

การออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพเครื่องสีข้าว พลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับโรงสีข้าวชุมชน อำเภอโกรกพระ จังหวัดนครสวรรค์

วันที่รับ : 24 พฤษภาคม 2566

วันที่แก้ไข : 17 กันยายน 2566

วันที่ตอบรับ : 9 ตุลาคม 2566

ธีรพจน์ แนนเนียน*

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์

*Corresponding author e-mail: Teerapod.n@nsru.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ ทดสอบประสิทธิภาพและวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับโรงสีข้าวชุมชน อำเภอโกรกพระ จังหวัดนครสวรรค์ วิจัยดำเนินการวิจัย ศึกษาปัญหากระบวนการสีข้าวและออกแบบโดยโครงสร้างเครื่องสีข้าวทำจากเหล็ก ตันกำลังเป็นมอเตอร์ ขนาด 1.5 แรงม้า ส่วนประกอบ ได้แก่ กระบะบรรจุข้าว ลูกยางขัดข้าว ลูกหินขัดข้าว ตะแกรงร่อน ปล่องดูดกลบและระบบส่งกำลัง พร้อมด้วยระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบด้วย แผงโซลาร์เซลล์ อินเวอร์เตอร์ และแบตเตอรี่ จากการทดสอบหาประสิทธิภาพการสีข้าวทั้ง 3 ชนิด ที่ค่าความเร็วรอบและระยะห่างของลูกยางที่เหมาะสม พบว่า การสีข้าว กข 41 ความเร็วรอบ 1,290 rpm และระยะห่าง 0.9 mm การสีข้าว ชัยนาท 1 ความเร็วรอบ 1,350 rpm และระยะห่าง 0.9 mm และการสีข้าว หอมปทุมธานี ความเร็วรอบ 1,200 rpm และระยะห่าง 1.0 mm ผลการทดสอบความชื้นข้าวเปลือกที่เหมาะสมในการสีข้าว พบว่า พันธุ์ข้าว กข 41 ความชื้น 14%w.b. ได้ข้าวเต็มเมล็ด 0.395 กิโลกรัม ประสิทธิภาพ 62.70% พันธุ์ข้าว ชัยนาท 1 ความชื้น 14%w.b. ได้ข้าวเต็มเมล็ด 0.397 กิโลกรัม ประสิทธิภาพ 63.40% และพันธุ์ข้าว หอมปทุมธานี ความชื้น 13%w.b. ได้ข้าวเต็มเมล็ด 0.396 กิโลกรัม ประสิทธิภาพ 63.50% การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานในการสีข้าว พบว่า การสีข้าว 5 ชั่วโมงต่อวัน ใช้พลังงานไฟฟ้า 5.5 หน่วย คิดเป็นเงิน 24.31 บาท ซึ่งคิดเป็นผลประหยัดค่าไฟฟ้า 6,344.91 บาทต่อปี การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่า ระยะเวลาในการคืนทุนมีค่าเท่ากับ 3.73 ปี ลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 20.86 ton.CO₂ ผลจากการวิจัยจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสีข้าวลดต้นทุนด้านพลังงานและเป็นแนวทางให้เกษตรกรในการตัดสินใจลงทุนอย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: เครื่องสีข้าว, พลังงานแสงอาทิตย์, ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

DESIGN AND PERFORMANCE TESTING OF SOLAR ENERGY RICE MILLING MACHINE FOR COMMUNITY RICE MILL IN KROK PHRA DISTRICT OF NAKHON SAWAN

Received : 24 May 2566

Revised : 17 September 2566

Accepted : 9 October 2566

Teerapod Naebnean*

Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology,
Nakhon Sawan Rajabhat University, Nakhon Sawan

*Corresponding author e-mail: Teerapod.n@nsru.ac.th

ABSTRACT

The objectives of this research were to design, test the efficiency, and perform an economic cost benefit analysis of a solar powered rice milling machine for the community's rice mill in Krok Phra District of Nakhon Sawan Province. The research method was conducted to examine the problems of rice milling process, design the rice milling machine with the structure made of steel with the power source of electric motor of 1.5 HP. The main components of the machine consisted of rice pickup truck, rice polishing ball, rice polishing stone, screen sieve, rice husk suction vent with the transmission system installation of a solar power system of solar cell, inverter and battery. According to the testing for finding the efficiency of milling 3 varieties of rice at the appropriate speed of rotation, and the suitable distance of the rubber ball, it was found that the appropriate rice milling of RD 41 was at the speed of 1,290 rpm and the distance of 0.9 mm, that of Chainat 1 at the speed was 1,350 rpm and the distance was 0.9 mm, and that of Hom Pathum Thani at the speed was 1,200 rpm and the distance was 1.0 mm. The results of the testing on the suitable moisture of rice for milling revealed that for the variety of RD 41, the moisture was 14%w.b. which gave the whole grain rice of 0.395 kg. resulting in the efficiency of 62.70%; for the variety of Chainat 1, the moisture was 14%w.b., which gave the whole grain rice of 0.397 kg. resulting in the efficiency was 63.40%; and the variety of Hom Pathum Thani, the moisture was 13%w.b., which gave the whole grain rice of 0.396 kg. resulting in the efficiency was 63.50%. The comparison of the energy efficiency of rice milling for 5 hours per day, the energy consumption was 5.5 units, and the electricity cost 24.31 baht which could save the electricity bills for 6,344.91 baht. The economic cost benefit analysis found that the payback period was 3.73 years. It was possible to achieve a reduction of 20.86 ton.CO₂. The results of the research would increase the efficiency of rice milling, reduce the energy costs, and be the guideline for farmers' decisions to make the appropriate investment

Keywords: Rice milling machine, Solar energy, Economical value

บทนำ

นครสวรรค์เป็นจังหวัดตอนบนสุดของภาคกลาง ตั้งอยู่ต้นแม่น้ำเจ้าพระยา เป็นพื้นที่ยุทธศาสตร์สำคัญของการปลูกข้าวซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของไทย โดยมีพื้นที่ปลูกข้าวจำนวน 2,410,166 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 51.10 ของพื้นที่ถือครองทางการเกษตรทั้งหมด ซึ่งพื้นที่นาส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณที่ราบลุ่ม ได้แก่ อำเภอลาดยาว อำเภอหนองบัว อำเภอไพศาลี อำเภอชุมแสง และโกรกพระ การปลูกข้าวสามารถทำได้ทั้งนาปีและนาปรัง มีปริมาณมากคิดเป็นอันดับ 2 ของประเทศรองจากจังหวัดสุพรรณบุรี สำหรับข้าวที่ปลูกในจังหวัดนครสวรรค์มีหลากหลายชนิดแต่ที่นิยม ได้แก่ พันธุ์ กข 41, กข 49, ชัยนาท 1, พิษณุโลก 2, และหอมปทุมธานี มีจุดรับซื้อข้าว จำนวน 72 แห่ง แต่กำลังการผลิตของศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวและจากศูนย์ข้าวชุมชน ประมาณ 17,400 ตัน คิดเป็น 30% ส่วนที่ยังขาดอีก 70% เกษตรกรต้องซื้อจากพ่อค้า หรือเก็บพันธุ์ไว้ใช้เอง (สำนักงานเกษตรจังหวัดนครสวรรค์, 2566) สามารถสรุปเป็นปัญหาของข้าวและชาวนาในจังหวัดได้ 3 ประการที่สำคัญ คือ ต้นทุนในการผลิตสูง ผลผลิตต่อไร่ต่ำกว่ามาตรฐาน ชาวนาและองค์กรชาวนายังไม่เข้มแข็ง จากประเด็นยุทธศาสตร์การพัฒนาการแปรรูปและผลิตภัณฑ์ข้าว ที่มีศักยภาพสูงให้สอดคล้องกับความต้องการของตลาด ส่งเสริมการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต ส่งเสริมกระบวนการผลิตให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากลตามแนวทาง BCG พัฒนานวัตกรรมและเทคโนโลยี เพื่อเสริมสร้างศักยภาพและความเข้มแข็งในการพัฒนาเศรษฐกิจให้เกิดความมั่นคงและยั่งยืน

