นวัตกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำภายใต้ระบบหมุนวนแก๊สแบบปิด

INNOVATIVE PADDY DRYING VIA MILD TORREFACTION UNDER CLOSED-LOOP GAS CIRCULATION SYSTEM

มนตรี วงษ์ศิริวิทยา* กุลเดช สุขใย ธนกฤต คงวุธ เอกกฤษ แก้วเจริญ และวีรวุธ เลพล

Montree Wongsiriwittaya, Kunladet Sookyai, Thanakrit Kongwut, Eakrit Kaewcharoen and Wirawut Lephon

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ (mild torrefaction) ต่อการลดความชื้นและพฤติกรรมการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือก ภายใต้ระบบหมุนวนแก๊สแบบปิด โดยกำหนดสภาวะการทดลองที่อุณหภูมิการอบแห้ง 40–80 องศาเซลเซียส ระยะเวลาอบแห้ง 10–30 นาที และอัตราการป้อนวัตถุดิบ 500, 1,000 และ 1,500 กรัม การทดลองทั้งหมดดำเนินการแบบทำซ้ำ 3 ครั้ง และรายงานผลในรูปค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาอบแห้งมีอิทธิพลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการลดความชื้นของข้าวเปลือก โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มอัตราการลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่การเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงเล็กน้อย เนื่องจากความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนและการแพร่ของไอน้ำภายในชั้นวัตถุดิบเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ระบบยังคงสามารถลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ทุกสภาวะที่ศึกษา นอกจากนี้ ข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำที่อุณหภูมิ 70–80 องศาเซลเซียส และระยะเวลาอบแห้งมากกว่า 20 นาที มีแนวโน้มการดูดคืนความชื้นลดลงอย่างชัดเจน สะท้อนถึงความเสถียรต่อความชื้นที่ดีขึ้น อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเมล็ดภายใต้สภาวะออกซิเจนต่ำและการหมุนเวียนแก๊สภายในระบบ

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang District, Phitsanulok Province 65000

*corresponding author e-mail : montree.w@psru.ac.th

Received: 5 January 2026; Revised: 28 April 2026; Accepted: 8 May 2026

DOI: https://doi.org/10.14456/lsej.2026.15

ซึ่งช่วยลดสมบัติการดูดซับความชื้นของวัสดุ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำภายใต้ระบบหมุนวนแก๊สแบบปิดมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นเทคโนโลยีอบแห้งทางเลือกสำหรับการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือก โดยสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง ลดการดูดคืนความชื้น และสนับสนุนการใช้งานในระดับกึ่งอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: ทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ ข้าวเปลือก การลดความชื้น การดูดคืนความชื้น การอบแห้ง

Abstract

This study investigated the effectiveness of mild torrefaction under a closed-loop gas circulation system for moisture reduction and moisture reabsorption behavior of paddy rice. Drying experiments were conducted at temperatures ranging from 40 to 80°C, drying times of 10–30 minutes, and feed rates of 500, 1,000, and 1,500 g. All experiments were performed in triplicate, and results were reported as mean ± standard deviation. The results demonstrated that drying temperature and residence time significantly affected moisture reduction efficiency. Higher temperatures enhanced the drying rate, while increasing feed rate slightly reduced drying efficiency due to increased resistance to heat and mass transfer within the material bed. Nevertheless, effective moisture reduction was achieved under all investigated conditions. In addition, paddy rice treated at 70–80°C with drying times longer than 20 minutes exhibited significantly reduced moisture reabsorption behavior, indicating improved moisture stability during storage. This behavior was attributed to structural modification within the grain under low-oxygen and closed-loop gas circulation conditions, which reduced the hygroscopic characteristics of the material. The findings suggest that mild torrefaction under a closed-loop gas circulation system has strong potential as an alternative drying technology for post-harvest paddy management. The process can improve drying efficiency, reduce moisture reabsorption, and support semi-industrial drying applications.

Keywords: mild torrefaction, paddy rice, moisture reduction, moisture reabsorption, drying process

บทนำ

กระบวนการอบแห้ง (drying) เป็นเทคโนโลยีสำคัญในอุตสาหกรรมการเกษตรและอาหาร เนื่องจากผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่มีความชื้นสูง จึงมีความเสี่ยงต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี และการเสื่อมคุณภาพระหว่างการเก็บรักษา หากไม่ได้รับการลดความชื้นอย่างเหมาะสม (Shuping et al., 2020) ข้าวเปลือกถือเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ผลิตและผู้ส่งออกข้าวรายสำคัญของโลก โดยมีปริมาณการผลิตเฉลี่ยมากกว่า 25 ล้านตันต่อปี ดังนั้น การควบคุมและจัดการความชื้นของข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวจึงมีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ การยืดอายุการเก็บรักษา และความมั่นคงทางอาหารของประเทศ

ในปัจจุบัน วิธีการลดความชื้นข้าวเปลือกที่นิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ การตากแดดบนลานตาก ซึ่งแม้จะมีต้นทุนต่ำและสามารถดำเนินการได้ง่าย แต่ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น การใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ ระยะเวลาในการทำแห้งที่ยาวนาน ความไม่แน่นอนของสภาพอากาศ และความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม (Chen et al., 2015) นอกจากนี้ ในบางพื้นที่เกษตรกรยังจำเป็นต้องใช้พื้นที่สาธารณะหรือถนนในการตากข้าว ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อการจราจรและเพิ่มความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกและจุลินทรีย์ Kumar et al. (2009) รายงานว่าการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถควบคุมสภาวะการทำงานได้อย่างเหมาะสม จึงเป็นแนวทางสำคัญในการยกระดับคุณภาพการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวของข้าวเปลือก

กระบวนการทอร์รีแฟกชัน (torrefaction) เป็นเทคนิคการปรับปรุงสมบัติของชีวมวลด้วยความร้อนภายใต้สภาวะออกซิเจนต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปดำเนินการที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านพลังงานของวัสดุชีวมวล (Chen et al., 2015) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้แนวคิดของทอร์รีแฟกชันกับการอบแห้งข้าวเปลือกในช่วงอุณหภูมิ 40–80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับการอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไปมากกว่าทอร์รีแฟกชันแบบดั้งเดิม ดังนั้น ความใหม่ของงานวิจัยจึงไม่ได้อยู่ที่ระดับอุณหภูมิ แต่เกิดจากการออกแบบสภาวะกระบวนการที่แตกต่าง โดยเฉพาะการควบคุมบรรยากาศออกซิเจนต่ำและการหมุนเวียนแก๊สภายในระบบแบบปิด ซึ่งช่วยส่งเสริมการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างในระดับจุลภาคของวัสดุ

แม้อุณหภูมิที่ใช้จะต่ำกว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันทั่วไป แต่สภาวะการหมุนเวียนแก๊สภายใต้บรรยากาศออกซิเจนต่ำสามารถกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบางส่วนขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติการดูดซับความชื้นของวัสดุ (Ong et al., 2021) ส่งผลให้วัสดุมีความเสถียรต่อความชื้นสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไป งานวิจัยนี้จึงนิยามกระบวนการดังกล่าวว่า “ทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ (mild torrefaction)” ซึ่งเป็นแนวทางที่ผสานกลไกของการอบแห้งและการปรับปรุงสมบัติวัสดุเข้าด้วยกันภายใต้สภาวะการทำงานเฉพาะ

ที่ผ่านมา งานวิจัยด้านทอร์รีแฟกชันส่วนใหญ่มุ่งเน้นการใช้ช่วงอุณหภูมิสูงเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลและการปรับปรุงค่าความร้อนของวัสดุ ขณะที่การประยุกต์ใช้กระบวนการดังกล่าวในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส สำหรับการลดความชื้นและการเพิ่มเสถียรภาพความชื้นของวัสดุเกษตรยังมีการศึกษาค่อนข้างจำกัด อีกทั้งยังขาดข้อมูลเชิงกลไกที่อธิบายความแตกต่างระหว่างกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำกับการอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไป (Chen et al., 2015) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำต่อพฤติกรรมการลดความชื้นและการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือก โดยวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิ ระยะเวลาอบแห้ง และอัตราการป้อนวัตถุดิบต่อสมบัติของวัสดุและประสิทธิภาพการอบแห้ง เพื่อยกระดับองค์ความรู้และสนับสนุนการประยุกต์ใช้งานในระดับกึ่งอุตสาหกรรม (Ribeiro et al., 2018)

การประยุกต์ใช้กระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำกับข้าวเปลือกนับเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากสามารถช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง ลดการใช้พื้นที่ ลดความเสี่ยงต่อการปนเปื้อน และเพิ่มความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันสามารถช่วยลดความชื้นสมดุลของวัสดุและเพิ่มเสถียรภาพระหว่างการเก็บรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Nabila et al., 2023) อีกทั้งยังสอดคล้องกับแนวโน้มของการพัฒนาเทคโนโลยีสะอาดและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในภาคอุตสาหกรรมเกษตรและอาหารในปัจจุบัน

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินการออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือก การทดลองลดความชื้นด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ และการประเมินสมบัติด้านความชื้นของข้าวเปลือกหลังผ่านกระบวนการอบแห้ง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือก ตัวอย่างข้าวเปลือกพันธุ์พิษณุโลก 80 ได้มาจากพื้นที่เพาะปลูกในอำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก จากนั้นนำตัวอย่างบางส่วนมาวิเคราะห์ความชื้นเริ่มต้นด้วยวิธีอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105±5 องศาเซลเซียส ตามวิธีมาตรฐาน โดยทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนการอบแห้งและบันทึกน้ำหนักที่ลดลงทุกชั่วโมงจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ผลการวิเคราะห์พบว่าข้าวเปลือกมีค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 23.15±0.25 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นตัวอย่างทั้งหมดถูกเก็บรักษาในภาชนะปิดสนิทเพื่อป้องกันการดูดคืนความชื้นจากสภาพแวดล้อมก่อนเข้าสู่กระบวนการทดลอง

ขั้นตอนที่ 2 การทดลองลดความชื้นด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ การทดลองลดความชื้นของข้าวเปลือกดำเนินการด้วยเตาปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่องภายใต้ระบบหมุนวนแก๊สแบบปิด (closed-loop gas circulation system) โดยกำหนดอุณหภูมิการอบแห้งที่ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลาอบแห้ง 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที และอัตราการป้อนวัตถุดิบ

500, 1,000 และ 1,500 กรัมต่อรอบการทดลอง การทดลองทั้งหมดดำเนินการแบบสุ่มและทำซ้ำ 3 ครั้ง ในแต่ละสภาวะทดลอง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล

กระบวนการทดลองเริ่มต้นจากการบรรจุข้าวเปลือกลงในถังป้อนวัตถุดิบ (hopper) จากนั้นให้ความร้อนแก่ชุดเตาปฏิกรณ์ (reactor) ด้วยขดลวดให้ความร้อน (heating coil) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) และชุดควบคุมอุณหภูมิ (box control unit) เมื่ออุณหภูมิภายในระบบถึงค่าที่กำหนด จะเริ่มป้อนข้าวเปลือกเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ด้วยมอเตอร์ป้อนวัตถุดิบ (motor feeder) พร้อมกับเปิดชุดปั๊มลม (pump discharge) เพื่อสร้างการหมุนเวียนของอากาศร้อนภายในระบบแบบปิด อากาศร้อนที่หมุนเวียนภายในระบบช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและเมล็ดข้าวเปลือกอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้ความชื้นภายในเมล็ดลดลงอย่างต่อเนื่อง ข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนจะไหลลงสู่ถังเก็บผลิตภัณฑ์ (tank) ขณะที่ไอร้อนซึ่งประกอบด้วยไอน้ำและฝุ่นละอองจะถูกส่งเข้าสู่ชุดไซโคลน (cyclone separator) เพื่อแยกฝุ่นออกจากกระแสอากาศด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง จากนั้นอากาศร้อนจะถูกส่งผ่านชุดกรองอากาศ (filter unit) เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนเพิ่มเติม ก่อนถูกส่งผ่านปั๊มส่งอากาศ วาล์วควบคุมการไหล (control valve) และเครื่องวัดอัตราการไหล (flow meter) เพื่อหมุนเวียนกลับเข้าสู่ถังป้อนวัตถุดิบอีกครั้ง เป็นการทำงานในลักษณะระบบปิดแบบต่อเนื่องจนสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง ภายหลังการทดลอง ทำการชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น โดยค่าความแตกต่างของน้ำหนักถูกนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การสูญเสียความชื้น เพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งภายใต้สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 1 (Figure)

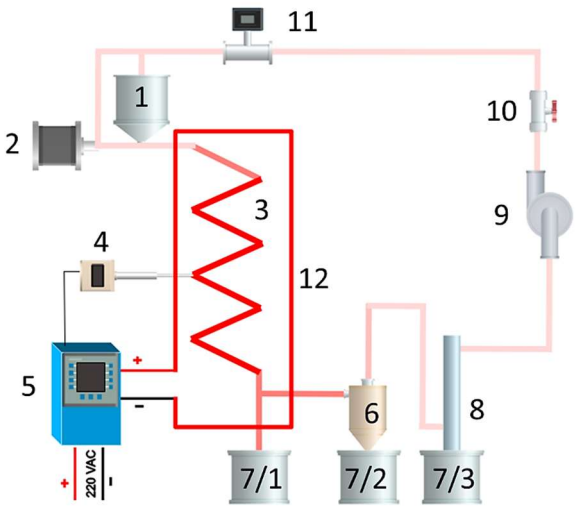


Figure 1 Principle of Moisture Reduction by Torrefaction Process.

Remark 1. Hopper 2. Motor Feeder 3. Reactor 4. Thermocouple 5. Box Control Unit 6. Cyclone Separator 7. Tank 8. Filters 9. Pump Discharge 10. Control Valve 11. Flow Meter 12. Heating Coil

ขั้นตอนที่ 3 การประเมินสมบัติด้านความชื้นของข้าวเปลือก

3.1 การประเมินประสิทธิภาพการลดความชื้นของข้าวเปลือก การประเมินปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกภายใต้ช่วงเวลาอบแห้งที่แตกต่างกันเป็นขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทมวลและประสิทธิภาพของกระบวนการลดความชื้น งานวิจัยนี้ประยุกต์วิธีการของ Ong et al. (2021) และปรับให้เหมาะสมกับเงื่อนไขการทดลอง เพื่อคำนวณค่าความชื้นของข้าวเปลือกทั้งในรูปแบบความชื้นฐานเปียก (wet basis) และความชื้นฐานแห้ง (dry basis) ตามสมการที่ 1 และสมการที่ 2 ตามลำดับ (Sarker et al., 2021)

$$\mathrm{MC}_{wb}(\%) = \frac{w_i - w_d}{w_i}\ x100 \quad \text{.....(1)}$$

$$\mathrm{MC}_{db}(\%) = \frac{w_i - w_d}{w_d}\ x100 \quad \text{.....(2)}$$

โดยที่ W_i คือ น้ำหนักเริ่มต้น และ W_d คือ น้ำหนักแห้ง

3.2 การประเมินการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือก ค่าการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือก (Equilibrium Moisture Content: EMC) ถูกประเมินภายหลังการอบแห้งด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ โดยนำตัวอย่างไปเก็บไว้ในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 ตามวิธีของ Chen et al. (2018) ระหว่างการทดลอง ทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมด้วยเครื่อง THERMO-HYGROMETER รุ่น HY-303C ซึ่งมีความละเอียด 2 ตำแหน่งทศนิยม และชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุกชั่วโมงเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง การทดลองทั้งหมดดำเนินการซ้ำ 3 ครั้งต่อชุดตัวอย่าง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ โดยคำนวณค่าการดูดคืนความชื้นตามสมการที่ 3 (Wongsiriwittaya et al., 2023)

$$\mathrm{EMC}\ (\%) = \frac{\mathrm{m_{wet}} - \mathrm{m_{dried}}}{\mathrm{m_{dried}}} \mathrm{x100} \text{.....(3)}$$

เมื่อ $\boldsymbol{m}_{\mathrm{wet}}$ คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังการดูดความชื้น และ $\boldsymbol{m}_{\mathrm{dried}}$ คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังการอบแห้งก่อนการทดลอง

ผลการวิจัย

ผลการทดลองเกี่ยวกับการลดความชื้นของข้าวเปลือกด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำภายใต้ระบบหมุนวนแก๊สแบบปิด ดำเนินการภายใต้อัตราการป้อนวัตถุดิบ 500, 1,000 และ 1,500 กรัม โดยกำหนดอุณหภูมิการอบแห้งที่ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส และระยะเวลาอบแห้ง 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที เพื่อศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งต่อประสิทธิภาพการลดความชื้นและพฤติกรรมการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือก ทั้งนี้ ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองมีค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 23.15±0.25 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) การประเมินประสิทธิภาพการลดความชื้นของข้าวเปลือกภายใต้สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน และ

2) การประเมินพฤติกรรมการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ

ผลการประเมินประสิทธิภาพการลดความชื้นของข้าวเปลือก ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกกับระยะเวลาการอบแห้งภายใต้อัตราการป้อนวัตถุดิบ 500 กรัม และอุณหภูมิการอบแห้ง 40–80 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 2 (Figure 2)

ผลการทดลอง พบว่า กระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุกสภาวะการทดลอง โดยค่าความชื้นมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้นในทุกระดับอุณหภูมิ ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้ง โดยเฉพาะในช่วง 10 นาทีแรก พบว่าความชื้นของข้าวเปลือกลดลงอย่างรวดเร็วในทุกสภาวะการทดลอง โดยอุณหภูมิสูงในช่วง 70–80 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นสูงกว่าสภาวะอุณหภูมิต่ำที่ 40–50 องศาเซลเซียส อย่างชัดเจน สะท้อนถึงการระเหยของน้ำอิสระภายในเมล็ดที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับพลังงานความร้อนในระดับสูง เมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น อัตราการลดความชื้นมีแนวโน้มชะลอลง โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง 40–50 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงลักษณะของช่วงการอบแห้งแบบอัตราลดลง (falling rate period) ที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ของความชื้นจากภายในเมล็ดข้าวเปลือกสู่ผิววัสดุ ขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70–80 องศาเซลเซียส ยังคงรักษาประสิทธิภาพการลดความชื้นได้ดีกว่า ส่งผลให้ค่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกต่ำที่สุดเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาอบแห้ง 30 นาที โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและระยะเวลาอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์การลดความชื้นของข้าวเปลือกภายใต้กระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและเร่งการระเหยของความชื้นภายในเมล็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้กระบวนการอบแห้งสามารถดำเนินได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2 (Figure 2)

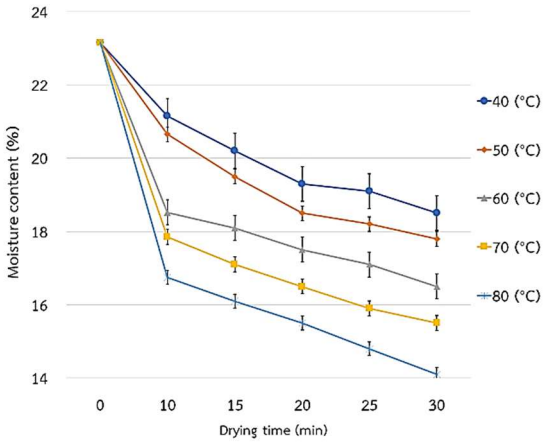


Figure 2 Torrefaction drying process at a feeding rate of 500 grams.

ผลการทดลองดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและระยะเวลาการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์การลดความชื้นของข้าวเปลือก ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในเมล็ดข้าวเปลือก ภายใต้กระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ โดยในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง ความร้อนจะช่วยเร่งการระเหยของน้ำอิสระที่อยู่บริเวณผิวและช่องว่างภายในเมล็ดอย่างรวดเร็ว ก่อนที่กระบวนการจะเข้าสู่ช่วงการแพร่ของความชื้นจากภายในเมล็ดมายังผิววัสดุ ซึ่งเป็นปัจจัยควบคุมอัตราการอบแห้งในระยะถัดไป

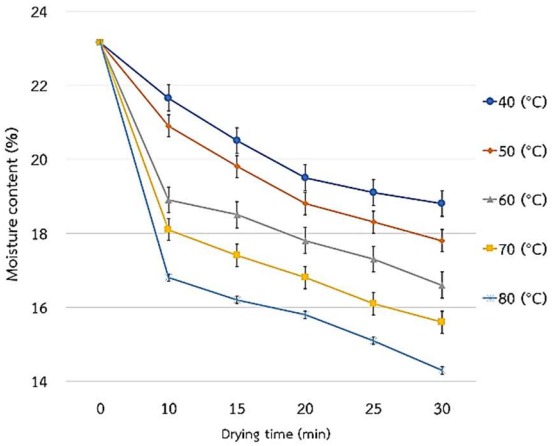


Figure 3 Torrefaction drying process at a feeding rate of 1,000 grams.

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกกับระยะเวลาการอบแห้ง แสดงในภาพที่ 3 (Figure 3) ภายใต้อุณหภูมิการอบแห้ง 40–80 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนวัตถุดิบ 1,000 กรัม พบว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำยังคงสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้นในทุกระดับอุณหภูมิ ในช่วง 10 นาทีแรกของการอบแห้ง พบว่าความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 70–80 องศาเซลเซียส ซึ่งสะท้อนถึงช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) ที่การระเหยของน้ำอิสระเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใต้การถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพ เมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น อัตราการลดความชื้นเริ่มชะลอตัวลง โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง 40–50 องศาเซลเซียส ซึ่งบ่งชี้ถึงการเข้าสู่ช่วงการอบแห้งแบบอัตราลดลง (falling rate period) ที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่ของความชื้นจากภายในเมล็ดสู่ผิววัสดุ แม้การเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบจะส่งผลให้ความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนและการแพร่ของไอน้ำภายในชั้นวัสดุเพิ่มขึ้น แต่การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะที่ 80 องศาเซลเซียส ยังคงให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นสูงที่สุด ส่งผลให้ค่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกต่ำกว่าสภาวะอื่นอย่างชัดเจน

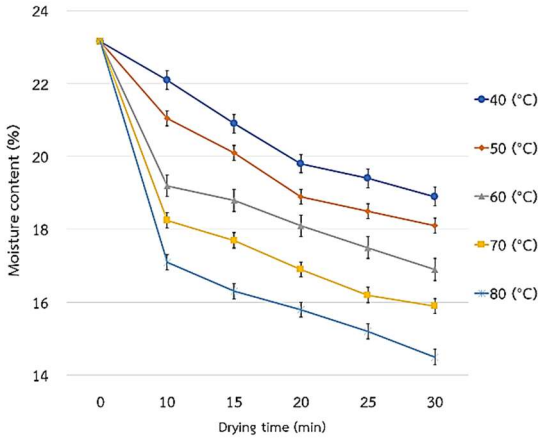


Figure 4 Torrefaction drying process at a feeding rate of 1,500 grams.

จากภาพที่ 4 (Figure 4) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกกับระยะเวลาการอบแห้ง ภายใต้อุณหภูมิการอบแห้ง 40–80 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนวัตถุดิบ 1,500 กรัม พบว่าความชื้นของข้าวเปลือกลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้นในทุกระดับอุณหภูมิ โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้ง ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 70–80 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการป้อนวัตถุดิบที่ต่ำกว่า พบว่าอัตราการลดความชื้นมีแนวโน้มชะลอลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณวัตถุดิบส่งผลให้ความหนาของชั้นวัสดุเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนและการแพร่ของความชื้นภายในระบบมากขึ้น ส่งผลให้การระเหยของน้ำเกิดขึ้นได้ช้าลง โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง 40–60 องศาเซลเซียส แม้ประสิทธิภาพการลดความชื้นจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบ แต่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ยังคงให้ค่าความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำภายใต้ระบบหมุนวนแก๊สแบบปิด โดยสามารถชดเชยผลกระทบจากการเพิ่มปริมาณวัตถุดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Table 1 Moisture recovery rate of paddy rice after drying by Torrefaction process.

Temperature	Time (min)				
(C°)	10	15	20	25	30
40	0.54±0.22	1.06±0.21	0.85±0.22	1.04±0.22	1.16±0.22
50	0.40±0.21	1.01±0.20	1.42±0.22	0.91±0.22	1.12±0.22
60	0.67±0.19	2.89±0.19	1.68±0.22	0.87±0.22	1.10±0.22
70	0.46±0.18	2.87±0.19	1.00±0.22	0.83±0.22	0.85±0.22
80	0.39±0.16	1.85±0.20	0.64±0.22	0.78±0.22	0.70±0.22

จากตารางที่ 1 (Table 1) แสดงผลการทดลองอัตราการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาอบแห้งมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อพฤติกรรมการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือก โดยค่าการดูดคืนความชื้นมีค่าอยู่ในช่วง 0.39±0.16 ถึง 2.89±0.19 ซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวเปลือกภายใต้สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิการอบแห้ง พบว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง 40–50 องศาเซลเซียส ค่าการดูดคืนความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ระยะเวลา 30 นาที ซึ่งอาจเกิดจากการลดความชื้นภายในเมล็ดโดยที่โครงสร้างภายในยังไม่ได้รับการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อเมล็ดที่เอื้อต่อการดูดซับไอน้ำเมื่อสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นหลังการอบแห้ง

ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิระดับกลางถึงสูง 60–70 องศาเซลเซียส พบค่าการดูดคืนความชื้นสูงผิดปกติที่ระยะเวลาอบ 15 นาที โดยมีค่าเท่ากับ 2.89±0.19 และ 2.87±0.19 ตามลำดับ พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการเกิดโครงสร้างพรุนชั่วคราวและรอยร้าวขนาดเล็กภายในเมล็ด (micro-crack formation) อันเป็นผลจากการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง ส่งผลให้ไอน้ำสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างภายในเมล็ดได้ง่ายขึ้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบแห้งและเกิดการดูดคืนความชื้นในระดับสูง

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มระยะเวลาอบแห้งเป็น 20–30 นาที ค่าการดูดคืนความชื้นกลับมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนในทุกระดับอุณหภูมิ โดยเฉพาะในช่วง 70–80 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเมล็ดอย่างต่อเนื่อง เช่น การยุบตัวของโครงสร้างพรุน และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีบางส่วนขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุ ส่งผลให้ความสามารถในการดูดคืนความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับอุณหภูมิสูงสุดที่ศึกษา คือ 80 องศาเซลเซียส พบว่าค่าการดูดคืนความชื้นมีแนวโน้มต่ำที่สุดในทุกช่วงเวลา โดยเฉพาะเมื่อระยะเวลาอบแห้งมากกว่า 20 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงร่วมกับระยะเวลาอบที่เหมาะสมสามารถเพิ่มเสถียรภาพต่อความชื้นของข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ และอาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างภายในเมล็ดในลักษณะกึ่งถาวร ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นกลับลดลง

Table 2 Two-way ANOVA results showing the effects of temperature and drying time on moisture reabsorption of paddy rice.

Source of Variation	F-value	p-value	Statistical Significance (α = 0.05)
Temperature	18.88	< 0.001	Significant
Time	95.22	< 0.001	Significant
Temperature × Time	13.84	< 0.001	Significant

จากตารางที่ 2 (Table 2) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองปัจจัย (Two-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าอุณหภูมิ ระยะเวลาอบแห้ง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัย มีผลต่อค่าการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) เมื่อพิจารณาค่า F-value พบว่าระยะเวลาอบแห้งเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการดูดคืนความชื้นมากที่สุด รองลงมาคืออุณหภูมิ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการดูดคืนความชื้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาอบแห้ง นอกจากนี้ ยังพบว่าค่าการดูดคืนความชื้นมีความสัมพันธ์ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นกับทั้งอุณหภูมิและเวลา โดยเฉพาะที่ระยะเวลาอบแห้ง 15 นาที ซึ่งพบค่าการดูดคืนความชื้นสูงที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 60–70 องศาเซลเซียส สะท้อนถึงการเกิดโครงสร้างพรุนชั่วคราวภายในเมล็ดจากการได้รับความร้อนอย่างรวดเร็วในระยะต้นของกระบวนการอบแห้ง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มระยะเวลาอบแห้งเป็น 20–30 นาที ค่าการดูดคืนความชื้นมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกระดับอุณหภูมิ โดยเห็นได้ชัดในช่วงอุณหภูมิ 70–80 องศาเซลเซียส ซึ่งสนับสนุนผลการวิเคราะห์ ANOVA ที่พบว่า interaction effect ระหว่างอุณหภูมิและเวลา มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือกภายใต้กระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ

อภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำภายใต้ระบบหมุนวนแก๊สแบบปิดสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุกสภาวะที่ทำการศึกษา โดยค่าความชื้นของข้าวเปลือกมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับกลไกพื้นฐานของกระบวนการอบแห้งวัสดุเกษตร ซึ่งในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งจะเกิดการกำจัดน้ำอิสระบริเวณผิวและช่องว่างภายในเมล็ดอย่างรวดเร็วก่อนเข้าสู่ช่วงที่อัตราการลดความชื้นถูกควบคุมด้วยการแพร่ของความชื้นจากภายในเมล็ดสู่ผิววัสดุ (Ibrahim et al., 2013) ผลการทดลองยังพบว่า การอบแห้งที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 500 กรัม

ให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการป้อนที่สูงกว่า เนื่องจากความหนาของชั้นวัสดุมีค่าน้อย ทำให้ความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนและการแพร่ของไอน้ำลดลง ส่งผลให้การระเหยของน้ำเกิดขึ้นได้รวดเร็วและสม่ำเสมอมากขึ้น พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Manouchehrinejad & Mani (2019) ที่ระบุว่าการเพิ่มอุณหภูมิและลดความหนาของชั้นวัสดุช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในระบบอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การอบแห้งภายใต้สภาวะออกซิเจนต่ำและระบบหมุนวนแก๊สแบบปิดยังมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ โดย Chen et al. (2020) รายงานว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันภายใต้สภาวะออกซิเจนต่ำสามารถเร่งการกำจัดความชื้นและสารระเหยออกจากชีวมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ Shuping et al. (2019) อธิบายว่าพฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุทางการเกษตรมักแสดงการลดความชื้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของกระบวนการ ก่อนเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าความชื้นของข้าวเปลือกลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก โดยเฉพาะภายใต้อุณหภูมิ 70–80 องศาเซลเซียส

นอกจากผลด้านการลดความชื้นแล้ว กระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำยังส่งผลต่อพฤติกรรมการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าการใช้อุณหภูมิและระยะเวลาอบแห้งที่สูงขึ้นสามารถลดค่าการดูดคืนความชื้นได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 70–80 องศาเซลเซียส และระยะเวลาอบแห้งมากกว่า 20 นาที พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งอาจเกิดจากการยุบตัวของโครงสร้างพรุนและการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสบางส่วน โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุ

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของ Zhang et al. (2018) ซึ่งระบุว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันสามารถลดความสามารถในการดูดคืนความชื้นของชีวมวลได้ เนื่องจากเกิดการสลายตัวบางส่วนของโครงสร้างพอลิเมอร์ธรรมชาติภายใต้สภาวะความร้อนและออกซิเจนต่ำ ส่งผลให้วัสดุมีความเสถียรต่อความชื้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การลดลงของค่าการดูดคืนความชื้นที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลาอบที่ยาวนานยังบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างภายในเมล็ดในลักษณะกึ่งถาวร ซึ่งช่วยลดความสามารถในการดูดซับไอน้ำจากสภาพแวดล้อมภายหลังการอบแห้ง แม้ว่าช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใกล้เคียงกับการอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไป แต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมสภาวะออกซิเจนต่ำและการหมุนเวียนแก๊สภายในระบบสามารถส่งผลต่อสมบัติของวัสดุได้มากกว่ากระบวนการอบแห้งทั่วไป โดยเฉพาะด้านเสถียรภาพต่อความชื้นและพฤติกรรมการดูดคืนความชื้น ดังนั้น กระบวนการที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงเหมาะสมที่จะนิยามเป็น “ทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ (mild torrefaction)” ซึ่งมุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติของวัสดุและเสถียรภาพในการเก็บรักษามากกว่าการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนอย่างรุนแรงเช่นในกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบดั้งเดิม

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองปัจจัย (Two-way ANOVA) สนับสนุนผลการทดลองดังกล่าวอย่างชัดเจน โดยพบว่าอุณหภูมิ ระยะเวลาอบแห้ง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัยมีผลต่อค่าการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) ทั้งนี้ ระยะเวลาอบแห้งเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุด รองลงมาคืออุณหภูมิ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสอง ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการควบคุมระยะเวลาอบแห้งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการลดความสามารถในการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือก นอกจากนี้ การพบ interaction effect อย่างมีนัยสำคัญระหว่างอุณหภูมิและเวลา ยังบ่งชี้ว่าผลของอุณหภูมิไม่ได้เกิดขึ้นอย่างอิสระ แต่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาอบแห้งร่วมด้วย กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิจะให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาอบแห้งเพียงพอ โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 70–80 องศาเซลเซียส และเวลาอบมากกว่า 20 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่ให้ค่าการดูดคืนความชื้นต่ำที่สุด สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวเปลือกภายใต้กระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำได้อย่างชัดเจน

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำภายใต้ระบบหมุนวนแก๊สแบบปิดในการลดความชื้นและลดการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือก ภายใต้อุณหภูมิการอบแห้ง 40–80 องศาเซลเซียส ระยะเวลาอบแห้ง 10–30 นาที และอัตราการป้อนวัตถุดิบ 500, 1,000 และ 1,500 กรัม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุกสภาวะที่ศึกษา โดยค่าความชื้นมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น และสามารถลดลงได้มากขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น ทั้งนี้อุณหภูมิการอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการลดความชื้นมากที่สุด โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 70–80 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นสูงสุดในทุกระดับอัตราการป้อนวัตถุดิบ ขณะเดียวกัน การเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบจาก 500 เป็น 1,500 กรัม ส่งผลให้อัตราการลดความชื้นลดลงเล็กน้อย เนื่องจากความหนาของชั้นวัสดุที่เพิ่มขึ้นก่อให้เกิดความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนและการแพร่ของความชื้นภายในเมล็ดมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลกระทบดังกล่าวสามารถชดเชยได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาอบแห้งให้เหมาะสม

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดคืนความชื้นพบว่า ข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำมีแนวโน้มการดูดคืนความชื้นลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิและระยะเวลาอบแห้งที่สูงขึ้น โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 70–80 องศาเซลเซียส และเวลาอบแห้งมากกว่า 20 นาที ซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเมล็ดและการเพิ่มเสถียรภาพต่อความชื้นของวัสดุ อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสบางส่วนภายใต้สภาวะออกซิเจนต่ำ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Two-way ANOVA ยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ ระยะเวลาอบแห้ง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัยมีผลต่อค่าการดูดคืนความชื้นของข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) ซึ่งสนับสนุนว่า

การควบคุมสภาวะการอบแห้งอย่างเหมาะสมมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ ดังนั้น กระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำภายใต้ระบบหมุนวนแก๊สแบบปิดมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้เป็นเทคโนโลยีอบแห้งทางเลือกสำหรับข้าวเปลือก เนื่องจากสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้ง เพิ่มประสิทธิภาพการลดความชื้น ลดการดูดคืนความชื้น และเพิ่มความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังมีศักยภาพในการต่อยอดสู่การใช้งานระดับกึ่งอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวและอุตสาหกรรมเกษตรของประเทศไทยในอนาคต

ข้อเสนอแนะและงานวิจัย

จากผลการศึกษานี้ ควรมีการศึกษาต่อยอดในประเด็นต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงานและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการทอร์รีแฟกชันอุณหภูมิต่ำ รวมถึงการทดสอบในสภาวะการทำงานแบบต่อเนื่องระดับกึ่งอุตสาหกรรม เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมเกษตร

2. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของข้าวเปลือกภายหลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ทั้งด้านกายภาพ เคมี โครงสร้างจุลภาค และคุณภาพการเก็บรักษาในระยะยาว รวมถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมภายใต้สภาพแวดล้อมจริง

3. การศึกษาจลนพลศาสตร์การถ่ายเทความร้อนและมวลภายในเมล็ดข้าวเปลือกภายใต้สภาวะออกซิเจนต่ำ เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบและควบคุมระบบอบแห้งในระดับอุตสาหกรรม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม สำหรับการสนับสนุนสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ภายใต้สัญญารับทุนเลขที่ RDI-1-67-19

เอกสารอ้างอิง

Chen D, Chen F, Cen K, Cao X, Zhang J, Zhou J. Upgrading rice husk via oxidative torrefaction: Characterization of solid, liquid, gaseous products and a comparison with non-oxidative torrefaction. Fuel 2020;27(5):117-136.

Chen WH, Peng J, Bi XT. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015;44:847-866.

Ibrahim RHH, Darvell LI, Jones JM, Williams A. Physicochemical characterisation of torrefied biomass. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 2013;103:21-30.

Kumar A, Jones DD, Hanna MA. Thermochemical biomass gasification: A review of the current status of the technology. Energies 2009;2(3):556-581.

Manouchehrinejad M, Mani S. Process simulation of an integrated biomass torrefaction and pelletization (iBTP) plant to produce solid biofuels. Energy Conversion and Management 2019;1:108-128.

Nabila R, Hidayat W, Haryanto A, Hasanudin U, et al. Oil palm biomass in Indonesia: Thermochemical upgrading and its utilization. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2023;176:113-138.

Ong HC, Yu KL, Chen WH, Pillejera MK, et al. Variation of lignocellulosic biomass structure from torrefaction: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2021;15(2):111-138.

Ribeiro JMC, Godina R, Matias JCO, Nunes LJR. Future perspectives of biomass torrefaction: Review of the current state-of-the-art and research development. Sustainability 2018;10(7):23-39.

Sarker T, Nanda S, Dalai A, Meda V. A review of torrefaction technology for upgrading lignocellulosic biomass to solid biofuels. BioEnergy Research 2021;14:1-25.

Wongsiriwittaya M, Chompookham T, Bubphachot B. Improvement of higher heating value and hygroscopicity reduction of torrefied rice husk by torrefaction and circulating gas in the system. Sustainability 2023;15(14):109-123.

Zhang S, Chen T, Xiong Y, Dong Q. Effects of wet torrefaction on the physicochemical properties and pyrolysis product properties of rice husk. Energy Conversion and Management 2017;141:403-409.

Zhang S, Su Y, Ding K, Zhu S, et al. Effect of inorganic species on torrefaction process and product properties of rice husk. Bioresource Technology 2018;265:450-455.

Zhang S, Su Y, Xiong Y, Zhang H. Physicochemical structure and reactivity of char from torrefied rice husk: Effects of inorganic species and torrefaction temperature. Fuel 2020;262:116-178.

Zhang S, Zhu S, Zhang H, Liu X, et al. Evaluation of pyrolysis behavior and products properties of rice husk after combined pretreatment of washing and torrefaction. Biomass and Bioenergy 2019;127:105-129.