

การพัฒนาเครื่องอัดก้อนเชื้อเห็ดแบบกึ่งอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต

Development of A Semi-Automatic Mushroom Block Compression Machine to Improve Production Efficiency.

เบญญา กasantikul^{1*}

Benya Kasantikul^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต
กำแพงแสน นครปฐม

¹Mechanical Department, Engineering Faculty at Kasetsart University, Kamphaeng Sean
Campus, Nakhon Pathom

*Corresponding author email: benya.k@ku.th

Received 27 Nov. 2025 Revised 10 Feb. 2026 Accepted 11 May. 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอัดก้อนเชื้อเห็ดแบบกึ่งอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดต้นทุนแรงงาน และลดระยะเวลาในกระบวนการทำก้อนเชื้อเห็ด เนื่องจากกระบวนการผลิตเดิมยังมีข้อจำกัดด้านกำลังการผลิตและต้องพึ่งพาแรงงานคนเป็นหลัก เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า ทำงานร่วมกับกลไกแบบ Slider-Crank และชุดกระบอกลูกสูบจำนวน 4 กระบอก สามารถอัดก้อนเชื้อเห็ดได้ครั้งละ 4 ก้อน

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องดำเนินการที่ความถี่การทำงานตั้งแต่ 2 ถึง 10 เฮิร์ตซ์ ผลการทดสอบพบว่า ที่ความถี่ 10 เฮิร์ตซ์ เครื่องสามารถผลิตก้อนเชื้อเห็ดได้สูงสุด 48 ก้อนต่อนาที เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องต้นแบบเดิมซึ่งผลิตได้ 10 ก้อนต่อนาที คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังการผลิต 380% และเพิ่มขึ้น 63.33% เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการทำงานของแรงงานคนต่อหน่วยเวลา

ความถี่การทำงานที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง 3–4 เฮิร์ตซ์ ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนเชื้อเห็ดสูงสุดเท่ากับ 0.78 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวมเท่ากับ 0.64 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงถึงคุณภาพการอัดที่ดีขึ้น นอกจากนี้ การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า เครื่องที่พัฒนาขึ้นมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 2.83 วัน เครื่องต้นแบบดังกล่าวเหมาะสำหรับผู้ประกอบการรายย่อย เกษตรกร และวิสาหกิจชุมชนที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก้อนเชื้อเห็ดอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: เครื่องอัดก้อนเห็ด, ระบบกึ่งอัตโนมัติ, ประสิทธิภาพการผลิต, ระบบกระบอกอัด 4 กระบอก, ระบบการอัดหลายตำแหน่ง

Abstract

This research aimed to develop a semi-automatic mushroom substrate block pressing machine to improve production efficiency, reduce labor costs, and shorten the production cycle. Conventional production systems are limited by low output capacity and heavy reliance on manual labor. The developed prototype is driven by a 1-horsepower electric motor combined with a slider–crank mechanism and a four-cylinder system, allowing the simultaneous pressing of four mushroom substrate blocks per cycle.

Performance tests were conducted at operating frequencies ranging from 2 to 10 Hz. The results showed that at 10 Hz, the machine achieved a maximum production rate of 48 substrate blocks per minute, compared with 10 blocks per minute produced by the previous prototype. This corresponds to a 380% increase in production capacity relative to the original prototype and a 63.33% increase compared with manual labor per unit time.

The optimal operating frequency was found to be 3–4 Hz, yielding the highest average substrate block density of 0.78 g/cm³, while the overall average density across all tested frequencies was 0.64 g/cm³, indicating improved compaction quality. An economic analysis revealed a payback period of approximately 2.83 days. The proposed low-cost machine effectively increases production capacity, reduces labor dependency, and is suitable for small-scale producers seeking sustainable improvements in mushroom substrate block production efficiency.

Keywords: mushroom block compressor, semi-automatic system, efficiency improvement, four-cylinder system, multi-station compression

1. บทนำ

การเพาะเห็ดเป็นกิจกรรมทางการเกษตรที่สำคัญในประเทศไทย เนื่องจากเป็นอาชีพที่สามารถสร้างรายได้อย่างต่อเนื่อง ใช้วัตถุดิบราคาถูก และทำได้ในพื้นที่จำกัด วัสดุปลูกที่นิยมใช้ ได้แก่ ขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมรำละเอียด เนื่องจากมีคุณสมบัติเหมาะสมทั้งด้านโครงสร้างและคุณค่าทางอาหารต่อการเจริญของเส้นใยเห็ด โดยเฉพาะในการเพาะ เห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*) ซึ่งเป็นเห็ดเศรษฐกิจที่ได้รับความนิยมในระดับฟาร์มขนาดเล็กและชุมชน (Seecharan, 2022; Sassine & El Sebaaly, 2024; Kilic & Yildiz, 2024) ในภาคการผลิตเห็ดเชิงพาณิชย์ขนาดเล็กและระดับชุมชน กระบวนการเตรียมวัสดุและการขึ้นรูปก้อนเพาะยังพบข้อบกพร่องในรูปแบบกิ่งแมนนวลหรือแมนนวล ซึ่งส่งผลจำกัดต่อการผลิต ความต่อเนื่องของการผลิต และความสม่ำเสมอของคุณภาพก้อนเพาะ (FAO, 2011; Cornell Small Farms Project, 2019) โดยกระบวนการเตรียมก้อนเพาะและการอัดก้อนในระบบระดับชุมชนมักใช้แรงงานจำนวนมาก โดยเฉพาะในฟาร์มที่ต้องผลิตก้อนเชื้อจำนวนหลายพันก้อนต่อวัน ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดด้านกำลังการผลิตและต้นทุนแรงงาน (EKOFUNGI, 2017)