จากการลงพื้นที่สำรวจโรงสีข้าวชุมชน อำเภอโกรกพระ จังหวัดนครสวรรค์ พบปัญหา ด้านกระบวนการสีข้าวจะต้องควบคุมระดับความชื้นข้าวเปลือกให้เหมาะสมเพื่อลดการแตกหัก ด้านคุณภาพของวัตถุดิบขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของกระบวนการสีข้าว ด้านพลังงานไฟฟ้ามีต้นทุนการผลิตสูงเพราะส่วนใหญ่กระบวนการผลิตจะใช้เครื่องจักรเป็นหลัก จากการศึกษาปัญหากระบวนการสีข้าวพบว่า คุณภาพข้าวขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของพันธุ์ข้าว รูปร่าง ขนาดและความชื้นของข้าวเปลือก รวมทั้งองค์ประกอบของการกะเทาะและการขัดขาวในเครื่องสีข้าว คุณภาพของข้าวที่ผ่านกระบวนการสีจะหักมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณภาพของหินขัดที่ใช้เป็นสำคัญ ปัจจุบันนักวิจัยได้มีการพัฒนาเครื่องสีข้าวกันอย่างต่อเนื่องมีการศึกษาประสิทธิภาพโดยการควบคุมระยะห่างของลูกยางกะเทาะเปลือก ผลการทดสอบเมื่อปรับระยะห่างของลูกยางให้เหมาะสมจะทำให้อัตราการทำงานลดลงและปริมาณข้าวเต็มเพิ่มขึ้น (ภัทรารุช บุญประคอง และคนอื่นๆ, 2563, น.107) มีการศึกษาความเร็วรอบของมอเตอร์ ที่เหมาะสมกับการสีข้าว หาค่ากำลังไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการสีข้าว โดยความเร็วรอบที่เหมาะสม ส่งผลให้อัตราการกะเทาะสูงขึ้น อัตราการแตกหักของเมล็ดข้าวลดลง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง (สุรินทร์ แหงมงาม และคนอื่นๆ, 2563, น.148; กมลศักดิ์ รัตนวงษ์ และคนอื่นๆ, 2563, น.44) และจากปัญหาด้านต้นทุนพลังงานไฟฟ้าที่สูงการสีข้าวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการลดต้นทุนกระบวนการสีข้าว ส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน แนวคิดในการนำเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการเกษตรแบบยั่งยืน โดยการประยุกต์ใช้โซลาร์เซลล์สำหรับเครื่องจักรกลทางการเกษตร เป็นการลดต้นทุนในกระบวนการผลิต ลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ อาจส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน (Aroonsrimorakot et al., 2020, p.560) แต่การนำเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้จำเป็นต้องศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ตัวแปรที่มีผลต่อความคุ้มค่าของโรงสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์มีหลายตัวแปร เช่น ต้นทุนของข้าวที่นำมาสี กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับโรงสี ค่าแรงงานการสีข้าวและการบำรุงรักษาเป็นต้น (นงเยาว์ เตชะใหม่ และคนอื่นๆ, 2563, น.46) ซึ่งทุกตัวแปรมีผลโดยตรงโดยการสร้างแรงจูงใจในการใช้งานเทคโนโลยีนี้ ดังนั้นการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์กับงานภาคเกษตรที่เหมาะสมก็มีความเป็นไปได้หลากหลายเทคโนโลยีที่สำคัญสามารถเป็นต้นแบบในการเสริมสร้างแรงจูงใจให้มีการใช้เพิ่มขึ้น

จากปัญหาและความสำคัญดังกล่าวรวมถึงแนวคิดจากนักวิชาการที่กล่าวข้างต้น พบว่าปัญหาส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการสีข้าวและคุณภาพของวัตถุดิบ จำเป็นจะต้องทดสอบการทำงานที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพ ด้านพลังงานไฟฟ้ามีต้นทุนการผลิตสูงเพราะส่วนใหญ่ใช้เครื่องจักรเป็นหลัก การสีข้าวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการลดต้นทุน ส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนและเนื่องจากปัจจุบันราคาของเทคโนโลยี เริ่มลดลง ส่งผลต่อการตัดสินใจในการลงทุน ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับโรงสีข้าวชุมชน อำเภอโกรกพระ จังหวัดนครสวรรค์ ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัยจะเป็นแนวทางให้ชุมชนหรือเกษตรกรนำไปใช้ในการตัดสินใจสร้างโรงสีข้าวที่ใช้พลังงานสะอาดและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับโรงสีข้าวชุมชน อำเภอโกกรพระ จังหวัดนครสวรรค์
2. เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับโรงสีข้าวชุมชน อำเภอโกกรพระ จังหวัดนครสวรรค์

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. การออกแบบเครื่องสีข้าว

การออกแบบเครื่องสีข้าว โครงสร้างทำจากเหล็กขนาด 140x110x85 เซนติเมตร ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ ขนาด 1.5 แรงม้า ส่วนประกอบหลัก ได้แก่ 1) โครงสร้าง 2) กระบะบรรจุข้าวเปลือกและข้าวกล้อง 3) ลูกยาง ขัดข้าว 4) ลูกหินขัดข้าว 5) ตะแกรงร่อน 6) ปล่องดูดแกลบ 7) ระบบส่งกำลัง ได้แก่ มอเตอร์ มูเลย์และสายพาน

2. การคำนวณทางเทคนิค

- 1) การคำนวณความเร็วรอบมอเตอร์

$$N_{rpm} = \frac{120 \times f}{p} \quad (1)$$

เมื่อ N_{rpm} คือ ความเร็วรอบต่อนาที มีหน่วยเป็น (rpm), f คือ ความถี่ มีหน่วยเป็น (Hz) และ P คือ จำนวนขั้ว มีหน่วยเป็น (pole)

