

<http://journal.rmutp.ac.th/>

แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสำหรับการอบแห้งชั้นบางของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ

ศิวกร ศรีธัญญากร กীরติ สุลักษณ์* และ ทวีช จิตรสมบุญ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 25 กุมภาพันธ์ 2563 แก้ไขบทความ 26 สิงหาคม 2563 ตอรับบทความ 15 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสำหรับการอบแห้งชั้นบางของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระในรูปแบบใหม่ โดยออกแบบสร้างเครื่องอบแห้งดังกล่าวเพื่อทดลองผลจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ภายใต้เงื่อนไขอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนในช่วง 60-150 องศาเซลเซียส มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5-15 กิโลกรัม และความเร็วลมร้อน 19 เมตรต่อวินาที ผลแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นลดลงส่งผลให้เวลาอบแห้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดลองถูกนำไปใช้สอบเทียบแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย 12 แบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ค่าโคกกำลังสอง (χ^2) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เมื่อพิจารณาทั้งอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ในรูปแบบเชิงเส้นพบว่าแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่นิยมใช้สามารถทำนายผลของอัตราส่วนความชื้นได้แม่นยำ โดยให้ความแม่นยำสูงสุดที่ $RMSE=0.0279$ $\chi^2=0.00084$ และ $r=0.9938$ นอกจากนี้ผลการทดลองยังถูกนำไปใช้สังเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในรูปแบบใหม่ที่เป็นฟังก์ชันของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น อุณหภูมิลมร้อน และเวลาอบแห้ง แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นอยู่ในรูปฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลที่ประกอบด้วยค่าคงที่แบบจำลองเพียงจำนวน 7 ตัว เมื่อนำไปใช้จำลองผลอัตราส่วนความชื้น พบว่าให้ความแม่นยำเทียบเท่าแบบจำลองที่นิยมใช้ที่แม่นยำสูงสุด ซึ่งใช้ค่าคงที่แบบจำลองถึง 24 ตัว โดยให้ค่าความแตกต่างของผลจำลองเพียงร้อยละ 1.8

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ; การอบแห้งข้าวเปลือก; แบบจำลองอบแห้งชั้นบาง; อัตราส่วนความชื้น; สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 9765 6526, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: keerati@sut.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Diffusion Coefficient Modelling of Thin-layer Drying of Paddy Using Spouted Free Fall Bed Dryer

Siwakorn Sritunyakorn Keerati Suluksna* and Tawit Chitsomboon

Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

111 University Avenue, Suranaree, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000

Received 25 February 2020; Revised 26 August 2020; Accepted 15 September 2020

Abstract

This research developed a new model to determine the moisture diffusion coefficient for the thin-layer paddy drying with the spouted free-fall bed dryer. The design and construction of the dryer was done to experiment with the drying kinetics. The experiment has studied under conditions of hot air temperature of 60-150 °C, the initial paddy mass of 5 - 15 kg and hot air velocity of 19 m/s. The results showed that the higher hot air temperature and the lower initial paddy mass resulted in a significant reduction in drying time. The experimental results were used to calibrate 12 of the most popular thin-layer drying models to find a suitable one, considering based on the root mean square error (RMSE), chi-squared value (χ^2) and the correlation coefficient (r). It was found that the popular thin layer drying model was able to accurately predict the effect of the moisture ratio, considering both the influence of hot air temperature and the initial paddy mass, in linear models. The highest accuracy was RMSE = 0.0279, χ^2 = 0.00084 and r = 0.9938. In addition, the experimental results have been used to synthesize the new diffusion moisture coefficient, which is a function of initial paddy mass, temperature and drying time. This developed model was based on an exponential function with only 7 model constants. The simulated results observed that the new model achieved the average error only 1.8 percent compared with the best model that uses up to 24 model constants.

