

การเพิ่มประสิทธิภาพด้านความแม่นยำเชิงพื้นที่และสมรรถนะเชิงเศรษฐศาสตร์
ของระบบโรยวัสดุในเครื่องเพาะกล้าข้าวแบบกึ่งอัตโนมัติ
OPTIMIZATION OF SPATIAL PRECISION AND ECONOMIC PERFORMANCE OF
THE MATERIAL METERING SYSTEM IN A SEMI-AUTOMATIC RICE SEEDLING
NURSERY MACHINE

ชูชาติ บุญฤทธิตรีเดช*, เจษฎา อิสหาะ, วิเชียร ดวงสีเสน และ กันติพจน์ กองแก้ว

Choochart Boonrittridej*, Jesada Is-haak, Wichian Duangsrisen

and Kantipot Kongkaew

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology
Suvarnabhumi

Received: 2 April 2026

Revised: 26 April 2026

Accepted: 28 April 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำเชิงพื้นที่และสมรรถนะเชิงเศรษฐศาสตร์ของระบบโรยวัสดุในเครื่องเพาะกล้าข้าวแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยประเมินสมบัติทางกายภาพของวัสดุเพาะ ความสม่ำเสมอในการกระจายตัว และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการสอบเทียบระบบ ดำเนินการทดลองแบบ CRD จำนวน 5 ซ้ำ ใช้ซีเมนต์กลบดำความพรุนร้อยละ 88.225 และเมล็ดพันธุ์ข้าว กข.43 เป็นวัสดุทดสอบ ผลการวิจัยพบว่าระบบมีเสถียรภาพสูง โดยมีค่า %CV ต่ำกว่าร้อยละ 5 ในทุกระดับการปรับตั้ง ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการปรับตั้งและปริมาณมวลวัสดุอธิบายได้แม่นยำด้วยสมการพหุนามอันดับสอง ($R^2 > 0.98$) ในเชิงเศรษฐศาสตร์ การปรับตั้งที่เหมาะสมช่วยลดการใช้เมล็ดพันธุ์เกินความจำเป็นและลดความสูญเสียได้ถึง 412.105 บาทต่อชั่วโมงปฏิบัติงาน สรุปได้ว่าเครื่องต้นแบบช่วยยกระดับคุณภาพแผ่นกล้า ลดความสูญเสีย และเพิ่มความคุ้มค่าเชิงพาณิชย์เหมาะสำหรับเกษตรกรและวิสาหกิจชุมชน

คำสำคัญ: เครื่องเพาะกล้าข้าวแบบกึ่งอัตโนมัติ, ระบบโรยวัสดุ, ความแม่นยำเชิงพื้นที่, สมรรถนะเชิงเศรษฐศาสตร์, การสอบเทียบระบบ

* Corresponding author: ชูชาติ บุญฤทธิตรีเดช

E-mail: boonrittridej5299@gmail.com

Abstract

This research aimed to optimize the spatial precision and economic performance of the material metering system in a semi-automatic rice seedling nursery machine. The study evaluated physical properties of substrates and developed mathematical models for system calibration. Arranged in a CRD with five replications, the experiments utilized carbonized rice husk (88.225% porosity) and RD43 rice seeds. Results demonstrated superior stability with a %CV below 5% across all settings. The discharge quantity was best described by second-order polynomial models ($R^2 > 0.98$), facilitating precise control. Economically, the optimal setting at level 8 yielded a peak field efficiency of 79.435% with a total material cost of 14.909 Baht per tray. High precision effectively prevented hidden economic losses of 412.105 Baht per hour by mitigating over-seeding. In conclusion, the system enhances both mat quality and industrial-scale cost-effectiveness.

Keywords: Semi-Automatic Rice Seedling Nursery Machine, Material Metering System, Spatial Precision, Economic Performance, System Calibration

บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญที่มีผลต่อความมั่นคงทางอาหารและเศรษฐกิจของไทย อย่างไรก็ตาม ภาคการผลิตปัจจุบันเผชิญวิกฤตขาดแคลนแรงงานและต้นทุนที่สูงขึ้น นำไปสู่การปรับตัวสู่เกษตรอัจฉริยะและการใช้เครื่องดำนาคัดแทนแรงงานคน ซึ่งปัจจัยความสำเร็จขึ้นอยู่กับการผลิตแผ่นกล้า (Seedling Mat) ให้มีคุณภาพ สม่ำเสมอ และมีระบบรากที่แข็งแรงเพื่อลดปัญหาทอว่าง (Missing Hills) และเพิ่มประสิทธิภาพในการปักดำ (ดาวรุ่ง วชิรินทร์รัตน์ และคณะ, 2560) ในระบบเพาะกล้าแบบกึ่งอัตโนมัติ ชุดโรยวัสดุ (Metering System) คือกลไกวิกฤตที่ส่งผลต่อคุณภาพแผ่นกล้าโดยตรง โดยความแม่นยำเชิงพื้นที่ของเมล็ดพันธุ์ช่วยลดการซ้อนทับและความสูญเสีย (Liu et al., 2024) ขณะที่ความสม่ำเสมอและความพรุนของวัสดุเพาะช่วยส่งเสริมการพัฒนาระบบราก (Gao et al., 2024) ปัจจุบันมีการพัฒนาชุดโรยให้ควบคุมปริมาณได้ละเอียดขึ้น (บรรลุ เพียจีน และคณะ, 2563) โดยประเมินสมรรถนะผ่าน

ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Gomez & Gomez, 1984) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อพยากรณ์พฤติกรรมการจ่ายวัสดุ (Karayel et al., 2004)

อย่างไรก็ตาม การควบคุมความแม่นยำระดับอุตสาหกรรมยังมีความท้าทายด้านความสอดคล้องระหว่างความเร็วชุดโรยและความเร็วสายพานลำเลียง (Linear Conveyor Velocity) ที่แปรผันตามภาระงาน การขาดข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับอิทธิพลของความเร็วที่แปรผันนี้ต่อความแม่นยำเชิงพื้นที่และสมรรถนะเชิงเศรษฐศาสตร์ ทำให้การปรับตั้งเครื่องจักรยังขาดมาตรฐานนำไปสู่ความสูญเสียเมล็ดพันธุ์และต้นทุนที่สูงเกินจำเป็น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำเชิงพื้นที่ของระบบโรยวัสดุ สร้างสมการสอบเทียบสำหรับการปรับตั้งภายใต้สภาวะความเร็วแปรผัน และประเมินสมรรถนะเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อเป็นแนวทางยกระดับมาตรฐานการผลิตแผ่นกล้าข้าวคุณภาพสูงอย่างยั่งยืน

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยดำเนินการ ณ อาคารปฏิบัติการแทรกเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา เพื่อวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของระบบโรยวัสดุในเครื่องเพาะกล้าข้าวแบบกึ่งอัตโนมัติ มีรายละเอียดดังนี้

1. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

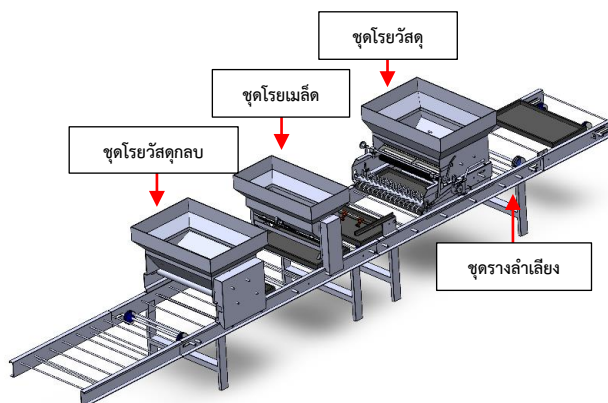
1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1.1.1 วัสดุเพาะ ใช้ซี่ไถ้าเกลบดำที่มีคุณลักษณะร่วนซุยและระบายน้ำได้ดี โดยวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความชื้นฐานเปียก ความหนาแน่นรวม และความพรุนตามมาตรฐาน ASABE S358.300

1.1.2 เมล็ดพันธุ์ข้าว ใช้เมล็ดพันธุ์ข้าว กข.43 (RD43) ความชื้นร้อยละ 12-14 (ฐานเปียก) อัตราความงอกไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80

1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

1) เครื่องเพาะกล้าข้าวแบบกึ่งอัตโนมัติ (Kubota รุ่น SR-K800 THL) ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ (AC Motor) ขนาด 90 วัตต์ แรงดัน 220 โวลต์ ประกอบด้วย 4 ชุดการทำงานหลัก ได้แก่ ชุดโครงสร้างและลำเลียงถาด ชุดโรยวัสดุเพาะ ชุดโรยเมล็ดข้าว และชุดโรยวัสดุกลบเมล็ด, 2) ถาดเพาะกล้า คือถาดพลาสติกสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 X 60 ตารางเซนติเมตร และ 3) เครื่องมือวัดและบันทึกผล เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล (ความละเอียด 0.01 กรัม), เครื่องวัดความเร็วรอบดิจิทัล และกล้องบันทึกภาพวิดีโอ



รูปที่ 1 แสดงเครื่องเพาะกล้าข้าวแบบกึ่งอัตโนมัติที่ใช้ทดสอบ

2. การศึกษาส่วนประกอบและหลักการทำงาน

ผู้วิจัยวิเคราะห์โครงสร้างเชิงกลและระบบส่งกำลังของเครื่องเพาะกล้าข้าวแบบกึ่งอัตโนมัติ (รูปที่ 1) โดยจำแนกส่วนประกอบหลักออกเป็น 4 ชุดทำงาน คือ 1) ชุดโรยวัสดุเพาะ ประกอบด้วย ถังบรรจุวัสดุ (Hopper) และกลไกลูกกลิ้งสายพานและประตูกันปรับระดับความหนาได้ 8 ระดับ โดยเน้นวิเคราะห์ความสม่ำเสมอที่ระดับ 7 และ 8, 2) ชุดโรยเมล็ดข้าว ใช้ระบบลูกกลิ้งร่องตัก (Fluted Roller) ขับเคลื่อนด้วยโซ่และเฟืองสำหรับเมล็ดพันธุ์ กข.43 วิเคราะห์ความแม่นยำเชิงพื้นที่ที่ระดับ 3 ถึง 6, 3) ชุดโรยวัสดุกลับเมล็ด มีกลไกแบบลูกกลิ้งสายพานทำหน้าที่โรยวัสดุปิดหน้าถาดเพื่อรักษาความชื้นในระดับที่เหมาะสมต่อการงอก และ 4) ชุดรางลำเลียงถาดเพาะ โครงสร้างเหล็กและโซ่ลำเลียงขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ควบคุมความเร็วเชิงเส้นให้สัมพันธ์กับความเร็วรอบของชุดโรยเพื่อลดความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่

3. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุเพาะ

ผู้วิจัยใช้ขี้เถ้าแกลบดำ (Rice Husk Ash) เป็นวัสดุเพาะหลักในการศึกษา เพื่อควบคุมตัวแปรที่ส่งผลต่อพฤติกรรมไหล (Flow Behavior) ในชุดโรยวัสดุ จึงดำเนินการสุ่มเก็บตัวอย่างจากทุกระดับการทดลอง (ระดับที่ 1 ถึง 8) ระดับละ 3 ซ้ำ (รวม $n = 24$ ตัวอย่าง) เพื่อวิเคราะห์สมบัติตามหลักเกณฑ์ดังนี้

3.1 ความชื้นฐานเปียก (Moisture Content, Wet Basis)

วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASABE S358.300 โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลความละเอียด 0.01 กรัม ก่อนนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ เพื่อกำหนดหาความชื้นร้อยละฐานเปียก

3.2 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

ประเมินตามแนวทางของ Mohsenin (1986) โดยบรรจุวัสดุลงในภาชนะทรงกระบอกที่ทราบปริมาตรด้วยวิธีเทแบบอิสระ เพื่อจำลองสภาวะภายในถังบรรจุวัสดุ (Hopper) แล้วนำมวลที่ได้ไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นรวม

3.3 ความพรุน (Porosity)

คำนวณค่าร้อยละความพรุนจากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวมและค่าความถ่วงจำเพาะอนุภาคของซีเมนต์แกลบดำ โดยอ้างอิงค่ามาตรฐานที่ 1.85 ตามการศึกษาของ Ikwueze et al. (2024) เพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการระบายอากาศและการसानตัวของระบบราก

4. การวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของชุดโรยวัสดุเพาะและชุดโรยเมล็ดข้าว

ผู้วิจัยทดสอบสมรรถนะความสม่ำเสมอเชิงพื้นที่และอิทธิพลของระดับการปรับตั้งกลไกภายใต้สภาวะปฏิบัติงานจริง (รูปที่ 2 และรูปที่ 3) เพื่อกำหนดจุดปฏิบัติงานที่มีสมรรถนะสูงสุด มีรายละเอียดดังนี้

4.1 แผนการทดลองและตัวแปรควบคุม การทดลองใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้งในทุกระดับ โดยควบคุมความเร็วเชิงเส้นของสายพานลำเลียง (Linear Conveyor Velocity) ให้คงที่ตามภาระงานแต่ละส่วน ได้แก่ 1) ชุดโรยวัสดุเพาะ ความเร็ว 0.028 เมตรต่อวินาที ศึกษาการปรับตั้งประตูกัน (Gate Opening) 8 ระดับ, 2) ชุดโรยเมล็ดข้าว ความเร็ว 0.084 เมตรต่อวินาที ศึกษาการปรับลูกกลิ้งร่อนตัก 6 ระดับ และ 3) ชุดโรยวัสดุกลบหน้า ความเร็ว 0.089 เมตรต่อวินาที

4.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล บรรจุซีเมนต์แกลบดำหรือเมล็ดพันธุ์ กข.43 ลงในถังบรรจุและเดินเครื่องในสภาวะต่อเนื่อง ตรวจวัดมวลวัสดุต่อภาชนะขนาด 30 x 60 เซนติเมตรด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลความละเอียด 0.01 กรัม พร้อมบันทึกวิดีโอเพื่อวิเคราะห์ความสม่ำเสมอเชิงพื้นที่ ป้องกันการซ้อนทับ (Overlap) หรือก่อกว้าง (Missing Hills)

4.3 การวิเคราะห์ทางสถิติและสมรรถนะ ข้อมูลถูกนำมาประมวลผลผ่านตัวชี้วัดสำคัญ 3 ด้าน คือ 1) ความสม่ำเสมอ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ตามเกณฑ์ Gomez and Gomez (1984), 2) การสร้างสมการสอบเทียบ วิเคราะห์ความถดถอยพหุนาม (Polynomial Regression) ระหว่างระดับการปรับตั้ง (x) และมวลวัสดุ (y) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และ 3) สมรรถนะเชิงเศรษฐศาสตร์ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำงานจริง (Capacity) และความสูญเสียวัสดุ เพื่อกำหนดต้นทุนการผลิตเปรียบเทียบกับความคุ้มค่าเชิงพาณิชย์