- 2) การสอบเทียบความเร็วรอบมอเตอร์กับความถี่

$$\%err = \frac{R_{cal} - R_{real}}{R_{real}} \quad (2)$$

เมื่อ $\%err$ คือ เปอร์เซนต์ความแตกต่าง มีหน่วยเป็น (%), R_{cal} คือ ความเร็วรอบคำนวณ มีหน่วยเป็น (rpm) และ R_{real} คือ ความเร็วรอบจริง มีหน่วยเป็น (rpm)

- 3) การคำนวณหาพลังงานไฟฟ้า

$$W = \frac{Ivt}{1000} \quad (3)$$

เมื่อ W คือ พลังงานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น (kWh), I คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น (A) V คือ แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น (V) และ t คือ เวลา มีหน่วยเป็น (hr)

3. การทดสอบหาประสิทธิภาพการสีข้าว

ประสิทธิภาพการสีข้าว

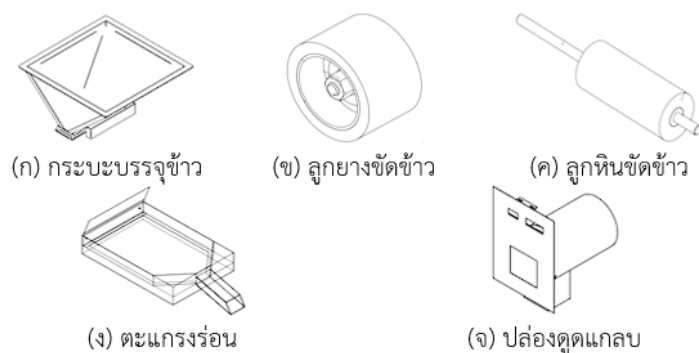
$$\text{ร้อยละ} = \frac{A+B+C \times 100}{T} \quad (4)$$

ประสิทธิภาพผลการสีข้าว

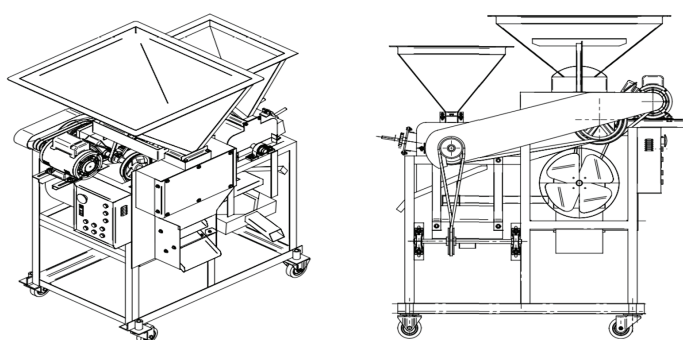
$$\text{ร้อยละ} = \frac{A \times 100}{T} \quad (5)$$

เมื่อ A คือ ปริมาณข้าวเต็ม (kg), B คือ ปริมาณข้าวหัก (kg), C คือ ปริมาณปลายข้าวและรำ (kg) และ T คือ ปริมาณข้าวเปลือก (kg)

จากการออกแบบส่วนประกอบเครื่องสีข้าว แสดงดังภาพ 1 และ โครงสร้างเครื่องสีข้าว แสดงดังภาพ 2



ภาพ 1 ส่วนประกอบเครื่องสีข้าว



ภาพ 2 โครงสร้างเครื่องสีข้าว

4. การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์

1) การหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้งานจริง

มอเตอร์ ขนาด 1.5 แรงม้า กำลังไฟฟ้า 1.1 kW การใช้งาน 5 ชั่วโมง พลังงานที่ใช้ต่อวัน 5.5 kWh

2) การหาค่าความจุของแบตเตอรี่

$$Q_{Batt} = \frac{P_{Load}}{V_{Batt} \times (\%DOD) \times E_{Inverter}} \times T_{Batt} \quad (6)$$

เมื่อ Q_{Batt}

คือ ความจุแบตเตอรี่ (Ah)

P_{Load}

คือ กำลังวัตต์รวม (W)

V_{Batt}

คือ โวลต์แบตเตอรี่ (V)

$\%DOD$

คือ ค่าระดับการคายประจุ (40-60%)

$E_{Inverter}$

คือ ค่าประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์ (0.8-0.9)

T_{Batt}

คือ ระยะเวลาการประจุในแต่ละวัน (ชั่วโมง)

ดังนั้น

$$Q_{Batt} = \frac{1,100\text{W}}{12\text{V} \times 0.6 \times 0.85} \times 5\text{hr}$$

$$= 898.7 \text{ Ah}$$

แบตเตอรี่ที่ใช้งาน ขนาด 12V, 120Ah จำนวน 8 ลูก

3) การหาขนาดของแผงโซลาร์เซลล์

$$PV = \frac{P_{Load}}{(Q \times C \times H \times I) / S} \quad (7)$$

เมื่อ	PV	คือ กำลังวัตต์ของโซลาร์เซลล์ (W)
	Q	คือ ค่าพลังงานแสงที่ได้รับ/วัน (ประมาณ 4 kWh/m ²)
	C	คือ ค่าความสูญเสียของเซลล์ (ประมาณ 0.8)
	H	คือ ค่าความสูญเสียเชิงความร้อน (ประมาณ 0.85)
	I	คือ ค่าประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์ (ประมาณ 0.8-0.9)
	S	คือ ค่าความเข้มแสงบนโลก (ประมาณ 1 kWh/m ²)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad PV &= \frac{5,500\text{Wh}}{(4,000\text{Wh/m}^2 \times 0.8 \times 0.85 \times 0.85) / 1,000\text{Wh/m}^2} \\ &= 2,378.89\text{W} \end{aligned}$$

แผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้งาน ขนาด 280W จำนวน 9 แผง (2,520W)

4) การหาขนาด Solar charge controller

$$C_{Batt} = \frac{PV}{V_{Batt}} \quad (8)$$

เมื่อ	C_{Batt}	คือ กระแสประจุ (A)
	PV	คือ กำลังวัตต์โซลาร์เซลล์ (W)
	V_{Batt}	คือ โวลต์แบตเตอรี่ (V)

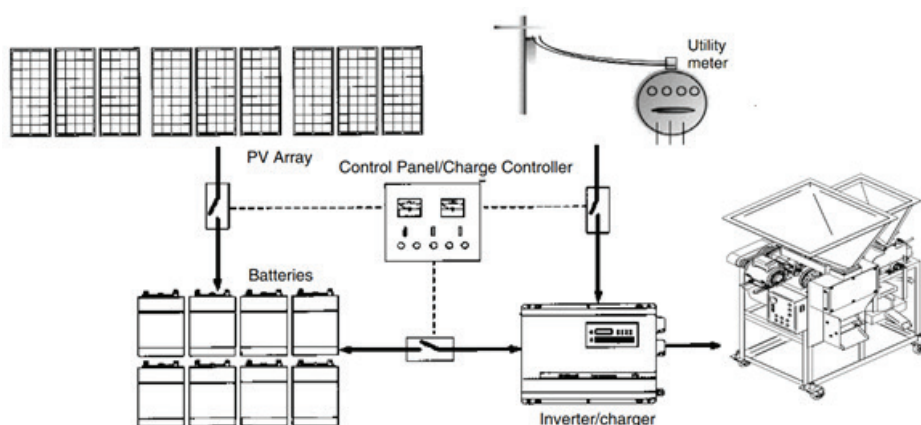
$$\text{ดังนั้น} \quad C_{Batt} = \frac{2,520\text{W}}{12\text{V}} = 210\text{A}$$

