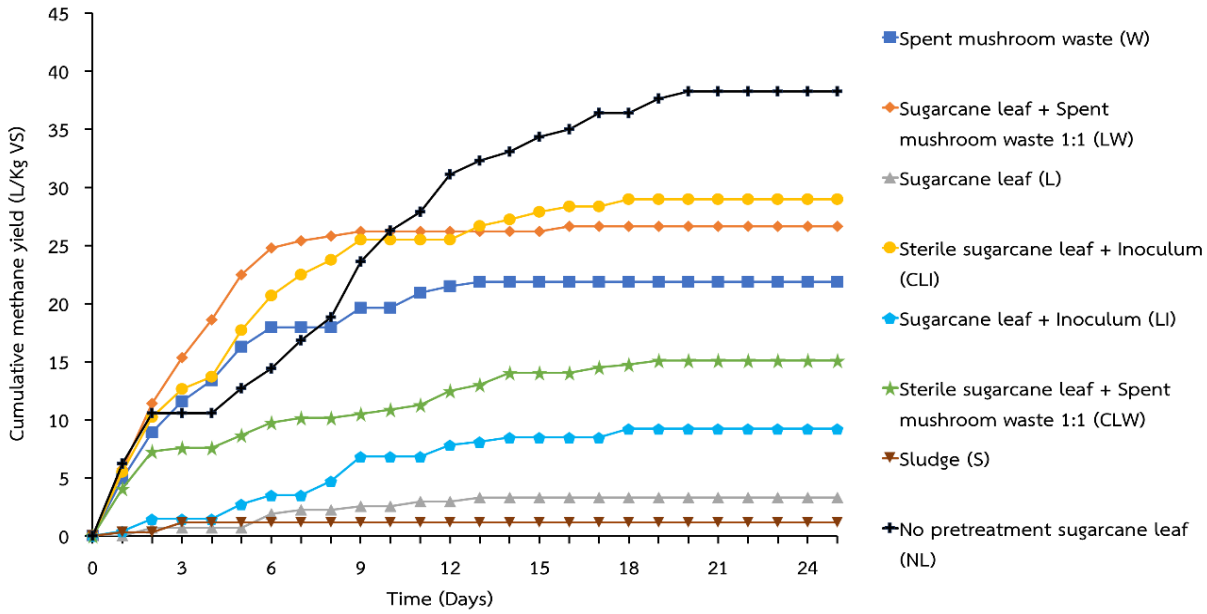


Figure 18 The comparative cumulative methane production of six experimental treatments.

4 สรุป

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการปรับสภาพวัสดุชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสและการผลิตแก๊สมีเทนโดยอาศัยวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งเพื่อเป็นแหล่งจุลินทรีย์สำหรับปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งลิกโนเซลลูโลสประเภทใบอ้อยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการนำหัวเชื้อเห็ดนางรมบริสุทธิ์เป็นแหล่งจุลินทรีย์เพื่อปรับสภาพ ผลการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ได้ 43.66±16.69% และ 44.36±11.34% เพิ่มปริมาณความต้องการออกซิเจนทางเคมี 84.27±22.27% และ 66.11±1.85% และปริมาณการผลิตมีเทนสะสมที่ 29.0±5.5 L kg^{-1} VS และ 26.6±5.8 L kg^{-1} VS ตามลำดับ ซึ่งระบุได้ว่าวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งสามารถนำมาใช้สร้างมูลค่าเพิ่มเพื่อทดแทนจุลินทรีย์ในกระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพของวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสได้ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการผลิตแก๊สชีวภาพของใบอ้อยที่นำมาปรับสภาพด้วยวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งชี้ให้เห็นถึงความสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ดีกว่าใบอ้อยที่ไม่ได้มีการปรับสภาพที่สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้เพียง 3.3±3.4 L kg^{-1} VS รวมทั้งจุดแข็งในการแข่งขันกับการใช้หัวเชื้อบริสุทธิ์เพื่อปรับสภาพใบอ้อยที่สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้เพียง 9.2±2.7 L kg^{-1} VS

อย่างไรก็ตามแม้ว่าการปรับสภาพวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสสามารถช่วยให้จุลินทรีย์ย่อยสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสและเปลี่ยนเป็นน้ำตาลในรูปแบบที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการชีวเคมีของเซลล์ได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าการควบคุมสภาวะในขั้นตอนการผลิตแก๊สชีวภาพไม่เหมาะสม การปรับสภาพวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสอาจก่อให้เกิดการหมักที่รวดเร็วเกินไปและทำให้สภาวะในการผลิตแก๊สชีวภาพเสียสมดุล แนวทางการส่งเสริมการใช้วัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งเพื่อเป็นแหล่งจุลินทรีย์ใช้การปรับสภาพวัสดุชีวมวลควรคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างได้แก่ การศึกษาถึงสัดส่วนของวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งต่อวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่เหมาะสมที่สามารถแข่งขันกับจุลินทรีย์ตามธรรมชาติได้ ปัจจัยเกี่ยวกับอายุของวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้ง ปัจจัยของชนิดสายพันธุ์ของเห็ดที่ใช้ และนอกจากนี้การขยายขนาดการวิจัยเพื่อศึกษาสภาวะที่ใช้ควบคุมกระบวนการปรับสภาพวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสให้มีประสิทธิภาพและสามารถประยุกต์ใช้กับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นๆ ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ รวมถึงความสำคัญในการควบคุมสมดุลในขั้นตอนการผลิตแก๊สชีวภาพ เพื่อให้การผลิตแก๊สชีวภาพเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว

การนำวัสดุเพาะเห็ดเหลือทิ้งมาใช้เป็นแหล่งจุลินทรีย์สำหรับปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเป็นหนึ่งในทางเลือกของการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้งานให้เกิดประโยชน์ที่สามารถต่อยอด สร้างมูลค่าเพิ่ม ทั้งในแง่การใช้ประโยชน์ด้านพลังงานทดแทน เช่น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ เป็นวัตถุดิบในกระบวนการไพโรไลซิส หรือการเน้นในเชิงอุตสาหกรรม ได้แก่ การสกัดเอนไซด์หรือสารชีวเคมีเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ ก่อนการนำวัสดุเหลือทิ้งการการเกษตรเหล่านี้ใช้ประโยชน์เป็นวัสดุคลุมดินหรือปรับปรุงดิน ช่วยลดปัญหาการกำจัดที่ไม่ถูกวิธี ส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากระบบนิเวศทางบกอย่างครบวงจรและยั่งยืน

5 กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาการปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสด้วยกระบวนการทางชีวภาพเพื่อการผลิตแก๊สชีวภาพ สามารถดำเนินงานวิจัยจนบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยได้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (ววน.) นอกจากนี้ขอขอบพระคุณท่านผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยและผู้บริหารทุกท่านที่ให้การสนับสนุนโครงการ พร้อมทั้งข้อคิดเห็นและคำแนะนำ เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยในด้านต่าง ๆ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6 เอกสารอ้างอิง

ชัยวัฒน์ โพธิ์ทอง, ปาจรีย์ ทองสนิท. 2555. ผลของการเผาอ้อยต่อคุณภาพอากาศและสมบัติของอ้อย. วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยนเรศวร. 7(1), 8-16.

ณัฐพล เสวตบุตร, ดาวรุ่ง สังข์ทอง, นภวรรณ รัตสุข, อุมารัจน์ สันติสุขเกษม. 2566. ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนและจลนพลศาสตร์ของการหมักร่วมระหว่าง เศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม.

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล. 2565. ผลกระทบของอ้อยไฟไหม้ต่ออุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทยผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมและผู้ที่เกี่ยวข้อง, แหล่งข้อมูล https://www.kubotasolutions.com/knowledge/sugar_cane/detail/376

Abraham, A., Mathew, A.K., Park, H., Choi, O., Sindhu, R., Parameswaran, B., Pandey, A., Park, J.H., Sang, B.I. 2020. Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass. Bioresource Technology. 301, 122725.

Agrawal, R., Verma, A., Singhania, R. R., Varjani, S., Di Dong, C., Kumar Patel, A. 2021. Current understanding of the inhibition factors and their mechanism of action for the lignocellulosic biomass hydrolysis. Bioresource Technology. 332, 125042.

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF). 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater. (23rd ed.). American Public Health Association.

AOAC International. 2000. Official methods of analysis of AOAC International. (17th ed.). AOAC International.

ASTM International. 2015. ASTM D7582-15: Standard test methods for proximate analysis of coal and coke by macro thermogravimetric analysis. ASTM International.

ASTM International. 2016. ASTM D5373-16: Standard test methods for instrumental determination of carbon, hydrogen, and nitrogen in laboratory samples of coal. ASTM International.

ASTM International. 2018. ASTM D4239-18: Standard test method for sulfur in the analysis sample of coal and coke using high-temperature tube furnace combustion methods. ASTM International.

ASTM International. 2019. ASTM D5865-19: Standard test method for gross calorific value of coal and coke. ASTM International.

Blanchette, R. A. 1991. Delignification by wood-decay fungi. Annual Review of Phytopathology. 29, 381–398.

Bugg, T.D., Ahmad, M., Hardiman, E.M. and Rahmanpour, R. 2011. Pathways for degradation of lignin in bacteria and fungi. Natural product reports. 28(12), 1883-1896.

Dobre, P., Nicolae, F. and Matei, F. 2014. Main factors affecting biogas production: an overview. Romanian Biotechnological Letters. 19(3), 9283-9296.

Durán-Aranguren, D. D., Meléndez-Melo, J. P., Covo-Ospina, M. C., Díaz-Rendón, J., Reyes-Gutiérrez, D. N., Reina, L. C., Durán-Sequeda, D., Sierra, R. 2021. Biological pretreatment of fruit residues using the genus *Pleurotus*: A review. Bioresource Technology Reports. 16, 100849.

Filer, J., Ding, H. H., Chang, S. 2019. Biochemical methane potential (BMP) assay method for anaerobic digestion research. Water. 11(5), 921.

Fox, M.H., Noike, T. Ohki, T. 2003. Alkaline subcritical-water treatment and alkaline heat treatment for the increase in biodegradability of newsprint waste. Water science and technology. 48(4), 77-84.

Goering, H.K., P.J. Van Soest. 1970. Forage fiber analysis (apparatus, reagents, procedures, and some applications). USDA Agricltural Research Service. Handbook number 379 as modified by D.R. Mertens (1992, Personal Communication).

Gonçalves, C., Gomes, N., Rodriguez-Jasso, R., Teixeira, J., Belo, I. 2010. Adaptation of dinitrosalicylic acid method to microtiter plates. Analytical methods. 2, 2046-2048.

Hubacher, M.H.; Doernberg, S.; Horner, A. 1953. Laxatives: Chemical Structure and Potency of Phthaleins and Hydroxyanthraquinones. Journal of the American Pharmaceutical Association. 42(1), 23-30.

