

บทความวิจัย (Research Article)

การศึกษาพฤติกรรมและจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบ
อินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

Drying Characteristics and Kinetic Modeling of Paddy Rice in an Infrared Dryer
Powered by Liquefied Petroleum Gas

ณัฐวิภา พันธุ์สะอาด¹, เชิดพงษ์ เชี่ยวชาญวัฒนา¹ และ จักรมาส เลหาวิช^{1*}

Natthawipa Phansaart¹, Cherdpong Chiawchanwattana¹ and Juckamas Laohavanich^{1*}

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

*Corresponding author email: juckamas.l@msu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)

24 กุมภาพันธ์ 2569

วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)

20 มีนาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)

20 มีนาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างกระบวนการอบแห้ง การทดสอบข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 20% และ 30% ฐานเปียกอุณหภูมิอินฟราเรด 550, 650 และ 750 องศาเซลเซียส โดยกำหนดช่วงเวลาอบแห้ง 2, 4, 6, 8 และ 10 นาที คำนวณค่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio : MR) เป็นฟังก์ชันของเวลา และนำข้อมูลไปปรับกับแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบาง Newton Model, Page Model และ Logarithmic Model โดยประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยรากที่สอง (RMSE) และค่าไคสแควร์ (X^2) ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอินฟราเรดส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยอุณหภูมิอินฟราเรด 750 องศาเซลเซียส สามารถลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อุณหภูมิเมล็ดข้าวสูงเสี่ยงต่อความเสียหายของโครงสร้างเมล็ด อุณหภูมิอินฟราเรด 550 องศาเซลเซียส มีอัตราการลดความชื้นต่ำ ส่งผลต่อเวลาการอบแห้งยาวนานขึ้น ขณะที่อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส ให้ความสมดุลที่เหมาะสมระหว่างประสิทธิภาพการลดความชื้นและการควบคุมอุณหภูมิเมล็ดข้าว ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง Page Model สมการ $MR = \exp(-kt^n)$ ให้ความแม่นยำสูงสุดในทุกสถานะ และอุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียก ให้ค่า $R^2 = 0.99882$ และ $RMSE = 0.00608$ ค่าพารามิเตอร์ $k = 0.32446$ และ $n = 0.44687$ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้อย่างแม่นยำ เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก

คำสำคัญ: ข้าวเปลือก, การอบแห้งอินฟราเรด, การอบแห้งแบบชั้นบาง, สมการถดถอยไม่เชิงเส้น, สมการเอมพิริคัล

Abstract

This study aim to investigate the drying characteristics and kinetic modeling of paddy rice using an infrared dryer powered by liquefied petroleum gas and to develop a mathematical model to predict moisture changes during the drying process. Paddy rice samples with initial moisture contents of 20% and 30% (wet basis) were dried at infrared temperatures of 550, 650, and 750°C for 2, 4, 6, 8, and 10 minutes. The moisture ratio (MR) was calculated as a function of drying time and fitted to thin-layer drying models Newton Model, Page Model and Logarithmic models. Model performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and chi-square (X^2). The results showed that increasing infrared temperature significantly enhanced the drying rate. Infrared temperature of 750°C resulted in rapid moisture reduction but led to elevated grain temperature, increasing the risk of structural damage. Infrared temperature of 550°C produced a lower moisture reduction rate and required a longer drying time. The infrared temperature of 650°C provided a suitable balance between drying efficiency and grain temperature control. Among the tested models, the Page model, expressed as $MR = \exp(-kt^n)$, provided the highest accuracy under all conditions. At Infrared temperature 650°C with an initial moisture content of 30% (wet basis), the model $R^2 = 0.99488$ and $RMSE = 0.00608$ with kinetic parameters $k = 0.32446$ and $n = 0.44687$. The model accurately predicted the drying behavior and demonstrated potential for application in the design and control of paddy rice drying processes.

Keywords: Paddy Rice, Infrared Drying, Thin-layer drying, Nonlinear regression, Empirical mode

บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจและความมั่นคงทางอาหารของประเทศไทย ข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่มีความชื้นสูง [1] กระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวโดยเฉพาะการลดความชื้นของข้าวเปลือก มีบทบาทสำคัญต่อการรักษาคุณภาพเมล็ด การลดการเสื่อมสภาพ การป้องกันการเกิดเชื้อรา จำเป็นต้องผ่านกระบวนการอบแห้งเพื่อลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาและการสีแปรรูป [5] โดยทั่วไปสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหลือประมาณ 13–16% ฐานเปียก [14] ถือเป็นระดับที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาและการสีแปรรูป [5] เทคโนโลยีการอบแห้งข้าวเปลือกมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งระบบลมร้อนแบบคอลัมน์และแบบไหลต่อเนื่อง ซึ่งอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนจากลมร้อนไปยังข้าวเปลือกและเกิดการระเหยของน้ำออกจากข้าวเปลือก เทคโนโลยีดังกล่าวสามารถรองรับปริมาณข้าวเปลือกได้จำนวนมาก มีความเสถียรเหมาะสำหรับการใช้งานระดับโรงสีขนาดใหญ่

อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการอบแห้งดังกล่าวอาจใช้เวลานานและสิ้นเปลืองพลังงาน เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสี เนื่องจากสามารถถ่ายเทความร้อนเข้าสู่วัสดุโดยตรง [10] โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดจากกระบวนการแพร่ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของน้ำจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ เมื่อความชื้นเคลื่อนที่มาถึงผิวเมล็ดข้าวเปลือกจะระเหยออกสู่บรรยากาศภายนอก ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและระยะเวลาในการอบแห้งลดลง [1, 2] ส่งผลให้มีการศึกษาการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน [14] รายงานการใช้รังสีอินฟราเรดสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งและเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [14] ในการศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [16] ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อ

อธิบายพฤติกรรมกรอบแห้งข้าวเปลือก และชี้ให้เห็นว่าการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมมีผลต่อความแม่นยำในการทำนายข้อมูลเชิงทดลองอย่างมีนัยสำคัญ [3] และรายงานแบบจำลอง เช่น Page และ Logarithmic สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดได้อย่างแม่นยำ โดยให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำและค่า R^2 สูง [17]

แม้ว่าจะมีงานวิจัยที่ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดหลายรูปแบบ แต่ส่วนใหญ่ใช้แหล่งพลังงานจากไฟฟ้าหรือใช้ร่วมกับลมร้อน ขณะที่การศึกษากการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas : LPG) เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน และการสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้สภาวะความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิอินฟราเรดที่แตกต่างกันยังมีข้อมูลที่จำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกภายใต้สภาวะต่าง ๆ ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน และพัฒนาการสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก และเหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

