

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่อง อบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด

Mathematical Model for Paddy Drying by Jet Spouted Bed Dryer

กิตติ สถาพรประสาธน์¹, โพร้ทอง ปรานีตพลกรัง²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

²สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

Corresponding author: pttmbj@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ดำเนินการเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด ซึ่งมีเงื่อนไขการอบแห้งดังนี้ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70, 80 และ 90 °C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30-35% (d.b.) และความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 12% (d.b.) ผลการศึกษาพบว่าอัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของลมร้อน โดยอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น โดยแบบจำลองการอบแห้งของ Midilli et al. สามารถทำนายคุณลักษณะการอบแห้งของข้าวเปลือกได้เหมาะสมที่สุด เพราะค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าสูงสุดและค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) มีค่าต่ำสุด จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective moisture diffusivities) ของข้าวเปลือกที่ระดับอุณหภูมิ 70-90 °C มีค่าระหว่าง 3.10×10^{-9} - 3.456×10^{-9} m²/s และค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียสมีค่าเท่ากับ 69.00 kJ/mol.

คำสำคัญ: เจ็ตสเปาต์เต็ดเบด, แบบจำลองการอบแห้ง, ข้าวเปลือก

Abstract

This research was performed to determine the most appropriate a mathematical model for predicting the moisture ratio of paddy drying by a Jet Spouted bed dryer. The condition for operation were: the drying temperature 70, 80 and 90 °C, the initial moisture content about 30-35 % (d.b) and final moisture content 12 % (d.b). The results showed that, drying temperature showed the effect on the rate of drying, the drying rate increased with drying temperatures resulted in the increase of drying rate. The Midilli et al. model could represent the drying characteristics of paddy most satisfactorily. Effective moisture diffusivities were determined between 3.10×10^{-9} and 3.456×10^{-9} m²/s. The activation energy was found to be 69.00 kJ/mol.

Keywords: Jet spouted bed, Drying model, Paddy

1. บทนำ

ข้าว นับเป็นสินค้าทางการเกษตรที่มีความสำคัญ เป็นสินค้าส่งออกมีมูลค่าสูงเป็นอันดับต้นๆของประเทศไทย แต่ปัญหาของเกษตรกรคือความชื้นและคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว [1-2] โดยทั่วไปข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวในระยะเวลาที่เหมาะสมมักมีความชื้นอยู่ในช่วง 22-25 % ซึ่งถ้าหากประสบกับสภาวะฝนตกหรือน้ำท่วมอาจทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นสูงถึง 28-33 % [2] จึงได้มีการนำเทคนิคการอบแห้งมาใช้ เพื่อช่วยลดปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกลง จนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ให้มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน [1-2] เทคนิคการอบแห้งแบบต่างๆได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อบแห้งข้าว เช่น การอบแห้งแบบกระแสน [1] ลมร้อน [2] ฟลูอิดไคเบด [3-4] และแบบรังสีอินฟราเรด [5] เป็นต้น ซึ่งการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรนั้นมีความจำเป็น โดยมีตัวแปรสำคัญหลายอย่างและเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด เช่น ค่าความชื้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น เป็นต้น ที่มีผลกระทบต่อคุณภาพผลผลิตทางการเกษตร [6-7] การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling) ของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง เป็นวิธีการที่ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง [6-7]

เทคนิคการอบแห้งเจ็ตสเปาต์เต็คเบด (Jet spouted bed หรือ JSB) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เต็คเบดแบบดั้งเดิม ในเรื่องมีปริมาณความจุจำกัด มีความดันลดคร่อมเบดมากและการหมุนวนภายในเบดต่ำ การขยายขนาดสเปาต์เต็คเบดเพื่อนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมจึงทำได้ลำบาก [8-10] ได้มีงานวิจัยนำเทคนิคการอบแห้งเจ็ตสเปาต์เต็คเบดไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

ได้แก่ กุ้ง [8] ถั่วเหลือง [9] พริกไทย [10] ซึ่งผลการอบแห้งที่ได้ก็อยู่ในระดับที่น่าพอใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาในแง่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ [8-10] จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ายังมีงานวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคการอบแห้งเจ็ตสเปาต์เต็คเบดอยู่น้อยมาก และยังไม่มียานวิจัยที่เกี่ยวกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องเจ็ตสเปาต์เต็คเบด ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องแบบเจ็ตสเปาต์เต็คเบด โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง ที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัลที่เหมาะสมขึ้นมาเพื่อใช้ทำนายจลนพลศาสตร์ดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

2. ทฤษฎีการอบแห้ง

2.1 ความชื้นในวัสดุ (Moisture Content) คือ ค่าที่บ่งชี้ปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือแห้งตามมาตรฐาน AOAC [11]

2.2 อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเมื่อเทียบความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินต่อไปในเวลาใดๆ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [12-13]

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (1)$$

เมื่อ MR คืออัตราส่วนความชื้น, M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ, M_i คือความชื้นเริ่มต้น, M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลตามลำดับ

2.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff}) คือ คุณสมบัติเฉพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ ขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้น

สัมพัทธ์ และความเร็วอากาศ พิจารณาโดยอาศัยสมการการแพร่ตามกฎข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's law of diffusion) [12] สามารถเขียนสมการสัมพันธ์ได้คือ

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

เมื่อ M คือ ความชื้น, D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s), t คือ เวลา (s)

เมื่อกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงตัว การกระจายความชื้นในวัสดุสม่ำเสมอ วัสดุไม่หดตัว ไม่เกิดความต้านทานการถ่ายเทมวลที่วัสดุ และอุณหภูมิคงที่ [12] รวมไปถึงเวลาในการอบแห้งเป็นเวลานาน สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกได้ดังสมการที่ (2) โดยตั้งสมมุติฐานข้าวเปลือกที่มีรูปทรงเรขาคณิตเป็นทรงกลม [5] ได้ดังสมการดังนี้

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{-n^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{r^2} \right) \quad (3)$$

เมื่อ r คือ รัศมีสมมูลของข้าวเปลือก (Equivalent radius of paddy, mm), t คือ เวลา (s)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ดสเปาต์เต็ดเบดจากค่าความชื้นของกราฟเส้นตรง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ และเวลาในการอบแห้ง (t) [12-13] ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$\text{Slope} = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{r^2} \quad (4)$$

$$\text{หรือ } D_{\text{eff}} = \frac{\text{Slope} \cdot r^2}{\pi^2} \quad (5)$$

2.4 พลังงานกระตุ้น (Activation Energy, E_a) คือ ค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุสามารถหาค่าได้โดยอาศัยสมการความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) [12-13] ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{R(T + 273.15)} \right) \quad (6)$$

เมื่อ D_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นคงที่ (m^2/s), E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (kcal/kg mol), R คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ ($8.314 \text{ kJ/kg mol. K}$), T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

2.5 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสม สำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ดสเปาต์เต็ดเบดได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่างๆ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยไม่เชิงเส้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB ให้ผลจากแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลผลการทดลอง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาหาค่าความเหมาะสมแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [13]

Model name	Model
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$

การพิจารณาดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายค่าความชื้นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determine, R^2) และ ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) เป็นค่าทางสถิติที่ใช้เลือกแบบจำลองที่เหมาะสม [12-13] ดังสมการที่ (7)

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{\text{pred},i} - MR_{\text{exp},i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

เมื่อ $MR_{\text{exp},i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

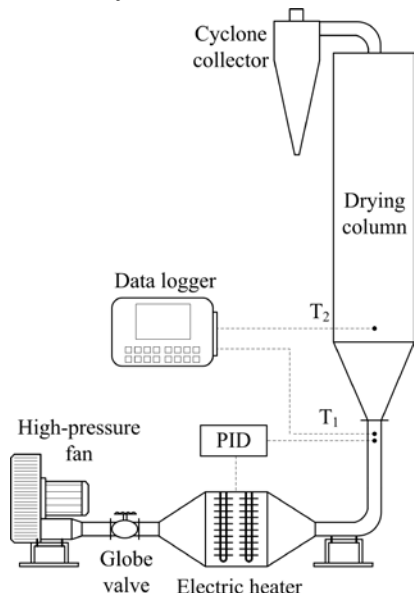
$MR_{\text{pred},i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลอง

n คือ จำนวนข้อมูล

3.วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์

เครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบดที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รายละเอียดเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด

ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ 1) พัดลมแรงดันสูง (High-Pressure fan) (CRELEC, HB-329, Taiwan) ขนาด 2.2 kW ซึ่งทำหน้าที่ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ 2) โกลบวาล์ว (Globe Valve) ซึ่งทำหน้าที่ปรับความเร็วของอากาศที่เข้าสู่ระบบโดยความเร็วของอากาศจะถูกวัดด้วยท่อปีโตท (Pitot tube) ซึ่งต่ออยู่กับอุปกรณ์ประมวลผล (TESTO, 435-4, Germany) 3) ชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (Electric heater) ขนาด 15 kW4) หออบแห้ง (drying column) ซึ่งทำจากเหล็กสแตนเลส (Stainless steel) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 125 mm และสูง 800 mm อากาศร้อนที่ผ่านชุดทำความร้อนจะไหลเข้าหออบแห้งที่ด้านล่างผ่านช่องทางเข้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 63 mm ซึ่งเชื่อมต่อกับหออบแห้งด้วยกรวยสแตนเลสที่มีมุมเอียง 20 องศา 5) ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone collector) ซึ่งทำหน้าที่แยกผลิตภัณฑ์ออกจากอากาศร้อน 6) ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) แบบ PID (SHINKO, JCS-33A, Japan) ซึ่งมีความแม่นยำในการควบคุม $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 7) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) (HIOKI, 8421-52, Japan) 8) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K

(Type K Thermocouples) ในที่นี้ได้หุ้มฉนวนความร้อนให้กับอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบดไว้ทั้งหมด เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศแวดล้อม

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้าวเปลือกซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30-35% (d.b.) [11] เป็นวัสดุตัวอย่างในการทดลองอบแห้งและจะถูกเก็บที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนการทดลองอบแห้งแต่ละครั้งข้าวเปลือกจะถูกนำมาผึ่งลมทิ้งไว้จนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องทดลอง

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิของอากาศที่เข้าหออบแห้ง 3 ระดับ คือ 70°C , 80°C และ 90°C ความสูงเบด 200 mm (1,000 g) ความเร็วลมร้อน 10 m/s ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง มวลของข้าวเปลือกจะถูกวัดอย่างต่อเนื่อง (ทุกๆ 10 นาที) โดยอาศัยอุปกรณ์ชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Kro-tron รุ่น SG 1500 พิกัด 1500 g การอบแห้งจะดำเนินไปจนกระทั่งความชื้นของข้าวเปลือกไม่เปลี่ยนแปลง (สังเกตได้จากมวลมีค่าคงที่) โดยความชื้นในสภาวะดังกล่าวถือเป็นความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกที่เงื่อนไขการทดลองนั้น ๆ โดยแต่ละเงื่อนไขการอบแห้งจะทำการทดลอง 3 ครั้ง

4.ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์และจลนพลศาสตร์การแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด

จากผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกที่ได้นำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ในตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Empirical model) จะพบว่าแบบจำลองของ Midilli et. al. ให้ค่า R^2 สูงที่สุดและให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et. al. มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 ในช่วง 0.9998-0.9999 และค่า RMSE อยู่ในช่วง

0.002583-0.004342 ข้อจำกัดของแบบจำลอง Midilli et. al. พบว่าจะทำนายได้ดีเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 70-90 °C เนื่องจากแบบจำลองพัฒนามาจากผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว และค่าคงที่ a, b, k และ n ของแบบจำลอง Midilli et.al. ไม่ได้เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ซึ่งจากการทดลองพบว่าตัวแปรอุณหภูมิมิมีอิทธิพลต่ออัตราส่วนความชื้นโดยตรง ดังนั้นจึงได้นำค่าคงที่ a b k และ n มาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรอุณหภูมิ (T) โดยการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นจากสมการ Midilli et.al.

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt \quad (8)$$

เมื่อค่า a , b ,k และ n เขียนความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิได้ดังสมการ

$$a = 1.002 - 0.131/T \quad ; R^2 = 0.81$$

$$k = 0.083 + 0.002T \quad ; R^2 = 0.97$$

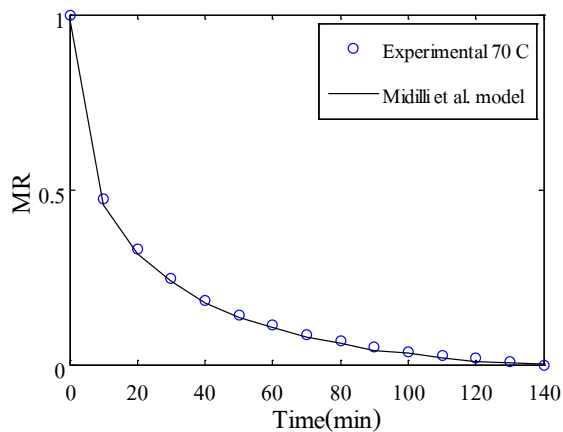
$$b = -0.0342/T \quad ; R^2 = 0.98$$

$$n = 0.631 - 3.195/T \quad ; R^2 = 0.90$$

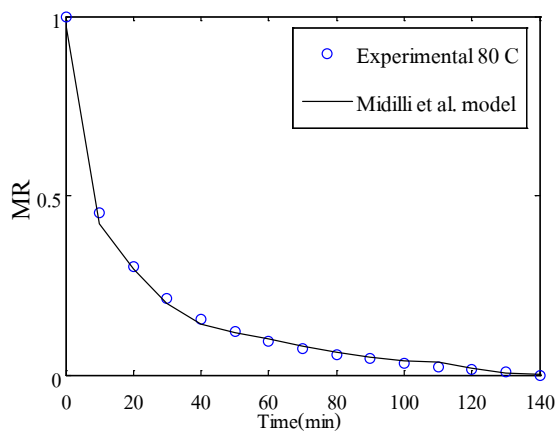
ซึ่งทำให้แบบจำลองของ Midilli et.al. สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอื่นได้

ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์

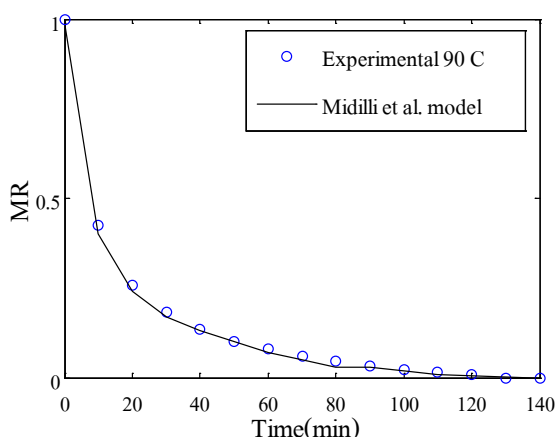
Model name	Temperature (°C)	Drying Model Constants	R ²	RMSE
Newton MR=exp(-kt)	70 °C	k=0.04959	0.9624	0.04900
	80 °C	k = 0.05604	0.9668	0.04569
	90 °C	k = 0.0647	0.9718	0.04187
Page MR=exp(-kt ⁿ)	70 °C	k=0.1594, n = 0.6484	0.9980	0.01170
	80 °C	k = 0.1785, n = 0.6373	0.9990	0.008075
	90 °C	k = 0.2007, n = 0.6298	0.9992	0.007415
Henderson and Pabis MR=aexp(-kt)	70 °C	a = 0.9298, k = 0.0455	0.9676	0.04704
	80 °C	a = 0.9439, k = 0.05237	0.9700	0.04486
	90 °C	a = 0.9580, k = 0.06161	0.9735	0.04186
Midilli et al. MR=aexp(-kt ⁿ)+bt	70 °C	a = 0.9996 , b = -0.0002032 k = 0.1908 , n = 0.5843	0.9998	0.003559
	80 °C	a = 1.0000 , b = -0.0001294 k = 0.2021 , n = 0.5928	0.9999	0.002583
	90 °C	a = 1.0000 , b = -9.589x10 ⁻⁵ k = 0.2213 , n = 0.5942	0.9998	0.004342
Verma et al. MR=aexp(-kt) +(1-a)exp(-bt)	70 °C	a = 0.5684 , b = 0.2313 k = 0.02762	0.9996	0.005338
	80 °C	a = 0.5026 , b = 0.028 k = 0.186	0.9996	0.00525
	90 °C	a = 0.4363 , b = 0.1747 k = 0.02936	0.9997	0.00452



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งของการทดลองกับผลจากแบบจำลองที่ 70 °C



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งของการทดลองกับผลจากแบบจำลองที่ 80 °C

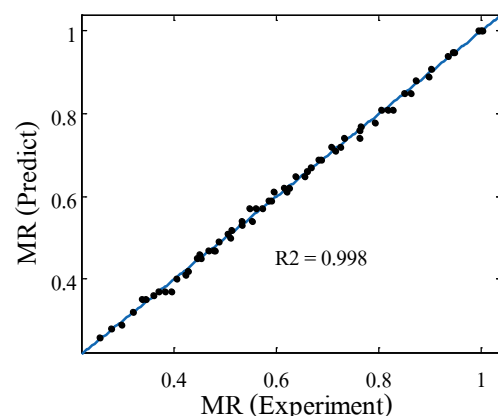


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งของการทดลองกับผลจากแบบจำลองที่ 90 °C

จากผลการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็คเบดแสดงดังรูปที่ 2-4 จะพบว่า

ที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการลดความชื้นมากกว่าอุณหภูมิต่ำเนื่องจากอัตราการลดความชื้นที่อุณหภูมิสูงมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนมากกว่าอุณหภูมิต่ำ [13] และยังพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงยังส่งผลให้เวลาในการอบแห้งลดลงตามไปด้วย จากผลการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็คเบดแสดงดังรูปที่ 2-4 พบว่า ในช่วงแรกอัตราส่วนการลดลงของความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากภายในเมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นสูง ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำมายังผิวนอกเป็นไปอย่างรวดเร็ว แล้วค่อยๆลดอัตราเร็วในการถ่ายเทความชื้นลง [2]

เมื่อพิจารณาผลคำนวณที่ได้จากแบบจำลองของ Midilli et al. เปรียบเทียบกับผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 70-90 °C แสดงดังรูปที่ 2-4 จะพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาเส้นกราฟอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งในรูปที่ 2-4 ในช่วง 10 นาทีแรกจะพบว่ามีลักษณะเป็นเชิงเส้น แล้วค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งทำให้ลักษณะเส้นกราฟอัตราส่วนความชื้นเป็นเส้นโค้งหงาย เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งจะมีลักษณะไม่เชิงเส้น เมื่อวิเคราะห์สมการของ Midilli et al.; $MR = a \exp(-kt^n) + bt$ มีลักษณะความสัมพันธ์อัตราส่วนความชื้นกับเวลาเชิงเส้นร่วมกับ Exponential ทำให้ผลการคำนวณของแบบจำลองของ Midilli et. al. ให้ค่า R^2 สูงที่สุดและให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด

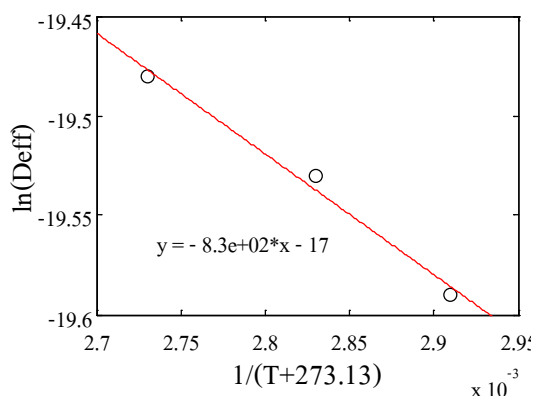


รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลการทดลองกับแบบจำลองของ Midilli et al.

ในรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองของ Midilli et al. เปรียบเทียบกับผลการทดลองค่าอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือก โดยใช้ดัชนีชี้วัด R^2 พบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันโดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.998

4.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้น

จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 70,80 และ 90°C มีค่าเท่ากับ 3.10×10^{-9} , 3.29×10^{-9} และ $3.456 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ การเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการอบแห้งด้วยลมร้อนกับวัสดุทางเกษตรอื่น [12-14] เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้า และมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนของน้ำภายในโครงสร้างที่เพิ่มเติมบริเวณผิวหน้า ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทมวลสารในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ [13]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $1/(T+273.15)$ ที่อุณหภูมิ 70-90 °C

รูปที่ 6 แสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในฟังก์ชันลอการิทึมของสมการอาร์เรเนียส โดยสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง [12-13] ซึ่งจากผลการคำนวณจะได้ค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 69.00 kJ/mol

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็คเบคในระหว่างการอบแห้งที่ระดับอุณหภูมิ 70, 80 และ 90 °C ความสูงเบดของข้าวเปลือก 200 mm ความเร็วของอากาศในท่อทางเข้าหอบแห้ง 10m/s อบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30-35% (d.b.) อบแห้งจนกระทั่งความชื้นของข้าวเปลือกไม่เปลี่ยนแปลง ผลการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นและระยะเวลาในการอบแห้งลดลง การวิเคราะห์หาแบบจำลองคณิตศาสตร์ พบว่าแบบจำลองของ Midilliet al. มีความเหมาะสมมากที่สุดที่อุณหภูมิช่วง 70-90 °C เนื่องจากมีค่า R^2 ในช่วง 0.9998-0.9999 และค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.002583-0.004342 ซึ่งผลคำนวณได้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองกว่าแบบจำลองอื่นๆ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D_{eff}) ของข้าวเปลือกในระหว่างการอบแห้งที่ระดับอุณหภูมิ 70,80 และ 90°C มีค่าเท่ากับ 3.10×10^{-9} ถึง $3.456 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับและมีค่า E_a มีค่าเท่ากับ 69.00 kJ/mol

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒองค์รักษ์ ที่ช่วยเก็บข้อมูลผลการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Thanasookprasert, T. Swasdisevi, S. Devahastin, S. Soponronnarit, "Dehydration of unhusked rice by using impinging stream dryer," Journal of Science and Technology, Vol. 1, No.2, pp.1-10, 2012.
- [2] S. Srisuriyawong, S. Wanlapa, W. Phromjan, N. Chankamma, "Drying kinetics of paddy dried with the small-scale paddy dryer," Agricultural Sci. J., Vol.45, No.2, pp.345-348, 2014.
- [3] S. Soponronnarit, S. Prachayawarakorn, O. Sripawatakul, "Development of cross-flow

- fluidized bed paddy dryer,” *Drying Technology*, Vol.14, No.10, pp.2397-2410, 1996.
- [4] A. Artnaseaw, “Drying germinated paddy rice by hot-air fluidized bed dryer,” *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 27, No. 1, pp.55-60, 2010.
- [5] N. Meeso, A. Nathakarakule, T. Madhiyanon, S. Soponronnarit, “Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process,” *Journal of Food Engineering*, Vol.78, No.4, pp.1248-1258, 2007.
- [6] A. Nadeel, Y. Tirawanichakul, S. Tirawanichakul, “Drying kinetics of pandanus leaf by infrared radiation combine hot air and hot air,” *Burapha Sci. J.*, Vol.17, No.2 , pp.130-138, 2012.
- [7] P. Prakotmak, “Modeling coupled transport phenomena and mechanical deformation of rice during drying in fluidized-bed dryer,” *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 33, No. 2, pp.42-48, 2016.
- [8] C. Ninmnuy, S. Devahastin, S. Soponronnarit, “Effects of process parameters on quality changes of shrimp during drying in a jet-spouted bed dryer,” *Journal of food science*, Vol. 72, No.9, pp.553-563, 2007.
- [9] S. Wachiraphansakul, S. Devahastin, “Drying kinetics and quality of soy residue (okara) dried in a jet spouted bed dryer,” *Drying Technology*. Vol.23, pp.1229–1242, 2005.
- [10] K. Sathapornprasath, C. Nimmol, “Influences of far-infrared radiation on the energy efficiency of stepwise jet spouted bed drying system,” *KKU Res. J.*, Vol.18, No.2, pp.325-343, 2013.
- [11] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). *Official Methods of Analysis*. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists. Maryland: Gaithersburg; 2000.
- [12] E. Saniso, F. Saudi, R. Hanafee, “Moisture diffusivity coefficient specific energy consumption and specific moisture extraction rate of betel nut drying using combined thermal energy,” *Burapha Sci. J.*, Vol.17, No.1, pp.142-149, 2012.
- [13] T. Madhiyanon, A. Phila, S. Soponronnarit, “Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut,” *Applied Thermal Engineering* Vol. 29 , pp.2849–2854, 2009.
- [14] A. Sae-Khow, S. Tirawanichakul, Y. Tirawanichakul, “Effect of drying with heat convection and heat radiation on drying kinetics and quality aspect of black pepper,” *Burapha Sci. J.*, Vol.18, No.1, pp.166-180, 2013.