Keywords: Spouted Free-fall Bed Dryer; Paddy Drying; Thin-layer Model; Moisture Ratio; Moisture Diffusivity Coefficient

* Corresponding Author. Tel.: +668 9765 6526, E-mail Address: keerati@sut.ac.th

1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย การบริโภคข้าวมีความต้องการเพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากร ด้วยการเก็บเกี่ยวข้าวในปัจจุบัน ข้าวมักมีความชื้นสูงในช่วงร้อยละ 25-30 มาตรฐานเปียก ดังนั้นการอบแห้งหลังการเก็บเกี่ยวจึงมีความสำคัญมาก เพื่อคงคุณภาพที่ดีป้องกันการเน่าเสีย ยืดอายุการเก็บรักษา โดยลดความชื้นลง ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 13-14 มาตรฐานเปียก [1] ซึ่งสภาพความชื้นต่ำช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และเชื้อรา การลดความชื้นข้าวเปลือกที่นิยมใช้คือ การตากบนลานปูนซึ่งประหยัดแต่มีข้อเสีย เช่น ขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ ใช้เวลาแรงงานและพื้นที่มาก รวมถึงการปนเปื้อนและเสียหายปริมาณสูง ดังนั้น การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเชิงกลจึงช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ปัจจุบันมีเครื่องอบแห้งหลายรูปแบบที่นิยมในเชิงพาณิชย์ โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากไม่ซับซ้อนและต้นทุนต่ำ เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เครื่องอบแห้งแบบไหลคลุกเคล้า (LSU) เป็นต้น

เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดระบบฟลูอิดไดซ์ในด้านการขาดอนุภาคที่ใช้ออบสามารถอบแห้งวัสดุที่ไวต่อความร้อนสูงได้ดีโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เวลาสัมผัสความร้อนสั้นทำให้ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงได้ มีการพักตัวในหีบอบแห้งทำให้ความชื้นภายในแพร่ออกมาที่ผิว มีความสม่ำเสมอของคุณภาพหลังการอบ และใช้พลังงานค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ดังนั้น เทคนิคแบบเป่าพ่นจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท [1], [2] การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีหล่นอิสระ ซึ่งพบว่าให้อัตราการอบแห้งสูงอบแห้งได้เร็ว ประหยัดพลังงาน และให้ข้าวมีคุณภาพดีในด้านคุณภาพการขัดสีและความขาวของข้าว [3], [4]

การออกแบบหีบอบแห้งแบบทรงกระบอกฐานกรวยนั้น มีตัวแปรต่างๆที่ต้องคำนึงถึง จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีข้อกำหนดของตัวแปรที่ใช้ออกแบบ เพื่อให้เกิดการเป่าพ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและป้องกันการเกิดการเกิด

ขอบเขตนิ่งของวัสดุ (Dead Zone) [5-7] เช่น อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศเข้าต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (D_i/d_p) อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางห้องอบแห้งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศเข้า (D_o/D_i) และมุมเอียงด้านล่างห้องอบแห้ง (Slant Angle) เป็นต้น

การทดลองเพื่อหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมนั้นค่อนข้างใช้เวลาและค่าใช้จ่ายมาก นอกจากนี้วัสดุทางชีวภาพอย่างเช่น ข้าว มีกระบวนการแพร่และการระเหยน้ำภายในเมล็ดที่ซับซ้อน เช่น การไหลแบบโมเลกุลอิสระ (Knudsen Flow) การดูดซึมด้วยระบบคาปีลารี การแพร่ของน้ำในสภาพของเหลวและไอ เป็นต้น ดังนั้นการสร้างสรรค์การทำนายความชื้นโดยใช้แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางจึงนิยมกันอย่างแพร่หลาย [4] งานวิจัยที่ศึกษาการจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางกับวัสดุที่หลากหลาย เช่น การอบแห้งหญ้าปักกิ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด [8] การอบแห้งถั่วและเมล็ด [9] การอบแห้งพริกเทคนิคสุญญากาศ [10] การอบแห้งแป้งมันเทศ [11] กากแครอท [12] การอบแห้งข้าวโดยการวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิจากความร้อน [13] การอบแห้งใบตะไคร้ [14] การอบแห้งโกโก้ และเฮเซลนัท โดยจำลองวัสดุเป็นวงกลมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น [15], [16]

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ส่วนใหญ่ใช้รูปแบบการจำลองโดยมักใช้ความสัมพันธ์ในรูปเชิงเส้นระหว่างความสัมพันธ์ของ $\ln(MR)$ กับเวลา ซึ่งจะได้เป็นค่าคงที่ เช่น การอบแห้งพริกไทยดำด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น รวมถึงศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในรูปเชิงเส้น แบบทั่วไปโดยสมมติรูปทรงของพริกไทยดำเป็นทรงกลม [17] การจำลองการแพร่ความชื้นสำหรับการอบแห้งชั้นบางข้าวเปลือก โดยจำลองรูปทรงเมล็ดข้าวเปลือกแบบทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง รูปทรงกลม และรูปทรงกระบอกจำกัด เทียบกับผลการทดลอง พบว่าแบบจำลองการแพร่ความชื้นโดยใช้รูปทรงกลมแบนข้าง ให้ความแม่นยำมากกว่ารูปทรงอื่น ๆ แต่ไม่ต่างกันมากดังนั้น