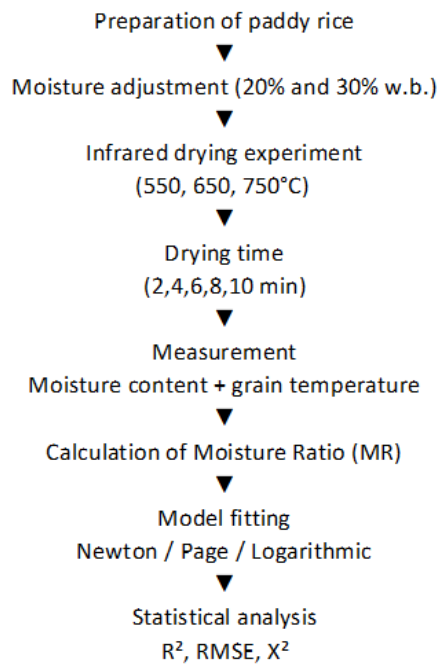
ตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยอินฟราเรด

Author	Material	Drying Method	Temperature	Model
[20]	Paddy rice	Far-infrared drying	60–100°C	Page
[19]	Rough rice	Infrared drying	IR radiation	Fick diffusion
[17]	Glutinous rice	Infrared drying	70–90°C	Page
[22]	Paddy rice	Graphene infrared dryer	60–120°C	Page
[13]	Paddy rice	Infrared drying	63-77°C	Newton, Page, Logarithmic

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน
2. สร้างสมการทางคณิตศาสตร์อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือกในสภาวะความชื้นเริ่มต้นต่าง ๆ

วิธีดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 1 Schematic diagram of experimental procedure

1. การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน การทดสอบในแต่ละเงื่อนไขดำเนินการ 3 ซ้ำเงื่อนไขในการทดสอบดังนี้

ตัวแปรต้น

- 1.1 ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเฉลี่ย 20% และ 30% ฐานเปียก ข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวโดยทั่วไป ความชื้นอยู่ในช่วง 20-30% ฐานเปียก
- 1.2 อุณหภูมิอินฟราเรดที่ระดับ 550, 650 และ 750 องศาเซลเซียส ซึ่งครอบคลุมช่วงพลังงานความร้อนต่ำ ปานกลาง และสูง เพื่อศึกษาผลกระทบต่ออัตราการลดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าว
- 1.3 ช่วงเวลาการอบแห้งที่ 2, 4, 6, 8 และ 10 นาที การเปลี่ยนแปลงของความชื้นในช่วงเวลานั้น ซึ่งเหมาะสมกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนของระบบอินฟราเรดที่มีอัตราการให้ความร้อนสูง

ตัวแปรตาม

- 1.4 ความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง
- 1.5 อุณหภูมิของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

2. การทดสอบเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน ต้องมีการเตรียมข้าวเปลือกก่อนนำเข้าอบแห้ง โดยในการทดสอบใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 [8] มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 2.1 นำข้าวเปลือก 10 กิโลกรัม แบ่ง 2 ส่วนเท่า ๆ กัน จากนั้นนำมาสเปรย์น้ำตามสัดส่วนที่กำหนด แล้วทำการคลุกเคล้าให้เข้ากัน นำเข้าตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 - 7 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

- 2.2 นำข้าวที่ผ่านการสเปรย์น้ำ 7 วันออกมาผึ่งในที่ร่มเป็นเวลา 1 ชั่วโมง [14] เพื่อให้ไอน้ำระเหยออก ก่อนนำไปอบแห้ง
- 2.3 การวัดความชื้นข้าวเปลือกก่อนอบแห้ง [18] จะทำการสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกมาชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล
- 2.4 จากนั้นนำข้าวเปลือกไปอบแห้ง (Hot Air Oven) ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส [15] เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2.5 จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ออกจากตู้อบแห้งมาพักให้อุณหภูมิข้าวเปลือกลดลง แล้วนำเข้าอบแห้งตามเงื่อนไข
- 2.6 หลังจากอบแห้งตามเงื่อนไขจะทำการชั่งน้ำหนักข้าวเปลือก และวัดอุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้งเพื่อวิเคราะห์และสรุปผล

3. ทฤษฎีการอบแห้ง

ข้อมูลค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ได้จากการทดสอบนำมาคำนวณอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio : MR) เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการอบแห้ง เนื่องจากช่วยให้ข้อมูลความชื้นสามารถเปรียบเทียบกันได้ โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นเริ่มต้น เพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการอบแห้ง และลดผลกระทบจากความแตกต่างของค่าความชื้นเริ่มต้น โดยอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

เมื่อ

M_t คือ ความชื้นของข้าวเปลือก ณ เวลา t (% ฐานเปียก)

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (% ฐานเปียก)

M_e คือ ความชื้นสมดุล (% ฐานเปียก)

การศึกษาการอบแห้งทางคณิตศาสตร์ ค่า M_e มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า M_0 และ M_t จึงประมาณค่าให้ $M_e \approx 0$ เพื่อให้สมการคำนวณง่ายขึ้น ดังนี้

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective Moisture Diffusivity Coefficient, D_{eff}) [11] เป็นคุณสมบัติจำเพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ เขียนสมการได้ ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (3)$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis of Variance: ANOVA)

วิธีทางสถิติที่ใช้ในการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่สองกลุ่มขึ้นไปมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ การวิเคราะห์นี้ช่วยประเมินว่าอุณหภูมิอินฟราเรดที่แตกต่างกันมีผลต่ออัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกหรือไม่ ภายใต้ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้

4. การสร้างแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล (Empirical drying models)

ความเหมาะสมและความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษานี้ประเมิน โดยใช้ดัชนีทางสถิติที่นิยมใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination : R^2) ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองเฉลี่ย (Root Mean Square Error : RMSE) และค่าไคสแควร์ (Chi-square : X^2) [16]

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ใช้เพื่อแสดงระดับความสอดคล้องระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าทดลอง โดยค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(MR_{\text{exp}} - MR_{\text{pre}})^2}{\sum(MR_{\text{exp}} - MR_{\text{exp}})^2} \quad (4)$$

ค่า RMSE ใช้ในการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองและค่าทดลอง โดยค่า RMSE หากมีค่าต่ำเข้าใกล้ 0 หมายถึง ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง สามารถคำนวณจากสมการ