Solar charge controller ที่ใช้งาน ขนาด 12V 250A

5) การหาค่าอินเวอร์เตอร์

กำลังไฟฟ้า 1.1 kW อินเวอร์เตอร์ที่ใช้งาน ขนาด 1.5 kW (ประสิทธิภาพ 0.8-0.9)

จากการออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับเครื่องสีข้าว แสดงดังภาพ 3



ภาพ 3 การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับเครื่องสีข้าว

5. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จุดคุ้มทุน "(BEP) =" ต้นทุนคงที่/(ราคาต่อหน่วย-ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย) (บาทต่อปี) (9)

ระยะเวลาคืนทุน "(PBP) =" ต้นทุนสร้างเครื่อง(บาท)/กำไรสุทธิ (บาทต่อปี) (10)

ผลการวิจัย

1. ผลการออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์

1.1 เครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้จากการออกแบบและการทดสอบ แสดงดังภาพ 4



ภาพ 4 เครื่องสีข้าวและการทดสอบ

1.2 การทดสอบการสีข้าวเปลือกที่ค่าความเร็วรอบและระยะห่างของลูกยางที่เหมาะสม

การทดสอบสีข้าวพันธุ์ข้าว กข 41, ชัยนาท 1 และหอมปทุมธานี โดยควบคุมความเร็วด้วยการปรับค่าความถี่ไฟฟ้า 35-50 Hz และระยะห่างของลูกยาง 0.8, 0.9 และ 1.0 mm น้ำหนักข้าวเปลือก 1 กิโลกรัมต่อครั้ง

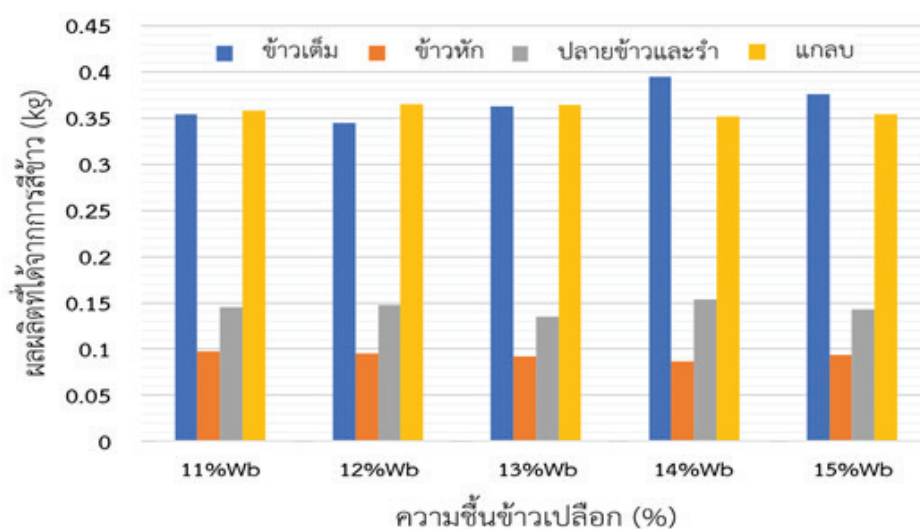
ตาราง 1 ผลการทดสอบการสีข้าวเปลือกที่ค่าความเร็วและระยะห่างของลูกยางที่เหมาะสม

พันธุ์ข้าว	ความถี่ (Hz)	ความเร็วรอบ (rpm)	ระยะห่าง (mm)	ข้าวเต็ม (กิโลกรัม)	ประสิทธิภาพ (%)
กข 41	43	1,290	0.8	0.37	37
			0.9	0.38	38
			1.0	0.36	36
ชัยนาท 1	45	1,350	0.8	0.33	33
			0.9	0.35	35
			1.0	0.34	34
หอมปทุมธานี	40	1,200	0.8	0.30	30
			0.9	0.31	31
			1.0	0.32	32

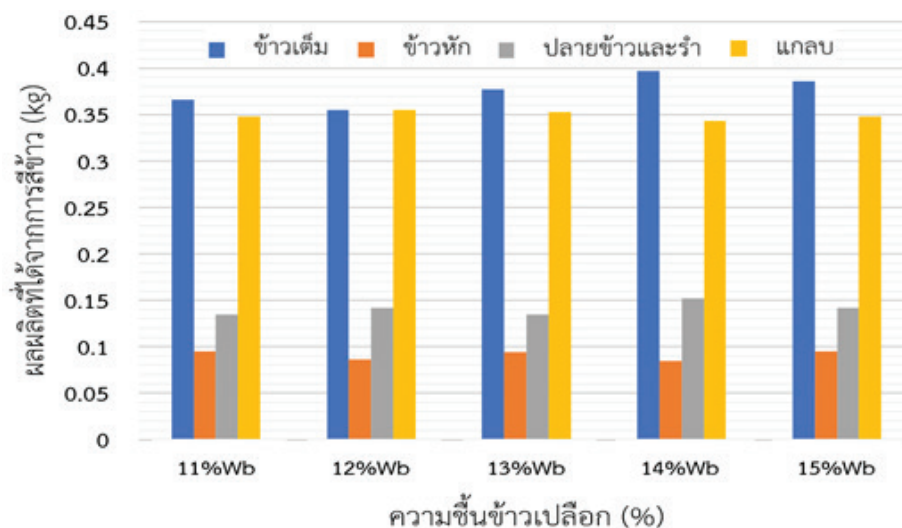
จากตาราง 1 ค่าความเร็วและระยะห่างของลูกยางที่เหมาะสม พบว่า การสีข้าว กข 41 ความเร็วรอบ 1,290 rpm (ความถี่ 43 Hz) และระยะห่างของลูกยาง 0.9 mm ได้ข้าวเต็ม 0.38 กิโลกรัม ประสิทธิภาพ 38% การสีข้าว ชัยนาท 1 ความเร็วรอบ 1,350 rpm (ความถี่ 45 Hz) และระยะห่างของลูกยาง 0.9 mm ได้ข้าวเต็ม 0.35 กิโลกรัม ประสิทธิภาพ 35% และการสีข้าว หอมปทุมธานี ความเร็วรอบ 1,200 rpm (ความถี่ 40 Hz) และระยะห่างของลูกยาง 1.0 mm ได้ข้าวเต็ม 0.32 กิโลกรัม ประสิทธิภาพ 32%