รูปที่ 2 แสดงการทดสอบหาความสม่ำเสมอในการโรยวัสดุเพาะ
(ก) ลักษณะของชุดโรยวัสดุเพาะ (ข) ลักษณะการโรยวัสดุเพาะลงในถาด
(ค) ลักษณะถาดที่โรยวัสดุเพาะแล้ว



รูปที่ 3 แสดงการทดสอบหาความสม่ำเสมอในการโรยเมล็ดข้าว
(ก) ลักษณะของชุดโรยเมล็ดข้าว (ข) ลักษณะการโรยเมล็ดข้าวลงในถาด
(ค) ลักษณะถาดที่โรยเมล็ดข้าวแล้ว

5. การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของระบบโรยวัสดุ

ผู้วิจัยกำหนดดัชนีชี้วัดสมรรถนะตามมาตรฐานวิศวกรรมเกษตร เพื่อประเมินประสิทธิภาพของชุดโรยวัสดุเพาะและชุดโรยเมล็ดข้าว ดังนี้

5.1 ความสามารถในการทำงาน (Capacity) คำนวณจากจำนวนถาดเพาะที่ผลิตได้จริงต่อหน่วยเวลา เพื่อประเมินอัตราการไหลของงานในสภาวะปฏิบัติงานจริง (Hunt, 2001) ตามสมการที่ (1)

$$C = [N/T] \quad (1)$$

เมื่อ C คือ ความสามารถในการทำงาน (ถาดต่อชั่วโมง)

N คือ จำนวนถาดเพาะที่ผลิตได้ทั้งหมด (ถาด)

T คือ เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานรวม (ชั่วโมง)

5.2 ประสิทธิภาพในการทำงาน (Efficiency) เป็นการเปรียบเทียบผลผลิตจริงกับความสามารถตามทฤษฎีของเครื่อง เพื่อประเมินศักยภาพในการใช้งาน (Hunt, 2001) ตามสมการที่ (2)

$$Ef = [Qa/Qt] \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ Ef คือ ประสิทธิภาพในการทำงาน (ร้อยละ)

Qa คือ ผลผลิตจริง

Qt คือ ผลผลิตตามทฤษฎี

5.3 ความสูญเสียของวัสดุเพาะ (Material Loss) วิเคราะห์ปริมาณวัสดุที่ตกหล่นนอกถาดอันเนื่องมาจากกลไกการปิดและระบบลำเลียง (ASABE, 2012) ตามสมการที่ (3)

$$L = [(Wi-Wo)/Wi] \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ L คือ ความสูญเสียของวัสดุเพาะ (ร้อยละ)

Wi คือ น้ำหนักวัสดุป้อนเข้าทั้งหมด (กิโลกรัม)

Wo คือ น้ำหนักวัสดุที่บรรจุในถาดอย่างสมบูรณ์ (กิโลกรัม)

5.4 ความสม่ำเสมอในการโรยวัสดุและเมล็ดข้าว (Consistency) ใช้สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) เป็นดัชนีชี้วัดความแม่นยำเชิงพื้นที่ในการกระจายตัวของวัสดุ (Gomez and Gomez, 1984) ตามสมการที่ (4)

$$\%CV = [SD/\bar{X}] \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยน้ำหนักวัสดุหรือเมล็ดข้าวต่อถาด (กรัม)

6. การวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุที่ใช้เพาะกล้าข้าว

ผู้วิจัยวิเคราะห์ต้นทุนผันแปรในส่วน of วัสดุ (Variable Material Costs) เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงเศรษฐศาสตร์ของการผลิตแผ่นกล้าต่อถาดภายใต้ระดับการปรับตั้งที่ต่างกัน (Hunt, 2001) ตามสมการที่ (5)

$$C_{total} = [W_s \times P_s] + [W_m \times P_m] \quad (5)$$

- เมื่อ C_{total} คือ ต้นทุนวัสดุรวมต่อถาด (บาทต่อถาด)
 W_s คือ มวลของเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ใช้จริงต่อถาด (กิโลกรัมต่อถาด)
 P_s คือ ราคาเมล็ดพันธุ์ข้าว (บาทต่อกิโลกรัม)
 W_m คือ มวลของวัสดุเพาะ (ซีเมนต์กลบดำ) ที่ใช้จริงต่อถาด (กิโลกรัมต่อถาด)
 P_m คือ ราคาวัสดุเพาะ (บาทต่อกิโลกรัม)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุเพาะ

จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของซีเมนต์กลบดำจากกลุ่มตัวอย่าง ($n = 24$) เพื่อยืนยันคุณภาพวัสดุก่อนทดสอบระบบโรยวัสดุ (Material Metering System) ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของซีเมนต์กลบดำที่ใช้ในการทดสอบ

รายละเอียด	หน่วย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	สัมประสิทธิ์ ความแปรปรวน (%CV)
ความชื้นฐานเปียก	เปอร์เซ็นต์	$17.741 \pm 1.513^*$	8.530
ความหนาแน่นรวม	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	$0.218 \pm 0.013^*$	5.859
ความถ่วงจำเพาะ	-	1.85^{**}	-
ความพรุน	เปอร์เซ็นต์	$88.225 \pm 0.690^*$	0.782