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (MR_{\text{exp}} - MR_{\text{pre}})^2} \quad (5)$$

ค่า X^2 ใช้ในการประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองกับข้อมูลการทดลองจริง หากค่า X^2 มีค่าต่ำ แสดงว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าความชื้นได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองมาก โดยพิจารณาจำนวนพารามิเตอร์ในสมการซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$X^2 = \frac{1}{N-z} \sum (MR_{\text{exp}} - MR_{\text{pre}})^2 \quad (6)$$

เครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน เครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้มีส่วนประกอบไปด้วย (ภาพที่ 1)

- 4.1 หัวเผาอินฟราเรด (Infrared Burner) ให้ความร้อนสำหรับการอบแห้ง
- 4.2 มอเตอร์สั่น (Vibrating Motor) มีการสั่นเพื่อให้วัสดุที่นำมาอบแห้งได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วถึง
- 4.3 ตัวควบคุม (Control Unit) แสดงอุณหภูมิของหัวเผาอินฟราเรด/เปิด-ปิดเครื่อง
- 4.4 ถังบรรจุแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหัวเผาอินฟราเรด
- 4.5 ถาดอบแห้ง (Drying Tray) สำหรับใส่วัสดุเพื่อใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 2 Infrared Dryer Powered by Liquefied Petroleum Gas



ภาพที่ 3 Infrared Dryer Powered by Liquefied Petroleum Gas

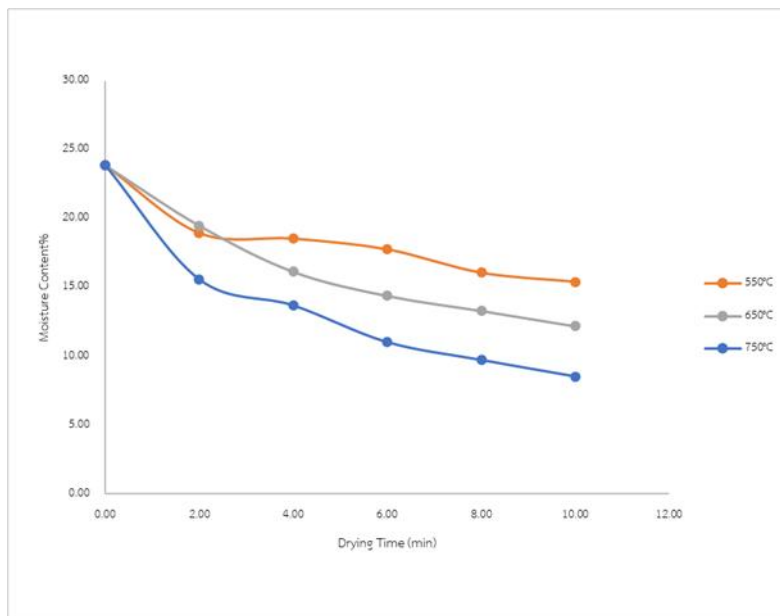
ผลการวิจัย

ผลการศึกษาการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

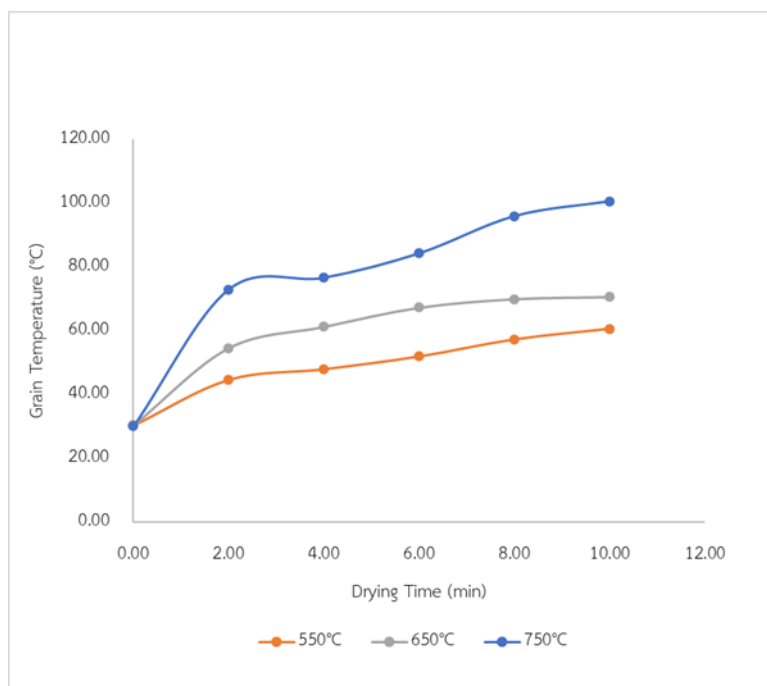
การศึกษาผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas : LPG) เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการลดความชื้นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวภายใต้สภาวะอุณหภูมิอินฟราเรดและระยะเวลาอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิอินฟราเรด 550, 650 และ 750 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 20% และ 30% ฐานเปียก และช่วงเวลาอบแห้ง 2, 4, 6, 8 และ 10 นาที ผลการทดลองถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าความชื้นหลังการอบแห้งและอุณหภูมิเมล็ดข้าว เพื่อใช้วิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ

ตารางที่ 2 ความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

เวลา (s)	อุณหภูมิอินฟราเรด 550°C		อุณหภูมิอินฟราเรด 650°C		อุณหภูมิอินฟราเรด 750°C	
	ความชื้นหลังการอบแห้ง	อุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้ง	ความชื้นหลังการอบแห้ง	อุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้ง	ความชื้นหลังการอบแห้ง	อุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้ง
0	18.03 ± 0.00	30.40 ± 0.56	18.03 ± 0.00	30.43 ± 0.60	18.03 ± 0.00	30.87 ± 0.85
2	13.87 ± 1.35	46.67 ± 3.06	13.92 ± 0.70	56.67 ± 3.06	12.31 ± 1.50	68.00 ± 7.21
4	12.81 ± 1.51	51.33 ± 1.15	12.43 ± 0.27	62.00 ± 2.00	10.47 ± 3.54	80.00 ± 10.00
6	12.94 ± 0.16	54.67 ± 2.31	10.97 ± 0.44	68.67 ± 1.15	9.15 ± 0.73	80.67 ± 6.11
8	12.21 ± 0.05	57.33 ± 1.15	9.82 ± 0.51	78.67 ± 6.11	8.08 ± 1.75	102.67 ± 7.02
10	11.00 ± 0.86	62.00 ± 2.00	9.82 ± 0.51	84.00 ± 3.46	6.85 ± 0.83	106.00 ± 8.72
0	23.87 ± 0.00	30.40 ± 0.56	23.87 ± 0.00	30.43 ± 0.60	23.87 ± 0.00	30.87 ± 0.85
2	18.96 ± 0.98	44.67 ± 2.31	19.49 ± 1.85	54.67 ± 4.62	15.59 ± 3.07	73.00 ± 5.57
4	18.55 ± 0.71	48.00 ± 2.00	16.15 ± 2.75	61.33 ± 4.16	13.71 ± 2.66	76.67 ± 5.77
6	17.77 ± 1.01	52.00 ± 2.00	14.41 ± 0.90	67.33 ± 4.16	11.04 ± 3.15	84.33 ± 5.13
8	16.07 ± 0.62	57.33 ± 2.31	13.31 ± 0.81	70.00 ± 4.00	9.75 ± 2.19	96.00 ± 2.00
10	15.40 ± 0.52	60.67 ± 1.15	12.20 ± 0.84	70.67 ± 6.11	8.55 ± 2.31	100.67 ± 5.77



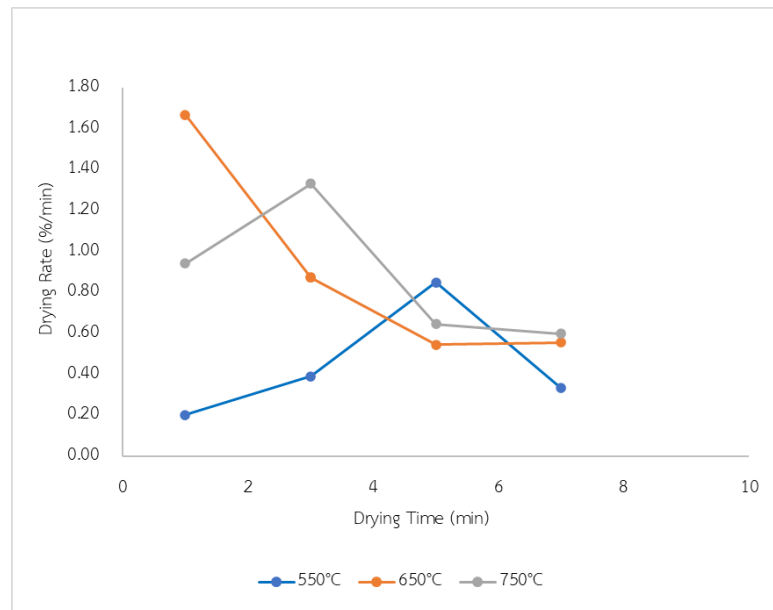
ภาพที่ 4 Moisture content of paddy with an initial moisture content of 30% (wet basis) after infrared drying at different temperatures.



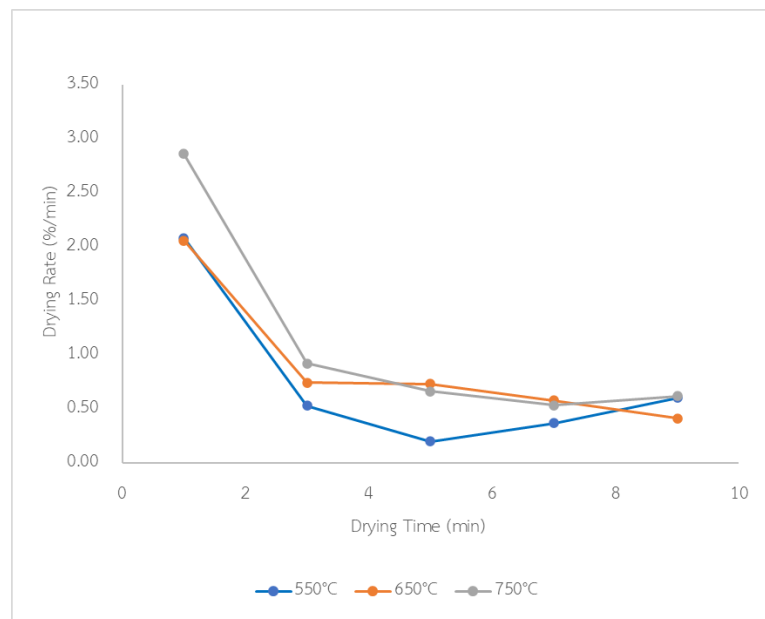
ภาพที่ 5 Grain temperature of paddy during infrared drying at temperatures with an initial moisture content of 30%

จากภาพที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียก หลังการอบแห้ง พบว่า อุณหภูมิอินฟราเรดมีผลโดยตรงต่ออัตราการลดความชื้น [8, 9] โดยที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส สามารถลดความชื้นได้รวดเร็วที่สุด รองลงมาคือ 650 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม แม้อุณหภูมิสูงจะช่วยเร่งการระเหยของน้ำภายในเมล็ดข้าว แต่การถ่ายเทความร้อนที่รวดเร็วเกินไปอาจทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวเมล็ดและภายในเมล็ด ส่งผลให้เกิดความเค้นภายในเมล็ดข้าวและเพิ่มโอกาสการแตกร้าวของเมล็ดหลังการอบแห้งได้

จากภาพที่ 5 แสดงอุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้ง พบว่า อุณหภูมิอินฟราเรด 750 องศาเซลเซียส ส่งผลให้อุณหภูมิเมล็ดข้าวเพิ่มสูงอย่างรวดเร็ว [7] โดยมีค่าสูงถึง 100 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาอบแห้ง 8 - 10 นาที ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพเมล็ดข้าว เช่น การแตกร้าวของเมล็ด และคุณภาพการสี ในขณะที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดข้าวต่ำ ส่งผลให้การลดความชื้นเกิดขึ้นช้ากว่า ดังนั้น อุณหภูมิอินฟราเรดที่ระดับ 650 องศาเซลเซียสจึงเป็นสถานะที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพพร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิเมล็ดข้าว [6, 7] ให้อยู่ในระดับที่ไม่สูงเกินไป ส่งผลให้เกิดความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพการอบแห้งและการรักษาคุณภาพข้าวเปลือก ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการอบแห้งข้าวด้วยรังสีอินฟราเรดและพบว่าการใช้ระดับพลังงานอินฟราเรดปานกลางช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและลดระยะเวลาอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยยังคงรักษาคุณภาพเมล็ดข้าว [17] นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาอุณหภูมิการอบแห้งที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงที่สามารถควบคุมอุณหภูมิเมล็ดไม่ให้สูงเกินไป เพื่อป้องกันความเสียหายของโครงสร้างเมล็ดและรักษาคุณภาพหลังการสี [4]



ภาพที่ 6 Drying Rate and Drying Time at initial moisture content of 30%



ภาพที่ 7 Drying Rate and Drying Time at initial moisture content of 20%

จากภาพที่ 6 และภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้ง โดยพบว่า อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามเวลาและอุณหภูมิอินฟราเรดที่ใช้ในการอบแห้ง ช่วงเริ่มต้นกระบวนการมีอัตราการอบแห้งสูง ความชื้นระเหยออกได้อย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาอุณหภูมิอินฟราเรด 750 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งช่วงเริ่มต้นกระบวนการสูง เมื่อเทียบกับอุณหภูมิอินฟราเรด 550 และ 650 องศาเซลเซียส

แนวโน้มของอัตราการอบแห้งสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น [21] มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยค่าที่ได้อยู่ในช่วง 1.75×10^{-7} - 4.11×10^{-7} m²/s

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA อุณหภูมิอินฟราเรดที่แตกต่างมีผลต่ออัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยค่าเฉลี่ยของอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 30% ฐาน

เปียกที่อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส มีค่าสูงที่สุด 14.4067 %/min รองลงมาคือ 550 องศาเซลเซียส 11.77 %/min และ 750 องศาเซลเซียส 11.0433 %/min และค่าเฉลี่ยของอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 20% ฐานเปียกที่อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส มีค่าสูงที่สุด 10.97 %/min รองลงมาคือ 750 องศาเซลเซียส 9.1533 %/min และ 550 องศาเซลเซียส 9.0433 %/min

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้ง

จากการศึกษาพฤติกรรมการลดความชื้นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของข้าวเปลือกภายใต้สภาวะการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน พบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอินฟราเรด ช่วงเวลาอบแห้ง และความชื้นเริ่มต้นของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อให้สามารถอธิบายและทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้อย่างเป็นระบบ จึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล (Empirical Drying Models) โดยใช้โปรแกรม Excel Solver ตารางที่ 2 มาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio : MR) กับเวลาอบแห้ง โดยแบบจำลองดังกล่าวได้รับการยอมรับและใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร

ตารางที่ 3 แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้ง

Model Name	Equation	Reference
Newton Model	$MR = \exp(-kt)$	[4,11,17]
Page Model	$MR = \exp(-kt^n)$	[4,11,17]
Logarithmic Model	$MR = a \exp(-kt)+c$	[4,11,17]

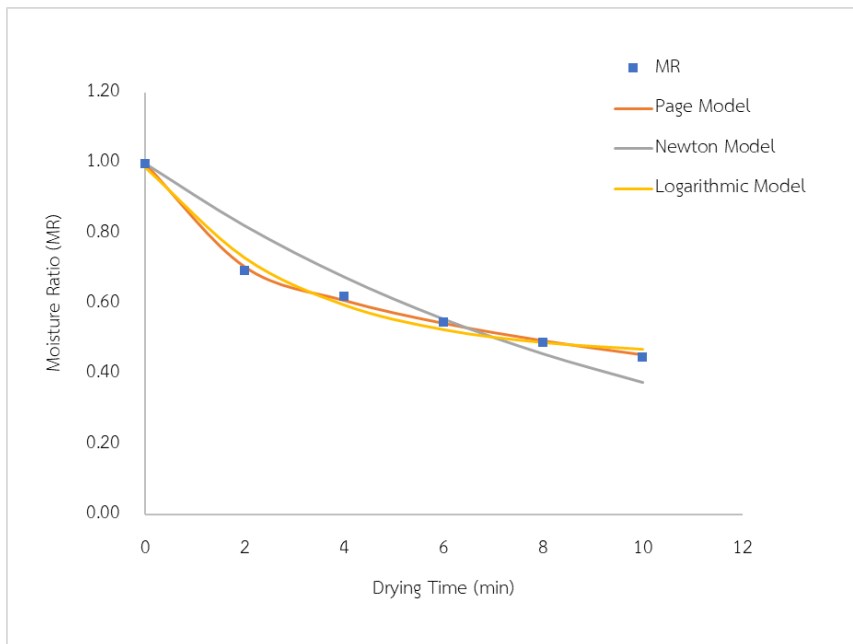
เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาที) และ k, n, a และ c คือ ค่าคงที่ใด ๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

จากตารางที่ 4 แสดงค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าความคลาดเคลื่อนของสมการอบแห้งที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการลดความชื้นของข้าวเปลือกภายใต้สภาวะอุณหภูมิอินฟราเรดและระยะเวลาอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาแบบจำลองการอบแห้ง ได้แก่ แบบจำลอง Newton Model แบบจำลองสมการพื้นฐานที่มีพารามิเตอร์ k ทำให้ง่ายต่อการคำนวณและวิเคราะห์แต่มักให้ค่าความแม่นยำต่ำ, Page Model แบบจำลองที่มีค่าพารามิเตอร์ k และ n ให้ความแม่นยำสูง แต่ค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงตามสภาวะการอบแห้ง และ Logarithmic Model แบบจำลองที่มีค่าพารามิเตอร์ k, n, a และ c ซึ่งปรับปรุงแบบกราฟได้ดีแต่การประมาณค่าพารามิเตอร์มีความซับซ้อน ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองถูกประมาณค่าด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) และประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยรากที่สอง (RMSE) และค่าไคสแควร์ (χ^2)

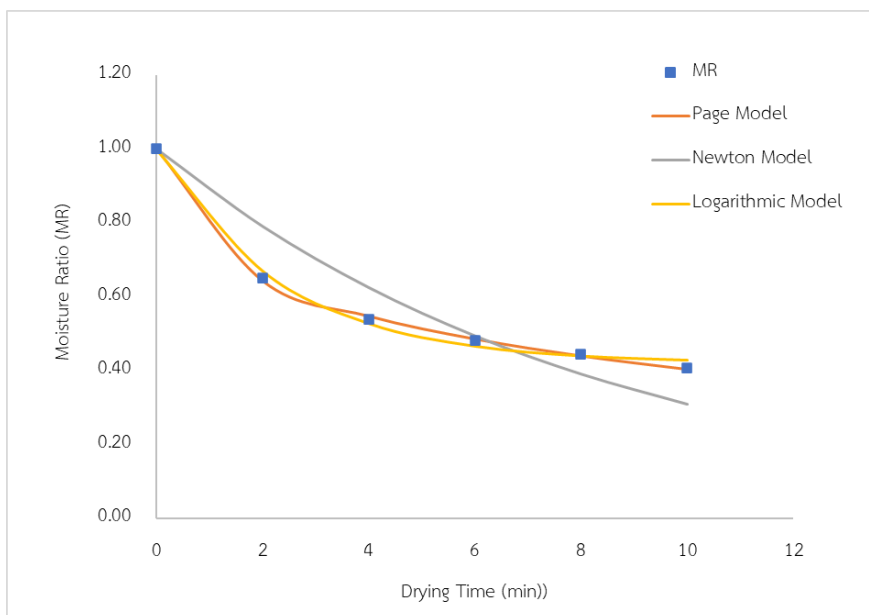
ตารางที่ 4 ค่าคงที่และค่าความคลาดเคลื่อนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้ง

Moisture	Model Name	Infrared					R ²	RMSE	X ²
		Temperature (°C)	k	n	a	c			
ความชื้น ข้าวเปลือก 20 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียก	Newton Model	550	0.07363	-	-	-	0.67940	0.09786	0.01197
		650	0.09739	-	-	-	0.87178	0.06532	0.00640
		750	0.14451	-	-	-	0.91361	0.07421	0.00688
	Logarithmic Model	550	0.29573	0.26987	-	-	0.98752	0.01931	0.00062
		650	0.24509	0.50779	-	-	0.99847	0.00714	0.00640
		750	0.31148	0.56897	-	-	0.99622	0.01551	0.00040
ความชื้น ข้าวเปลือก 30 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียก	Newton Model	550	0.64476	-	0.39910	0.59848	0.97000	0.02992	0.00224
		650	0.32462	-	0.54047	0.44967	0.98536	0.02207	0.00146
		750	0.34944	-	0.67932	0.31755	0.99400	0.01947	0.00096
	Logarithmic Model	550	0.08809	-	-	-	0.93925	0.11081	0.01535
		650	0.11784	-	-	-	0.96146	0.08936	0.00998
		750	0.17192	-	-	-	0.94746	0.10438	0.01362
Page Model	550	0.36305	0.24606	-	-	0.99850	0.01741	0.00051	
	650	0.32446	0.44687	-	-	0.99882	0.00608	0.00006	
	750	0.47013	0.41722	-	-	0.99917	0.01314	0.00029	
Logarithmic Model	550	0.72688	-	0.44527	0.55179	0.99468	0.03278	0.00269	
	650	0.41975	-	0.57765	0.41812	0.99887	0.01518	0.00059	
	750	0.50556	-	0.67664	0.31562	0.99409	0.03483	0.00306	

ตารางที่ 4 แสดงค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าความคลาดเคลื่อนของสมการอบแห้งที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการลดความชื้นของข้าวเปลือกภายใต้สภาวะอุณหภูมิอินฟราเรดและระยะเวลาอบแห้งที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งได้เนื่องจากแบบจำลองสมการมีค่าพารามิเตอร์ ซึ่งทำให้สามารถอธิบายลักษณะความโค้งของกระบวนการอบแห้งได้ดี



ภาพที่ 8 Drying of paddy with an initial moisture content of 20% (wet basis) at an infrared temperature of 650 °C



ภาพที่ 9 Drying of paddy with an initial moisture content of 30% (wet basis) at an infrared temperature of 650 °C

จากภาพที่ 8 และภาพที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio : MR) กับเวลาการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ภายใต้ความชื้นเริ่มต้น 20% และ 30% ฐานเปียก พบว่า ความชื้นเริ่มต้นมีผลโดยตรงต่อรูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นและความเหมาะสมของข้อมูลสำหรับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียกแสดงแนวโน้มการลดลงของค่าอัตราส่วนความชื้นอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ช่วงต้นจนถึงช่วงท้ายของกระบวนการอบแห้ง โดยสามารถแสดงพฤติกรรมของการอบแห้งได้ครบทั้งช่วงการระเหยของน้ำอิสระและช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling drying

rate period) [12] ซึ่งเป็นช่วงที่กลไกการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดสู่ผิวเมล็ด ส่งผลให้ข้อมูลมีลักษณะโค้งแบบไม่เชิงเส้นที่ชัดเจน เหมาะต่อการนำไปประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในทางตรงกันข้าม ความชื้นเริ่มต้น 20% ฐานเปียก มีปริมาณน้ำอิสระภายในเมล็ดต่ำกว่า ส่งผลให้การลดความชื้นเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเร็ว และช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้นมีระยะสั้นกว่า ทำให้ข้อมูลบางช่วงมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลทดลอง และอาจทำให้ค่าคงที่ของสมการมีความแปรปรวนสูงเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

อภิปรายผล

ผลการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอินฟราเรดมีผลโดยตรงต่ออัตราการลดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอินฟราเรดจาก 550 เป็น 650 และ 750 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราการลดความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากพลังงานของอินฟราเรดสามารถถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เมล็ดข้าวได้โดยตรง ส่งผลให้การระเหยของน้ำอิสระภายในเมล็ดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มระดับพลังงานของอินฟราเรดช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและเร่งอัตราการอบแห้งของข้าวเหนียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ [17]

จากผลการทดสอบ พบว่า อุณหภูมิอินฟราเรด 750 องศาเซลเซียส สามารถลดความชื้นได้รวดเร็วที่สุด แต่ส่งผลให้อุณหภูมิเมล็ดข้าวเพิ่มสูงอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าเกิน 100 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาอบแห้ง 8 - 10 นาที ซึ่งอาจก่อให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวและแกนกลางเมล็ด ส่งผลให้เกิดความเค้นภายในเมล็ดและเพิ่มความเสี่ยงต่อการแตกร้าวของเมล็ดข้าวภายหลังการสี ทั้งนี้สอดคล้องกับแนวทางของ [17] ที่ระบุว่า การเพิ่มอุณหภูมิเมล็ดอย่างรวดเร็วเกินไป อาจส่งผลต่อคุณภาพการสีและโครงสร้างภายในเมล็ดข้าว อุณหภูมิอินฟราเรด 550 องศาเซลเซียส แม้สามารถควบคุมอุณหภูมิเมล็ดข้าวให้อยู่ในระดับต่ำได้ แต่มีอัตราการลดความชื้นต่ำกว่า ส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาอบแห้งนานขึ้น ลดประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ [4] ที่พบว่า การใช้อุณหภูมิมอบแห้งต่ำเกินไปทำให้การแพร่ความชื้นจากภายในวัสดุเกิดขึ้นช้า ดังนั้น อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถสร้างสมดุลระหว่างอัตราการลดความชื้นและการควบคุมอุณหภูมิเมล็ดข้าวให้อยู่ในระดับที่ไม่สูงเกินไป โดยสามารถลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงเวลาอบแห้งสั้น และยังช่วยลดความเสี่ยงต่อความเสียหายเชิงโครงสร้างของเมล็ดข้าว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมลมร้อน [1] ที่รายงานว่า การใช้พลังงานอินฟราเรดระดับปานกลางสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งพร้อมรักษาคุณภาพเมล็ดได้ดี

เมื่อพิจารณาผลของความชื้นเริ่มต้น พบว่าข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียก แสดงแนวโน้มการลดความชื้นอย่างต่อเนื่องและชัดเจนกว่าข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 20% ฐานเปียก เนื่องจากมีปริมาณน้ำอิสระภายในเมล็ดสูงกว่า ส่งผลให้สามารถดูดกลืนพลังงานอินฟราเรดและเกิดการระเหยของน้ำได้รวดเร็วในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง อีกทั้งยังสะท้อนสภาพวัตถุดิบจริงหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งโดยทั่วไปมีความชื้นประมาณ 25 - 30% ฐานเปียก [19] ทำให้เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรม [23] และยังสามารถต่อยอดในการวิเคราะห์หรือเก็บค่าพลังงานที่ใช้จากรายงานการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับอบแห้งข้าวกล้องอก

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้ง

พบว่าอัตราการลดความชื้นมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling drying rate period) กลไกหลักคือการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดสู่ผิวเมล็ด [12] แบบจำลอง Page Model ให้ผลการทำนายที่ดีกว่า Newton Model เนื่องจากมีพารามิเตอร์ยกกำลังเวลา (n) ซึ่งช่วยอธิบายลักษณะการแพร่ความชื้นแบบไม่เชิงเส้นภายในวัสดุ

ได้ดี โดยเฉพาะในวัสดุที่มีโครงสร้างพรุน เช่น ข้าวเปลือก ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในระหว่างการอบแห้ง ส่งผลให้กลไกการถ่ายเทมวลมีความซับซ้อนมากขึ้น

จากการเปรียบเทียบแบบจำลอง Newton Model, Page Model และ Logarithmic Model พบว่าแบบจำลอง Page Model ให้ความแม่นยำสูงที่สุดในทุกสภาวะการทดสอบ และให้ค่าใกล้เคียงกับรายงานแบบจำลองคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด ค่า k อยู่ระหว่าง 0.1594 - 0.2007 และค่า n อยู่ระหว่าง 0.6298 - 0.6484 [13] โดยเฉพาะที่ความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียก และอุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่า R^2 สูงถึง 0.99488 และค่า RMSE และ X^2 ต่ำ แสดงให้เห็นถึงความสามารถของแบบจำลองในการทำนายพฤติกรรมการลดความชื้นได้ใกล้เคียงกับข้อมูลทดลองมากที่สุด เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากตารางที่ 3 ลงในสมการสามารถเขียนสมการทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ดังนี้

$$\text{Newton Model} \quad MR = \exp(-0.11784t) \quad (7)$$

$$\text{Page Model} \quad MR = \exp(-0.32446t^{0.44687}) \quad (8)$$

$$\text{Logarithmic Model} \quad MR = 0.57765 \exp(-0.41975t)+0.41812 \quad (9)$$

สมการ (8) สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการลดความชื้นของข้าวเปลือกภายใต้สภาวะที่เลือกได้อย่างแม่นยำ และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการอบแห้งได้ ดังนั้น เมื่อพิจารณาพร้อมกันทั้งด้านประสิทธิภาพการลดความชื้น และอุณหภูมิเมล็ด ความสอดคล้องกับสภาพข้าวเปลือกจริง และความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สภาวะข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียก ที่อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Page Model เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด [13] สำหรับการอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

สรุปผล

ผลการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน พบว่า อุณหภูมิอินฟราเรดมีผลต่ออัตราการลดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าว โดยอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ให้การลดความชื้นรวดเร็วที่สุด แต่ส่งผลให้อุณหภูมิเมล็ดสูงเกินไปและอาจกระทบต่อคุณภาพเมล็ด ในขณะที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสให้การอบแห้งช้ากว่า ดังนั้น อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียสจึงเหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพพร้อมควบคุมอุณหภูมิเมล็ดให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการรักษาคุณภาพข้าว

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าแบบจำลอง Page Model ให้ความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรม การอบแห้งสูงที่สุด [13] เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Newton Model และ Logarithmic Model โดยเฉพาะที่ความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียก ที่อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.99882 ค่า RMSE เท่ากับ 0.00608 และค่า X^2 เท่ากับ 0.00006 สมการที่ได้คือ $MR = \exp(-0.32446t^{0.44687})$ แสดงถึงความสามารถในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งได้อย่างแม่นยำ สภาวะดังกล่าวจึงเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเงื่อนไขอ้างอิงในการออกแบบ ควบคุม และพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอินฟราเรดในระดับอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดระยะเวลาอบแห้ง และรักษาคุณภาพเมล็ดข้าวหลังการสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

และจากผลการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง ให้ความร้อน สามารถพัฒนาระบบการอบแห้งข้าวเปลือกให้มีการใช้พลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานทางเลือก อื่นๆ เพื่อลดการใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนของหัวเผาอินฟราเรด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ สำหรับการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

1. เตชา ปะเขทานัง, เชิดพงษ์ เชี่ยวชาญวิวัฒนะ, จักรมาส เลหาวิช, พิระยศ แข็งขัน, สุพรรณ ยั่งยืน. อิทธิพลของรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและการเทมเปอร์ริงต่อร้อยละการงอกและการเจริญเติบโตต้นอ่อนของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 2563; 26(1): 52-61.
<https://li01.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ/article/view/217433>
2. ธีรศาสตร์ คณาศรี, ปวีริศ อุตทอง, สุภาภรณ์ ยอดสำโรง. แนวทางการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระบะลมร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 2560; 48(3 ฉบับพิเศษ): 55-58.
<https://www.phtnet.org/download/phtic-seminar/1706.pdf>
3. ประชา บุญยวานิชกุล. การประเมินกระบวนการเตรียมตัวอย่างอ้างอิงสำหรับเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี). 2556; 5(9): 47-55.
<https://ejournals.swu.ac.th/index.php/SWUJournal/article/view/3447/3477>
4. ยุทธนา ภูริระวีชัยกุล, สุภวรรณ ภูริระวีชัยกุล, อธิษัณห์ สนิโซ. การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร: พารามิเตอร์พื้นฐานทางกายภาพและแบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้ง. วารสารสงขลานครินทร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2550; 29(ฉบับพิเศษ 2): 347-363.
<https://www.thaiscience.info/Journals/Article/SONG/10462746.pdf>
5. จักรมาส เลหาวิช. โครงการการอบแห้งข้าวเปลือกโดยรังสีอินฟราเรด ลมร้อน และการเทมเปอร์ริง. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2559
https://elibrary.tsri.or.th/fullP/MRG5280115/MRG5280115_full.pdf
6. บุญทริกา ศิลา. (2565) การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี).
<http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/bitstream/123456789/9779/19/Fulltext.pdf>
7. เจษฎา แพรกนันทะ, มณฑล ชูไชนาค, มุสตาฟา ยะภา, เอนก สุทธิฤทธิ์. ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ ปทุมธานี 1 ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้ง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 2022; 41(2): 80-89. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/download/252937/174010>
8. บังอร แสนศรี, อรวรรณ ศรีโสมพันธ์, ศุภรัตน์ จิตต์จำนง, พัชรี สิริตระกูลศักดิ์. ประสิทธิภาพการผลิตเชิงเทคนิคของการผลิตข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในจังหวัดร้อยเอ็ด. เกษตร. 2557; 42(ฉบับพิเศษ 1): 136-141.
<https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm?filename=O22.pdf&id=1192&keeptrack=1>
9. สีนงนาท พวงจันทร์แดง, ปัญญา แสนชัย, กฤษณ์ จันทิโชติกุล. การพัฒนาเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นเพื่อพัฒนาการทำแห้งพืชผักสมุนไพรไทย (ใบกะเพรา). อาหาร. 2546; 33(2): 146-155.
https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/covid19/search_detail/result/29430

10. วีรชัย แผ่นอุไร, ศราวุธ รัตนวงษ์, เจริญ เป้าทอง, จิรวัฒน์ วรุณโรจน์. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งข้าวคลอนด้วยเครื่องอบแห้งแบบป้อนความร้อน. ใน: รายงานการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 9 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 7, 28 พฤษภาคม 2565, มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. ขอนแก่น: 2565. หน้า 574-584.
https://idcneu.com/neunic22/file_article/st/neunic2022-st-17.pdf
11. ศิวกร ศรีธัญญากร, กิรติ สุลักษณ์, ทวีช จิตรสมบุญ. แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสำหรับการอบแห้งชั้นบางของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2563;14(2):183-197.
https://agkb.lib.ku.ac.th/agrisservice/search_detail/result/416216
12. กิตติ สถาพรประสาน, โพร้ทอง ปราณีตพลกรัง. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ทสเปาต์เตดเบด. วิศวกรรมลาดกระบัง. 2560; 34(4): 22-29. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/article/download/240176/163720>
13. สุภวรรณ ภูริระวิชย์กุล, ยุทธนา ภูริระวิชย์กุล. จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกกอกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แบบสองชั้นตอนด้วยไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรด. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 2560; 48(3 ฉบับพิเศษ): 68-71. <https://www.phtnet.org/download/phtic-seminar/1709.pdf>
14. ทรงพล วิจารณ์จักร, สุพรรณ ยั่งยืน, จักรมาส เลหาวิช. การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องอบแห้งแบบถึงทรงกระบอกหมุนด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมลมร้อนปล่อยทิ้งในกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 2560; 48(3 ฉบับพิเศษ): 51-54. <https://www.phtnet.org/download/phtic-seminar/1705.pdf>
15. ปาริชาติ เทียนจุมพล, รณฤทธิ์ ฤทธิธิน, สงวนศักดิ์ ธนาพรพูนพงษ์, สุชาดา เวียรศิลป์. การหาปริมาณความชื้นอย่างแม่นยำสูงในข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี. วารสารเกษตร. 2549; 22(3): 213-222. https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/kukr/search_detail/result/104844
16. ศราวุธ รัตนวงษ์, วีรชัย แผ่นอุไร, พงษ์พันธุ์ พรหมพิพัทธ์, เกยูร ดวงอุปมา. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแบบถึงทรงกระบอกหมุน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี. 2565; 10(1): 125-142.
<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/scudru/article/view/246539/168471>
17. Dongbang, W., Nuantong, W. (2018). Drying kinetics of glutinous rice using an infrared irradiation technique. *Engineering and Applied Science Research*, 45(2), 127-131. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/easr/article/view/89519>
18. International Rice Research Institute. (2013). *Paddy drying training manual*.
<http://www.knowledgebank.irri.org/images/docs/training-manual-paddy-drying.pdf>
19. Khir, R., Pan, Z., Salim, A., Hartsough, B. R., Mohamed, S. (2011). Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. *LWT – Food Science and Technology*, 44(4), 1126-1132.
<https://agronomy-rice.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk11966/files/media/documents/Moisture%20diffusivity%20of%20rough%20rice%20under%20infrared%20radiation%20drying.pdf>

20. Meeso N, Nathakaranakule A, Madhiyanon T, Soponronnarit S. (2007). Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process. *J Food Eng*, 78(4), 1248-1258.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877406000392>
21. Du, Y., Yan, J., Wei, H., Xie, H., Wu, Y., Zhou, J. (2023). Drying kinetics of paddy drying with graphene far-infrared drying equipment at different IR temperatures, radiations-distances, grain-flow, and dehumidifying-velocities. *Case Stud Therm Eng*. 43:102780.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X23000862>
22. Huang, D., Yang, P., Tang, X., Luo, L., Sundén, B. (2021). Application of infrared radiation in the drying of food products. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 765-777.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224421001461>
23. ทิวานันท์ แก้วสอนดี, วราเดช แสงบุญ, สรินทรเทพ สายเนตร, พูลทวี ศรพรหม, จักรมาส เลหาวิช. (2560). การอบแห้งสมอด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารีโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรด. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 48(3 ฉบับพิเศษ), 59-62. <https://www.phtnet.org/download/phtic-seminar/1707.pdf>