International Organization for Standardization. 2015. ISO 18134-3: Solid biofuels — Determination of moisture content — Oven dry method — Part 3: Moisture in general analysis sample. ISO.

International Organization for Standardization. 2021. ISO 21656: Solid biofuels — Determination of ash content of fuel pellets. ISO.

Isroi, Millati, R., Syamsiah, S., Niklasson, C., Cahyanto, M. N., Lundquist, K., Taherzadeh, M. J. 2011. Biological pretreatment of lignocelluloses with white-rot fungi and its applications: A review. BioResources. 6(4), 5224-5259.

Kannah, Y., Kavitha, S., Sivashanmugam, P. and Kumar, G. 2021. Ultrasonic induced mechanoacoustic effect on delignification of rice straw for cost effective biopretreatment and biomethane recovery. Sustainable Energy & Fuels. 5(6), 1832-1844.

Khademimoshgenani, N., Green, S. A. 2023. Synthesis and Characterization of Humic/Melanin-like Compounds by Oxidative Polymerization of Simple Aromatic Precursors. Water. 15(7), 1400.

Khan, M.U., Usman, M., Ashraf, M.A., Dutta, N., Luo, G., Zhang, S. 2022. A review of recent advancements in pretreatment techniques of lignocellulosic materials for biogas production: Opportunities and Limitations. Chemical Engineering Journal Advances. 100263.

Ma, X., Yan, S., Wang, M. 2025. Spent mushroom substrate: A review on present and future of green applications. Journal of Environmental Management. 373, 123970.

Manmai, N., Unpaprom, Y., Ramaraj, R. 2021. Bioethanol production from sunflower stalk: application of chemical and biological pretreatments by response surface methodology (RSM). Biomass Conversion and Biorefinery. 11(5), 1759-1773.

Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., Wang, L. B. 2018. A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. Int J Environ Res Public Health. 15(10).

Mertens D. R. 2002. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in feeds with refluxing in beakers or crucibles: collaborative study. Journal of AOAC International. 85(6), 1217–1240.

Möller J. 2009. Gravimetric Determination of Acid Detergent Fiber and Lignin in Feed: Interlaboratory Study. Journal of AOAC INTERNATIONAL. 92(1), 74–90.

Mustafa, A. M., Poulsen, T. G., Sheng, K. 2016. Fungal pretreatment of rice straw with *Pleurotus ostreatus* and *Trichoderma reesei* to enhance methane production under solid-state anaerobic digestion. Applied Energy. 180, 661–671.

Nie, H., Wang, Z., You, J., Zhu, G., Wang, H., Wang, F. 2020. Comparison of in vitro digestibility and chemical composition among four crop straws treated by Pleurotus ostreatus. Asian-Australasian journal of animal sciences. 33(1), 24–34.

Pandey, V. K., Singh, M. P. 2014. Biodegradation of wheat straw by Pleurotus ostreatus. Cellular and Molecular Biology. 60(5), 29-34.

Pommier, S., Llamas, A.M., Lefebvre, X. 2010. Analysis of the outcome of shredding pretreatment on the anaerobic biodegradability of paper and cardboard materials. Bioresource Technology. 101(2), 463-468.

Rouches, E., Herpoël-Gimbert, I., Steyer, J.P., Carrere, H. 2016. Improvement of anaerobic degradation by white-rot fungi pretreatment of lignocellulosic biomass: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 59, 179-198.

Shakir, M. A., Ahmad, M. I. 2024. Bioproduct advances: Insight into failure factors in mycelium composite fabrication. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 18(5), 1739–1754.

Taherzadeh, M.J., Karimi, K. 2008. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. International journal of molecular sciences. 9(9), 1621-1651.

Teghammar, A., Yngvesson, J., Lundin, M., Taherzadeh, M.J., Horváth, I.S. 2010. Pretreatment of paper tube residuals for improved biogas production. Bioresource technology. 101(4), 1206-1212.

Usman, M., Ren, S., Ji, M., Sompong, O., Qian, Y., Luo, G., Zhang, S. 2020. Characterization and biogas production potentials of aqueous phase produced from hydrothermal carbonization of biomass–Major components and their binary mixtures. Chemical Engineering Journal. 388, 124201.

Usman, M., Shi, Z., Ji, M., Ren, S., Luo, G., Zhang, S. 2021. Microbial insights towards understanding the role of hydrochar in alleviating ammonia inhibition during anaerobic digestion. Chemical Engineering Journal. 419, 129541.

Van Soest, P.J., J.B. Robertson, B.A. Lewis. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. J. Dairy Science. 74, 3583-3597.

Wiesnerová, L., Hřebečková, T., Jablonský, I., Koudela, M. 2023. Effect of different water contents in the substrate on cultivation of Pleurotus ostreatus Jacq. P. Kumm. Folia Horticulturae. 35(1), 25–31.

Zhao, J., Ge, X., Vasco-Correa, J., Li, Y. 2014. Fungal pretreatment of yard trimmings for enhancement of methane yield from solid-state anaerobic digestion. Bioresource Technology. 156, 176–181.

Thai Society of Agricultural Engineering Journal Vol. 31 No. 2 (2025), 60-75

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ปีที่ 31 ฉบับที่ 2 (2568) 60-75
Available online at www.tsae.asia

บทความวิจัย

ISSN 1685-408X

เทคโนโลยีการตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืชในการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยว: บทความปริทัศน์

Grain quality monitoring technologies in post-harvest storage: a review

ชูเกียรติ โชติกเสถียร[1], อธิวัฒน์ บุญมี[2], วรญา เนื่องมัจฉา[2], วัชรพล ชยประเสริฐ[3]*

Chukiat Chotikasatian[1], Atiwat Boonmee[2], Woraya Neungmatcha[2], Watcharapol Chayaprasert[3]*

[1]สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม, 73000

[1]Industrial Education, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, 73000

[2]ภาควิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

[2]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University - Kamphaeng Saen Campus, Nakon Pathom, 73140

[3]ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

[3]Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University - Kamphaeng Saen Campus, Nakon Pathom, 73140

*Corresponding author: Tel.: +66–34–351897 ext 7101, E-mail: fengwpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความปริทัศน์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอภาพรวมของความก้าวหน้าและการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจติดตามคุณภาพของเมล็ดธัญพืชในระหว่างการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยว โดยมีเนื้อหากล่าวถึงปัจจัยเสี่ยงสำคัญที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของเมล็ด ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นเมล็ด, แมลงศัตรูในโรงเก็บ และเชื้อรา พร้อมทั้งให้รายละเอียดของระบบตรวจติดตามสมัยใหม่ที่อาศัยโครงข่ายเซนเซอร์เพื่อวัดค่าปัจจัยเหล่านี้แบบเวลาจริง ข้อมูลที่ได้จากระบบดังกล่าวสามารถถูกนำมาใช้ประเมินความเสี่ยง เพื่อช่วยในการตัดสินใจใช้มาตรการแทรกแซงเพื่อควบคุมและ/หรือยับยั้งปัญหาที่สร้างความเสียหายต่อเมล็ดอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียคุณภาพของผลผลิต และยังเป็นประโยชน์ต่อการจัดการเมล็ดธัญพืชอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การเก็บรักษาเมล็ดธัญพืช, การตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช, การจัดการหลังการเก็บเกี่ยว

Abstract

This review article provides an overview of the advances and developments in technologies used for monitoring the quality of cereal grains during post-harvest storage. It discusses the key risk factors that contribute to grain deterioration, including grain temperature and moisture content, storage insects and fungi. Furthermore, it details modern monitoring systems that use sensor networks to measure these factors in real-time. The data obtained from such systems can be used to assess risks, helping inform decisions on effective intervention measures to control and/or prevent problems that damage the grains. This, in turn, helps reduce product-quality losses and is beneficial for the sustainable management of cereal grains.

Keywords: grain storage, grain quality monitoring, postharvest management

1 บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่า ธัญพืชสำหรับการบริโภค (commodity grain) เช่น ข้าว, ข้าวโพด และถั่วต่างๆ นับเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญ ทั้งในมิติของความมั่นคงอาหารและเศรษฐกิจ ในระหว่างการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยว (post-harvest storage) ธัญพืชมักประสบปัญหาคุณภาพลดลงและการสูญเสียทั้งปริมาณและคุณภาพอันเนื่องมาจากปัจจัยเสี่ยงหลายประการ เช่น ความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดที่ไม่เหมาะสม, การเข้าทำลายของแมลงศัตรูในโรงเก็บ (stored-product pest insect) และการเกิดเชื้อรา (mold) (Proctor, 1994; Gwinner et al., 1996) เป็นต้น ซึ่งภายใต้สภาพอากาศเขตร้อนชื้นอย่างประเทศไทย กระบวนการเหล่านี้จะรุนแรงขึ้นหากไม่มีมาตรการควบคุมที่เหมาะสม

Received: August 23, 2025
Revised: September 21, 2025
Accepted: December 01, 2025
Available online: December 22, 2025

● อุณหภูมิ

เมล็ดธัญพืชมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ บรรยากาศที่อุณหภูมิสูงสามารถกระตุ้นกิจกรรมทางชีวภาพภายในเมล็ด เช่น กระบวนการหายใจ ซึ่งส่งผลให้ความชื้นภายในเพิ่มขึ้นและเร่งการเจริญเติบโตของเชื้อรา ในทางกลับกัน ในสภาวะอากาศที่อุณหภูมิต่ำเกินไป อาจเกิดการควบแน่น (condensation) ภายในไซโล ซึ่งนำไปสู่สภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการเน่าเสีย (spoilage)

● ความชื้น

ปริมาณความชื้นในเมล็ดธัญพืชเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเก็บรักษา ระดับความชื้นที่เหมาะสมสำหรับเมล็ดธัญพืชส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 12-15%$_{wb}$ (เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก) อย่างไรก็ตาม ความผันผวนของความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศภายนอกมักเป็นข้อจำกัดในการรักษาสภาวะที่เหมาะสม หากเมล็ดธัญพืชถูกเก็บรักษาในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง จะส่งผลให้ความชื้นเมล็ดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเน่าเสียเช่นเดียวกัน

● แมลงศัตรูในโรงเก็บ

หากไม่มีการบริหารจัดการอย่างเหมาะสม แมลงศัตรูในโรงเก็บ เช่น มอดหัวป้อม (*Rhyzopertha dominica*), ด้วงงวงข้าว (*Sitophilus oryzae*) และมอดแป้ง (*Tribolium castaneum*) เป็นต้น สามารถระบาดในธัญพืชได้อย่างรวดเร็ว แมลงเหล่านี้จะกัดกินเมล็ดธัญพืชโดยตรง และการระบาดของแมลงยังเร่งกระบวนการเกิดเชื้อราและการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดอีกด้วย