1.3 การทดสอบความชื้นข้าวเปลือกต่อประสิทธิภาพการสีข้าว

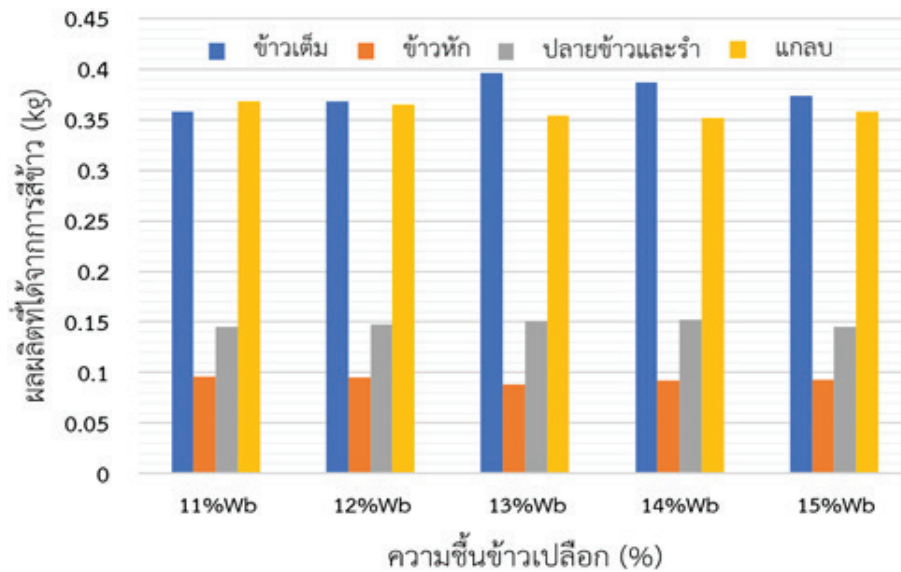
การทดสอบความชื้นข้าวเปลือกต่อประสิทธิภาพการสีข้าว พันธุ์ข้าว กข 41, ชัยนาท 1 และหอมปทุมธานี ที่ค่าความชื้นข้าวเปลือก 11%w.b. ถึง 15%w.b. น้ำหนักข้าวเปลือก 1 กิโลกรัมต่อครั้ง โดยการสุมตัวอย่างแต่ละพันธุ์ข้าวที่นำมาทดลอง 1-6 กระสอบ สุ่มเก็บจากทุกกระสอบและไม่น้อยกว่า 5 จุดสุ่ม ดังภาพ 5



(ก) พันธุ์ข้าว กข 41



(ข) พันธุ์ข้าว ชัยนาท 1



(ค) พันธุ์ข้าว หอมปทุมธานี

ภาพ 5 การทดสอบความชื้นข้าวเปลือกต่อประสิทธิภาพการสีข้าว

จากภาพ 5 พบว่า การสีข้าวเปลือก 1 กิโลกรัม พันธุ์ข้าว กข 41 ความชื้นข้าวเปลือก 14%w.b. ได้ข้าวเต็ม 0.395 กิโลกรัม ข้าวหัก 0.087 กิโลกรัม ปลายข้าวและรำ 0.145 กิโลกรัม และแกลบ 0.352 กิโลกรัม ประสิทธิภาพ 62.70% พันธุ์ข้าว ชัยนาท 1 ความชื้นข้าวเปลือก 14%w.b. ได้ข้าว 0.397 กิโลกรัม ข้าวหัก 0.085 กิโลกรัม ปลายข้าวและรำ 0.152 กิโลกรัม และแกลบ 0.343 กิโลกรัม ประสิทธิภาพ 63.40% และพันธุ์ข้าวหอมปทุมธานี ความชื้นข้าวเปลือก 13%w.b. ได้ข้าว 0.396 กิโลกรัม ข้าวหัก 0.088 กิโลกรัม ปลายข้าวและรำ 0.151 กิโลกรัม และแกลบ 0.354 กิโลกรัม ประสิทธิภาพ 63.50% ความชื้นข้าวเปลือกต่อประสิทธิภาพการสีข้าวจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของพันธุ์ข้าว ลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ทั้งรูปร่าง ขนาดและความชื้นของข้าวเปลือกที่นำมาทำการทดสอบ ผลผลิตที่ได้จากการสีข้าว แสดงดังภาพ 6



(ก) ข้าวเต็ม



(ข) ข้าวหัก



(ค) ปลายข้าวและรำ

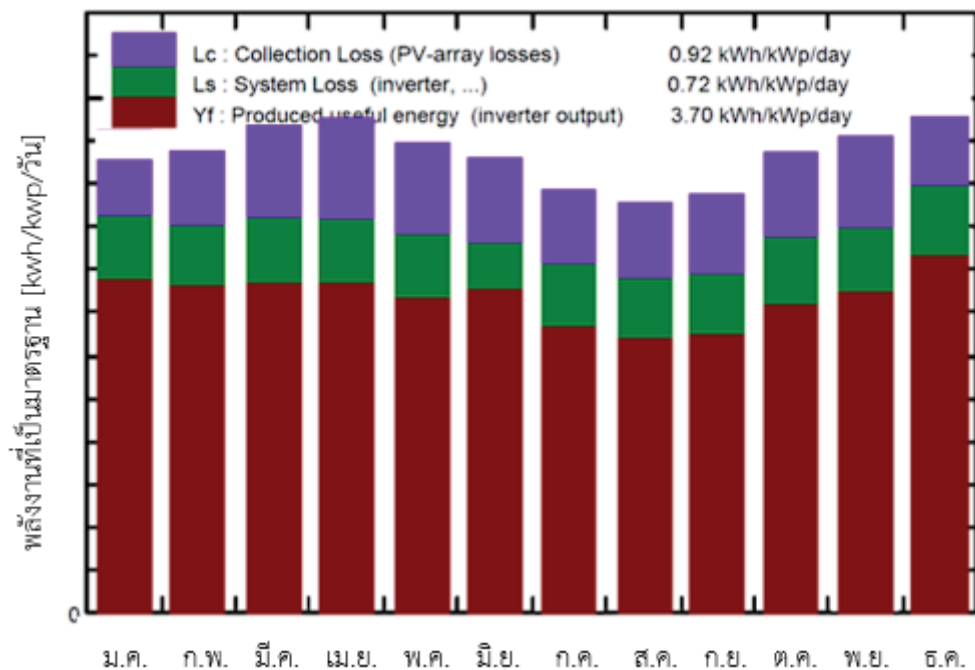


(ง) แกลบ

ภาพ 6 ผลผลิตที่ได้จากการสีข้าว

1.4 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของพลังงานที่ผลิตได้ของแต่ละเดือนใน 1 ปี

การวิเคราะห์ความเหมาะสมในการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการจำลองระบบการผลิตกำลังไฟฟ้า สำหรับพื้นที่จังหวัดนครสวรรค์ แสดงดังภาพ 7