ในด้านคุณภาพก้อนเพาะ งานวิจัยด้านวัสดุเพาะเห็ดพบว่า ความหนาแน่น ความสม่ำเสมอของน้ำหนัก และโครงสร้างของวัสดุปลูกมีผลโดยตรงต่อการเจริญของเส้นใยและคุณภาพผลผลิต (Kilic & Yildiz, 2024; Sassine & El Sebaaly, 2024; Seecharan, 2022) โดยความหนาแน่นของก้อนเพาะในงานวิจัยนี้วัดจากอัตราส่วนระหว่างมวลของก้อนเพาะต่อปริมาตรก้อน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ซึ่งสะท้อนถึงระดับการอัดและความแน่นของวัสดุปลูก ดังนั้นกระบวนการอัดก้อนจึงต้องสามารถควบคุมแรงอัดและจังหวะการอัดได้อย่างสม่ำเสมอ

ในด้านวิศวกรรมของระบบอัด การใช้กลไก Slider-Crank Mechanism ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในการออกแบบเครื่องอัดลูกสูบ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการแปลงพลังงานการหมุนให้เป็นแรงอัดเชิงเส้น และสามารถสร้างโปรไฟล์แรงอัดที่เหมาะสมสำหรับวัสดุชีวมวล (Sharma & Patel, 2020) นอกจากนี้ งานวิจัยด้านการอัดวัสดุชีวมวลยังระบุว่า แรงอัด ความเร็วลูกสูบ และ dwell time ซึ่งหมายถึงช่วงเวลาที่ลูกสูบคงอยู่ใน

ตำแหน่งอัดสูงสุด เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อัดแท่งอย่างมีนัยสำคัญ (Philippoussis, 2009)

ในด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO, 2017) ชี้ให้เห็นว่า เครื่องจักรกลเกษตรขนาดเล็กที่ได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสม สามารถเพิ่มผลผลิต ลดการพึ่งพาแรงงาน และมีระยะเวลาคืนทุนที่สั้น เหมาะสมสำหรับผู้ประกอบการรายย่อย การพัฒนาเครื่องจักรกลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดเวลาการปฏิบัติงานเป็นแนวทางที่พบได้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านวิศวกรรม (Tuammee et al., 2020)

จากข้อมูลทั้งหมดนี้ งานวิจัยจึงมุ่งพัฒนาเครื่องอัดก้อนเชื้อเห็ดแบบกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งหมายถึงระบบที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและกลไกในการอัดก้อนโดยอัตโนมัติ ขณะที่ขั้นตอนการบรรจุวัสดุปลูกและการถอดก้อนยังคงดำเนินการโดยแรงงานคน โดยสามารถอัดก้อนเชื้อเห็ดได้ครั้งละ 4 ก้อน เพื่อเพิ่มกำลังการผลิต ลดการพึ่งพาแรงงาน และคงคุณภาพก้อนเพาะให้สม่ำเสมอ ทั้งนี้ การทดสอบเครื่องดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมห้องปฏิบัติการ และยังไม่ได้ทำการทดสอบผลระยะยาวต่อการเจริญของเส้นใยเห็ดหลังการอัด โดยมีต้นทุนเครื่องจักรที่เหมาะสมและสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลาอันสั้น เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงในระดับฟาร์มและวิสาหกิจชุมชน

2. วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอัดก้อนเชื้อเห็ดแบบกึ่งอัตโนมัติที่ใช้กลไก Slider-Crank
- 2) เพื่อประเมินผลการทำงานในด้านกำลังผลิตและคุณภาพก้อน
- 3) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเครื่องต้นแบบและเครื่องที่พัฒนา
- 4) เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนและจุดคุ้มทุนของการใช้งานเครื่อง

3. วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องที่พัฒนาขึ้นใช้ระบบกลไกแบบ Slider-Crank Mechanism พร้อมมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า และชุดเกียร์ทดรอบ 20:1 ทำให้เกิดแรงบิดที่เพียงพอสำหรับการอัดวัสดุปลูกที่มีความหนาแน่นสูง การทดสอบดำเนินการที่ความถี่ 2–6 Hz เพื่อประเมิน

ประสิทธิภาพ และนำผลที่ความถี่ 10 Hz มาเปรียบเทียบกับเครื่องต้นแบบของศูนย์เพาะเห็ด



ก) เครื่องต้นแบบ



ข) เครื่องที่พัฒนา

ภาพที่ 1 แสดงเครื่องอัดก้อนเชื้อเห็ด ก) เครื่องต้นแบบ ข) เครื่องที่พัฒนา

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องอัดก้อนเชื้อเห็ดแบบกึ่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น กลไก Slider-Crank ถูกเลือกใช้เนื่องจาก แปลงการหมุนเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Uicker, Pennock & Shigley, 2013) ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้

- 1) มอเตอร์ไฟฟ้ากำลัง 1 แรงม้า
- 2) ชุดเกียร์ทดรอบอัตราทด 20:1
- 3) กลไกส่งกำลังแบบ Slider-Crank Mechanism
- 4) ชุดกระบอกอัดจำนวน 4 กระบอก (4-station compression unit)
- 5) โครงสร้างเหล็กกล้าเพื่อรองรับแรงอัด
- 6) ระบบจ่ายวัสดุปลูกแบบกึ่งอัตโนมัติ

การทดสอบดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมควบคุมที่อุณหภูมิ 28–30°C และความชื้นสัมพัทธ์ 60–70% โดยมีการควบคุมสภาพแวดล้อมให้ใกล้เคียงกันตลอดการทดลองเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวัด

ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (rubber tree sawdust) ถูกใช้เป็นวัสดุตั้งต้น (basal substrate) อย่างแพร่หลายในกระบวนการเพาะเห็ด เนื่องจากเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ประกอบด้วย cellulose, hemicellulose และ lignin ซึ่งเหมาะต่อการเจริญของเส้นใยเห็ด (Zakil et al., 2021) โดยผสมตามอัตราส่วนมาตรฐาน ขี้เลื่อย 100 กก.: รำ 6 กก.: น้ำตามค่าความชื้น 55% (วัดด้วยวิธี gravimetric method) การควบคุมความชื้นของวัสดุปลูกที่ประมาณ 55% เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูปและการอัดก้อน (Kilic & Yildiz, 2024; Sassine & El Sebaaly, 2024)"

3.2 การออกแบบผังการทดลอง (Experimental Design)

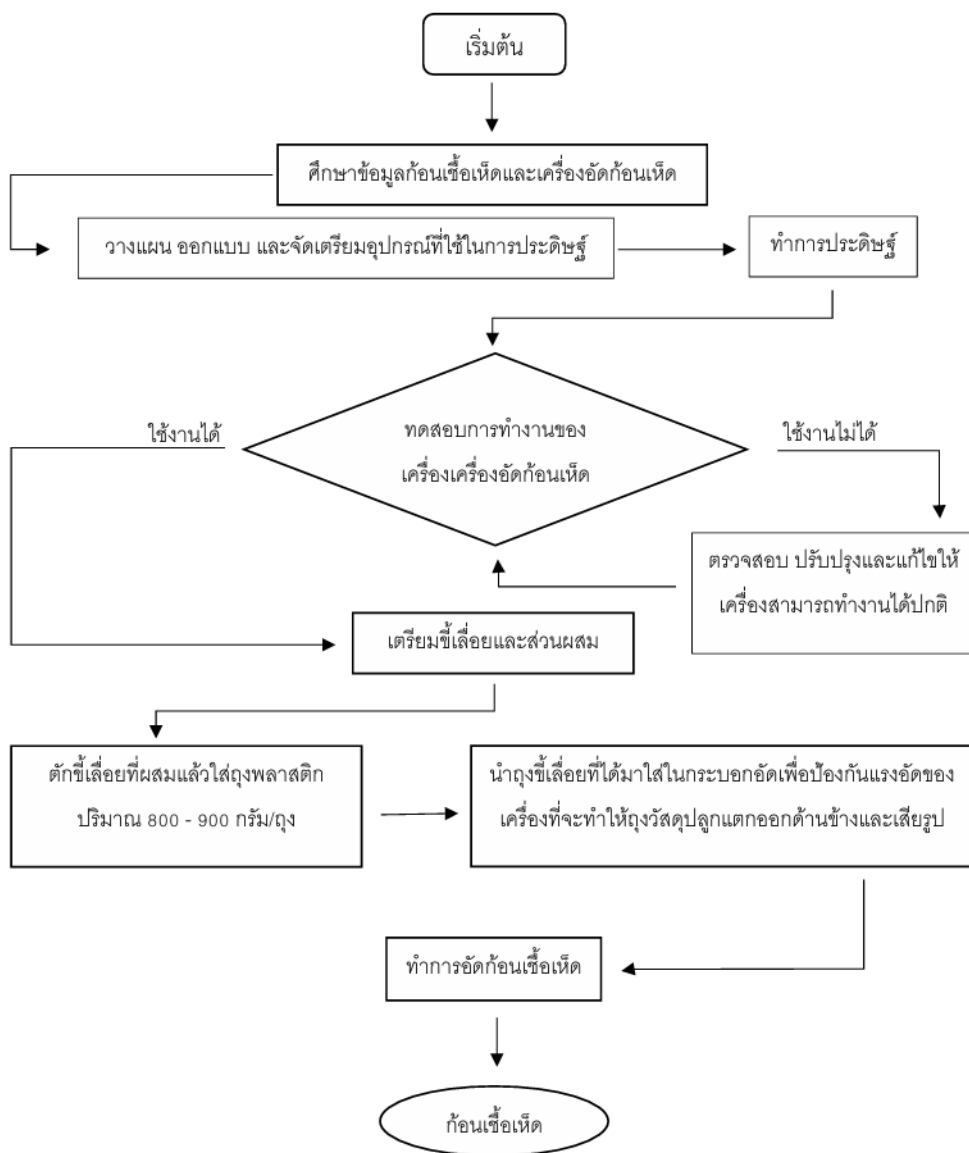
ตัวแปรต้น (Independent Variable)

- 1) ความถี่รอบของมอเตอร์ (Hz) = 2, 4, 6, 8 และ 10 Hz
- 2) ตัวแปรตาม (Dependent Variables)
- 3) จำนวนก้อนเชื้อเห็ดที่ผลิตได้ต่อนาที
- 4) ความหนาแน่น (g/cm^3)
- 5) ความสม่ำเสมอของรูปร่างและน้ำหนักก้อน
- 6) เวลาในการอัดต่อรอบ (Cycle time)

ตัวแปรควบคุม (Control Variables)

- 1) ความชื้นของวัสดุปลูก = 55%
- 2) ปริมาณผสมวัสดุต่อก้อน = 800–900 g
- 3) จำนวนกระบอกอัด = 4 กระบอก
- 4) ระยะชักลูกสูบ = ค่าออกแบบคงที่

ผังการทดลอง ใช้แบบ Completely Randomized Design (CRD) ทำซ้ำ 5 ครั้ง ในแต่ละระดับความถี่



ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการทำงานและผังการทดลอง

3.3 ขั้นตอนการทดสอบการทำงานของเครื่องอัดก้อนเชื้อเห็ด

- 1) เตรียมวัสดุปลูกให้ได้ความชื้น 55%
- 2) เติมวัสดุลงถังป้อนของเครื่อง
- 3) ตั้งค่าความถี่รอบของมอเตอร์
- 4) เริ่มการอัดเพื่อผลิตก้อนเชื้อเห็ด

- 5) ชั่งน้ำหนักก่อนที่ได้ทุกก้อน
- 6) วัดขนาดและคำนวณความหนาแน่น
- 7) บันทึกจำนวนก้อนที่ผลิตได้ภายใน 1 นาที
- 8) ทำซ้ำ 5 รอบต่อระดับความถี่

3.4 การคำนวณความหนาแน่นของก้อนเชื้อเห็ด

ใช้สมการ:

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{มวล}}{\text{ปริมาตร}}$$

$$\text{ปริมาตร} = \pi R^2 h$$

โดยที่ R คือ รัศมีของก้อนเชื้อเห็ด (เซนติเมตร)

และ h คือ ความสูงเฉลี่ยของก้อนเชื้อเห็ด (เซนติเมตร) ซึ่งวัดจาก 3 ตำแหน่ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

ข้อมูลนำเสนอในรูปค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างความถี่การทำงานโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

- 1) วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- 2) วิเคราะห์ผลกระทบของความถี่ต่อประสิทธิภาพการผลิต
- 3) ใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปร

3.6 การวิเคราะห์เปรียบเทียบและคำนวณจุดคุ้มทุน

3.6.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องจักร

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเครื่องที่พัฒนามีประสิทธิภาพสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญและสามารถลดการใช้แรงงานได้

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์ของเครื่องต้นแบบและเครื่องที่พัฒนา

รายการ	เครื่องเชิงพาณิชย์ทั่วไป	เครื่องที่พัฒนา	การเปลี่ยนแปลง
ราคาซื้อเครื่อง	35,000–45,000 บาท	12,500 บาท	ลดลง ~65%
กำลังผลิต	8–12 ก้อน/นาที่	48 ก้อน/นาที่	เพิ่มขึ้น 380%
จำนวนก้อนต่อรอบ	1	4	เพิ่มขึ้น 300%
ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm ³)	0.61	0.64	+4.91%
แรงงานที่ต้องใช้	2 คน	1 คน	-50%

3.6.2 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

ต้นทุนเครื่องอัด

เครื่องเชิงพาณิชย์ทั่วไป: 35,000–45,000 บาท

เครื่องที่พัฒนา: 12,500 บาท ประหยัด 60–70%

ต้นทุนแรงงาน

เดิม: 2 คน = 600 บาท/วัน

ใหม่: 1 คน = 300 บาท/วัน ประหยัด 300 บาท/วัน

3.6.3 การคำนวณจุดคุ้มทุน (Payback Period)

สูตร:

$$\text{Payback} = \frac{\text{ต้นทุนเครื่อง}}{\text{ผลประโยชน์ต่อวัน}}$$

ผลประโยชน์ต่อวันประกอบด้วย

1) ประหยัดแรงงาน = 300 บาท/วัน

2) ผลผลิตเพิ่มขึ้น

เดิม 600 ก้อน/ชม.

ใหม่ 2,880 ก้อน/ชม.

กำไรสุทธิต่อก้อน = 0.30 บาท

กำไรเพิ่มขึ้นต่อชั่วโมง = $(2,880 - 600) \times 0.30 = 684$ บาท/ชม.

วันละ 6 ชม. คำนวณรายได้ 4,104 บาท/วัน

รวมผลประโยชน์ = $4,104 + 300 = 4,404$ บาท/วัน

คำนวณจุดคุ้มทุน

$$\text{Payback} = \frac{12500}{4,404} = 2.83$$

3.6.4 สรุปผลด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

เครื่องที่พัฒนามีต้นทุนต่ำ เพิ่มกำลังผลิตเกือบ 4 เท่า ลดแรงงานคน จุดคุ้มทุนต่ำมาก (2-3 วัน) เหมาะสำหรับเกษตรกรรายย่อยและวิสาหกิจชุมชน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าเครื่องที่พัฒนามีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงกว่าเครื่องในท้องตลาดอย่างชัดเจน

4. การวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

4.1 กลไก Slider-Crank และการวิเคราะห์จลนศาสตร์ (Kinematic Analysis)

เครื่องอัดก้อนเชื้อเห็ดที่พัฒนาขึ้นใช้กลไก Slider-Crank Mechanism เพื่อแปลงการหมุนของเพลามอเตอร์ให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นของลูกสูบ สมการการเคลื่อนที่ของลูกสูบมีลักษณะดังนี้:

$$x = R \cos \theta + \sqrt{L^2 - (R \sin \theta)^2}$$

การเปลี่ยนตำแหน่งเชิงเส้นของลูกสูบขึ้นกับ รัศมีข้อเหวี่ยง (R) และ ความยาวก้านสูบ (L) ซึ่งส่งผลต่อความเร็วและความเร่งของลูกสูบ ความเร็วลูกสูบสูงสุดเกิดที่มุมประมาณ 90° และ 270° เนื่องจากเป็นช่วงที่อัตราการเปลี่ยนตำแหน่งสูงที่สุด ซึ่งนำไปสู่แรงอัดสูงสุดในช่วงกลางชัก (mid-stroke) สอดคล้องกับงานของ Tumuluru et al. (2011) พฤติกรรมการอัดของวัสดุชีวมวลขึ้นอยู่กับแรงอัดและอัตราการอัด โดยเมื่อความถี่ในการทำงานเพิ่มขึ้นจะทำให้ช่วงเวลาการอัด (dwell time) ลดลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพการอัดและความสม่ำเสมอของความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์อัด