● เชื้อรา

เชื้อราสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง และเป็นปัจจัยสำคัญของการเกิดการเน่าเสียและเสื่อมคุณภาพของเมล็ดธัญพืช นอกจากนี้ เชื้อรายังเป็นสาเหตุของการปนเปื้อนสารไมโคทอกซิน (mycotoxin) โดยเฉพาะอะฟลาทอกซิน (aflatoxin) ซึ่งเป็นสารพิษก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ เมื่อเมล็ดที่มีการปนเปื้อนถูกนำไปใช้ในห่วงโซ่อาหาร ทั้งในรูปแบบอาหารโดยตรงหรือวัตถุดิบสำหรับผลิตอาหารสัตว์

ปัจจัยความเสี่ยงดังกล่าว เมื่อผนวกเข้ากับแนวโน้มความต้องการผลผลิตธัญพืชในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การพึ่งพาทรัพยากร, วิธีการ และโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการจัดเก็บแบบดั้งเดิม ซึ่งมักอาศัยแรงงานคนและสภาวะอากาศธรรมชาติ ไม่อาจรองรับต่อปริมาณผลผลิตที่เพิ่มขึ้นและความซับซ้อนของกระบวนการในอุตสาหกรรมได้

ตลอดช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา การศึกษาวิจัย เทคโนโลยี และนวัตกรรมด้านการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืช (grain storage) ได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยมีเป้าหมายเพื่อลดการสูญเสียและรักษาคุณภาพของเมล็ดให้ยาวนานที่สุด ระบบตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช (grain quality monitoring system) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อเฝ้าระวังปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพเมล็ด เช่น อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ภายในไซโล (silo) หรือโรงเก็บแนวราบ (flat storage) (Flu-Tech, 2025a) นอกจากนี้ ในระบบขั้นสูง ยังสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ภายในโรงเก็บ (Eye-Grain, 2025a) และการตรวจติดตามความหนาแน่นประชากรแมลงศัตรูในโรงเก็บ (stored-insect population) ด้วย (Neethirajan and Jayas, 2007; Flinn et al., 2009; Jian et al., 2014) นอกจากนี้ เทคโนโลยีระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในกองเมล็ดธัญพืช เช่น ระบบระบายอากาศ (aeration systems) (Navarro and Noyes, 2002) และเครื่องเป่าลมเย็น (grain chillers) (CGrain, 2025) ก็มีบทบาทสำคัญในการรักษาอุณหภูมิและความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ซึ่งการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในกองเมล็ดธัญพืชให้ได้อย่างมีประสิทธิผลจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากระบบตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช

ด้วยเหตุนี้ บทความปริทัศน์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอความก้าวหน้าและพัฒนาการในปัจจุบันของเทคโนโลยีด้านการตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืชในการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวในภาคอุตสาหกรรมการเกษตรสมัยใหม่ เพื่อถ่ายทอดให้ผู้อ่านได้เห็นถึงแนวโน้มของเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม ตลอดจนส่งเสริมการวิจัยและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเหล่านี้ให้เกิดประสิทธิภาพในการจัดการอย่างยั่งยืน

2 การตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช (grain quality monitoring)

Brooker et al. (1974) อธิบายกระบวนการหายใจของเมล็ดและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ รวมถึงแมลง ไร และจุลินทรีย์ต่างๆ ภายในกองธัญพืช ดังแสดงในสมการที่ 1 กระบวนการหายใจนี้เป็นการสลายสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต ไขมัน หรือโปรตีนโดยใช้ออกซิเจน ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานในรูปของความร้อน

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 677.0\ kcal/mole \quad (1)$$

โดยทั่วไป เมล็ดธัญพืชที่มีความชื้นต่ำและจัดเก็บในสภาพปลอดภัยจะมีอัตราการหายใจต่ำมาก จนแทบไม่มีผลต่อการเกิดความร้อน แต่จุลินทรีย์จำพวกเชื้อราและแบคทีเรียจะมีอัตราการหายใจที่สูงกว่าอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อความชื้นในกองเมล็ดธัญพืชเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีการเน่าเสียเกิดขึ้น ในกรณีที่กองเมล็ดธัญพืชมีความชื้นสูง เชื้อราจะกลายเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนหลัก โดยมีสัดส่วนการสร้างความร้อนสูงถึง 85–95% ของทั้งหมด นอกจากนี้ ถึงแม้ว่ากองเมล็ดธัญพืชจะมีความชื้นอยู่ช่วงที่ปลอดภัย แมลงที่เข้าทำลายเมล็ดธัญพืชยังสามารถเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนได้ ทั้งความร้อนและน้ำที่เกิดขึ้นจาก

กระบวนการหายใจนี้ ยังสามารถส่งผลให้ความชื้นและอุณหภูมิของกองเมล็ดธัญพืชเพิ่มสูงขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นปัจจัยที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของแมลงและจุลินทรีย์ และนำไปสู่การเสื่อมคุณภาพของผลผลิตในที่สุด (Jian and Jayas, 2012)

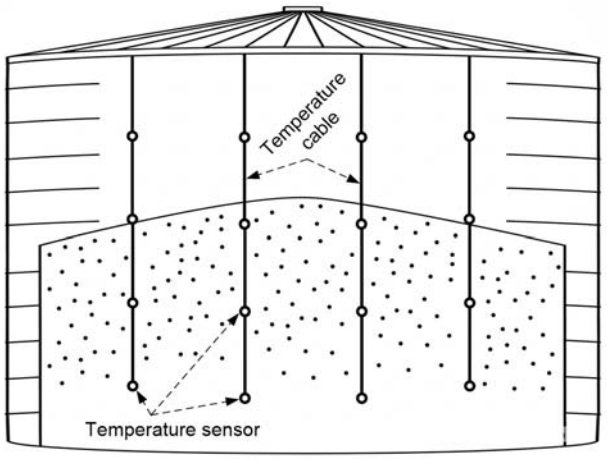
ด้วยเหตุผลที่กล่าวไว้ข้างต้น การตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืชเป็นกิจกรรมที่ไม่สามารถละเลยได้ในกระบวนการเก็บรักษา ในอดีต การตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืชมักดำเนินการโดยใช้แรงงานคนเป็นผู้ตรวจสอบสุ่มชักตัวอย่างจากกองเมล็ดธัญพืช และประเมินด้วยสายตา ผิวสัมผัส หรือกลิ่น เป็นต้น ต่อมา จึงได้มีการพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์แบบพกพาที่ช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานทำการวัดคุณสมบัติเมล็ดได้สะดวกขึ้น เช่น หลาววัดอุณหภูมิ (temperature probe), เครื่องวัดความชื้นเมล็ด (moisture tester) และเครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 monitor) (Figure 1) ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์เหล่านี้ยังคงมีการใช้งานอยู่ อย่างไรก็ตาม การใช้แรงงานคนยังคงมีข้อด้อยคือ การสิ้นเปลืองเวลา ความผิดพลาดของการจดบันทึกข้อมูล ความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุต่อผู้ปฏิบัติงาน อีกทั้งการบันทึกข้อมูลไม่สามารถทำได้อย่างครอบคลุม และต่อเนื่อง

Figure 1 Example of a handheld grain temperature probe (left), moisture tester (upper-right) and carbon dioxide monitor (lower-right).

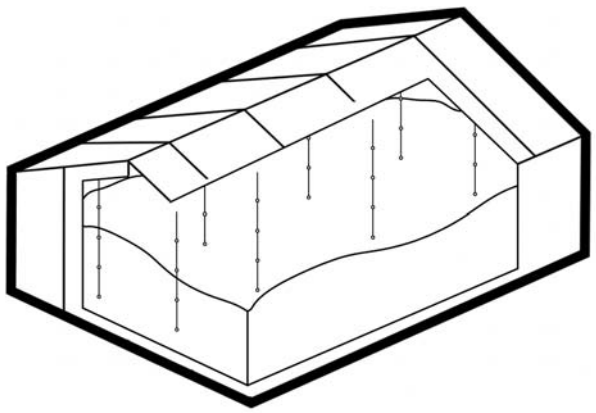
ในปัจจุบัน สำหรับการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืชปริมาณมากในสถานประกอบการหรือโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ จะมีการใช้งานระบบตรวจติดตามที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายเซนเซอร์ (sensor network) ซึ่งจะมีการตรวจติดตามอุณหภูมิ และอาจมีการวัดค่าความชื้นสัมพันธ์ และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมด้วย นอกจากนี้ ระบบยังมีความสามารถในการแสดงผลแบบเวลาจริง (real-time) และบันทึกผลโดยอัตโนมัติ ระบบดังกล่าวมักถูกติดตั้งอย่างถาวรเข้ากับโครงสร้างการจัดเก็บเมล็ดธัญพืช อาทิ ไซโลคอนกรีต, ไซโลเหล็ก หรือโรงเก็บขนาดใหญ่ ผู้ผลิตบางรายยังได้พัฒนาระบบที่มีความสามารถในการสื่อสารไร้สาย และมีเครื่องมือบริหารจัดการระบบผ่านอินเทอร์เน็ต ซึ่งช่วยให้สามารถติดตามคุณภาพของเมล็ดธัญพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา

2.1 การตรวจติดตามอุณหภูมิเมล็ดธัญพืช (grain temperature)

Jian and Jayas (2012) และ Singh and Fielke (2017) อธิบายสรุปภาพรวมการติดตั้งระบบตรวจติดตามอุณหภูมิในไซโลไว้ดังแสดงใน Figure 2a ระบบดังกล่าวมักเป็นระบบพื้นฐานที่มีการติดตั้งโดยทั่วไปในไซโลหรือโรงเก็บ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ เคเบิลวัดอุณหภูมิ (temperature cable) ซึ่งภายในมีเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (temperature sensor) ติดตั้งอยู่เป็นระยะๆ ตลอดความยาวของเคเบิล เคเบิลวัดอุณหภูมิจะถูกติดตั้งเป็นโครงข่ายภายในแต่ละไซโล และมักเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์รวมและรับส่งสัญญาณ (data transmission hub) หรือฮับ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปยังอุปกรณ์ประมวลผลกลาง ซึ่งระบบส่วนใหญ่มักใช้เป็นคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (personal computer) หน้าที่หลักของคอมพิวเตอร์ดังกล่าวคือ การประมวลผลและแสดงค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์ทั้งหมดในไซโล อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็น UI (user interface) สำหรับรับคำสั่งต่างๆ จากผู้ใช้งาน ในบางระบบ อุปกรณ์ประมวลผลกลางยังอาจทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบที่เกี่ยวข้อง เช่น ระบบระบายอากาศ (aeration system) หรือ เครื่องลดอุณหภูมิเมล็ดธัญพืช (grain chiller) ด้วย นอกจากนี้ ระบบตรวจติดตามสมัยใหม่ยังมีแพลตฟอร์มคลาวด์ (cloud platform) และความสามารถทำงานกับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (internet of things – IoT) ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลและควบคุมระบบได้จากทุกที่ทุกเวลา ระบบตรวจติดตามอุณหภูมิที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นยังสามารถติดตั้งในโรงเก็บแนวราบได้เช่นกันดังตัวอย่างใน Figure 2b



(a)



(b)

Figure 2 Typical installations of temperature cables in (a) a grain silo and (b) a flat storage.

เซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ในเคเบิลวัดอุณหภูมิมีหลายประเภท ซึ่งในอดีตเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) และเทอร์มิสเตอร์ (thermistor) เป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ได้ความนิยมใช้ในระบบตรวจติดตามอุณหภูมิในการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืช เนื่องจากมีราคาถูก ติดตั้งง่าย และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในกองเมล็ดธัญพืชได้รวดเร็วเพียงพอ ด้วยวิวัฒนาการด้านการผลิตชิปวงจรรวม (integrated circuit chip) หรือ ไอซีชิป (IC chip) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (digital temperature sensor) ซึ่งมีลักษณะเป็นไอซีชิป เช่น DS1820 (Songwang, 1999) หรือ DS18B20 (Yuliang, 2012) เป็นต้น จึงได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบการจัดเก็บเมล็ดธัญพืชปริมาณมาก ข้อได้เปรียบของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิทัลคือ มีความแม่นยำที่สูงกว่า, ทนต่อสัญญาณรบกวน (noise) และมีฟอร์มแฟกเตอร์ (form factor) ที่เล็กลง จึงทำให้ผู้ผลิตสามารถออกแบบโครงข่ายเซนเซอร์สื่อสารข้อมูลระหว่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และต้นทุนต่ำลง โดยทั่วไปเซนเซอร์ดิจิทัลให้ความแม่นยำของการวัดอยู่ในช่วงประมาณ ±0.5°C ซึ่งสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับเทอร์โมคัปเปิล การเชื่อมต่อเซนเซอร์ดิจิทัลหลายตัวเข้าเป็นเคเบิลวัดอุณหภูมิ และการเชื่อมต่อเคเบิลหลายเส้นเข้าเป็นโครงข่ายสามารถทำได้โดยใช้จำนวนสายสัญญาณที่น้อยกว่าโครงข่ายที่ใช้เทอร์โมคัปเปิลหรือเทอร์มิสเตอร์ นอกจากนี้ การใช้งานเทอร์โมคัปเปิลหรือเทอร์มิสเตอร์จำเป็นต้องมีอุปกรณ์แปลงจากสัญญาณแอนะล็อก (analog) เป็นสัญญาณดิจิทัล ในขณะที่การใช้เซนเซอร์ดิจิทัลไม่มีความจำเป็น จึงทำให้โครงข่ายเซนเซอร์ดิจิทัลโดยรวมมีความซับซ้อนน้อยลงและมีประสิทธิภาพในการสื่อสารรับส่งข้อมูลสูงขึ้น

สัญญาณบ่งชี้หนึ่งของการเกิดการเน่าเสียคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในกองเมล็ดธัญพืช ซึ่งบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างผิดปกตินี้เรียกว่า ฮอตสปอต (hot spot) โดยในบางกรณีอาจเพิ่มสูงถึง 64°C (Sinha and Wallace, 1965) ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ สาเหตุหลักของการเกิดความร้อนสะสมนี้มาจากกิจกรรมทางชีวภาพ ได้แก่ การเข้าทำลายของแมลง และการเกิดเชื้อรา โดยธรรมชาติแล้ว กองเมล็ดธัญพืชเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี กล่าวคือ กองเมล็ดธัญพืชมีค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ต่ำ (Jian and Jayas, 2012) ดังนั้น เมื่อเกิดความร้อนขึ้นในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ความร้อนนั้นจะถูกกักเก็บและสะสมอยู่เฉพาะที่จนกลายเป็นฮอตสปอต

การตรวจติดตามอุณหภูมิเป็นเครื่องมือหนึ่งในการตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช ทำหน้าที่เป็นระบบเตือนภัยล่วงหน้าช่วยในการตรวจหาฮอตสปอตที่กำลังก่อตัวในช่วงเริ่มต้น เพื่อให้สามารถจัดการปัญหาได้ทันเวลาก่อนที่ความเสียหายจะลุกลามเป็นวงกว้าง และยังเป็นหนึ่งในเครื่องมือสำคัญสำหรับประเมินแนวโน้มการเสื่อมสภาพในอนาคต และคาดการณ์ระยะเวลาการเก็บรักษาที่ปลอดภัย (safe storage duration) ของเมล็ดธัญพืชได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำข้อมูลอุณหภูมิมาวิเคราะห์ร่วมกับปัจจัยอื่น เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความหนาแน่นประชากรแมลงภายในไซโลหรือโรงเก็บ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ข้อมูลดังกล่าวเพื่อควบคุมระบบระบายอากาศ (aeration system) หรือระบบควบคุมอุณหภูมิภายในไซโล

เพื่อให้การตรวจติดตามอุณหภูมิครอบคลุมปริมาตรทั้งหมดของกองเมล็ดธัญพืชและตรวจพบความผิดปกติเป็นไปอย่างแม่นยำและรวดเร็ว การกำหนดจำนวนและตำแหน่งของเซนเซอร์และเคเบิลวัดอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณา (Standardization Administration of China, 2024) โดยทั่วไปจุดตรวจวัด (sensing point) ต้องกระจายตัวสม่ำเสมออย่างทั่วถึงภายในกองเมล็ดธัญพืช โดยเซนเซอร์จะถูกติดตั้งเป็นระยะห่างเท่าๆ กันตลอดความยาวของเคเบิล ในอุดมคติ จุดตรวจวัดแต่ละจุดควรอยู่ห่างกันไม่เกิน 0.5 m แต่การติดตั้งเซนเซอร์และเคเบิลวัดอุณหภูมิที่ระยะดังกล่าวเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เนื่องจากข้อจำกัดด้านต้นทุน และความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างไซโลหรือโรงเก็บ (Singh et al., 1983; Jian and Jayas, 2012) โดยทั่วไป ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์วัดอุณหภูมิบนเคเบิลมักอยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 m หรือในกรณีที่ต้องตรวจวัดอย่างละเอียดระยะดังกล่าวอาจใกล้ถึง 60 cm (OPISystems, 2025a) จำนวนของเคเบิลวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งภายในไซโลจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโล หรือพื้นที่ของโรงเก็บ Table 1 สรุปตัวอย่างคำแนะนำจำนวนเคเบิลวัดอุณหภูมิที่ควรติดตั้งของผู้ผลิตบางราย (Rolfes @ Boone, 2009; Eltrum Systems, 2025; Flu-Tech, 2025b)

Table 1 Recommended number of temperature cables for different silo diameters.

Silo diameter	Number of cables
< 6 m (small)	1
6-12 m (medium)	3-5
12-20 m (large)	10-12
> 20 m	> 12 Requires specific analysis based on volume and risk

2.2 การตรวจติดตามความชื้นเมล็ดธัญพืช (grain moisture content)

นอกจากอุณหภูมิแล้ว ความชื้นเมล็ดธัญพืชเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความสามารถในการเก็บรักษา เชื้อรา (fungi) ส่วนใหญ่จะชะลอการเจริญเติบโตลงในสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 70% ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง EMC (equilibrium moisture content - ความชื้นสมดุล) และ ERH (equilibrium relative humidity - ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล) สำหรับเมล็ดธัญพืชส่วนใหญ่ ERH ที่ 70% นี้จะเกิดขึ้นที่ความชื้นเมล็ดประมาณ 13% ที่อุณหภูมิการเก็บรักษาปกติ (Navarro et al., 2012) จากแผนภาพของ FAO (2011) ดังแสดงใน Figure 3 ชี้ให้เห็นถึงบริเวณช่วงอุณหภูมิและความชื้นเมล็ดธัญพืชที่เหมาะสมและปลอดภัยสำหรับการเก็บรักษา จะเห็นได้ว่า หากความชื้นและอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมจะก่อให้เกิดความเสียหายได้ทั้ง การเกิดความร้อนจากการเข้าทำลายของแมลง (insect heating), การลดลงของอัตราการงอก (fall in germination) หรือการเกิดความร้อนจากเชื้อรา (fungal heating)

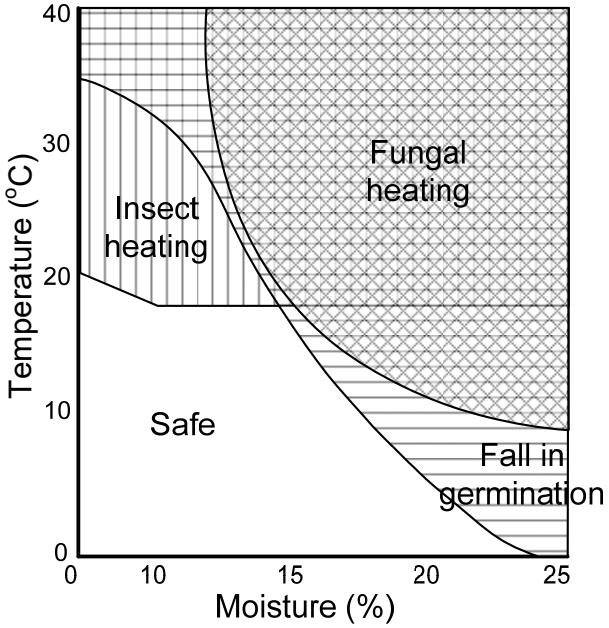


Figure 3 Effects of different temperatures and moisture contents on storability of grain crops. This chart is recreated from the one presented by FAO (2011).