หมายเหตุ: * ค่าเฉลี่ยจากการสุ่มเก็บตัวอย่างในทุกระดับการทดสอบ ($n = 24$)

** ค่าอ้างอิงจาก Ikwueze et al. (2024)

จากผลการทดสอบในตารางที่ 1 พบว่าตัวแปรทางกายภาพทั้งหมดมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ต่ำกว่าร้อยละ 10 (8.530 และ 5.859 ตามลำดับ) ซึ่งสะท้อนถึงความสม่ำเสมอของวัสดุในระดับที่เยี่ยมตามเกณฑ์ของ Gomez and Gomez (1984) ส่งผลให้ความแตกต่างของปริมาณวัสดุที่โรยลงในถาดในการทดสอบสมรรถนะเครื่องจักร เป็นผลมาจากการปรับตั้งระดับกลไกของเครื่องจักรอย่างแท้จริงเมื่อพิจารณาค่าความพรุน พบว่าวัสดุมีค่าเฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 88.225 ± 0.690 ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์กลบดำที่ Ikwueze

et al. (2024) ระบุว่ามีความพรุนสูงและกักเก็บอากาศได้ดีกว่าดินทั่วไป (ร้อยละ 40-60) โดยโครงสร้างที่มีความพรุนสูงในระดับนี้ (มากกว่าร้อยละ 80) สอดคล้องกับแนวทางของ วิไล ปลายวิสุทธิ และคณะ (2560) ที่พบว่าช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของระบบรากข้าวให้เกิด การประสานตัว (Root Entwining) ได้อย่างหนาแน่น ทำให้แผ่นกล้า (Seedling Mat) มีความ แข็งแรงเชิงกลสูงขึ้นคุณสมบัติดังกล่าวถือเป็นปัจจัยวิกฤตที่ บรรลุ เพียชิน และคณะ (2563) ระบุว่าช่วยลดอัตราการความสูญเสียจากปัญหาห่อว่าง (Missing Hills) ในระหว่างกระบวนการ ปักดำได้มากกว่าร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับแผ่นกล้าที่ระบบรากไม่ประสานกัน เนื่องจากแผ่น กล้าที่มีความพรุนเหมาะสมจะทำให้ระบบรากสานเป็นโครงข่ายที่เหนียวแน่น ทนทานต่อชุด หยิบกล้าของเครื่องปักดำได้ดีกว่า

2. ผลการวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของชุดโรยวัสดุเพาะ

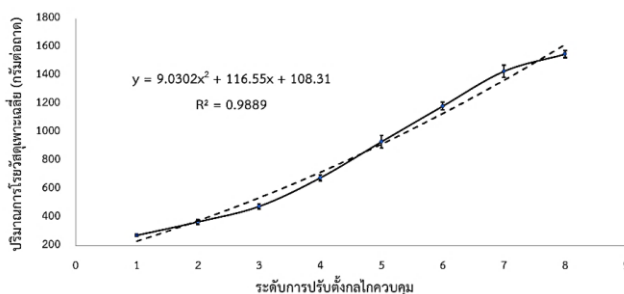
จากการทดสอบปริมาณการโรยวัสดุเพาะเฉลี่ยที่ระดับ 1 ถึง 8 พบว่ามวลวัสดุมี แนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง 274.593 ± 8.229 ถึง 1,551.491 ± 24.490 กรัมต่อถาด (ตารางที่ 2) โดยทุกระดับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) สะท้อนถึงความแม่นยำ ในการตอบสนอง (Precision Response) ของกลไกประตูกันควบคุม (Control Gate) ในด้าน ความสม่ำเสมอเชิงพื้นที่ พบค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) อยู่ระหว่างร้อยละ 1.578 ถึง 4.790 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีเยี่ยมตามเกณฑ์ของ Gomez and Gomez (1984) และ Karayel et al. (2004) ที่ระบุว่าค่า %CV ต่ำกว่าร้อยละ 10 เป็นระดับที่ยอมรับได้สำหรับเครื่องจักรกลเกษตร

ตารางที่ 2 ปริมาณการโรยวัสดุเพาะเฉลี่ยในแต่ละระดับการปรับตั้ง

ระดับการปรับตั้ง	ปริมาณการโรยวัสดุเพาะเฉลี่ย (กรัมต่อถาด)	สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV)
ระดับที่ 1	274.593 ± 8.229 ^h	2.997
ระดับที่ 2	369.394 ± 16.162 ^g	4.375
ระดับที่ 3	478.587 ± 19.000 ^f	3.970
ระดับที่ 4	680.315 ± 19.590 ^e	2.880
ระดับที่ 5	934.597 ± 44.766 ^d	4.790
ระดับที่ 6	1185.002 ± 27.584 ^c	2.328
ระดับที่ 7	1430.416 ± 42.272 ^b	2.955
ระดับที่ 8	1551.491 ± 24.490 ^a	1.578

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวนั่ง แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่าง กันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05)