4.2 การวิเคราะห์แรงอัด (Compression Force Analysis)

แรงอัดที่เกิดขึ้นประมาณได้จากสมการ:

$$F = \frac{T}{R}$$

โดยที่

F = แรงอัด (นิวตัน)

T = แรงบิดหลังผ่านชุดเกียร์ทดรอบ (นิวตัน เมตร)

R = รัศมีข้อเหวี่ยง (เมตร)

เมื่อมอเตอร์ขนาด 1 HP ผ่านชุดเกียร์ทดรอบ 20:1 ค่าแรงบิดที่เพลาขาออกจะเพิ่มขึ้นตามอัตราทด ทำให้แรงอัดเพียงพอต่อการรวมตัวของวัสดุปลูกขึ้นเรื่อย แนวคิดสอดคล้องกับหลักการของการอัดแน่นวัสดุชีวมวลซึ่งระบุว่าแรงอัดและเงื่อนไขการอัดมีผลต่อความหนาแน่นและความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์อัดแน่น (Tumuluru et al., 2011)

4.3 ความถี่ (Frequency) กับประสิทธิภาพแรงอัด

จากผลทดสอบพบว่า:

< 4 Hz: แรงอัดเสถียร แต่กำลังการผลิตต่ำ

≈ 6 Hz: เหมาะสมที่สุด ทั้งแรงอัดและความหนาแน่น

10 Hz: ผลิตได้มากที่สุด แต่ความหนาแน่นลดลง

สาเหตุเกิดจากความเร็วลูกสูบที่สูงเกินไปทำให้เวลาการอัด (dwell time) สั้นลง วัสดุไม่สามารถจัดเรียงตัวได้เต็มที่ ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง งานของ Asp et al. (2023) ให้ผลตรงกัน โดยพบว่าความเร็วอัดสูงทำให้ความแน่นของวัสดุชีวมวลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

4.4 ความหนาแน่นของก้อนอัด (Density Analysis)

ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 0.64 g/cm³ อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับเห็ดนางรมตามเกณฑ์ของ Kilic & Yildiz (2024) และ Sassine & El Sebaaly (2024)

4.5 พฤติกรรมการอัดของวัสดุชีวมวลแบบพรุน (Porous Biomass Behavior)

วัสดุปลูกประเภทขึ้นเลื้อยมีพฤติกรรมการอัดแบบ Nonlinear Compaction ซึ่งขึ้นกับ dwell time การอัด และความชื้น ดัง Philippoussis (2009) ระบุว่าทำให้เวลาแรงอัดเพียงพอทำให้อัดแน่นขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

5. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

5.1 ผลการวิจัย

ตารางที่ 2 ตารางสรุปผล ความถี่ 2–6, และ 10 Hz เปรียบเทียบ

ความถี่ (Hz)	ผลผลิตเฉลี่ย (ก้อน/นาท)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm ³)
2	8	0.72
3	11	0.78
4	14	0.75
5	20	0.74
6	23	0.72
10 (เครื่องที่พัฒนา เปรียบเทียบ)	48	0.64
10 (เครื่องต้นแบบ)	10	0.61

ตารางที่ 2 ความถี่ 2 Hz กำลังการผลิตเฉลี่ย = 8 ก้อน/นาท ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย = 0.72 g/cm³ ผลผลิตมีความสม่ำเสมอสูง เนื่องจาก dwell time มาก ส่งผลแรงอัดเสถียร ผลลัพธ์สอดคล้องกับ Asp et al. (2023) ที่ระบุว่า “ความเร็วต่ำให้ความหนาแน่นดี แต่กำลังผลิตต่ำ”

ตารางที่ 2 ความถี่ 3 Hz กำลังการผลิตเฉลี่ย = 11 ก้อน/นาท ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย = 0.78 g/cm³ ความหนาแน่นสูงกว่า 2 Hz เนื่องจากแรงอัดสูงขึ้นและวัสดุจัดเรียงตัวดีขึ้น ค่าความหนาแน่นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพก้อนเพาะเห็ด (Kilic & Yildiz, 2024)

ตารางที่ 2 ความถี่ 4 Hz กำลังการผลิตเฉลี่ย = 14 ก้อน/นาท ความหนาแน่นเฉลี่ย = 0.75 g/cm³ ความหนาแน่นสูงกว่าความถี่ 2–3 Hz สะท้อนว่าแรงอัดสูงขึ้นและวัสดุจัดตัวแน่นขึ้น ไม่มีความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักก้อน ส่งผลให้ระบบ feeding เสถียร ค่า density เพิ่มขึ้นจาก 0.72 เป็น 0.78 แล้วลดลงเป็น 0.75 ตามลำดับ ความถี่ระดับกลาง (4 Hz) ให้ผลดี แต่เริ่มเห็นสัญญาณว่า density อาจเริ่มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น เข้าเงื่อนไขตาม

ทฤษฎี Asp et al. (2023) "ความถี่ที่สูงขึ้นทำให้ dwell time ลดลง และความหนาแน่นจะเริ่มลดลงหลังถึงจุดเหมาะสม"

ตารางที่ 2 ความถี่ 5 Hz แสดงกำลังการผลิตเฉลี่ย = 20 ก้อน/นาที่ ความหนาแน่นเฉลี่ย = 0.74 g/cm^3 ผลผลิตเพิ่มขึ้น 42.9% จากความถี่ 4 Hz (14 เป็น 20 ก้อน/นาที่) ความหนาแน่นเริ่มลดลงเล็กน้อยจากระดับ 3 Hz–4 Hz ความถี่ 5 Hz เป็น “จุดสมดุลใหม่” ที่ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นชัดเจนแต่ density ลดลงจาก 0.75 เป็น 0.74 เนื่องจากวัสดุปลูกถูกอัดด้วยความเร็วสูงขึ้น ทำให้จัดเรียงตัวไม่เต็มที่ตรงตามรายงานของ Philippoussis (2009) และ Asp et al. (2023) วัสดุชีวมวลที่ความถี่สูง จะมีการสูญเสียแรงคงค้าง (dwell) ทำให้ g/cm^3 ลดลง