Flor et al. (2022) สรุปรวมรายชื่อวิธีการประเมินความชื้นเมล็ดธัญพืชไว้ได้มากกว่า 20 วิธี ทั้งนี้ วิธีการประเมินความชื้นที่ได้รับการยอมรับและนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในเชิงพาณิชย์สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ (Kett US, 2025)

1. วิธีปฐมภูมิ (primary measurement method) ได้แก่ วิธี Karl Fischer และวิธี loss on drying (หรือ oven method) เป็นการวัดปริมาณความชื้นได้โดยตรงจากตัวอย่าง โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการสอบเทียบกับตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบค่าความชื้นเมล็ดมาก่อนล่วงหน้า

2. วิธีทุติยภูมิ (secondary measurement method) ได้แก่ วิธีการวัดทางไฟฟ้า (electrical method), วิธี microwave, วิธี nuclear และวิธี near-infrared (NIR)

Jian and Jayas (2012) ได้ระบุไว้ว่า อุปกรณ์สำหรับวัดความชื้นเมล็ดธัญพืช ณ ตำแหน่งภายในกอง (in situ) เช่น ภายในกองเมล็ดในไซโลหรือโรงเก็บ ยังไม่มีการผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยการตรวจติดตามความชื้นเมล็ดในระหว่างเก็บรักษายังคงต้องอาศัยการชักตัวอย่างออกมาจากไซโลหรือโรงเก็บแล้วจึงประเมินความชื้นจากตัวอย่างดังกล่าวด้วยวิธีปฐมภูมิหรือวิธีทุติยภูมิที่กล่าวถึงข้างต้น อย่างไรก็ตาม ในช่วงทศวรรตที่ผ่านมา อุปกรณ์สำหรับวัดความชื้นเมล็ดธัญพืช ณ จุดเก็บรักษา ก็ได้รับการวิจัยพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (Casada and Armstrong, 2009; Lewis et al., 2018; Rai et al., 2018; Liu et al., 2022; Nunes et al., 2023; Liu et al., 2024; Wang et al., 2024) Chen (2001) และ Uddin et al. (2006) นำเสนอวิธีการทางอ้อมในการประมาณค่าความชื้นเมล็ดธัญพืช ณ ตำแหน่งภายในกอง โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง EMC และ ERH เมล็ดธัญพืชมีคุณสมบัติเป็นวัสดุดูดความชื้น (hygroscopic) ซึ่งใน

สภาวะปิดที่อุณหภูมิคงที่เมล็ดจะดูดซับหรือคายความชื้นสู่อากาศโดยรอบจนกว่าจะถึงสภาวะสมดุล ความชื้นของเมล็ดและความชื้นสัมพันธ์ของอากาศโดยรอบ ณ สภาวะสมดุลคือ EMC และ ERH ตามลำดับ สมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง EMC และ ERH เรียกว่า สมการไอโซเทิร์ม (isotherm equation) โดยสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวของเมล็ดธัญพืชแต่ละชนิดสามารถสร้างขึ้นโดยการวัดค่า EMC และ ERH ของเมล็ดในภาชนะปิดที่บรรยากาศภายในถูกควบคุมให้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ จากนั้น ค่า EMC และ ERH ณ สภาะสมดุลจะถูกวิเคราะห์ด้วยการถดถอยที่ไม่ใช่เชิงเส้น (non-linear regression) เพื่อหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด ตัวอย่างสมการไอโซเทิร์มที่นิยมใช้ได้แก่ modified Henderson equation (สมการที่ 2) หรือ modified Chung-Pfost equation (สมการที่ 3) ทั้งนี้ สมการไอโซเทิร์มอื่นๆ และค่าสัมประสิทธ์ต่างๆ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากเอกสารมาตรฐานของ ASABE (2021)

$$EMC = \left[\frac{\ln(1 - ERH)}{-A(T + B)} \right]^{\frac{1}{C}} \quad (2)$$

$$EMC = -\frac{1}{C} \ln \left[\frac{\ln(ERH)(T + B)}{-A} \right] \quad (3)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิของเมล็ด และ A, B และ C คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะสำหรับเมล็ดธัญพืชแต่ละชนิด

ระบบตรวจติดตามความชื้นเมล็ดธัญพืช โดยใช้เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ณ ตำแหน่งภายในกอง มีการใช้งานเชิงพาณิชย์แล้วในปัจจุบัน (Eye-Grain, 2025b; Gescaser, 2025; Supertech Agroline, 2025) Singh and Fielke (2017) และ Lutz and Coradi (2022) อธิบายลักษณะการติดตั้งเซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ในไซโลโดยทั่วไปไว้ดังแสดงใน Figure 4 ระบบตรวจติดตามความชื้นเมล็ดธัญพืชโดยใช้เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์มักติดตั้งเป็นระบบเสริม เพิ่มจากระบบตรวจติดตามอุณหภูมิ เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ใน Figure 4 มักถูกติดตั้งเพิ่มเติมให้กับโครงข่ายเคเบิลวัดอุณหภูมิใน Figure 2 และระบบตรวจติดตามความชื้นจะใช้ UI ร่วมกับระบบตรวจติดตามอุณหภูมิ โดยทั่วไป เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์แบบดิจิทัล (digital relative humidity sensor) ที่มีลักษณะเป็นไอซีชิปจะถูกติดตั้งอยู่ภายในเคเบิลคล้ายกับเคเบิลวัดอุณหภูมิ เซนเซอร์ดังกล่าวมักมีความสามารถในการวัดได้ทั้งความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในไอซีชิปตัวเดียวกัน ในการใช้งานจริง เคเบิลวัดความชื้นสัมพัทธ์ใน 1 ไซโลอาจมีเพียง 1-2 เส้น และจำนวนเซนเซอร์ต่อเคเบิล อาจมีได้ 1-6 ตำแหน่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้อยกว่า จำนวนเคเบิลและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิมาก (เทียบกับ Table 1) ในช่องว่างด้านบนไซโลหรือไซโลเฮดสเปซ (silo headspace) เป็นอีกตำแหน่งที่มักมีการติดตั้งเซนเซอร์ความชื้นสัมพัทธ์ โดยจะติดตั้งอยู่ใต้หลังคาไซโล ทั้งนี้ วัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อเฝ้าระวังและป้องกันการเกิดการควบแน่น (condensation) ที่ใต้หลังคาหรือที่ผนังด้านในไซโล

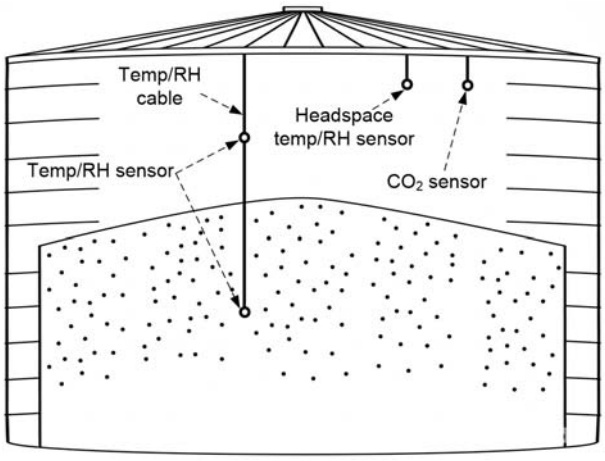


Figure 4 Typical installations of relative humidity sensors in grain silos.

2.3 การตรวจติดตามความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide concentration)

ข้อจำกัดสำคัญของการใช้เคเบิลวัดอุณหภูมิในการเฝ้าระวังการเกิดฮอตสปอตคือ การที่กองเมล็ดธัญพืชเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี การถ่ายเทความร้อนผ่านกองเมล็ดเป็นไปได้ช้า ซึ่งหมายความว่าเมื่อตรวจพบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างผิดปกติ ความเสียหายจากการเน่าเสียมักจะแพร่กระจายเป็นวงกว้างแล้ว เนื่องจากตำแหน่งที่เกิดฮอตสปอตอยู่ห่างจากจุดติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ด้วยเหตุที่ จุลินทรีย์และแมลงศัตรูในโรงเก็บมีอัตราการหายใจที่สูงกว่าเมล็ดธัญพืช ผลการศึกษาหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่า การตรวจติดตามความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแนวทางที่สามารถใช้ตรวจหาการเน่าเสียและความหนาแน่นประชากรแมลง (insect population density) ในกองเมล็ดธัญพืชได้ (White et al., 1982a, 1982b; Singh et al., 1983; Muir et al., 1985; Sinha et al., 1986a, 1986b, 1986c; Chotikasatian et al., 2017) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในกองเมล็ดธัญพืช สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วกว่าการนำหรือการพาความร้อน การตรวจติดตามความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเป็นส่วนเสริมที่จะช่วยลดจุดอ่อนของการตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดด้วยการใช้เคเบิลวัดอุณหภูมิ เทคโนโลยีการตรวจติดตามความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนามีข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้กับไซโลหรือโรงเก็บเมล็ดธัญพืชได้อย่างแพร่หลายคือ เซนเซอร์มีราคาสูง แต่ยังคงมีความแม่นยำไม่เพียงพอ (World Grain, 2025) ในปัจจุบัน ความก้าวหน้าในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (microelectronics) ทำให้เซนเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีราคาถูกลง แม่นยำสูงขึ้น และทนทานกว่าเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซนเซอร์

NDIR (non-dispersive infrared carbon dioxide sensor) ซึ่งทำงานบนหลักการของการดูดซับแสงอินฟราเรดของโมเลกุลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทั่วไปที่ความยาวคลื่นประมาณ 4.26 μm (CO2METER, 2025) ภายในเซนเซอร์จะมีแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรด เมื่อแสงส่องผ่านตัวอย่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มแสงจะลดลงเนื่องจากถูกโมเลกุลก๊าซดูดซับไว้ ซึ่งความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถประเมินได้จากปริมาณการลดลงของความเข้มแสง

ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซส่งผลต่อการตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืชให้ได้อย่างมีประสิทธิผล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความหนาแน่นมากกว่าอากาศจึงมีแนวโน้มที่จะลอยตัวสะสมอยู่ในระดับต่ำ อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของก๊าซภายในกองเมล็ดธัญพืชเป็นขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิภายในกอง ลักษณะการเปิดปิดระบบระบายอากาศ รวมถึงสภาวะบรรยากาศภายนอก นอกจากนี้ ต้นทุนความสะดวกต่อการติดตั้ง ใช้งาน และบำรุงรักษา ยังเป็นประเด็นที่ต้องพิจารณา ระบบตรวจติดตามความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไซโล ณ ปัจจุบัน โดยทั่วไปมักติดตั้งเซนเซอร์วัดความเข้มข้นที่เฮดสเปซ ดังแสดงใน Figure 4 (Lutz and Coradi, 2022) อีกตำแหน่งหนึ่งที่ผู้ผลิตระบบตรวจติดตามเริ่มนำเสนอเป็นทางเลือกในการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเข้มข้นคือฝังไว้ที่ใต้ผิวพื้นโรงเก็บแนวราบ (Eye-Grain, 2025c)

2.4 การตรวจติดตามความหนาแน่นประชากรแมลง (insect population density)

ข้อมูลความหนาแน่นประชากรแมลงเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของ IPM (integrated pest management - การจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสาน) ซึ่งโดยทั่วไปมักอยู่ในหน่วยของจำนวนแมลงต่อน้ำหนักเมล็ดธัญพืช (เช่น แมลงจำนวน 10 ตัว ต่อ ข้าวสาร 1 kg) หรือจำนวนแมลงที่จับได้ต่อกับดักต่อช่วงเวลา (เช่น แมลงจำนวน 2 ตัว ต่อ กับดัก ต่อ วัน) การตรวจติดตามความหนาแน่นประชากรแมลงจะช่วยให้สามารถคาดการณ์และป้องกันปัญหาได้ล่วงหน้า เลือกใช้วิธีการแก้ไขปัญหาได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือในการประเมินประสิทธิภาพการควบคุมจัดการแมลงในระหว่างการเก็บรักษา

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน การตรวจติดตามความหนาแน่นประชากรแมลงในระหว่างการเก็บรักษาด้วยแรงงานคนยังคงเป็นวิธีการปฏิบัติที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ผู้ปฏิบัติงานจะสุ่มชักตัวอย่างจากกองเมล็ดธัญพืชและใช้ตะแกรงร่อนตรวจหาแมลงในตัวอย่างเมล็ดด้วยสายตา การสุ่มตัวอย่างอาจทำได้โดยการใช้ภาชนะตักหรือใช้หลาวแทงลงในกองเมล็ด วิธีการนี้เป็นวิธีที่เรียบง่ายและประหยัด แต่ไม่เหมาะสำหรับการเก็บรักษาในปริมาณมาก การใช้กับดักเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการตรวจติดตามประมาณประชากรแมลง ซึ่งสามารถจำแนกได้หลากหลายรูปแบบ เช่น รูปร่างของกับดัก, วิธีการติดตั้ง, กลุ่มของแมลงเป้าหมาย และการใช้งานร่วมกับใช้ฟีโรโมน (pheromone) เป็นต้น (Insects Limited, 2025; Martin Lishman, 2025; Trécé, 2025) กับดักแบบหลุมดัก (pitfall trap) ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อการตรวจติดตามแมลงภายในกองเมล็ดธัญพืช (White et al., 1990) โดยรูปทรงของกับดักอาจเป็นได้หลายลักษณะดังแสดงตัวอย่างใน Figure 5 กับดักลักษณะนี้มักผลิตจากพลาสติก ซึ่งถูกออกแบบพื้นผิวบางส่วนมีรูพรุน และติดตั้งโดยฝังกับดักไว้ในกองเมล็ดธัญพืช เมื่อแมลงคลานผ่านรูพรุนเข้าในกับดัก แมลงจะตกลงสู่ภาชนะรวบรวมด้านล่าง ต่อมา กับดักแบบหลุมดักได้รับการพัฒนาเพิ่มเซนเซอร์แสงอินฟราเรดและวงจรควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ให้มีความสามารถนับและระบุชนิดของแมลงที่ตกลงในกับดัก และสามารถสื่อสารและรายงานผลร่วมกับระบบตรวจติดตามอื่นๆ ได้ (Shuman et al., 1996; Epsky and Shuman, 2001; Bonjour and Phillips, 2003; Toews et al., 2003) ซึ่งในปัจจุบัน มีการผลิตจำหน่ายเชิงพานิชย์แล้ว (Jian et al., 2012; Jian et al., 2014; OPISystems, 2025b) กับดักอิเล็กทรอนิกส์เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยให้การตรวจติดตามประชากรแมลงในไซโลหรือโรงเก็บเป็นไปได้อย่างสะดวกรวดเร็วและแม่นยำ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาในการใช้งานระยะยาวคือ 1) การติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่ไม่กีดขวางการขนถ่ายกองเมล็ดธัญพืช เช่น การโหลดเมล็ดเข้าและถ่ายออกจากไซโล และการปฏิบัติงานอื่นๆ เช่น การรมยาฆ่าแมลง (fumigation) และ 2) ความน่าเชื่อถือ (reliability) และความทนทาน (durability) ของกับดักที่ต้องถูกใช้งานในสภาวะที่อุณหภูมิและความชื้นแปรปรวน มีฝุ่นละอองและสิ่งแปลกปลอมต่างๆ

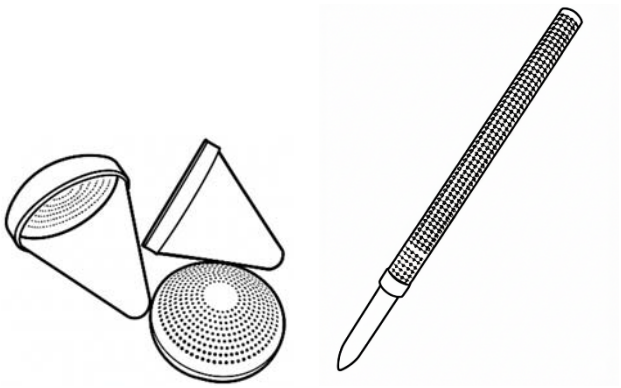


Figure 5 Typical pitfall traps: (left) cone-shaped bottom (recreated from a photo from Martin Lishman (2025)) and (right) perforated tube (recreated from a photo from Control Unlimited (2025)).

เทคนิคการตรวจหาแมลงอื่นๆ ที่มีการวิจัยและพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ การตรวจหาด้วยเสียง (acoustic detection), การตรวจหาด้วยภาพ (machine vision), การใช้รังสีเอกซ์ (X-ray), การใช้ภาพถ่ายความร้อน (thermal imaging), การใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (near infrared spectroscopy - NIRS), การวัดค่าการนำไฟฟ้า และการใช้จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic nose) เป็นต้น Neethirajan et al. (2007) และ Banga et al. (2018) ได้รวบรวมและวิเคราะห์ข้อดี

และข้อจำกัดของเทคนิคเหล่านี้ไว้โดยละเอียด ทั้งนี้ วิธีการเหล่านี้ยังคงมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ค่าใช้จ่ายสูง, ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง, ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวน หรือการแยกแยะแมลงได้เพียงบางกลุ่ม เป็นต้น กล่าวโดยสรุป วิธีการเหล่านี้ยังคงต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไปเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมเชิงอุตสาหกรรม (industrial settings)

2.5 การใช้งานข้อมูลจากระบบตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช

การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากระบบตรวจติดตามปัจจัยต่างๆ ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของเมล็ดธัญพืช (อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์, ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ความหนาแน่นประชากรแมลง) ที่ถูกกล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้านี้ เป็นเพียงขั้นตอนแรกของกระบวนการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืชที่มีประสิทธิผลเท่านั้น ขั้นตอนสำคัญอีกส่วนหนึ่งคือ การตีความ (interpretation) หรือการวิเคราะห์ (analysis) ข้อมูลดังกล่าวอย่างถูกต้อง สะท้อนสภาพแวดล้อมของการเก็บรักษาและคุณภาพเมล็ดตามความเป็นจริง ขั้นตอนลำดับถัดมาคือ การกำหนดแนวทางปฏิบัติที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพ และสอดคล้องกับสภาวะแวดล้อมหรือปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างทันท่วงที

วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการประเมินระยะเวลาปลอดภัยในการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืช (safe grain storage time) คือ การประเมินจากหลักการของการสูญเสียน้ำหนักแห้งของเมล็ด (dry matter loss - DML) ซึ่งตัวแปรหลักที่ใช้ในการคำนวณคือ อุณหภูมิและความชื้นเมล็ด (Górnicki and Kaleta, 2013) Sadaka et al. (2025) ทำการคำนวณจำนวนวันปลอดภัยในการเก็บรักษาเมล็ดข้าวโพด, ถั่วเหลือง, ข้าวเปลือกและข้าวสาลีไว้ โดยสมมุติให้ DML ต้องไม่เกิน 0.5% ดังแสดงตัวอย่างใน Table 2 ผู้ปฏิบัติงานอาจใช้ข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นจากระบบตรวจติดตามคุณภาพเมล็ด เพื่อประเมินระยะเวลาปลอดภัยในการเก็บรักษาได้

Table 2 Numbers of safe storage days for rice (partial data from Sadaka et al. (2025)).

Grain temp.	Grain moisture content (%wet basis)				
(°C)	14	15	16	17	18
31.1	40	20	8	5	3
27.2	120	40	10	10	5
25.0	160	40	20	20	10
20.0	<270	80	40	40	20
15.0	>270	160	80	60	40

Maier et al. (2010) ทำการตรวจติดตามความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไซโลเก็บเมล็ดข้าวโพดปริมาณ 254 ton เป็นระยะเวลา 8 เดือน พบว่า 1) ที่ความเข้มข้นในช่วง 400-500 ppm (part per million) ข้าวโพดมีสภาพปกติ, 2) ความเข้มข้นในช่วง 500-1,200 ppm บ่งชี้ถึงการเริ่มมีการติดเชื้อราหรือมีแมลงเข้าทำลาย, และ 3) ที่ความเข้มข้น 1,500-4,000 ppm หรือสูงกว่า ข้าวโพดมีการติดเชื้อราหรือมีการระบาดของแมลงที่รุนแรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ช่วงความเข้มข้นต่างๆ ดังกล่าวอาจใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับความเสียหายของเมล็ดในระหว่างการเก็บรักษาได้

ตามแนวคิดของ IPM (Nansen and Meikle, 2011; Kaur and Kaur, 2020) การตัดสินใจใช้มาตรการแทรกแซง (intervention measure) เพื่อควบคุมและ/หรือยับยั้งปัญหาที่สร้างความเสียหายต่อเมล็ดธัญพืชในระหว่างการเก็บรักษา จะพิจารณาจากระดับ EIL (economic injury level - ระดับความเสียหายทางเศรษฐกิจ) ซึ่งตามคำนิยามของ Stern et al. (1959) คือ ความหนาแน่นของประชากรศัตรูพืชที่ต่ำที่สุดที่จะทำให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจ โดยที่ ความเสียหายทางเศรษฐกิจหมายถึง ปริมาณความเสียหายที่สมเหตุสมผลกับค่าใช้จ่ายของมาตรการที่จะใช้ควบคุมศัตรูพืช เนื่องจากประชากรศัตรูพืชที่เพิ่มถึงระดับ EIL จะทำให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจ การใช้มาตรการแทรกแซงใดๆ จึงควรดำเนินการที่ระดับต่ำกว่า EIL เป็นเกณฑ์ ซึ่งเรียกว่า เกณฑ์ ET (economic threshold - เกณฑ์ทางเศรษฐกิจ) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เกณฑ์ AT (action threshold – เกณฑ์ที่ต้องดำเนินการ) พรทิพย์ et al. (2548) ได้ให้ตัวอย่างเกณฑ์ ET สำหรับในกลุ่มประเทศในเขตร้อนชื้นอยู่ที่แมลงมีชีวิตจำนวน 10 ตัว ใน ข้าวสาร 1 kg แต่สำหรับกลุ่มประเทศในทวีปยุโรปและประเทศสหรัฐอเมริกา เกณฑ์ ET อยู่ที่ 0 (ถึงแม้ว่า จะพบแมลงที่มีชีวิตเพียง 1 ตัว ผู้ปฏิบัติงานควรดำเนินมาตรการแทรกแซง เพื่อควบคุมหรือกำจัดแมลง) งานวิจัยของ Kuzmanov and Dimitrov (2009) เป็นตัวอย่างหนึ่งของการใช้หนาแน่นประชากรแมลงเป็นเกณฑ์ ET เพื่อตัดสินใจใช้การรมยา (fumigation) เป็นมาตรการกำจัดแมลงในระหว่างการเก็บรักษา นักวิจัยกลุ่มนี้ใช้แบบจำลองประชากรแมลง (insect population model) และการเก็บข้อมูลจากการทดลองเก็บรักษาเมล็ดข้าวสาลีปริมาณ 2,500 ton ในไซโลและ 3,500 ton ในโรงเก็บแนวราบ เพื่อกำหนดระดับความหนาแน่นประชากรแมลงที่ทำให้น้ำหนักของเมล็ดที่เสียหายไม่เกิน 0.5 kg ton^{-1} ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ควรทำการรมยาเมื่อความหนาแน่นประชากรแมลงสูงถึง 8.5 ตัว ต่อ ข้าวสาลี 1 kg (เกณฑ์ ET = 8.5 ตัว ต่อ kg) นอกจากการรมยาแล้ว มาตรการแทรกแซงอื่นๆ ที่สามารถพิจารณาเลือกใช้งานได้ อาจรวมถึง การใช้สารเคมี (chemical treatment) ประเภทอื่น, การทำความสะอาด (cleaning and sanitation), การซ่อมบำรุงสถานที่จัดเก็บ (structural integrity and maintenance), การระบายอากาศ (aeration) หรือ การใช้เครื่องลดอุณหภูมิ เป็นต้น

ตัวอย่างการใช้งานข้อมูลอุณหภูมิ, ความชื้นเมล็ด, ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความหนาแน่นประชากรแมลง ที่ถูกกล่าวถึงข้างต้นเป็นเพียงแนวทางเบื้องต้นเท่านั้น ข้อมูลจากระบบตรวจติดตามไม่ควรถูกพิจารณาเพียงปัจจัยใด

ปัจจัยหนึ่ง ณ ช่วงเวลาใดช่วงเวลาหนึ่งแยกจากกัน แต่ควรถูกนำมาวิเคราะห์ในบริบทที่เชื่อมโยงกับปัจจัยและช่วงเวลาอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของเมล็ดธัญพืช เนื่องจากสภาวะภายในกองเมล็ดธัญพืชมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ผู้ปฏิบัติงานจึงควรให้ความสำคัญกับการพิจารณาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกับการพิจารณาค่า ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง หรือเวลาใดเวลาหนึ่งด้วย ยกตัวอย่างเช่น หากพบว่าอุณหภูมิในบางตำแหน่งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีอัตราการเพิ่มที่สูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ ตำแหน่งนั้นอาจกำลังมีฮอตสปอตเกิดขึ้น ซึ่งเป็นสัญญาณเตือนถึงการก่อตัวของเชื้อราหรือการระบาดของแมลง ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของเมล็ดจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกัน (correlation) ที่ซับซ้อน เช่น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอาจส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศรอบๆ เมล็ดสูงขึ้น ซึ่งเป็นสภาพที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา ซึ่งในขณะเดียวกัน กิจกรรมของจุลินทรีย์ (microorganism) และการหายใจของแมลง รวมทั้งของเมล็ดเอง จะเพิ่มสูงขึ้นทำให้ระดับความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น จะเห็นได้ว่า ด้วยความซับซ้อนของระบบนิเวศในไซโลหรือโรงเก็บ ข้อจำกัดของเครื่องมือและอุปกรณ์ รวมถึงเงื่อนไขกำกับการปฏิบัติงานของสถานประกอบการ การวิเคราะห์ข้อมูลและการตัดสินใจดำเนินมาตรการแทรงแซงต่างๆ ยังคงต้องอาศัยความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของเมล็ดธัญพืชและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานเป็นหัวใจสำคัญ

3 สรุป

บทความนี้มุ่งเน้นการนำเสนอความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช เพื่อลดการสูญเสียและรักษาคุณภาพของเมล็ดให้ยาวนานที่สุด ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของเมล็ดในระหว่างการเก็บรักษาประกอบด้วย อุณหภูมิเมล็ด, ความชื้นเมล็ด, ความเสียหายที่เกิดจากเชื้อรา และแมลงศัตรูในโรงเก็บ ระบบตรวจติดตามปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ประกอบด้วยโครงข่ายเซนเซอร์วัด อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในกอง และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอาจรวมถึงกับดักแมลงที่มีเซนเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ช่วยนับและระบุชนิดแมลง คุณสมบัติและข้อจำกัดสำคัญของระบบถูกสรุปอยู่ใน Table 3 การใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่ได้จากระบบดังกล่าว ต้องอาศัยความเข้าใจและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานเป็นหัวใจสำคัญ เทคโนโลยีเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมการเกษตรสมัยใหม่อย่างยั่งยืน

Table 3 Key attributes and limitations of different grain quality monitoring systems.

Monitoring systems	Attributes	Limitations
Grain temperature	- Temperature monitoring is a foundation of grain quality monitoring systems typically installed in silos or storage facilities - Temperature data are used for assessing deterioration trends and predict safe storage periods - Hotspots can be detected by temperature increases within grain mass - Grain aerantilation and/or temperature control systems can be controlled based on temperature data - Digital temperature sensors are highly accurate (±0.5°C), noise-resistant, and cost-effective	- Grain mass is a poor conductor of heat, thus by the time an abnormality is detected, the damage is often already extensive - Installing sensors at appropriate intervals (no more than 0.5 meter) is difficult in practice due to cost constraints and structural load-bearing capacity
Grain moisture content	- Indirect techniques can be used to approximate grain moisture content within grain mass, using the relationship between equilibrium humidity (EMC) and equilibrium relative humidity (ERH) - Relative humidity monitoring systems are often installed as an add-on to temperature monitoring systems	- In situ measurement of grain moisture content is not yet available commercially - The number of relative humidity sensors used for moisture monitoring is much less than that for temperature monitoring
Carbon dioxide concentration	- Movement of gas molecules occurs faster than heat conduction or moisture migration, thus carbon dioxide monitoring can detect spoilage earlier than temperature or moisture content monitoring - It can also potentially be used for assessing insect population density	- Early technologies are limited by high cost and insufficient accuracy - Carbon dioxide distribution within grain mass can be affected by several factors, such as the differences in grain and ambient temperatures and operation of aeration system
Insect population density	- Electronic traps enable convenient, fast, and accurate monitoring of insect populations in silos or storage facilities - Insect population density monitoring is an essential index for assessing the effectiveness of insect control measures	- Electronic traps must be installed in locations that do not obstruct grain handling and fumigation - Reliability and durability of traps are still a concern when used in harsh industrial environments

4 เอกสารอ้างอิง

พรทิพย์ วิสารทานนที, กุสุมา นวลวัฒน์, บุษรา จันทร์แก้วมณี, ใจทิพย์ อุไรชื่น, รังสิมา เก่งการพานิช, กรรณิการ์ เพ็งคุ้ม, จิราภรณ์ ทองพันธ์, ดวงสมร สุทธิสุทธิ์, ลักขณา ร่มเย็น, ภาวินี หนูชนะภัย. 2548. แมลงที่พบในผลิตผลเกษตรและการป้องกันกำจัด. กรุงเทพมหานคร: กลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กรมวิชาการเกษตร.

ASABE. 2021. Standard ASAE D245.7 JUN2021: Moisture relationships of plant-based agricultural products. St. Joseph, MI: ASABE.

Banga, K.S., Kotwaliwale, N., Mohapatra, D., Giri, S.K. 2018. Techniques for insect detection in stored food grains: an overview. Food Control. 94, 167-176.

Bonjour, E.L., Phillips, T.W. 2003. Comparing insect captures in the "StorMax Insector" and other probe traps. In: Credland, P.F., Armitage, D.M., Bell, C.H., Cogan, P.M., Highley, E. (Eds). Proceedings of the Eighth International Working Conference on Stored Product Protection, 238-240. CAB International, Wallingford, United Kingdom. 22-26 July 2002, York, UK.

Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C.W. 1974. Drying Cereal Grains, Westport, Connecticut, AVI Publishing Company Inc.

Casada, M.E., Armstrong, P.R. 2009. Wheat moisture measurement with a fringing field capacitive sensor. Transactions of the ASABE. 52(5), 1785-1791.

CGrain. 2025. เครื่องเป่าลมเย็น สำหรับข้าว-ธัญพืช. CGrain Technology Co., Ltd. Available at: https://cgrain.com/pcat/grain-chillers-th/. Accessed on 7 July 2025.

Chen, C. 2001. Moisture measurement of grain using humidity sensors. Transactions of the ASAE. 44(5), 1241.

Chotikasatian, C., Chayaprasert, W., Pathaveerat, S. 2017. A study on the feasibility of quantifying the population density of stored product insects in air-tight grain storage using CO2 concentration measurements. Journal of Stored Products Research. 73, 21-29.

CO2METER. 2025. How does an NDIR CO2 sensor work? CO2METER Inc. Available at: https://www.co2meter.com/en-th/blogs/news/how-does-an-ndir-co2-sensor-work. Accessed on 4 August 2025.

Control Unlimited. 2025. Grain monitoring: grain insect probe trap. Control Unlimited Pty Ltd. Available at: https://www.grainaeration.com.au/products/controllers-1/grain-insect-trap. Accessed on 7 August 2025.

Eltrum Systems. 2025. Grain temperature monitoring and control. Musninkai, Lithuania. Available at: https://eltrum.com/presentation/eltrum-systems-en.pdf. Accessed on 22 July 2025.

Epsky, N.D., Shuman, D. 2001. Laboratory evaluation of an improved electronic grain probe insect counter. Journal of Stored Products Research. 37(2), 187-197.

Eye-Grain. 2025a. CO2 Sniffer for spoilage detection. Eye-Grain ApS. Available at: https://crop-protector.com/products/product/co2-sniffer-spoilage-detection/. Accessed on 7 July 2025.

Eye-Grain. 2025b. Moisture sensor cables for grain silos. Eye-Grain ApS. Available at: https://crop-protector.com/products/product/moisture-sensor-cable/. Accessed on 31 July 2025.

Eye-Grain. 2025c. All-in-one floor sensor (AIO). Eye-Grain ApS. Available at: https://crop-protector.com/products/product/aio-floor-sensor/. Accessed on 7 July 2025.

FAO. 2011. Chapter 16 Grain crop drying, handling and storage. In, Rural structures in the tropics: design and development. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Flinn, P.W., Opit, G.P., Throne, J.E. 2009. Predicting stored grain insect population densities using an electronic probe trap. Journal of Economic Entomology. 102(4), 1696-1704.

Flor, O., Palacios, H., Suárez, F., Salazar, K., Reyes, L., González, M., Jiménez, K. 2022. New sensing technologies for grain moisture. Agriculture. 386.

Flu-Tech. 2025a. การเก็บรักษาเมล็ดพืชในถังไซโล. Flu-Tech Co., Ltd. Available at: https://flutech.co.th/maintain-quality-of-grain-in-storage-silos/. Accessed on 7 July 2025.

Flu-Tech. 2025b. EST grain silo temperature & level monitoring system. Flu-Tech Co., Ltd. Available at: https://flutech.co.th/wp-content/uploads/2022/07/EST110-Multi-point-temperature-sensor.pdf. Accessed on 22 July 2025.

Gescaser. 2025. Obtain maximum market value of your grain by preserving it under perfect temperature and moisture conditions. Gescaser SA. Available at:

https://www.gescaser.com/for-silos/. Accessed on 1 August 2025.

Górnicki, K., Kaleta, A. 2013. Criteria of determination of safe grain storage time – a review. In: Grundas, S.T., Stępniewski, A. (Eds.), Advances in Agrophysical Research. Rijeka, Croatia: IntechOpen Ltd.

Gwinner, J., Harnisch, R., Muck, O. 1996. Manual of the prevention of post-harvest grain losses. Eschborn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.

Insects Limited. 2025. Pest products. Insects Limited Inc. Available at: https://www.insectslimited.com/store. Accessed on 14 August 2025.

Jian, F., Chelladurai, V., Jayas, D.S., White, N.D.G. 2012. Insector® system to monitor insect activity and density during grain storage and fumigation. In: Navarro, S., Banks, H.J., Jayas, D.S., Bell, C.H., Noyes, R.T., Ferizli, A.G., Emekci, M., Isikber, A.A., Alagusundaram, K. (Eds). Proceedings of the Ninth International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, 396-402. ARBER Professional Congress Services, Turkey, Antalya, Turkey.

Jian, F., Jayas, D.S. 2012. Temperature monitoring. In: Hagstrum, D.W., Phillips, T.W., Cuperus, G. (Eds.), Stored Product Protection. 271-282. Manhattan, Kansas: Kansas State University.

Jian, F., Jayas, D.S., White, N.D.G. 2014. How many kilograms of grain per sample unit is big enough? Part I – Comparison of insect detection and density estimation between manual probe sampling and Insector® system. Journal of Stored Products Research. 56, 60-66.

Kaur, M., Kaur, T. 2020. Integrated pest management: a paradigm for modern age. In: Kontogiannatos, D., Kourti, A., Mendes, K.F. (Eds.), Pests, Weeds and Diseases in Agricultural Crop and Animal Husbandry Production. Rijeka, Croatia: IntechOpen Ltd.

Kett US. 2025. Learn the six methods for determining moisture: the advantages, deficiencies and who uses each method. Kett US. Available at: https://blog.kett.com/hs-fs/hub/173270/file-2496654055-pdf/docs/kett_six_different_moisture_methods_ebook.pdf. Accessed on 28 July 2025.

Kuzmanov, D., Dimitrov, N. 2009. Forecasting the necessity of grain fumigation during storage. Czech Journal of Food Sciences. 27(3), 210-215.

Lewis, M.A., Trabelsi, S., Nelson, S.O. 2018. Real-time monitoring of moisture within an eighth-scale grain bin during drying, 2018 ASABE Annual International Meeting: ASABE Paper No. 1801664, St. Joseph, MI, ASABE, pp. 1.

Liu, J., Qiu, S., Wei, Z. 2022. Real-time measurement of moisture content of paddy rice based on microstrip microwave sensor assisted by machine learning strategies, Chemosensors, pp. 376.

Liu, L., Song, C., Zhu, K., Liu, P. 2024. A design method for an SVM-based humidity sensor for grain storage, Sensors, pp. 2854.

Lutz, É., Coradi, P.C. 2022. Applications of new technologies for monitoring and predicting grains quality stored: Sensors, Internet of Things, and Artificial Intelligence. Measurement. 188, 110609.

Maier, D.E., Channaiah, L.H., Martinez-Kanwas, A., Lawrence, J.S., Chaves, E.V., Coradi, P.C., Fromme, G.A. 2010. Monitoring carbon dioxide concentration for early detection of spoilage in stored grain. In: Carvalho, M.O., Fields, P.G., Adler, C.S., Arthur, F.H., Athanassiou, C.G., Campbell, J.F., Fleurat-Lessard, F., Flinn, P.W., Hodges, R.J., Isikber, A.A., Navarro, S., Noyes, R.T., Riudavets, J., Sinha, K.K., Thorpe, G.R., Timlick, B.H., Trematerra, P., White, N.D.G. (Eds). Proceedings of the Tenth International Working Conference on Stored Product Protection, 505—509. Julius Kühn-Institut, Berlin, Germany, Estoril, Portugal.

Martin Lishman. 2025. Insect traps. Martin Lishman Ltd. Available at: https://martinlishman.com/insect-traps/. Accessed on 14 August 2025.

Muir, W.E., Waterer, D., Sinha, R.N. 1985. Carbon Dioxide as an Early Indicator of Stored Cereal and Oilseed Spoilage. Transactions of the ASAE. 28(5), 1673-1675.

Nansen, C., Meikle, W.G. 2011. The economic injury level and action threshold in stored-product systems. Stewart Postharvest Review. 7(3), 1-8.

Navarro, S., Noyes, R. 2002. The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management, Boca Raton, FL, CRC Press LLC, pp. 647.

Navarro, S., Noyes, R.T., Casada, M., Arthur, F.H. 2012. Grain aeration. In: Hagstrum, D.W., Phillips, T.W.,

Cuperus, G. (Eds.), Stored Product Protection (pp. 121-134). Manhattan, Kansas: Kansas State University.

Neethirajan, S., Jayas, D.S. 2007. Sensors for grain storage, 2007 ASAE Annual Meeting: ASABE Paper No. 076179, St. Joseph, MI, ASABE.

Neethirajan, S., Karunakaran, C., Jayas, D.S., White, N.D.G. 2007. Detection techniques for stored-product insects in grain. Food Control. 18, 157—162.

Nunes, C.F., Coradi, P.C., Jaques, L.B.A., Teodoro, L.P.R., Teodoro, P.E. 2023. Sensor-cable-probe and sampler for early detection and prediction of dry matter loss and real-time corn grain quality in transport and storage. Scientific Reports. 13(1), 5686.

OPISystems. 2025a. Maximizing grain storage: the importance of using grain bin temperature cables. OPISystems Inc. Available at: https://opisystems.com/maximizing-grain-storage-the-importance-of-using-grain-bin-temperature-cables/. Accessed on 22 July 2025.

OPISystems. 2025b. OPI INTEGRIS Pro. OPISystems Inc. Available at: https://opisystems.com/integris-pro/. Accessed on 14 August 2025.

Proctor, D.L. 1994. Grain Storage Techniques: Evolution and Trends in Developing Countries. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: https://www.fao.org/4/t1838e/t1838e00.htm. Accessed on 9 July 2025.

Rai, A.K., Dass, B., Tiwari, V.K. 2018. Design of a probe type in situ electronic grain moisture measurement system. Bioscience Biotechnology Research Communications. 11(2), 246-250.

Rolfes @ Boone. 2009. Cables, leadwire & conduit installation. Boone Cable Works & Electronics, Inc. Available at: https://rolfesatboone.com/wp-content/uploads/2023/01/temperature_cable_manual.pdf. Accessed on 3 July 2024.

Sadaka, S., Atungulu, G., Olatunde, G. 2025. Safe grain storage period. Research and Extension, University of Arkansas System. Available at: https://www.uaex.uada.edu/publications/pdf/FSA1058.pdf. Accessed on 19 August 2025.

Shuman, D., A. Coffelt, J., K. Weaver, D. 1996. A Computer-based electronic fall-through probe insect counter for monitoring infestation in stored products. Transactions of the ASAE. 39(5), 1773-1780.

Singh, C.B., Fielke, J.M. 2017. Recent developments in stored grain sensors, monitoring and management technology. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 20(3), 32-55.

Singh, D., Muir, W.E., Sinha, R.N. 1983. Finite element modelling of carbon dioxide diffusion in stored wheat. Canadian Agricultural Engineering. 25(1), 149-152.

Sinha, R.N., Wallace, H.A.H. 1965. Ecology of a fungus-induced hot spot in stored grain. Canadian Journal of Plant Science. 45(1), 48-59.

Sinha, R.N., Waterer, D., Muir, W.E. 1986a. Carbon dioxide concentrations associated with insect infestations of stored grain 1. natural infestation of corn barley and wheat in farm granaries. Sciences des Aliments. 6(1), 91-98.

Sinha, R.N., Waterer, D., Muir, W.E. 1986b. Carbon dioxide concentrations associated with insect infestations of stored grain 2. infestation in wheat filled jars. Sciences des Aliments. 6(1), 99-106.

Sinha, R.N., Waterer, D., Muir, W.E. 1986c. Carbon dioxide concentrations associated with insect infestations of stored grain 3. infestation in bagged wheat. Sciences des Aliments. 6(1), 107-118.

Songwang, L. 1999. Grain temperature measurement cable. Patent Number CN2349566Y

Standardization Administration of China. 2024. GB/T 26882.1-2024 Grain and oil storage—Monitoring and control system of stored-grain condition—Part 1: General rule. Standardization Administration of China. Available at: https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=28045D84D9999055E06397BE0A0A7C5C. Accessed on 22 July 2025.

Stern, V.M., Smith, R.F., Bosch, R.v.d., Hagen, K.S. 1959. The integrated control concept. Hilgardia. 29(11), 81-101.

Supertech Agroline. 2025. Moisture multi-sensor cable SLM3000. Supertech Agroline ApS. Available at: https://www.agrolog.io/moisture-cable. Accessed on 31 July 2025.

Toews, M.D., Phillips, T.W., Shuman, D. 2003. Electronic and manual monitoring of *Cryptolestes ferrugineus*

(Coleoptera: Laemophloeidae) in stored wheat. Journal of Stored Products Research. 39(5), 541-554.

Trécé. 2025. Storgard® early-warning insect monitoring systems. Trécé Inc. Available at: https://www.trece.com/products/storgard-early-warning-insect-monitoring/. Accessed on 14 August 2025.

Uddin, M.S., Armstrong, P.R., Zhang, N. 2006. Accuracy of grain moisture content prediction using temperature and relative humidity sensors. Applied Engineering in Agriculture. 22(2), 267-273.

Wang, Z., Chen, Z., Zhang, Y., Geng, C., Song, W., Sun, Z., Guo, B., Yu, Z., Chen, L. 2024. GrainSense: a wireless grain moisture sensing system based on Wi-Fi wignals. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies. 8(3), Article 136.

White, N.D.G., Arbogast, R.T., Fields, P.G., Hillmann, R.C., Loschiavo, S.R., Subramanyam, B., Throne, J.E., Wright, V.F. 1990. The development and use of pitfall and probe traps for capturing insects in stored grain. Journal of the Kansas Entomological Society. 63(4), 506-525.

White, N.D.G., Sinha, R.N., Muir, W.E. 1982a. Intergranular carbon dioxide as an indicator of deterioration in stored rapeseed. Canadian Agricultural Engineering. 24, 43-50.

White, N.D.G., Sinha, R.N., Muir, W.E. 1982b. Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat. Canadian Agricultural Engineering. 24(1), 35-42.

World Grain. 2025. Early spoilage detection. Sosland Publishing Co. Available at: https://www.world-grain.com/articles/10162-early-spoilage-detection. Accessed on 6 August 2025.

Yuliang, B. 2012. Temperature measurement cable assembly for grain condition monitoring and control system. Patent Number CN102589749A