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการปรับตั้ง (x) และปริมาณมวลวัสดุ (y) สอดคล้องกับตัวแบบพหุนามอันดับสอง (Second-Order Polynomial) $y = 9.0302X^2 + 116.55X + 108.31$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงถึง 0.9889 (รูปที่ 4) ความแม่นยำนี้สอดคล้องกับ Karayel et al. (2004) ที่ระบุว่าพฤติกรรมการโรยวัสดุสามารถพยากรณ์ด้วยสมการคณิตศาสตร์ได้อย่างแม่นยำหากกลไกทำงานสม่ำเสมอ นอกจากนี้ เสถียรภาพของระบบยังเป็นผลจากการออกแบบชุดลูกกลิ้งลำเลียงและแปรงปิดที่สัมพันธ์กับความเร็วสายพาน สอดคล้องกับรายงานของ บรรลุ เพียชิน และคณะ (2563) และ มงคล ธีระ และคณะ (2568) ที่พบว่าเสถียรภาพระบบส่งกำลังเป็นปัจจัยหลักต่อคุณภาพการกระจายตัวเพื่อลดปัญหาหว่าง (Missing Hills) ตามหลักการควบคุมความแม่นยำ (Precision Metering) ของ Srivastava et al. (2006)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์และสมการพยากรณ์ระหว่างระดับการปรับตั้งกลไกควบคุมและปริมาณการโรยวัสดุเพาะเฉลี่ย

3. ผลการวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของชุดโรยเมล็ดข้าว

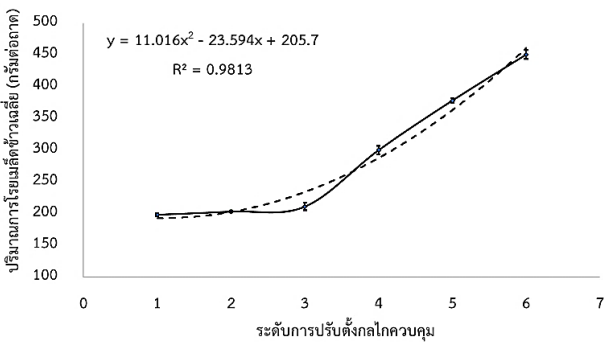
การทดสอบชุดโรยเมล็ดข้าวที่ระดับการปรับตั้ง 1 ถึง 6 พบว่าปริมาณมวลเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างเป็นระบบในช่วง 198.300 ± 1.972 ถึง 450.327 ± 6.915 กรัมต่อถาด (ตารางที่ 3) ข้อมูลทางสถิติยืนยันว่าปริมาณมวลในทุกะดับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ในด้านความสม่ำเสมอเชิงพื้นที่ พบค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) อยู่ระหว่างร้อยละ 0.631 ถึง 2.842 ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ดีเยี่ยม เนื่องจากต่ำกว่าเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนร้อยละ 5 สำหรับระบบจ่ายเมล็ดพันธุ์แม่นยำ (Precision Metering) ตามเกณฑ์ของ Gomez and Gomez (1984) และ Karayel et al. (2004)

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการปรับตั้ง (x) และปริมาณมวลเมล็ดข้าว (y) อธิบายได้ด้วยตัวแบบพหุนามอันดับสอง $y = 11.016x^2 - 23.594x + 205.7$ โดยมีค่า R^2 สูงถึง 0.9813 (รูปที่ 5) สะท้อนถึงความสามารถในการพยากรณ์และสอบเทียบอัตราการจ่ายได้อย่างแม่นยำ เสร็จสภาพดังกล่าวเป็นผลจากความเร็วรอบลูกกลิ้งร่อนดักที่ทำงานสัมพันธ์กับชุดลำเลียงถาด สอดคล้องกับการศึกษาของ บรรลุ เพียชิน และคณะ (2563) ที่ระบุว่าระบบควบคุมความเร็วที่คงที่ช่วยลดความแปรปรวนเชิงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้แผ่นกล้ามีความแข็งแรงสม่ำเสมอและลดปัญหาการเกิดกอว่าง (Missing Hills) ตามหลักวิศวกรรมเกษตรที่เสนอโดย Srivastava et al. (2006)

ตารางที่ 3 ปริมาณการโรยเมล็ดข้าวเฉลี่ยในแต่ละระดับการปรับตั้ง

ระดับการปรับตั้ง	ปริมาณการโรยเมล็ดข้าวเฉลี่ย (กรัมต่อถาด)	สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV)
ระดับที่ 1	198.300 ± 1.972 ^f	0.994
ระดับที่ 2	203.353 ± 1.283 ^e	0.631
ระดับที่ 3	211.107 ± 5.999 ^d	2.842
ระดับที่ 4	300.101 ± 6.498 ^c	2.165
ระดับที่ 5	378.041 ± 3.746 ^b	0.991
ระดับที่ 6	450.327 ± 6.915 ^a	1.536

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวดิ่ง แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์และสมการพยากรณ์ระหว่างระดับการปรับตั้งกลไกควบคุมกับปริมาณการโรยเมล็ดข้าวเฉลี่ย

4. ผลการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานชุดโรยวัสดุเพาะและชุดโรยเมล็ดข้าว

การทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างระดับการโรยที่ 7 และ 8 (ตารางที่ 4) พบว่าความสามารถทางปฏิบัติเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) โดยอยู่ในช่วง 351.07 ถึง 363.41 ถาดต่อชั่วโมง อย่างไรก็ตาม ระดับที่ 8 ให้ประสิทธิภาพทางปฏิบัติ (Field Efficiency) สูงถึงร้อยละ 79.435 ซึ่งมากกว่าระดับที่ 7 อย่างมีนัยสำคัญ ($P = 0.005$) ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากอัตราการไหลของวัสดุ (Mass Flow Rate) ที่ระดับ 8 มีความสมดุลกับความเร็วสายพานลำเลียงถาด ทำให้วัสดุเติมเต็มถาดได้สมบูรณ์และลดความสูญเสียลงเหลือร้อยละ 20.565 ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานของ Hunt (2001) ที่ระบุว่าประสิทธิภาพแปรผันตามความต่อเนื่องของระบบป้อนและทักษะผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ ความสูญเสียจากการตกหล่นที่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติสะท้อนถึงเสถียรภาพของกลไกปิดเกลี่ยหน้าดินแม้จะเปลี่ยนอัตราการจ่ายวัสดุ

ตารางที่ 4 สมรรถนะการทำงานและความสูญเสียของชุดโรยวัสดุเพาะที่ระดับการปรับตั้งแตกต่างกัน

ข้อมูลรายละเอียด	ระดับการโรยที่ 7	ระดับการโรยที่ 8	P-value
1. ความสามารถในการทำงานทางทฤษฎี (ถาดต่อชั่วโมง)	505.124 ± 33.487 ^a	458.624 ± 49.619 ^a	0.109 ^{NS}
2. ความสามารถในการทำงานทางปฏิบัติ (ถาดต่อชั่วโมง)	351.073 ± 29.237 ^a	363.408 ± 35.753 ^a	0.553 ^{NS}
3. ประสิทธิภาพในการทำงานทางปฏิบัติ (เปอร์เซ็นต์)	69.494 ± 3.325 ^b	79.435 ± 5.288 ^a	0.005 [*]
4. ความสูญเสียจากการโรยวัสดุเพาะไม่สมบูรณ์ในถาด (เปอร์เซ็นต์)	30.506 ± 3.325 ^a	20.565 ± 5.288 ^b	0.005 [*]
5. ความสูญเสียจากวัสดุที่เหลือในถังบรรจุและตกหล่น (เปอร์เซ็นต์)	2.989 ± 2.504 ^a	5.304 ± 3.444 ^a	0.243 ^{NS}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$)

5. ผลการวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุที่ใช้เพาะกล้าข้าว

ผู้วิจัยวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุผันแปรต่อถาดจากระดับปฏิบัติงานที่มีสมรรถนะสูงสุด (ชุดโรยวัสดุระดับ 8 และชุดโรยเมล็ดระดับ 5) โดยอ้างอิงราคาตลาดปัจจุบัน ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5 พบว่าต้นทุนรวมสุทธิอยู่ที่ 14.909 บาทต่อถาด

จากผลการวิเคราะห์ตารางที่ 5 พบว่าเมล็ดพันธุ์ข้าวเป็นตัวแปรวิกฤต (Critical Factor) เนื่องจากมีสัดส่วนต้นทุนสูงถึงร้อยละ 76.068 ของต้นทุนรวม ตามแนวทางของ Hunt (2001) ความคลาดเคลื่อนจากการจ่ายเมล็ดเกินความจำเป็น (Over-seeding) เพียงร้อยละ 10 จะส่งผลให้ต้นทุนเพิ่มขึ้น 1.134 บาทต่อถาด เมื่อพิจารณาจากขีดความสามารถทางปฏิบัติที่ 363.408 ถาดต่อชั่วโมง ปัญหาดังกล่าวจะก่อให้เกิดความสูญเสียแฝง (Hidden Cost) สูงถึง 412.105 บาทต่อชั่วโมง ดังนั้น ความแม่นยำสูง (ค่า $\%CV < 1$) และเสถียรภาพของเครื่องต้นแบบ SR-K800THL จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมต้นทุนการผลิต ซึ่งสะท้อนถึงความสำเร็จในการประยุกต์ใช้หลักการ Precision Metering เพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงเศรษฐศาสตร์ในระดับอุตสาหกรรม

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุผันแปรต่อถาดเพาะกล้า

รายการวัสดุ	มวลเฉลี่ย (กรัมต่อถาด)	ราคาต่อหน่วย (บาทต่อกิโลกรัม)	ต้นทุน (บาทต่อถาด)	สัดส่วนต้นทุน (ร้อยละ)
1. วัสดุเพาะซีเมนต์กลบดำ	1,551.491	2	3.103	20.813
2. เมล็ดพันธุ์ข้าว กข.43	378.041	30	11.341	76.068
3. วัสดุกลบหน้าเมล็ด	232.250	2	0.465	3.119
รวมต้นทุนสุทธิ	-	-	14.909	100