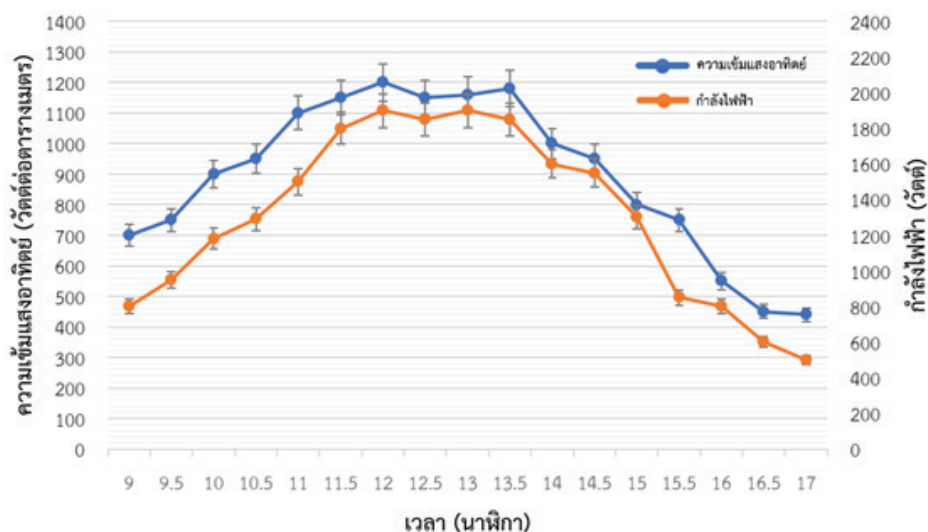


ภาพ 7 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของพลังงานที่ผลิตได้ของแต่ละเดือนใน 1 ปี

จากภาพ 7 พบว่า การจำลองระบบการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยมีอุปกรณ์ ดังนี้ 1) แผงโซลาร์เซลล์ ขนาด 280W 9 แผง 2) อินเวอร์เตอร์ ขนาด 1.5 kW 3) แบตเตอรี่ 12V 120Ah 8 ลูก ผลของกำลังผลิตแต่ละเดือนใน 1 ปี โดยค่าเฉลี่ยในการผลิตไฟฟ้าใน 1 วัน เท่ากับ 3.70 kWh/kWp/day ค่ากำลังการสูญเสียเฉลี่ยที่แผงโซลาร์เซลล์ใน 1 วัน เท่ากับ 0.92 kWh/kWp/day และค่ากำลังการสูญเสียเฉลี่ยที่อินเวอร์เตอร์ใน 1 วัน เท่ากับ 0.72 kWh/kWp/day กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าในรอบ 1 ปี โดยใช้โปรแกรมจำลองได้พลังงาน 2,360 kWh/year

1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์กับกำลังไฟฟ้า

การตรวจวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์กับกำลังไฟฟ้าของแผงแผงโซลาร์เซลล์ในช่วงเวลา 09.00 น. ถึง 17.00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ทำการทดลองการสืขาว แสดงดังภาพ 8



ภาพ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์กับกำลังไฟฟ้า

จากภาพ 8 พบว่า ค่าความเข้มแสงอาทิตย์จะเริ่มต้นในช่วงเวลา 09.00 น. และมีแนวโน้มค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงเวลาประมาณ 12.00 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุด ประมาณ 1,200 W/m² ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ย 1,049 W/m² กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้มีค่า 1,900 W กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องสีข้าวสามารถทำงานได้จะอยู่ในช่วง 10.00 น. ถึง 15.00 น. มีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 1,611 W จึงทำให้เครื่องสีข้าวสามารถทำงานติดต่อกันสูงสุด 5 ชั่วโมงต่อวัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์

1.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานที่ใช้ในการสีข้าว

ตาราง 2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานที่ใช้ในการสีข้าว

ระบบไฟฟ้า 220 V				ระบบพลังงานแสงอาทิตย์			
เวลา (ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้า (kW)	จำนวนยูนิต (หน่วย)	จำนวนเงิน (บาท)	เวลา (ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้า (kW)	จำนวนยูนิต (หน่วย)	จำนวนเงิน (บาท)
1	1.1	1.1	4.86	1	1.1	-	-
5	1.1	5.5	24.31	5	1.1	-	-
ค่าความแตกต่างการใช้พลังงานไฟฟ้าในการสีข้าว 5 ชั่วโมงต่อวัน คิดเป็นเงิน							24.31 บาท
ค่าความแตกต่างการใช้พลังงานไฟฟ้าในการสีข้าว 5 ชั่วโมงต่อวัน ระยะเวลา 1 ปี คิดเป็นเงิน							6,344.91 บาท

หมายเหตุ พิจารณาการสีข้าว 261 วันต่อปี อัตราค่าไฟฟ้า 4.42 บาทต่อหน่วย

จากตาราง 2 พบว่า ระบบไฟฟ้า 220 V เครื่องสีข้าวขนาด กำลังไฟฟ้า 1.1 kW การสีข้าว 1 ชั่วโมง คิดเป็น 1.1 หน่วย เสียค่าไฟฟ้า 4.86 บาท และการสีข้าว 5 ชั่วโมง คิดเป็น 5.5 หน่วย เสียค่าไฟฟ้า 24.31 บาท กรณีระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ไม่เสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ค่าความแตกต่างการใช้พลังงาน 5 ชั่วโมงต่อวัน ประหยัดค่าไฟฟ้า 24.31 บาท และหากพิจารณา ค่าความแตกต่างการใช้พลังงาน 5 ชั่วโมงต่อวัน ระยะเวลา 1 ปี (261 วัน) ประหยัดค่าไฟฟ้า 6,344.91 บาท

1.7 การลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสีข้าว

สามารถทำได้โดยนำข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้า เท่ากับ 0.5821 kgCO₂/kWh ซึ่งมีการคำนวณดังสมการ (11) นี้ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2566)

$$\text{ค่าการปลดปล่อย CO}_2 \text{ (kgCO}_2\text{)} = \text{ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปี (kWh)} \times 0.5812 \text{ kgCO}_2\text{/kWh} \quad (11)$$

ตาราง 3 ผลการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสีข้าว

ระยะเวลา การทำงาน	การใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh)	ลดการปลดปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์		รถยนต์ (คัน)
		(kgCO ₂)	(tonCO ₂)	
1 ปี	1.1x5x261=1,435.50	834.31	0.83	3
25 ปี	1.1x5x261x25=35,887.50	20,857.82	20.86	75

หมายเหตุ 1,000 kgCO₂ เท่ากับ 1 tonCO₂

1 kW เทียบเท่าการใช้รถยนต์ 2.69 คันต่อปี

จากตาราง 3 การใช้เซลล์แสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้กระบวนการสีข้าว เมื่อนำค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ามาวิเคราะห์ จะสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 20,857.82 kgCO₂ หรือ 20.86 ton.CO₂ เทียบได้กับการใช้รถยนต์ 75 คัน ตลอดช่วงอายุการใช้งาน

2. ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์

ตาราง 4 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องสีข้าวโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

ต้นทุนคงที่	ค่าใช้จ่าย (บาทต่อปี)	ต้นทุนแปรผัน	ค่าใช้จ่าย (บาทต่อปี)
ค่าเสื่อมราคา	28,800	ค่าแรงในการสีข้าว	92,400
ค่าเสียโอกาส	7,200	ค่าบำรุงรักษาเครื่องสีข้าว	78,000
รวม	36,000	ค่าข้าวเปลือก	1,306,536
		รวม	1,476,936
รวมต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน			1,512,936
รายการ	น้ำหนักผลผลิตที่ได้จากการสีข้าว (กิโลกรัมต่อปี)	ราคาต่อหน่วย (บาทต่อกิโลกรัม)	รายได้จากการสีข้าวจำหน่าย (บาทต่อปี)
ข้าวเต็ม	35,864	31.9	1,144,062
ข้าวหัก	12,410	14	173,740
ปลายข้าวและรำ	17,520	10	175,200
แกลบ	31,400	2	62,800
รวมรายได้ต่อปีจากการจำหน่ายผลผลิตที่ได้จากการสีข้าว			1,555,802

จากตาราง 4 พบว่า ค่าใช้จ่ายในกระบวนการสีข้าว ต้นทุนคงที่ 36,000 บาทต่อปี และต้นทุนแปรผัน 1,476,936 บาทต่อปี ต้นทุนรวม 1,512,936 บาทต่อปี รายได้ต่อปีจากการจำหน่ายผลผลิตที่ได้จากการสีข้าว 1,555,802 บาทต่อปี หักต้นทุนรวมต่อปีจะได้กำไรสุทธิ 42,866 บาทต่อปี ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเครื่องสีข้าวและระบบพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 160,000 บาท ระยะเวลาในการคืนทุนมีค่าเท่ากับ 3.73 ปี

อภิปรายผลการวิจัย

จากการวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ที่ออกแบบ ทำการทดสอบสีข้าวให้กับกลุ่มโรงสีข้าวชุมชน อำเภอไทรทอง จังหวัดนครสวรรค์ พบว่า การสีข้าวพันธุ์ข้าว กข 41, ชัยนาท 1 และหอมปทุมธานี น้ำหนักข้าวเปลือก 1 กิโลกรัมต่อครั้ง จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวจำเป็นจะต้องปรับความเร็วรอบและระยะห่างของลูกยางให้เหมาะสมกับชนิดพันธุ์ข้าวเนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน คุณภาพวัตถุดิบจะต้องมีความชื้น 13-14%w.b. เพื่อลดการแตกหักและเพิ่มประสิทธิภาพการสีข้าว สอดคล้องกับ สุรินทร์ แหมงงาม และคนอื่นๆ (2563, น.151) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมความเร็วรอบลูกยางกะเทาะ พบว่า ความเร็วรอบ และระยะห่างลูกยางที่เหมาะสมกับการสีข้าว จะทำให้ประสิทธิภาพการสีข้าวเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกันกับ สมพจน์ คำแก้ว (2565, น.86) และ ศักดิ์ชัย ตรีดีและคนอื่นๆ (2564, น.29) ได้ศึกษาผลของความชื้นต่อประสิทธิภาพการสีข้าว พบว่า ความชื้นที่เหมาะสมส่งผลให้ปริมาณข้าวเต็มเพิ่มขึ้น และการออกแบบลูกยางวางคู่หมุนในทิศทางตรงกันข้าม ปรับระยะห่างลูกยางให้เหมาะสมส่งผลให้ประสิทธิภาพการสีข้าวเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับ เชน และคนอื่นๆ (Chen et al., 2019, p.205) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกของลูกยางในกระบวนการสีข้าว พบว่า อัตราการบ่อนที่เหมาะสมของกระบวนการกะเทาะเปลือกมีผลต่ออัตราการแตกหักของข้าว การทดสอบความชื้นข้าวเปลือกต่อประสิทธิภาพการสีข้าวทั้ง 3 พันธุ์ข้าวผ่านเกณฑ์มาตรฐานด้านประสิทธิภาพที่กำหนดไว้ 60 เปอร์เซนต์ สอดคล้องกับการศึกษา รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ และคนอื่นๆ (2562, น.15) ได้ศึกษาการทดสอบและประเมินผลเครื่องสีข้าวตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การนำเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้กับเครื่องสีข้าวสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องสามารถ

ทำงานได้อยู่ในช่วง 10.00 น. ถึง 15.00 น. มีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 1,611 W สามารถลดต้นทุนด้านพลังงานในกระบวนการสีข้าว เป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนให้กับชุมชน เช่นเดียวกับ กอร์เจียน และคนอื่นๆ (Gorjian et al., 2021, p.36) ได้ศึกษา การนำเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้กับเครื่องจักรกลทางการเกษตร เพื่อเป็นแนวทางปฏิบัติให้เกิดความยั่งยืน ลดต้นทุน ในกระบวนการผลิต ส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาด การใช้เซลล์แสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้กระบวนการสีข้าวสามารถลด การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 20.86 ton.CO₂ ดังเช่น การุณย์ ชัยวัฒน์ และคนอื่นๆ (2561, น.42) ได้ศึกษา การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากโครงการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถช่วยลดผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมในรูปของการลดก๊าซเรือนกระจกได้ การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ปัจจุบันเริ่มมี การนำมาใช้ประโยชน์มากขึ้น เนื่องจากโซลาร์เซลล์เริ่มถูกลง ระยะเวลาคืนทุนลดลง ส่งผลต่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สอดคล้อง กับ ปิยะพงษ์ ศรีวัชรราช และศักดา อินทวิชัย (2562, น.245) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เครื่องสีข้าวขนาดเล็กระดับ ชุมชน และสอดคล้องกับผลการวิจัย นงเยาว์ เต๊ะใหม่ และคนอื่นๆ (2563, น.49) ได้ศึกษาผลกระทบพลังงานแสงอาทิตย์และ ค่าแรงงานต่อความคุ้มค่าทางการเงินของโรงสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า จำนวนชั่วโมงของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากพลังงาน แสงอาทิตย์และค่าแรงงานส่งผลต่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการ ผลจากการวิจัยจะช่วยแก้ไขปัญหาให้กับวิสาหกิจ ชุมชนเพิ่มประสิทธิภาพการสีข้าว ลดต้นทุนด้านพลังงานและเป็นแนวทางให้เกษตรกรในการตัดสินใจลงทุนได้อย่างเหมาะสม

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวเปลือกที่ค่าความเร็วรอบและระยะห่างของลูกยางที่เหมาะสม พบว่า การสีข้าว กข 41 ความเร็วรอบ 1,290 rpm และระยะห่าง 0.9 mm การสีข้าว ชัยนาท 1 ความเร็วรอบ 1,350 rpm และระยะห่าง 0.9 mm และการสีข้าว หอมปทุมธานี ความเร็วรอบ 1,200 rpm และระยะห่าง 1.0 mm ผลการทดสอบความชื้นข้าวเปลือก ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการสีข้าว พบว่า พันธุ์ข้าว กข 41 ความชื้น 14%w.b. ประสิทธิภาพ 62.70% พันธุ์ข้าวชัยนาท 1 ความชื้น 14%w.b. ประสิทธิภาพ 63.40% และพันธุ์ข้าวหอมปทุมธานี ความชื้น 13%w.b. ประสิทธิภาพ 63.50% การจำลอง การผลิตพลังงานไฟฟ้าในรอบ 1 ปี สามารถผลิตพลังงานได้ 2,360 kWh/year ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์กับ กำลังไฟฟ้า ช่วง 10.00 น. ถึง 15.00 น. ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ย 1,049 W/m² กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 1,611 W การเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพด้านพลังงานในการสีข้าว พบว่า ระบบไฟฟ้า 220 V การสีข้าว 5 ชั่วโมง เสียค่าไฟฟ้า 24.31 บาท กรณีระบบ พลังงานแสงอาทิตย์ ไม่เสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และหากพิจารณาการใช้พลังงาน 5 ชั่วโมงต่อวัน ระยะเวลา 1 ปี ประหยัด ค่าไฟฟ้า 6,344.91 บาท สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 20.86 ton.CO₂ เทียบได้กับการใช้รถยนต์ 75 คัน ตลอดช่วงอายุการใช้งาน การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ต้นทุนรวม 1,512,936 บาทต่อปี รายได้ต่อปี จากการจำหน่ายผลผลิต 1,555,802 บาทต่อปี กำไรสุทธิ 42,866 บาทต่อปี ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเครื่องสีข้าวพลังงาน แสงอาทิตย์ 160,000 บาท พบว่าระยะเวลาในการคืนทุน 3.73 ปี

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. สำหรับกลุ่มโรงสีข้าวชุมชนหรือเกษตรกรที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ เพื่อประสิทธิภาพในกระบวนการสีข้าว จำเป็น จะต้องควบคุมการทำงานให้เหมาะสมกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น ชนิดพันธุ์ข้าว รูปร่าง ขนาด ความชื้นของข้าวเปลือก ความเร็วและระยะห่างของลูกยางขัดข้าว

2. ควรมีการถ่ายทอดองค์ความรู้ในการออกแบบและสร้างเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี พลังงาน เพื่อให้สามารถนำมาใช้ในการประกอบอาชีพและพัฒนาเกษตรกรไปสู่สมาร์ตฟาร์มเมอร์

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรมีการพัฒนานวัตกรรมเครื่องจักรกลทางการเกษตรโดยใช้เทคโนโลยีพลังงาน เพื่อให้กลุ่มชุมชนและเกษตรกร สามารถนำมาใช้ในการประกอบอาชีพได้อย่างยั่งยืน

2. ควรมีการออกแบบและสร้างโรงสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีกำลังผลิตสูง สามารถใช้เทคโนโลยีการควบคุม กระบวนการสีข้าวให้เหมาะสมกับข้าวสายพันธุ์ต่าง ๆ เพื่อเป็นการยกระดับประสิทธิภาพการผลิตข้าว

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงสีข้าวชุมชน อำเภอโกรกพระ จังหวัดนครสวรรค์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บข้อมูล ขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กมลศักดิ์ รัตนวงษ์, แมน พักทอง, ศักดิ์สิทธิ์ ชื่นชมนาคนาค, เอกรัฐ ชะอุ่มเอียด, ศุภชัย ชุมมนวัฒน์, และสมชาย โพธิ์พยอม. (2563). การพัฒนาเครื่องสีข้าวกลึงขนาดครัวเรือน. *วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม*, 4(1), 40-46.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2566, 21 เมษายน). รายงานประจำปี 2565 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. <https://www.egat.co.th/home/annual-report/>
- การุณย์ ชัยวนิชย์, พุทธิ อุบลสุข, และมนตรี สังข์ทอง. (2561). การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์*, 10(12), 35-46.
- นงเยาว์ เต๊ะใหม่, นิกราน หอมดวง, สัตยา ต้นจันทร์พงศ์, และทัตพงศ์ อวิโรธนานนท์. (2563). ผลกระทบพลังงานแสงอาทิตย์และค่าแรงงานต่อความคุ้มค่าทางการเงินของโรงสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์. *วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน*, 3(1), 44-50.
- ปิยะพงษ์ ศรีวงษ์ราช และศักดิ์ อินทวิชัย. (2562). การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เครื่องสีข้าวขนาดเล็กระดับชุมชน. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 29(2), 237-246.
- ภัทรารุญ บุญประกอบ, คณินิต ปทุมมาเกสร, และเอนก เทียนบูชา. (2563). การหาประสิทธิภาพของเครื่องสีข้าวขนาดเล็กสำหรับการสีข้าวพันธุ์การคำจังหวัดชัยนาท. *วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์*, 15(2), 105-117.
- รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์, สุชาญ อาลีอุสมาน, และจตุรงค์ ลังกาพินธุ์. (2562). การทดสอบและประเมินผลเครื่องสีข้าวตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 18(2), 1-16.
- ศักดิ์ชัย ตรี, กมลรักษ์ แก้วคำ, สิริพร ชันทองคำ, และวเรชษฐ์ แสงสีดา. (2564). การพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปข้าวของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนโรงสีชุมชนหนองไม้งาม. *วารสารวิชาการสมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย (สสอท.)*, 10(1), 21-31.
- สมพจน์ คำแก้ว. (2565). ผลของความชื้นต่อประสิทธิภาพการสีข้าวขาวของเครื่องสีขนาดเล็ก. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 17(1), 82-88.
- สำนักงานเกษตรจังหวัดนครสวรรค์. (2566). แผนยุทธศาสตร์การพัฒนาข้าวอย่างยั่งยืน จังหวัดนครสวรรค์ พ.ศ. 2566-2570. กรมส่งเสริมการเกษตร.
- สุรินทร์ แหวมงาม, ศศิวรรณ อินทวงศ์, ภูวดล วัฒนากรรุ่งเรือง, และณัฐวุฒิ หอมสิน. (2563). เครื่องสีข้าวขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือนควบคุมโดย Arduino Uno R3. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี*, 8(1), 143-152.
- Aroonsrimorakot, S., Laiphrakpam, M., & Paisantanakij, W. (2020). Solar panel energy technology for sustainable agriculture farming: A review. *International Journal of Agricultural Technology*, 16(3), 553-562.
- Chen, P., Jia, F., Liu, H., Han, Y., Zeng, Y., Meng, X., Xiao, Y., & Li, G. (2019). Effects of feeding direction on the hulling of paddy grain in a rubber roll huller. *Biosystems Engineering*, 183, 196-208. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.05.001>
- Gorjian, S., Ebadi, H., Trommsdorff, M., Sharon, H., Demant, M., & Schindele, S. (2021). The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. *Journal of Cleaner Production*, 292, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126030>