5.2 วิเคราะห์เชิงวิศวกรรม (Engineering interpretation)

จากตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ — dwell time — density เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จำนวนรอบ/นาที่เพิ่มขึ้น (productivity เพิ่มขึ้น) แต่เวลาในช่วงที่ถูกสูกดค้าง (dwell time) ต่อบรรลุลง ทำให้วัสดุชีวมวล (porous biomass) มีเวลาจัดเรียงตัวน้อยลง จึงพบแนวโน้ม density เพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง (peak at 3 Hz) แล้วค่อย ๆ ลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น (สอดคล้องกับ Philippoussis, 2009; Asp et al., 2023)

ประสิทธิภาพของระบบ Slider-Crank พบว่ากลไกนี้ส่งแรงอัดอย่างเหมาะสมในช่วงความถี่ต่ำ–กลาง โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอัดวัสดุและคุณภาพผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะความหนาแน่นที่ค่อนข้างสม่ำเสมอในช่วงที่แรงอัดและอัตราการอัดสมดุล เช่นที่รายงานในการศึกษาการอัดวัสดุชีวมวลก่อนหน้านี้ (Tumuluru et al., 2011).

Trade-off ระหว่างปริมาณและคุณภาพ หากต้องการ คุณภาพก้อนสูงสุด (density สูงและสม่ำเสมอ) ควรเลือกความถี่ ~3–4 Hz (density สูงสุด 0.78 และ 0.75 g/cm^3 ตามลำดับ)

หากต้องการ ปริมาณสูงสุด เลือก 10 Hz (48 ก้อน/นาที่) แต่ต้องยอมรับความหนาแน่นที่ลดลง (0.64 g/cm^3) และตรวจสอบผลต่อการเพาะจริง (growth test) ก่อนการใช้งานเชิงพาณิชย์

ความเสถียรของ Feeding และน้ำหนักก้อน น้ำหนักก้อนทดสอบทุกรายการ เท่ากัน (800 g) แสดงว่าระบบ feeding ถูกออกแบบและควบคุมปริมาณได้ดี แม้ที่ความถี่สูง ผลต่างน้ำหนักน้อย ช่วยให้การเปรียบเทียบ density เป็นไปได้อย่างเชื่อถือ

ผลต่อพลังงานและโครงสร้างเครื่อง ความถี่สูงขึ้นจะเพิ่มพลังงานต่อหน่วยเวลาและการสั่นสะเทือนของเครื่อง จึงควรพิจารณาการออกแบบโครงสร้างเพื่อรองรับ fatigue และติดตั้ง damping/anchoring ถ้าต้องการเดินเครื่องที่ความถี่สูงเป็นประจำ

5.3 เปรียบเทียบเครื่องที่พัฒนามกับเครื่องต้นแบบและงานวิจัยก่อนหน้านี้

เครื่องต้นแบบศูนย์: ผลผลิต 10 ก้อน/นาทีก, density 0.61 g/cm^3 เครื่องที่พัฒนา (ตัวอย่าง) ที่ 10 Hz: ผลผลิต 48 ก้อน/นาทีก (+380% เมื่อเทียบกับเครื่องต้นแบบ), density 0.64 g/cm^3 (+0.03 g/cm^3)

สรุปเชิงประสิทธิภาพ: เครื่องที่พัฒนามีประสิทธิภาพการผลิตสูงกว่า และให้ความหนาแน่นดีกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเครื่องต้นแบบ แม้การเพิ่มความถี่จะทำให้ density ลดลง แต่ยังคงสูงกว่าต้นแบบ ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบงานวิจัย

งานวิจัย	ระบบอัด	ก้อน/นาทีก	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ต้นทุนเครื่อง	ข้อดี
เครื่องต้นแบบ	1 กระบอ	10	0.61	ปานกลาง	เริ่มต้น
งานวิจัยนี้	4 กระบอ (Semi-Auto)	48	0.64	ต่ำมาก	ผลิตเร็วที่สุด

5.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

5.4.1. ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Table)

ตารางที่ 4 แสดง One-way ANOVA (Regression ANOVA): Productivity-Frequency

แหล่งที่มา (Source)	df	Sum Sq	Mean Sq	F-value	p-value
Frequency	1	1030.23	1030.23	195.23	0.000152
Residual	4	21.11	5.28	-	-

จากตารางที่ 4 สรุปได้ว่าความถี่มีผลต่อกำลังผลิตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$)

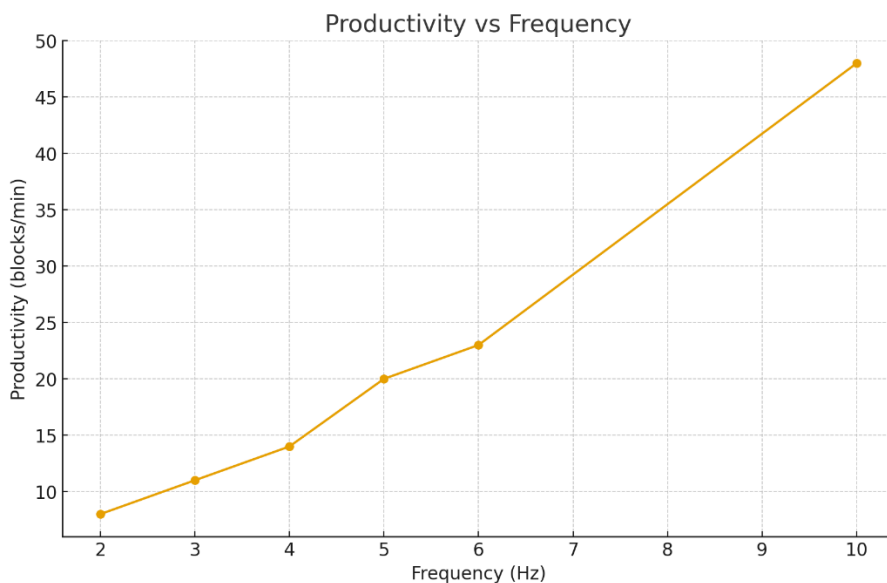
5.4.2 ค่าสหสัมพันธ์ (Pearson Correlation Coefficients)

ตารางที่ 5 แสดงค่าจากการคำนวณจริง

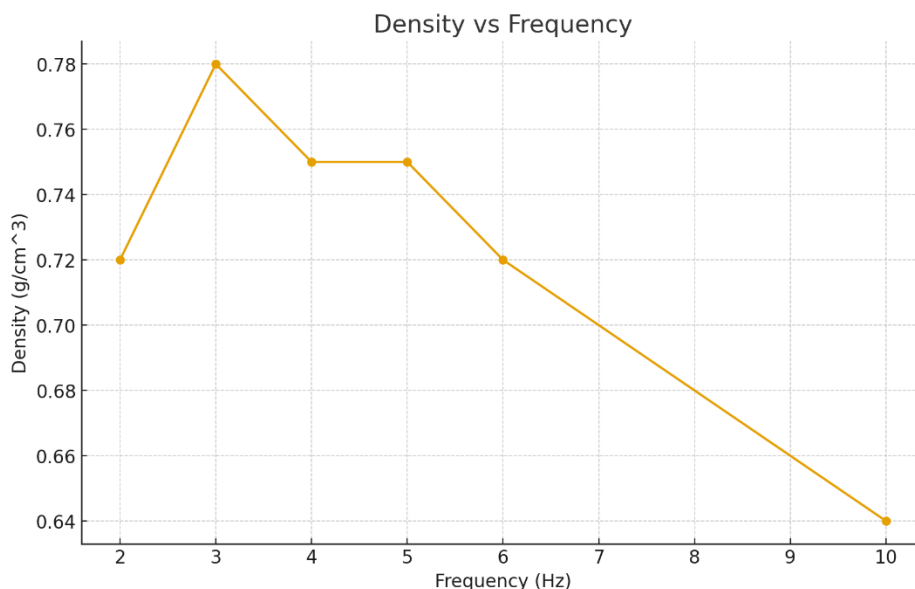
ตัวแปรที่สัมพันธ์ค่า r	ทิศทาง	ระดับความสัมพันธ์
Frequency - Productivity	+0.991 เชิงบวก	สูงมาก (very strong)
Frequency - Density	-0.846 เชิงลบ	สูง (strong)

จากตารางที่ 5 สรุปได้ว่า ยิ่งความถี่สูง ผลผลิตเพิ่มขึ้นแบบเกือบเชิงเส้นตรง และยิ่งความถี่สูง ความหนาแน่นลดลงชัดเจน

5.4.3 กราฟความสัมพันธ์



ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของ Productivity vs Frequency แบบเพิ่มขึ้นเชิงเส้นเกือบสมบูรณ์



ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ Density vs Frequency รูปแบบ Inverted-U: ความหนาแน่นสูงสุดที่ 3 Hz ก่อนจะลดลงต่อเนื่องที่ความถี่สูงขึ้น

5.4.4 บทวิเคราะห์สถิติ

จากตารางที่ 4 สรุปได้ว่า ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า ความถี่ของการทำงานของเครื่องอัดมีผลต่อจำนวนก้อนเชื้อเห็ดที่ผลิตได้นานาที่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.001$ ($F = 195.23$) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความถี่มีผลเชิงตรงต่อกำลังผลิตอย่างเด่นชัด โดยพบว่าความถี่สูงสุดที่ 10 Hz ให้ค่าผลผลิตสูงที่สุด (48 ก้อน/นาที่)

จากตารางที่ 5 สรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ด้วยสัมประสิทธิ์เพียร์สัน (Pearson's r) พบว่า ความถี่มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างยิ่งกับกำลังผลิต ($r = 0.991$) บ่งชี้ว่าผลผลิตเพิ่มขึ้นเกือบเป็นสัดส่วนโดยตรงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน พบความสัมพันธ์เชิงลบระดับสูงระหว่างความถี่กับความหนาแน่นของก้อนเชื้อเห็ด ($r = -0.846$) ซึ่งหมายความว่า เมื่อความถี่สูงขึ้น เวลาการอัดและการคงแรง (dwell time) ลดลง ทำให้ความหนาแน่นของก้อนลดลงตามไปด้วย

จากภาพที่ 3-4 พบว่าความหนาแน่นมีลักษณะเป็นโค้งแบบกลับด้าน (inverted-U shape) โดยมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุดที่ความถี่ 3 Hz (0.78 g/cm^3) ก่อนลดลงเรื่อย ๆ ใน

ความถี่ที่สูงกว่า สอดคล้องกับทฤษฎีการอัดวัสดุชีวมวลที่ระบุว่า ความเร็วอัดที่สูงทำให้วัสดุจัดเรียงตัวไม่สมบูรณ์ เนื่องจาก dwell time ไม่เพียงพอ

ผลการวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่าความถี่ระดับ 3–4 Hz เหมาะสมที่สุดสำหรับคุณภาพก้อน, ในขณะที่ระดับ 5–6 Hz เป็นจุดประนีประนอมที่ดีระหว่างคุณภาพและปริมาณ, ส่วนความถี่ 10 Hz เหมาะสำหรับการผลิตเชิงปริมาณสูงสุด แม้ความหนาแน่นจะลดลงแต่ยังสูงกว่าเครื่องต้นแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญ

6. สรุปผลการวิจัย

เครื่องอัดก้อนเชื้อเห็ดแบบกึ่งอัตโนมัติสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้สูงกว่าเครื่องต้นแบบเดิมถึง 63.33% และมีต้นทุนต่ำกว่าเครื่องในท้องตลาดมาก เหมาะสำหรับเกษตรกรรายย่อยหรือกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่ต้องการเพิ่มกำลังผลิตโดยไม่เพิ่มต้นทุนมากนัก

7. อภิปรายผล

ผลการเพิ่มความถี่ทำให้กำลังผลิตสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ความหนาแน่นกลับลดลงเมื่อเกิน 6 Hz เนื่องจากเวลาการอัดวัสดุปลูกไม่เพียงพอสำหรับการจัดเรียงตัวของซีลี้อยู่ การใช้ระบบ 4 กระบอกซึ่งสอดคล้องกับหลักการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงขนาด (economy of scale) ของเครื่องจักรกลเกษตรขนาดเล็ก (FAO, 2017) ผู้ประกอบการควรเลือกใช้ความถี่ 3-4 Hz เมื่อต้องการคุณภาพสูง หรือ 10 Hz เมื่อต้องการ ปริมาณ โดยยอมรับ density ที่ลดลง 18% (จาก 0.78 เป็น 0.64 g/cm³) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของงานวิจัย ไม่ได้ทดสอบการเจริญของเส้นใยในก้อนที่ผลิตด้วยความถี่ต่างกัน ทดสอบเฉพาะวัสดุปลูกซีลี้อย่างพาราและไม่ได้ทดสอบความทนทานระยะยาวของเครื่อง

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบ้านฟาร์มเห็ด ศูนย์การเรียนรู้กำแพงแสน ให้ข้อมูลด้านกระบวนการผลิตและให้ความร่วมมือในการทดสอบก้อนเชื้อเห็ดตลอดการวิจัย นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน ที่สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือทางวิศวกรรม และสถานที่ในการออกแบบและสร้างเครื่องอัดก้อนเชื้อเห็ดแบบกึ่งอัตโนมัติ ทำให้การศึกษาครั้งนี้สำเร็จสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์

9. เอกสารอ้างอิง

- Asp, H., Bergstrand, K. J., Hultberg, M., & Golovko, O. (2023). Production of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) on sawdust supplemented with anaerobic digestate. *Waste Management*, 155, 1– 7. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.10.025>
- Cornell Small Farms Program. (2019). *Methods of commercial mushroom cultivation: The seven stages of mushroom production*. Cornell University. Retrieved from https://smallfarms.cornell.edu/wp-content/uploads/2021/10/Methods_of_Commercial_Cultivation_Book_MC2.pdf
- EKOFUNGI. (2017). *Mushroom cultivation manual for the small mushroom entrepreneur*. Retrieved from <https://www.systemekofungi.com/wp-content/uploads/Mushroom-Cultivation-Manual.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2009). *Make money by growing mushrooms*. Rome, Italy: FAO. Retrieved from <https://www.fao.org/4/i0522e/i0522e00.htm>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). *Promoting sustainable agricultural mechanization for smallholder farmers*. Rome, Italy: FAO. Retrieved from <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ba5d1f0f-cca4-4e80-962f-7624f97cca2d/content>
- Kilic, C., & Yildiz, S. (2024). Total phenolics, tannin contents, antioxidant properties, protein and sensory analysis of *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus citrinopileatus* and *Pleurotus djamor* cultivated on different substrates. *Maderas Ciencia y Tecnología*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/377234894>

- Philippoussis, A. (2009). *Production of mushrooms using agro-industrial residues as substrates*. Hellenic Agricultural Organization– Demeter. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/226917053>
- Sassine, Y., & El Sebaaly, Z. (2024). Valorization of agro-forest wastes through the cultivation of shiitake (*Lentinula edodes*). *Heliyon*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/381523515>
- Seecharran, D. (2022). *Growth of oyster mushroom using sawdust and agricultural waste as substrates*. University of Guyana. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/362630075>
- Tuamsee, S., Rontlaong, P., Tinnam, P., Phonphun, P., Yuenyongchaiwat, P., Klunkaewdamrong, P., & Cheewaworanantri, Y. (2020). Time reduction in laundry process. *Journal of Bansomdej Engineering and Industrial Technology*, 1(2), 25–34.
- Tumuluru, J. K., Sokhansanj, S., Wright, C. T., et al. (2011). A review on biomass densification—A mechanical engineering perspective with implications for feedstock quality and utilization. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(3), 317–329. <https://doi.org/10.1002/bbb.324>
- Uicker, J. J., Pennock, G. R., & Shigley, J. E. (2013). *Theory of machines and mechanisms* (5th ed.). New York, NY: Oxford University Press.
- Zakil, F. A. A., Xuan, L. H., Zaman, N., Alan, N. I., Salahutheen, N. A. A., Sueb, M. S. M., & Isha, R. (2021). *Growth performance and mineral analysis of Pleurotus ostreatus from various agricultural wastes mixed with rubber tree sawdust in Malaysia*. Bioresource Technology Reports. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100873>