สรุปผลการวิจัย

เครื่องเพาะกล้าข้าวแบบกึ่งอัตโนมัติมีสมรรถนะและความสม่ำเสมอในการโรยวัสดุและเมล็ดพันธุ์ในระดับดีเยี่ยม โดยมีค่า $\%CV$ ต่ำกว่าร้อยละ 5 และมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำสูง ($R^2 > 0.98$) ซึ่งเหมาะสมสำหรับใช้เป็นฐานข้อมูลในการสอบเทียบ (Calibration) เพื่อการใช้งานจริง การประยุกต์ใช้เครื่องจักรที่มีความแม่นยำสูงไม่เพียงช่วยยกระดับมาตรฐานคุณภาพแผ่นกล้า (Seedling Mat Quality) ให้มีความสม่ำเสมอเท่านั้น แต่ยังเป็นกลไกสำคัญในการบริหารจัดการต้นทุนวัสดุและเมล็ดพันธุ์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดความสูญเสียเชิงเศรษฐศาสตร์ (Hidden Economic Losses) ได้อย่างเป็นรูปธรรม ส่งผลให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุดในการผลิตแผ่นกล้าข้าวระดับอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทางสาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องจักรกลเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดสอบ และขอขอบคุณนายคณนาถ ธรรมพรต นายบุญญพัฒน์ ต.วรพานิช นายธีระพงศ์ ระแสนพรม นายรณภัทร สุริยะวงศ์ทรัพย์ นายพรหมพร ใจช่วง และนายรัชพล วิเชียรเทียบ ที่เป็นผู้ช่วยสนับสนุนการทดสอบจนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- ดาวรุ่ง วชิรินทร์รัตน์, ปรียาณัฐ หงษ์ทอง และ ปราณี พระเพชร. (2560). *การเพาะกล้าข้าวสำหรับเครื่องดำนา*. (รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์). ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- บรรลุ เพียชิน, กิตติคุณ ปิตุพรหมพันธ์, สมาน คันทรินธ์, ฤชณพันธ์ ศรีมงคล และ วิรุทธ จีเพชร. (2563). การออกแบบและสร้างระบบโรยข้าวเมล็ดเดียวอัตโนมัติโดยใช้ถาดคัดเมล็ดพันธุ์. *วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี*, 1(3), 9-20.
- มงคล ธุระ, พงษ์ประพันธ์ ตันพงษ์, รัตน์ะ รัตนพรม, สาคร จำปาอ้อม, ยุทธนา ศรีบุญปาน, เอกสิษฐ์ นันติ, ราชันย์ พรหมแก้วงาม, จตุรงค์ คำกันทา, ประสงค์ วงศ์แก้ว, ขจรศักดิ์ ศิริสุภา, วาญญู ห้าวหาญ, ธนิตพงษ์ สุภาชาติ, นรินทร์ ศรีธิการ, ธวัช นนทธรรม, ปิติ นันทขว้าง และ ธนัญชัย ศรีวงษ์. (2568). การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพเครื่องอัดกลบดำในถาดเพาะต้นกล้าข้าวแบบกึ่งอัตโนมัติ ระบบไฮดรอลิกส์ไฟฟ้า. *วารสารวิจัยและนวัตกรรมการอาชีวศึกษา*, 9(2), 11-20.
- วิไล ปาละวิสุทธิ, พรสุรี กาญจนนา, นริศรา จำรูญวงษ์, สง่า โนจักษ์, และ ดวงมล บุญช่วย. (2560). เทคโนโลยีที่เหมาะสมในการเพาะกล้าสำหรับเครื่องดำนาในงานผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าว. *วารสารวิชาการข้าว*, 8(1), 67-83.
- American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). (2012). *Agricultural machinery management data (ASAE D497.7)*. St. Joseph, MI: ASABE.
- Gao, Y., Shao, M., Zhang, Y., Zhang, Y., Wang, Y., Wang, Z., Zhu, D., Zhang, Y., Xiang, J., & Chen, H. (2024). Effects of the seedling tray overlapping for seed emergence mode on emergence characteristics and growth of rice seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1-13.

- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Hunt, D. (2001). *Farm power and machinery management* (10th ed.). Ames: Iowa State University Press.
- Ikwueze, S. N., Animba, O., & Nnadi, E. E. (2024). A comprehensive analysis of the influence of rice husk ash content on concrete strength. *INOSR Applied Sciences*, 12(2), 69-81.
- Karayel, D., Barut, Z. B., & Ozmerzi, A. (2004). Mathematical modelling of vacuum pressure on a precision seeder. *Biosystems Engineering*, 87(4), 437-444.
- Liu, Y., He, P., Cao, Y., Zhu, C., & Ding, S. (2024). Evaluation model of rice seedling production line seeding quality based on deep learning. *Applied Sciences*, 14(7), 3098.
- Mohsenin, N. N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials: Structure, physical characteristics and mechanical properties* (2nd ed.). New York: Gordon and Breach Science Publishers.
- Srivastava, A. K., Goering, C. E., Rohrbach, R. P., & Buckmaster, D. R. (2006). *Engineering Principles of Agricultural Machines* (2nd ed.). St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers.