

การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะที่
ใช้พลังงานร่วมจากแก๊สซิฟิเคชันและชีวมวลอัดเม็ด
DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT ROTARY TUBE
PADDY DRYER THAT UTILIZES A COMBINATION OF ENERGY
FROM RICE HUSK GASIFIER AND BIOMASS PELLETS

ปิยโน ชุมมนณี

Pinyo Chummanee

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ อ.เมือง จ.นครสวรรค์ ประเทศไทย 60000

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

Muang, Nakhon Sawan, Thailand, 60000

Corresponding author e-mail: pinyo.c@nsru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 5 ตุลาคม 2568

วันที่แก้ไขบทความ 25 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 25 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะที่ใช้พลังงานร่วมจากแก๊สซิฟิเคชันและชีวมวลอัดเม็ด สำหรับกระบวนการอบแห้งแบบต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและยกระดับคุณภาพผลผลิตข้าวเปลือก ทั้งนี้เลือกโรงสีชุมชนเป็นพื้นที่กรณีศึกษา เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมีกำลังการผลิต 500 kg/hour และสามารถควบคุมอุณหภูมิรวมถึงความชื้นของอากาศร้อนได้อย่างแม่นยำผ่านชุดเซนเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ ช่วยลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการควบคุมด้วยแรงงานคน การทดสอบภาคสนามใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 25–28% มาตรฐานฐานเปียก (% w.b.) โดยกำหนดอุณหภูมิการอบที่ระดับ 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส และปรับอัตราการไหลของลมร้อนให้อยู่ระหว่าง 50 m³/min ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกลงสู่ระดับมาตรฐาน 14–15% w.b. ภายในระยะเวลา 5–6 hour ให้ประสิทธิภาพการอบแห้งเฉลี่ยอยู่ที่ 85–88% และมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงแกลบและชีวมวลอัดเม็ด เฉลี่ย 0.138, 0.117, 0.0984 และ 0.0888 kg/kg ข้าวเปลือก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งที่ใช้เชื้อเพลิง LPG และการควบคุมแบบใช้แรงงานคน พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถลดต้นทุนพลังงานได้ประมาณร้อยละ 18–22 อีกทั้งยังลดความผันผวนของอุณหภูมิในกระบวนการอบ ส่งผลให้คุณภาพผลผลิตดีกว่าอย่างชัดเจน จากการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิการอบที่เหมาะสมที่สุดคือ 90 °C ซึ่งให้สมดุลที่เหมาะสมระหว่างเวลาอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพของข้าว โดยสามารถเพิ่มสัดส่วนข้าวต้นได้เฉลี่ย 3–4% และลดการแตกตัวของเมล็ดข้าวเมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก, ท่อหมุน, แก๊สซีฟิเออร์, ระบบควบคุมอัจฉริยะ

Abstract

This study focuses on the design and development of an intelligent rotary tube paddy dryer that utilizes a combination of rice husk gasifier and biomass pellets for a continuous drying process. The aim is to improve energy efficiency and enhance the quality of paddy rice. A community rice mill was selected as the case study area. The developed dryer has a production capacity of 500 kg/hour and can precisely control the temperature and humidity of the hot air via a sensor system and microcontroller, reducing errors caused by manual control. Field testing used paddy rice with an average initial moisture content of 25–28% wet base (w.b.). Drying temperatures were set at 70, 80, 90, and 100 degrees Celsius, and the hot air flow rate was adjusted to 50 m³/min. Experimental results showed that the dryer could reduce the moisture content of paddy rice to a standard level of 14–15% w.b. within 5–6 hours, achieving an average drying efficiency of 85–88%. The average fuel consumption rates of rice husk and biomass pellets were 0.138, 0.117, 0.0984, and 0.0888 kg/kg of paddy rice, respectively. Compared to drying using LPG fuel and manual control, the developed system reduced energy costs by approximately 18–22% and also reduced temperature fluctuations during the drying process, resulting in significantly better yield quality. Analysis revealed that the optimal drying temperature was 90°C, providing an optimal balance between drying time, energy consumption, and rice quality. This resulted in an average increase of 3–4% in whole kernels and a reduction in grain cracking compared to traditional drying methods.

Keywords: Rice dryer, Rotary pipe, Gasifier, Automatic control system

1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทย ทั้งในด้านการบริโภคภายในประเทศและการส่งออกสู่ตลาดโลก อย่างไรก็ตาม ข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการเก็บเกี่ยวมักมีความชื้นในระดับสูง โดยทั่วไปมากกว่าร้อยละ 25 มาตรฐานฐานเปียก (% w.b.) ซึ่งหากไม่มีการจัดการลดความชื้นอย่างเหมาะสมจะส่งผลโดยตรงต่อการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดข้าว การเข้าทำลายของเชื้อรา และเพิ่มอัตราการแตกหักระหว่างการสี

ในปัจจุบันโรงสีชุมชนจำนวนมากยังคงพึ่งพาวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม เช่น การตากแดด หรือการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลอย่างก๊าซหุงต้ม (LPG) ซึ่งนอกจากจะมีต้นทุนการดำเนินงานที่ผันผวนตามราคาพลังงานแล้ว ยังขาดความยั่งยืนในระยะยาว (Vengov *et al.*, 2020) อีกทั้งการอบแห้งที่ไม่สามารถควบคุมสภาวะอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำยังเป็นปัจจัยวิกฤตที่ก่อให้เกิดความเครียดภายในเมล็ดข้าว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสีและสัดส่วนข้าวตันลดลง (Wetchacama & Soponronnarit, 2015)

การนำพลังงานชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยเฉพาะแกลบและชีวมวลอัดเม็ด ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว มาผ่านกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊สด้วยระบบแก๊สซิไฟเออร์ (Gasification) จึงเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมอย่างยิ่งในด้านเศรษฐศาสตร์และความยั่งยืน (Vattanakul & Soponronnarit, 2010) ระบบดังกล่าวสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อเป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่สะอาดสำหรับกระบวนการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Ahmad *et al.*, 2021)

เมื่อนำระบบแก๊สซิไฟเออร์มาใช้งานร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบท่อหมุน ซึ่งมีสมรรถนะเด่นในการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอในการผสมวัสดุ (Jha & Prasad, 2018; Suriyaporn *et al.*, 2019) และผสานเข้ากับระบบควบคุมอัจฉริยะ (Intelligent control) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของอุณหภูมิและความชื้นของอากาศร้อน ลดความแปรปรวนที่เกิดจากการควบคุมด้วยแรงงานคน (Phan *et al.*, 2023) การบูรณาการเทคโนโลยีเหล่านี้ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน แต่ยังช่วยลดต้นทุนและยกระดับคุณภาพผลผลิตให้สูงขึ้น (Chen *et al.*, 2024; Kumar *et al.*, 2022)

ด้วยเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนา "เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะที่ใช้พลังงานร่วมจากแก๊สซิไฟเออร์แกลบและชีวมวลอัดเม็ด" เพื่อเป็นนวัตกรรมต้นแบบที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง ลดต้นทุนด้านพลังงาน และยกระดับคุณภาพข้าวสารให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงในระดับโรงสีชุมชนอย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะที่ใช้พลังงานร่วมจากแก๊สซิไฟเออร์แกลบและชีวมวลอัดเม็ด

2.2 เพื่อพัฒนาระบบควบคุมอัจฉริยะด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์ สำหรับควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของลมร้อนในกระบวนการอบแห้ง

2.3 เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในด้านประสิทธิภาพการอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพของผลผลิตข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาสภาพและปัญหา

ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งถูกเก็บรวบรวมจากแปลงนาของเกษตรกรในพื้นที่การศึกษา โดยผู้วิจัยได้คัดเลือกข้าวเปลือก 2 สายพันธุ์ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ได้แก่ พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (KDML 105) ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์เชิงพาณิชย์คุณภาพสูง และข้าวพันธุ์หอมปทุม 1 เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาเปรียบเทียบผลของกระบวนการอบแห้งต่อคุณภาพเมล็ดข้าว โดยในการทดสอบแต่ละครั้ง ข้าวเปลือกจะถูกชั่งน้ำหนักและจัดเตรียมในปริมาณชุดละ 500 กิโลกรัม เพื่อให้สอดคล้องกับกำลังการผลิตที่ออกแบบไว้ของเครื่องอบแห้งท่อหมุน

ก่อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือกให้มีสภาวะเริ่มต้นใกล้เคียงกับสภาพจริงหลังการเก็บเกี่ยว (Freshly harvested paddy) โดยควบคุมความชื้นเริ่มต้นให้อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 25–28 มาตรฐานฐานเปียก (% w.b.) ซึ่งเป็นระดับความชื้นวิกฤตที่มักพบหลังการเก็บเกี่ยวและเสี่ยงต่อการเสื่อมเสียทางชีวภาพ (Wetchacama & Soponronnarit, 2015) ระดับความชื้นดังกล่าวนอกจากจะเป็นตัวแทนของสภาวะการทำงานจริงในโรงสีชุมชนแล้ว ยังถือเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดสอบขีดความสามารถของระบบควบคุมอัจฉริยะและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแก๊สซีฟเอร์ในการลดความชื้น

3.2 การออกแบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุน (Rotary drum dryer)

3.2.1 การคำนวณปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (Fuel consumption rate)

ในการออกแบบระบบให้ความร้อน ปริมาณการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้กำหนดขนาดของห้องเผาไหม้และระบบป้อนเชื้อเพลิง โดยอ้างอิงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตและคุณสมบัติทางความร้อนของแกลบดังนี้

3.2.1.1 สมการคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (m_f)

อัตราการใช้เชื้อเพลิงคำนวณได้จากผลคูณของอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะ (Specific fuel consumption) และอัตราการผลิตของเครื่อง โดยใช้สมการที่ (1)

$$m_f = \text{SFC} \times m_p \quad (1)$$

เมื่อ	m_f	คือ	อัตราการใช้เชื้อเพลิงแกลบ (kg/hour)
	SFC	คือ	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (0.0984 kg/kg)
	m_p	คือ	กำลังการผลิตข้าวเปลือกต่อชั่วโมง (kg/hour)

3.2.1.2. การออกแบบระบบป้อนเชื้อเพลิง (Feed system design):

เพื่อให้สามารถรักษาระดับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (Combustion chamber) ให้คงที่ที่ประมาณ 850 °C ระบบต้องถูกออกแบบให้อัตราการป้อนกลบสอดคล้องกับภาระความร้อนที่ต้องการ (Thermal load) โดยมีค่าพารามิเตอร์จากการออกแบบดังนี้:

- อัตราการป้อนระดับปฏิบัติการ (m_{feed}): ประมาณ 0.5 kg/min (หรือเท่ากับ 30 kg/h)
- การควบคุมสมดุลพลังงาน: อัตราการป้อนนี้ถูกคำนวณเพื่อให้สมดุลกับความร้อนที่สูญเสียและการถ่ายเทความร้อนไปยังลมร้อน (Process Air) ตามสมการสมดุลพลังงาน

$$Q_{\text{in}} = m_f \times \text{LHV}_{\text{rice_husk}} \quad (2)$$

เมื่อ LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของกลบ ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 12 - 15 MJ/kg

3.2.2 การคำนวณระบบลมและพัดลม (Blower/fan calculation)

3.2.2.1 อัตราการไหลรวม (Total air flow rate, Q_{total}): คำนวณจากผลรวมของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งและอากาศปฐมภูมิสำหรับปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{hot_air}} + Q_{\text{primary}} \quad (3)$$

โดยกำหนดให้ $Q_{\text{total}} = 50 \text{ m}^3/\text{min}$ และ $Q_{\text{primary}} = 0.03 \text{ m}^3/\text{min}$ ดังนั้น $Q_{\text{total}} = 50.03 \text{ m}^3/\text{min}$

3.2.2.2 การคำนวณกำลังมอเตอร์พัดลม (P_{fan}): มอเตอร์ต้องมีกำลังเพียงพอที่จะสร้างความดันเพื่อเอาชนะแรงต้านทานภายในชั้นกลบ (Pressure drop) โดยใช้สมการ

$$P_{\text{fan}} = (Q_{\text{total}} \times \Delta P) / (60 \times \eta) \quad (4)$$

เมื่อ P_{fan} คือ กำลังงานที่พัดลมต้องการ (Watt)

ΔP คือ ความดันสถิตรวมที่พัดลมต้องเอาชนะ (N/m^2)

η คือ ประสิทธิภาพของพัดลม (โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 0.6 - 0.8)

3.2.3 การคำนวณระบบขับเคลื่อนท้อหมุน (Rotary drum drive)

การออกแบบใช้หลักการอบแห้งแบบต่อเนื่อง (Continuous drying) โดยใช้การไหลแบบตามกัน (Co-current flow) ซึ่งต้องคำนวณภาระโหลดและกำลังขับเคลื่อนดังนี้:

3.2.3.1 น้ำหนักบรรทุกรวม (W_{total}): ประกอบด้วยน้ำหนักของโครงสร้างท่อและน้ำหนักข้าวเปลือกที่บรรจุอยู่ภายใน

$$W_{total} = W_{drum} + (V_{drum} \times \phi \times \rho_{rice}) \quad (5)$$

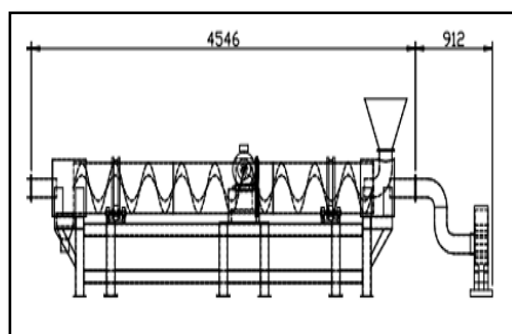
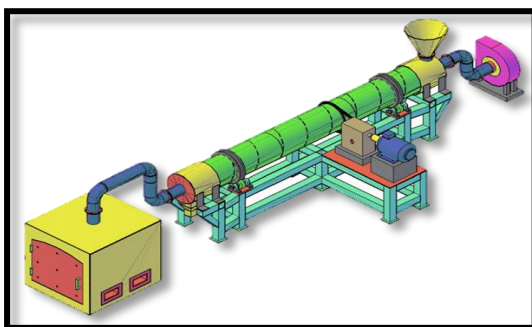
เมื่อ V_{drum} คือ ปริมาตรภายในท่อหมุน (m^3)
 ϕ คือ สัมประสิทธิ์การบรรจุ (Loading ratio, โดยทั่วไปอยู่ที่ 0.1 - 0.15)
 ρ_{rice} คือ ความหนาแน่นปรากฏของข้าวเปลือก (kg/m^3)

3.2.3.2 กำลังมอเตอร์ขับเคลื่อน (P_{drive}): คำนวณจากแรงบิดที่ต้องใช้ในการเอาชนะแรงเสียดทานและยกวัสดุภายในท่อ

$$P_{drive} = (2\pi N T) / (60\eta_{trans}) \quad (6)$$

เมื่อ N คือ ความเร็วรอบของท่อหมุน (rpm)
 T คือ แรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อน (N.m)
 η_{trans} คือ ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง (เช่น ชุดเกียร์ทด)

การเลือกความเร็วรอบ (N) ต้องสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ข้าวอยู่ในท่อ (Retention Time) เพื่อให้ความชื้นลดลงตามเกณฑ์ที่กำหนดในเชิงวิศวกรรมการอบแห้งแสดงในภาพที่ 1

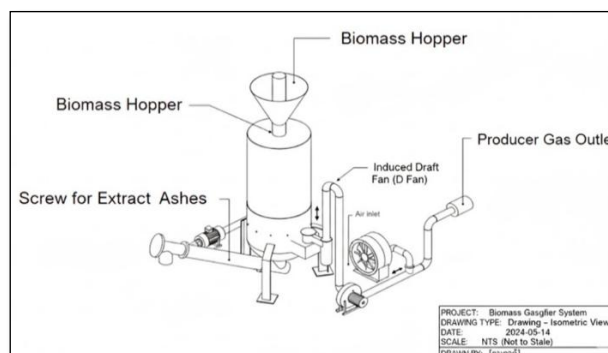


ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุน

3.3 การออกแบบระบบแก๊สซิฟิเคชันเชื้อเพลิงชีวมวล

ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีววมวล (Gasification) เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนหลักสำหรับกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกในระดับโรงสีชุมชน โดยระบบถูกออกแบบให้รองรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่หลากหลาย ได้แก่ แกลบ ฟางอัดเม็ด และชานอ้อยอัดเม็ด ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในท้องถิ่น (Kaur *et al.*, 2022) ระบบดังกล่าวอาศัยหลักการผลิตก๊าซชีววมวลแบบอากาศไหลลง (Downdraft gasification) ซึ่งมีจุดเด่นในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีปริมาณน้ำมันดิน (Tar) ต่ำและมีความเสถียรของอุณหภูมิสูง (Sethi *et al.*, 2017)

เครื่องแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้นถูกออกแบบให้ทำงานในลักษณะต่อเนื่อง (Continuous flow) เพื่อให้สอดคล้องกับเครื่องอบแห้งท่อหมุนที่มีกำลังการผลิตประมาณ 500 kg/hour จากการทดสอบสมรรถนะพบว่า สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดคือการรักษาระดับอุณหภูมิเฉลี่ยในบริเวณชั้นเผาไหม้ (Combustion zone) ไว้ที่ประมาณ 850 °C ภายใต้เงื่อนไขการควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 0.03 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเฉลี่ยที่ 0.5 kg/min (Vattanakul & Soponronnarit, 2010) แสดงในภาพที่ 2



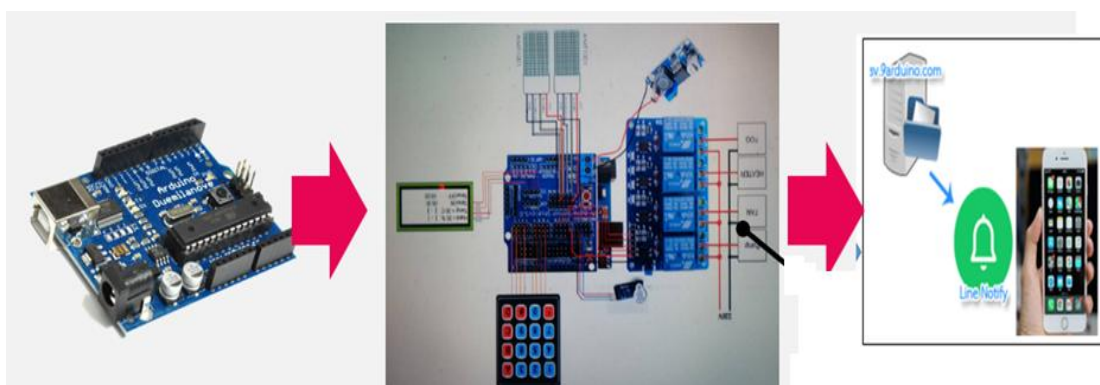
ภาพที่ 2 การออกแบบและทดสอบเตาแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง

3.4 การออกแบบระบบควบคุมอัจฉริยะ

การออกแบบระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในงานวิจัยนี้ อาศัยการทำงานของระบบสมองกลฝังตัว (Embedded system) ผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ซึ่งทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลกลางในการบริหารจัดการสภาวะการอบแห้ง (Kumar *et al.*, 2022) โดยระบบเริ่มต้นการทำงานจากการรับสัญญาณผ่านเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (AMT1001) ที่ติดตั้งในจุดวิกฤตของระบบ อุปกรณ์ตรวจวัดดังกล่าวจะทำหน้าที่แปลงค่าพารามิเตอร์

ทางกายภาพเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าส่งเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real-time processing) ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในอัลกอริทึม (Wang & Zhang, 2025)

เมื่อกระบวนการประมวลผลเสร็จสิ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณเอาต์พุตไปยังชุดรีเลย์ (Relay) เพื่อควบคุมการตัดต่อวงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ปฏิบัติการ (Actuators) ได้แก่ ระบบป้อนกลับเข้าสู่เตาแก๊สซีฟเอร์ และระบบป้อนข้าวเปลือกเข้าสู่ท่อหมุนอบแห้ง การควบคุมในลักษณะนี้ช่วยรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งให้คงที่ตามค่าที่ตั้งไว้ (Set point) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการลดความเครียดทางความร้อนของเมล็ดข้าว (Chen *et al.*, 2024) นอกจากนี้ การใช้ระบบควบคุมอัจฉริยะยังช่วยลดความแปรปรวนจากปัจจัยภายนอกและลดความผิดพลาดที่มักเกิดจากการควบคุมด้วยแรงงานคน (Human error) ส่งผลให้กระบวนการอบแห้งมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุด (Phan *et al.*, 2023) แสดงภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนผังวงจรของ Arduino

3.5 การเก็บผลทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะ

3.5.1 เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 25–28% w.b. จากโรงสีชุมชน

3.5.2 ทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะที่ใช้พลังงานร่วมจากแก๊สซีฟเอร์แอลบและชีวมวลอัดเม็ด

3.5.3 ทำการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบข้าวเปลือกที่พัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิที่ 70, 80, 90 และ 100 °C และอัตราการไหลของลมร้อน 50 m³/ton

3.5.4 บันทึกค่าความชื้นเป็นช่วง ๆ จนได้ระดับความชื้นมาตรฐาน 14–15% w.b.

3.5.5 นำไปสีเพื่อประเมินสัดส่วนข้าวตัน และร้อยละความแตกร้าว ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

4. ผลการวิจัย

4.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะ

4.1.1 สร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุน (Rotary drum dryer)

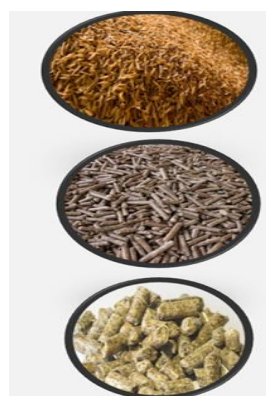
การสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนในช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นสูงสำหรับโรงสีข้าวชุมชน โดยใช้เทคนิคโรตารีหมุนต่อเนื่องชนิดอากาศร้อนไหลตาม สามารถอบแห้งข้าวเปลือกที่มีกำลังผลิต 500 kg/h แสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุน

4.1.2 การสร้างและทดสอบเครื่องแก๊สซิไฟเออร์จากเชื้อเพลิง

การสร้างและทดสอบเครื่องแก๊สซิไฟเออร์จากเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ในระบบพลังงานประกอบด้วย แกลบ ฟางอัดเม็ด และชานอ้อยอัดเม็ด โดยใช้เทคนิคผลิตก๊าซชีวมวลแบบอากาศไหลลงต่อเนื่อง สามารถใช้อบแห้งข้าวเปลือกที่มีกำลังผลิต 500 kg/hour โดยมีอุณหภูมิชั้นเผาไหม้เฉลี่ย 850 °C และอัตราการไหลของอากาศ 0.03 m³/min และอัตราการป้อนแกลบ ฟางอัดเม็ด และชานอ้อยอัดเม็ด 0.5 kg/min แสดงในภาพที่ 5



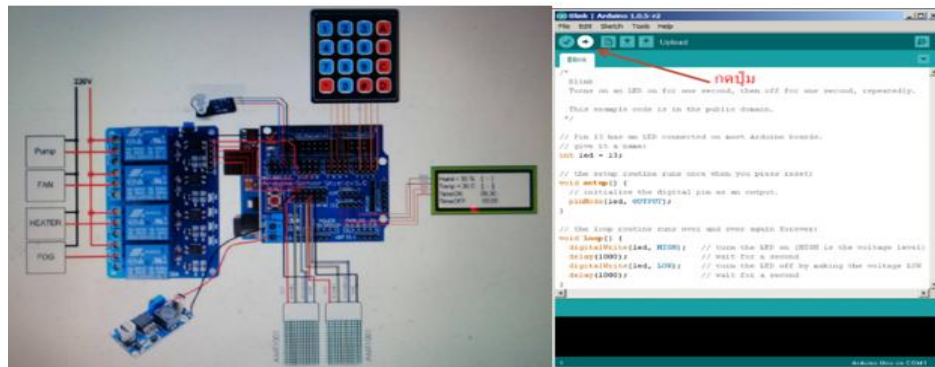
ภาพที่ 5 การสร้างและทดสอบเครื่องแก๊สซิไฟเออร์จากเชื้อเพลิง

4.1.3 การสร้างและทดสอบระบบควบคุมอัจฉริยะ

การสร้างและพัฒนาชุดควบคุมอัจฉริยะสำหรับกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมองกลฝังตัว (Embedded system) บนแพลตฟอร์ม Arduino เป็นหน่วยประมวลผลหลัก (Kumar *et al.*, 2022) โดยระบบเริ่มต้นการทำงานจากเซนเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ รุ่น AMT1001 ซึ่งทำหน้าที่รับพารามิเตอร์ทางกายภาพภายในห้องอบแห้งและแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำมาประมวลผลผ่านอัลกอริทึมเพื่อตัดสินใจเชิงตรรกะ ก่อนส่งสัญญาณเอาต์พุตไปยังชุดรีเลย์ (Relay) เพื่อทำหน้าที่เสมือนสวิตช์ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ปฏิบัติการ (Wang & Zhang, 2025)

ระบบถูกออกแบบให้สามารถควบคุมตัวแปรสำคัญในกระบวนการอบแห้งได้อย่างแม่นยำ ประกอบด้วยการควบคุมอุณหภูมิอากาศร้อนในระดับที่ต้องการคือ 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส ควบคู่ไปกับการรักษาระดับอัตราการไหลของลมร้อนที่ 50 m³/ton เพื่อให้สอดคล้องกับคุณลักษณะการถ่ายเทมวลและความร้อนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องอบแห้งทอหมุน (Jha & Prasad, 2018; Suriyaporn *et al.*, 2019) การควบคุมในลักษณะนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเครียดทางความร้อนของเมล็ดข้าวและรักษาคุณภาพของสัดส่วนข้าวต้นให้สูงที่สุด (Liu *et al.*, 2023)

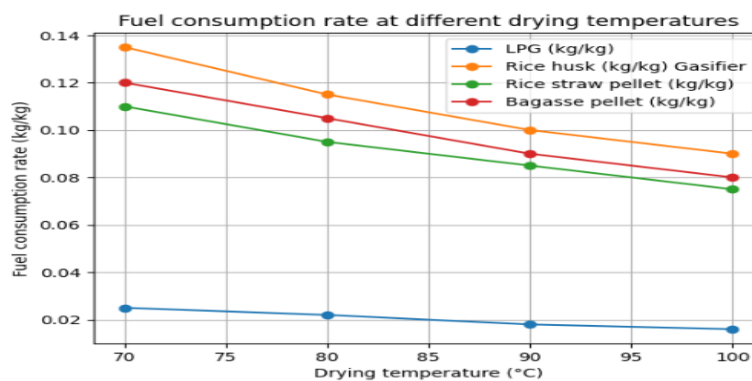
ขั้นตอนการทดสอบและปรับปรุงโปรแกรมควบคุม (Debugging and validation) ภายหลังจากเสร็จสิ้นการเขียนรหัสคำสั่ง ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบโปรแกรมอย่างเป็นระบบเพื่อระบุข้อผิดพลาด (Error) ที่อาจเกิดขึ้นในสภาวะการทำงานจริง ทั้งในส่วนของตรรกะการคำนวณและความล่าช้าของการตอบสนองจากเซนเซอร์ (Sensor lag) ข้อผิดพลาดที่พบจะถูกนำมาวิเคราะห์และปรับปรุงแก้ไข (Program optimization) เพื่อให้ระบบการควบคุมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ออกแบบไว้ ซึ่งช่วยลดความแปรปรวนที่เกิดจากปัจจัยภายนอกและข้อผิดพลาดจากมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Phan *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2024) แสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การสร้างและทดสอบระบบควบคุมอัจฉริยะ

4.1.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก

จากการศึกษาพบว่า เมื่อเปรียบเทียบการใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) กับการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ในระบบพลังงานประกอบด้วยแกลบ ฟางอัดเม็ด และขานอ้อยอัดเม็ดผ่านระบบแก๊สซิไฟเออร์สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก พบว่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยสำหรับกรณีใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิการเป่า 70, 80, 90 และ 100 °C เท่ากับ 0.0260, 0.0220, 0.0185 และ 0.0167 kg/kg ข้าวเปลือก ตามลำดับ ในขณะที่กรณีใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ในระบบพลังงานประกอบด้วยแกลบ ฟางอัดเม็ด และขานอ้อยอัดเม็ดผ่านระบบแก๊สซิไฟเออร์ มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิเดียวกันเท่ากับ 0.138, 0.117, 0.0984 และ 0.0888 kg/kg ข้าวเปลือก ตามลำดับ แสดงในภาพที่ 7



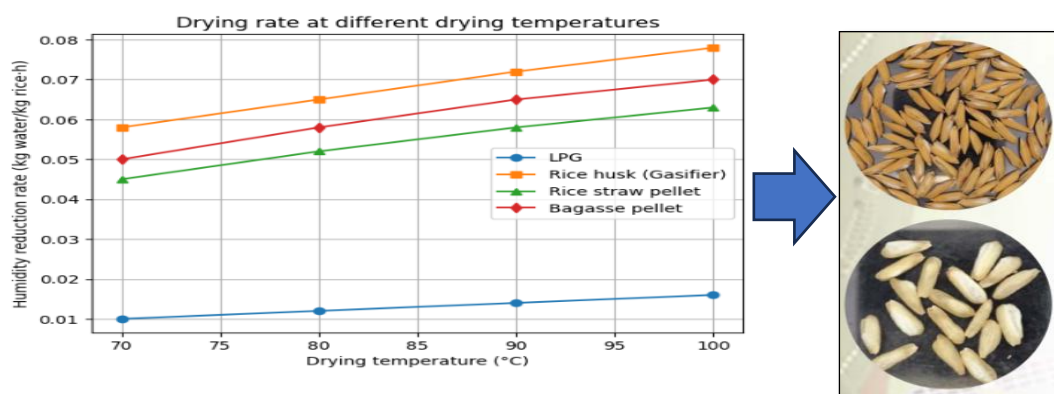
ภาพที่ 7 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

4.2. การทดสอบคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

4.2.1 อัตราการอบแห้ง (Drying rate curve)

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกดำเนินการภายใต้เงื่อนไขการควบคุมสองแบบ ได้แก่ การควบคุมด้วยพนักงาน (Manual control) และ การควบคุมอัตโนมัติ (Automatic control) โดยใช้ อุณหภูมิอากาศอบแห้งช่วง 70–100 °C เพื่อปรับความชื้นของข้าวเปลือกสด (ข้าวเปลือกที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้งก่อนการทดลอง) จากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 25–28 w.b. จนกระทั่งความชื้นของข้าวเปลือกลดลงเหลือประมาณร้อยละ 14 w.b.

ผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้ง (Drying rate) มีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับ อุณหภูมิการอบแห้ง โดยระบบแก๊สซิไฟเออร์ที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงแสดงประสิทธิภาพในการลดความชื้นได้สูงที่สุดในทุกช่วงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ณ อุณหภูมิใช้งานที่เหมาะสม 90 °C ระบบแก๊สซิไฟเออร์จากแกลบสามารถทำอัตราการลดความชื้นได้สูงถึงประมาณ 0.072 kg water/kg rice· h ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้เชื้อเพลิง LPG อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้เครื่องอบแห้งทอหมุนขนาดกำลังการผลิต 500 kg/hour ที่พัฒนาขึ้น สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจากร้อยละ 25–28 w.b. สู่ระดับมาตรฐานที่ร้อยละ 14–15 w.b. ได้ภายในระยะเวลาเพียง 5–6 hour อีกทั้งยังช่วยเพิ่มสัดส่วนข้าวต้นได้ร้อยละ 3–4 และประหยัดต้นทุนพลังงานได้ร้อยละ 18–22 เมื่อเทียบกับการใช้ LPG แสดงภาพที่ 7



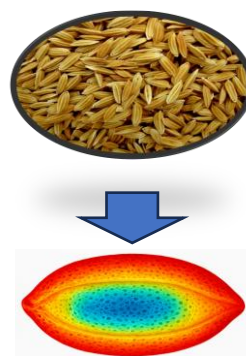
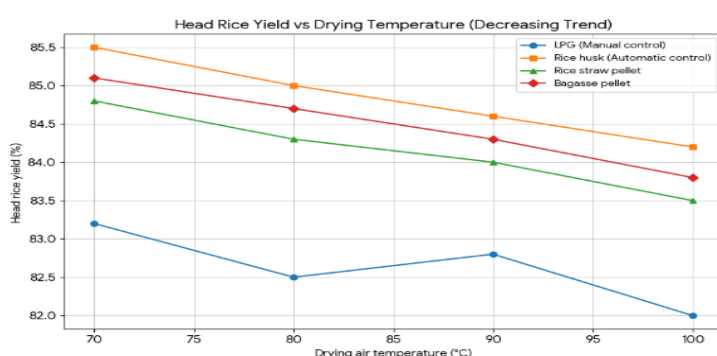
ภาพที่ 7 อัตราการอบแห้ง

4.2.2 อัตราสัดส่วนข้าวต้น และร้อยละความแตกร้า

4.2.2.1 อัตราสัดส่วนข้าวต้น (Whole grain proportion/head rice yield)

จากกราฟพบว่าผลผลิตข้าวเต็มเมล็ด (Head rice yield) มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นจาก 70°C ถึง 100°C โดยระบบที่ใช้แกลบร่วมกับระบบอัตโนมัติ

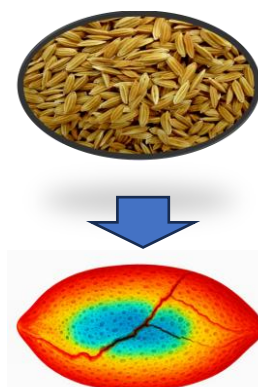
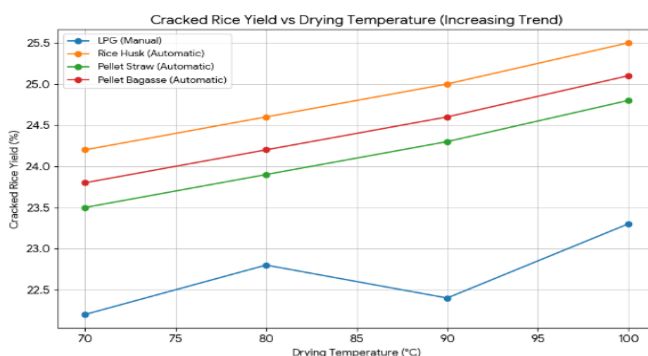
ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 85.5% ขณะที่การใช้ก๊าซ LPG แบบควบคุมด้วยมือให้ผลผลิตต่ำสุดและลดลงเหลือเพียง 82.0% ที่อุณหภูมิสูงสุด ซึ่งความแตกต่างของผลผลิตระหว่างระบบที่ดีที่สุดและแย่ที่สุดกว้างถึง 3.5% ณ จุดเริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำและการเลือกใช้เชื้อเพลิงชีวมวลมีผลสำคัญต่อการรักษาคุณภาพเมล็ดข้าวทางวิศวกรรมมากกว่าการใช้ก๊าซในระบบธรรมดา แสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 อัตราสัดส่วนข้าวต้น

4.2.2.2 ร้อยละความแตกร้าว (Broken percentage)

จากการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 70°C ถึง 100 °C พบว่าอัตราข้าวแตกร้าวเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับการลดลงของข้าวต้นประมาณ 1.3% ในระบบอัจฉริยะ โดยความร้อนที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดความเครียดเทอร์มัล (Thermal Stress) ทำให้อัตราการระเหยน้ำที่ผิวหน้าเร็วกว่าการแพร่ความร้อนขึ้นภายในเมล็ด ส่งผลให้โครงสร้างเชิงกลเกิดรอยร้าวภายใน (Internal Fissuring) โดยเฉพาะที่จุดวิกฤต 100 °C ซึ่งมีค่าข้าวแตกร้าวสูงสุด ขณะที่ระบบ Manual (LPG) แสดงค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่ 90 °C สะท้อนถึงความเสี่ยงในการควบคุมตัวแปรทางอุณหภูมิ แสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ร้อยละความแตกร้าว

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะที่ใช้พลังงานร่วมจากแก๊สซีพีเออร์แกสและชีวมวลอัดเม็ด มีสมรรถนะในการอบแห้งสูงกว่าวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมที่อาศัยแรงงานคนอย่างมีนัยสำคัญ โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลจากการควบคุมสถานะการเผาไหม้ในระบบแก๊สซีพีเออร์ให้มีความเสถียร (Sethi *et al.*, 2017) จากการทดสอบพบว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงกลบอยู่ในช่วง 0.138, 0.117, 0.0984 และ 0.0888 kg/kg ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพด้านพลังงานและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยสามารถลดต้นทุนเชื้อเพลิงได้ประมาณร้อยละ 18–22 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ahmad *et al.* (2021) ที่ระบุว่าการใช้พลังงานชีวมวลผ่านระบบแก๊สซีพีเออร์ช่วยลดภาระต้นทุนด้านพลังงานในกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ด้านคุณภาพผลผลิต พบว่าสัดส่วนข้าวตัน (Head rice yield) เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 3–4 ซึ่งเป็นผลลัพธ์เชิงบวกจากการควบคุมสถานะการอบแห้งอย่างเหมาะสมผ่านระบบอัจฉริยะ (Chen *et al.*, 2024) เนื่องจากระบบควบคุมอัจฉริยะสามารถรักษาระดับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ให้มีความเสถียร ส่งผลให้ความเค้นทางความร้อน (Thermal stress) ที่เกิดขึ้นภายในเมล็ดข้าวลดลง จึงช่วยลดอัตราการแตกตัวของเมล็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Liu *et al.*, 2023) ซึ่งสอดคล้องกับหลักการถ่ายเทความร้อนและกลไกการแพร่กระจายความชื้น โดยการรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจะช่วยลดความแตกต่างของศักย์การแพร่ของไอน้ำภายในเมล็ด ส่งผลให้กระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำเป็นไปอย่างสมดุลและลดความเสียหายของโครงสร้างเมล็ดข้าว (Wetchacama & Soponronnarit, 2015; Jha & Prasad, 2018)

เมื่อพิจารณาถึงการประยุกต์ใช้ในระดับโรงสีข้าวชุมชน ระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถแก้ไขปัญหาข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงหลังการเก็บเกี่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในพื้นที่ (Vengov *et al.*, 2020) การพัฒนานี้ถือเป็นการยกระดับเทคโนโลยีการแปรรูปข้าวในระดับท้องถิ่น ทั้งในมิติของประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพผลผลิต (Prasad *et al.*, 2021) อีกทั้งยังสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) และการพัฒนาอย่างยั่งยืน โดยการเปลี่ยนผลพลอยได้จากกระบวนการสีข้าวให้กลับมาเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สร้างมูลค่าเพิ่มได้อย่างเป็นรูปธรรม (Vattanukul & Soponronnarit, 2010)

6. ข้อเสนอแนะ

ควรมีการติดตั้งชุดกรองแก๊สเชื้อเพลิงและระบบขจัดฝุ่นที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นก่อนส่งลมร้อนเข้าสู่ท่อหมุน เพื่อลดการปนเปื้อนของเขม่าควันและรักษาความสะอาดของเมล็ดข้าวเปลือกตามมาตรฐานความปลอดภัยทางอาหารและควรขยายผลการทดสอบกับพืชเกษตรชนิดอื่นที่มีลักษณะเมล็ดใกล้เคียงกันเพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

7. เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, F., Al-Sulaiman, S., & Mehmood, S. (2021). Performance evaluation of a biomass gasifier-based drying system for agricultural products. **Renewable Energy**, 174, 1020–1035. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.112>
- Chen, X., Li, Y., & Zhang, W. (2024). Smart drying system: Integration of IoT and fuzzy logic for temperature control in paddy drying. **Journal of Food Process Engineering**, 47(2), e14567. Doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.14567>
- Jha, P.K., & Prasad, S. (2018). Continuous drying of paddy in a rotary dryer: Modeling and simulation. **Journal of Food Engineering**, 222, 121–130. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.015>
- Kaur, R., Pandey, A.K., & Singh, S. (2022). Comparative study on heating values and efficiency of different biomass pellets in gasification systems. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 12(4), 1145–1158. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01678-x>
- Kumar, M., Singh, R., & Upadhyay, A. (2022). Low-cost Arduino-based temperature control for biomass gasifier combustion chambers. **International Journal of Agricultural Engineering**, 15(1), 45–52.
- Phan, T.Q., Nguyen, V.H., & Tran, D.L. (2023). Automation of drying processes to mitigate human error in industrial applications. **Journal of Mechanical Systems and Control**, 9(3), 214–225.
- Sethi, S.K., Singh, J., & Chauhan, R. (2017). Airflow dynamics in downdraft biomass gasifiers for stable thermal output. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, 39(22), 2110–2117. Doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1403510>



- Vattanakul, P., & Soponronnarit, S. (2010). Economic analysis of rice husk gasification for community-scale rice mills. **Applied Energy**, 87(1), 197–203.
- Vengov, R., Ivanov, P., Petrov, D., & Markov, S. (2020). Transitioning from fossil fuels to biomass in rural drying applications. **Sustainability**, 12(18), 7421.
- Wetchacama, S., & Soponronnarit, S. (2015). Moisture diffusion and thermal stress in paddy drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 53, 1–15.