ห้องอบแห้งหมายเลข (3) ถูกออกแบบให้มีขนาดความจุข้าวเปลือก 15 กิโลกรัม มุมเอียงด้านล่างห้องอบแห้ง (θ) 60 องศา เส้นผ่านศูนย์กลางห้องอบแห้ง (D_c) 30 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศเข้า (D_i) 4.4 เซนติเมตร ความสูงท่อเป่าพ่น (H_i) 60 เซนติเมตร โดย $D_i/d_p=12$, $D_c/D_i = 6.8$ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไข การเป่าพ่นที่มีเสถียรภาพและป้องกันการเกิดขอบเขตนิ่งของวัสดุ

การทำงาน คือ ลมร้อนที่ขับจากพัดลมผ่านชุดทำความร้อน เป่าพ่นข้าวจากห้องอบแห้งผ่านท่อเป่าพ่นขึ้นด้านบน ซึ่งจะเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลในลักษณะไหลตามกัน จากนั้นข้าวจะหล่นตามแรงโน้มถ่วงอย่างอิสระลงสู่ห้องอบแห้งสวนทางกับลมร้อนที่เป่าพ่น

2.2 การทดลองอบแห้ง

การทดลองอบแห้งด้วยเครื่องเป่าพ่นหล่นอิสระใช้ข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณ 60 ที่เก็บเกี่ยวสดในจังหวัดนครราชสีมา ผ่านเครื่องทำความสะอาดข้าว ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงร้อยละ 24-26 มาตรฐานเปียก เก็บบรรจุถุงไว้ในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียส ก่อนการทดลองอบแห้ง ข้าวเปลือกจะถูกพักที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อปรับอุณหภูมิข้าวเปลือกให้เป็นอุณหภูมิโดยรอบเพื่อหลีกเลี่ยงการควบแน่นของไอน้ำ จากนั้นนำข้าวเปลือกชั่งน้ำหนักเริ่มต้น เข้าอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น ภายใต้เงื่อนไขกรณีทดลองดังนี้ อุณหภูมิลมร้อนที่ 60, 80, 100, 120 และ 150 องศาเซลเซียส มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5, 10 และ 15 กิโลกรัม โดยสุ่มเก็บตัวอย่างข้าวครั้งละ 15 กรัมใส่ถุงพลาสติกเพื่อวัดความชื้น จนกระทั่งข้าวมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 13-14 มาตรฐานเปียก

การหาปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวโดยใช้เตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง [3], [4] วิธีการหาความชื้นวัสดุคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$M_s = (w-d) / s \tag{1}$$

โดยที่

M_s = ความชื้นวัสดุ

w = มวลของวัสดุขึ้น (กรัม)

d = มวลของวัสดุแห้ง (กรัม)

เมื่อ $s = w$ จะได้ความชื้นวัสดุแบบมาตรฐานเปียก (M_w) และเมื่อ $s = d$ จะได้ความชื้นวัสดุแบบมาตรฐานแห้ง (M)

2.3 แบบจำลองการอบแห้ง

แบบจำลองที่ใช้ทำการอบแห้งข้าวเปลือกมักนิยามสมการในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย (MR) กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (t) รูปแบบความสัมพันธ์จัดรูปใหม่มักอยู่ในรูปสมการเอกซ์โพเนนเชียลที่มีค่าคงที่ต่างๆ ประกอบในสมการ ตัวอย่างแบบจำลองที่นิยมใช้แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจะเป็นแบบจำลองที่ถูกนำไปใช้ในการสอบเทียบผลการทดลองต่อไป โดย a, b, c, g, h และ k เป็นค่าคงที่แบบจำลองซึ่งมีค่าแตกต่างกันในแต่ละแบบจำลอง

อย่างไรก็ตามในการวิจัยนี้สนใจสมการแบบจำลองการอบแห้งของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น โดยพิจารณาจาก Fick's Second Law ที่ใช้กันแพร่หลายในกระบวนการอบแห้ง อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในวัสดุ บนสมมติฐานเมล็ดข้าวเป็นทรงกลม การแพร่ความชื้นสม่ำเสมอในทุกทิศทาง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นคงที่ ไม่มีการหดตัว [15], [21] ดังสมการที่ (2)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \tag{2}$$

โดยที่

M = ความชื้น (มาตรฐานแห้ง)

r = รัศมี (เมตร)

t = เวลาอบแห้ง (วินาที)

D_{eff} = สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (ตารางเมตร/วินาที)

ภายใต้สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต [16], [21] $M(r, 0) = M_o$, $M(r_o, t) = M_e$ และ $dM(0, t)/dt = 0$ ผลเฉลยรูปทั่วไปที่เป็นค่าเฉลี่ยบนปริมาตรเมล็ดข้าวแบบทรงกลมแสดงในสมการที่ (3) โดยใช้ความสัมพันธ์ของ Arrhenius (1899) [9], [11], [12] ซึ่งได้นำเสนอรูปแบบของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ดังสมการที่ (4) [22]

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

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{abs}}\right) \quad (4)$$

โดยที่

MR = อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย

r_o = รัศมีของเมล็ดข้าว (เมตร)

D_o = สัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (ตารางเมตร/วินาที)

E_a = พลังงานกระตุ้น (กิโลจูล/โมล)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (กิโลจูล/โมล-เคลวิน)

T_{abs} = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของลมร้อน (เคลวิน)

ตารางที่ 1 แบบจำลองที่ใช้ทำนายการอบแห้งข้าวเปลือก

No.	Model Name	Equation	References
1	Newton (1921)	$MR = \exp(-kt)$	[4], [8]-[12], [14]-[16]
2	Page (1943)	$MR = \exp(-kt^n)$	[4], [8]-[16], [21], [22]
3	Henderson and Pabis (1961)	$MR = a \exp(-kt)$	[4], [8]-[12], [14]-[16]
4	Two-term (1974)	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt)$	[4], [8]-[16]
5	Wang and Singh (1978)	$MR = 1 + at + bt^2$	[4], [8], [10]-[13], [14], [16]
6	Logarithmic (1984)	$MR = a \exp(-kt) + c$	[4], [8]-[15], [21], [22]
7	Verma et al. (1985)	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	[8], [10]-[15], [21]
8	Modified Page equation II (1993)	$MR = \exp(-k(t/L^2)^n)$	[10], [12], [14], [21], [22]
9	Diffusion approach (1998)	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	[4], [8]-[12], [14], [21]
10	Modified Henderson and Pabis (1999)	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	[4], [8]-[11], [14], [21], [22]
11	Midilli et al. (2002)	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[4], [8], [10]-[15], [21], [22]
12	Jena and Das (2007)	$MR = a \exp(-kt + bt^{1/2}) + c$	[10], [14]

อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย เป็นสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้น ดังสมการที่ (5) [21] ค่าความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกใช้รูปแบบจำลอง Henderson (1952) [4] ดังสมการที่ (6)

$$MR = \frac{\bar{M} - M_e}{M_o - M_e} \quad (5)$$

$$M_e = \frac{1}{100} \left[\frac{\ln(1 - RH)}{C_1 - T_{abs}} \right]^{1/C_2} \quad (6)$$

โดยที่

\bar{M} = ความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใดๆ (มาตรฐานแห้ง)

M_o = ความชื้นเริ่มต้น (มาตรฐานแห้ง)

M_e = ความชื้นสมดุล (มาตรฐานแห้ง)

RH = ความชื้นสัมพัทธ์

$C_1 = -3.146 \times 10^{-6}$ และ $C_2 = 2.464$ เป็นค่าคงที่สำหรับข้าวเปลือก (ขึ้นกับเมล็ดพืชที่ใช้อบแห้ง) [4]

การวิเคราะห์พิจารณาจากค่าตัวแปรทางสถิติ ดังนี้ รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่แสดงถึงโคกำลังสอง (χ^2) และที่แสดงถึงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ดังสมการที่ (7)-(9) ตามลำดับ [4], [22] เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำในการทำนายผล

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (7)$$

$$\chi^2 = RMSE^2 \left(\frac{N}{N-z} \right) \quad (8)$$

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} MR_{exp,i} - \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{\Delta MR_{pre} \Delta MR_{exp}} \quad (9)$$

เมื่อ

$$\Delta MR_{pre} = \sqrt{N \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \right)^2}$$

$$\Delta MR_{exp} = \sqrt{N \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{exp,i} \right)^2}$$

โดยที่

MR_{exp} = อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

MR_{pre} = อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนาย

N = จำนวนข้อมูล

z = จำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลอง

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

3.1 การสอบเทียบผลการทดลองด้วย

แบบจำลองการอบแห้ง

ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ ในรูปความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น (สมการที่ (5)) กับเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 60, 80, 100, 120 และ 150 องศาเซลเซียส มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5, 10 และ 15 กิโลกรัม ความเร็วลมร้อน 19 เมตรต่อวินาที (จุดสัญลักษณ์ในรูปที่ 3) พบว่าเมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น อัตราส่วนความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เวลาการอบแห้งลดลง [4], [5] เพราะอุณหภูมิลมร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความชื้นที่ผิวเมล็ดแห้งเร็วขึ้น จึงเกิดความแตกต่างของ

ค่าความชื้นของเส้นกราฟความชื้นระหว่างผิวและภายในเมล็ดข้าว ทำให้ความชื้นภายในแพร่ออกมาได้เร็วมากขึ้น การเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นส่งผลให้เวลาการอบแห้งนานขึ้นเพราะมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่มากขึ้นส่งผลต่อระยะเวลาของวงรอบการอบแห้งที่นานขึ้น ทำให้ระยะเวลาการสัมผัสระหว่างเมล็ดข้าวเปลือกกับลมร้อนน้อยลง โดยอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงเร็วที่สุดที่อุณหภูมิอบแห้งสูงสุดคือ 150 องศาเซลเซียส และมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นน้อยสุดที่ 5 กิโลกรัม

ผลการทดลองถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลสอบเทียบแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางทั้ง 12 แบบจำลอง (ตารางที่ 1) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยพิจารณาแบบจำลองที่ให้ค่า r เข้าใกล้ 1 และให้ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำสุด ตัวอย่างผลที่อุณหภูมิลมร้อน 60 องศาเซลเซียส มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 10 และ 15 กิโลกรัม แสดงในตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับอิทธิพลของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น (m) และอุณหภูมิลมร้อน (T) พบว่าแบบจำลอง Midilli et al. (2002) มีความแม่นยำที่สุด [11] โดยมีค่า r สูงสุดระหว่าง 0.99960-0.99993 ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำสุดระหว่าง 0.00300-0.00941 และ 0.00001-0.00012 ตามลำดับ แบบจำลองที่มีความแม่นยำลำดับถัดมาคือ Jena and Das (2007) และ Modified Handerson and Pabis (1999) ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถทำนายผลกระทบของทั้งอุณหภูมิลมร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นค่าพารามิเตอร์ของทั้ง 12 แบบจำลองถูกนำไปจัดรูปตามสมการที่ (10) เมื่อ C เป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลอง อาทิ k, a, b, c (ดูตารางที่ 1)

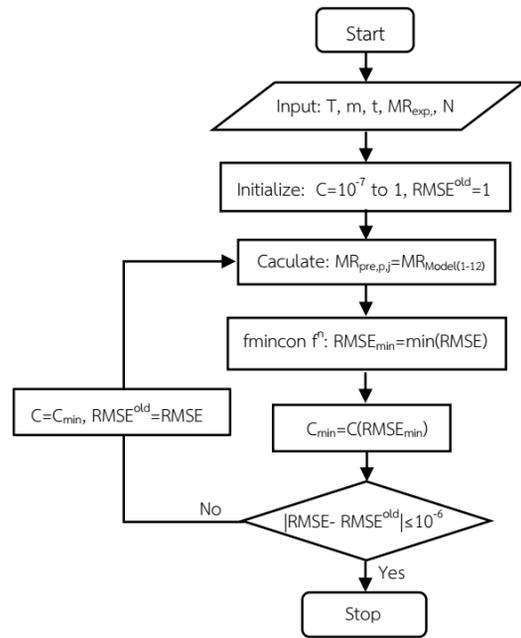
$$C = C_1 + C_2 T + C_3 m + C_4 m T \quad (10)$$

โดย C_1, C_2, C_3 และ C_4 เรียกว่าค่าคงที่ของแบบจำลองด้วยรูปแบบการหาค่าพารามิเตอร์ตามสมการที่ (10) พารามิเตอร์แต่ละตัวจะประกอบด้วยค่าคงที่แบบจำลอง

4 ตัว ดังนั้นจำนวนค่าคงที่ในแบบจำลองมีทั้งหมดเท่ากับ 4z ตัว เช่นแบบจำลอง Modified Handerson and Pabis (1999) มีพารามิเตอร์แบบจำลอง 6 ตัว (a, k, b, g, c, h) จึงทำให้มีค่าคงที่แบบจำลองทั้งหมด 24 ตัว เป็นต้น

การหาค่าคงที่แบบจำลองที่นำไปสู่การได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมด้วยโปรแกรมแมทแลบ ผ่านฟังก์ชัน Fmincon โดยผังการคำนวณแสดงดังรูปที่ 2

ผลการคำนวณให้ค่าคงที่แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) มีความแม่นยำสุด โดยให้ค่า RMSE และค่า χ^2 ต่ำสุดที่ 0.01860 และ 0.00039 ตามลำดับ ค่า r เท่ากับ 0.99719 ส่วนแบบจำลอง Midilli et al. (2002) ให้ความแม่นยำรองลงมา



รูปที่ 2 ผังที่ใช้คำนวณหาค่าคงที่แบบจำลองที่เหมาะสม

ตารางที่ 2 ผลการจำลองการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

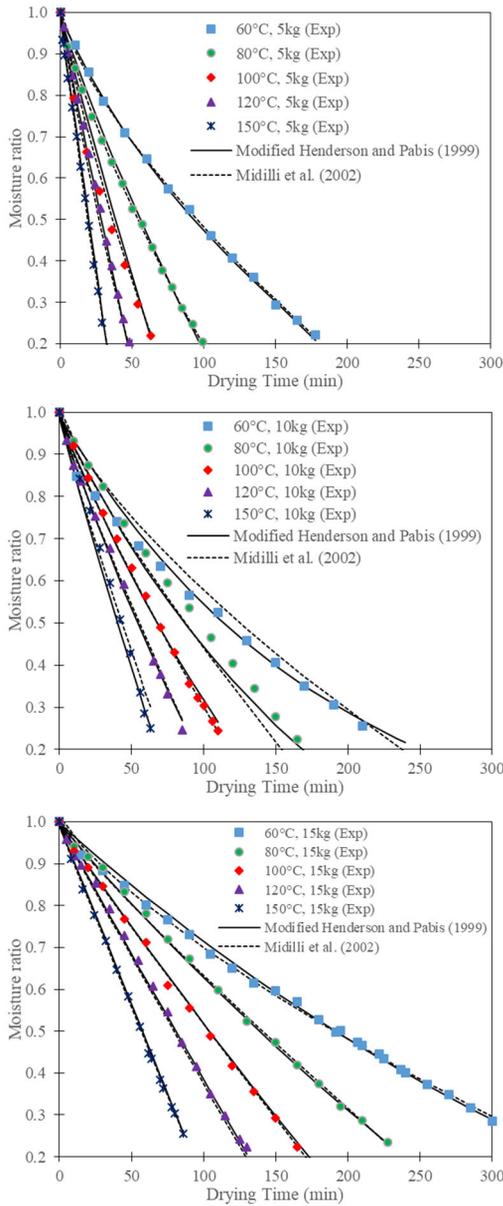
Model No.	z	m = 5 kg			m = 10 kg			m = 15 kg		
		RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r
1	1	0.01602	0.00028	0.99799	0.03001	0.00096	0.99457	0.01920	0.00038	0.99581
2	2	0.01438	0.00024	0.99833	0.02709	0.00085	0.99404	0.01629	0.00029	0.99701
3	2	0.01593	0.00030	0.99794	0.02400	0.00066	0.99512	0.01905	0.00039	0.99569
4	4	0.00728	0.00007	0.99956	0.01907	0.00050	0.99689	0.00637	0.00005	0.99951
5	2	0.01399	0.00023	0.99880	0.03620	0.00151	0.99347	0.01284	0.00018	0.99869
6	3	0.00909	0.00011	0.99931	0.02107	0.00055	0.99620	0.00806	0.00007	0.99922
7	3	0.00820	0.00009	0.99952	0.02014	0.00051	0.99663	0.00831	0.00008	0.99935
8	3	0.01438	0.00026	0.99833	0.02709	0.00092	0.99404	0.01629	0.00030	0.99701
9	3	0.00820	0.00009	0.99952	0.02014	0.00051	0.99663	0.01014	0.00012	0.99923
10	6	0.00640	0.00007	0.99966	0.00888	0.00013	0.99933	0.00652	0.00006	0.99949
11	4	0.00552	0.00004	0.99975	0.00572	0.00004	0.99972	0.00469	0.00003	0.99973
12	4	0.00612	0.00005	0.99969	0.00644	0.00006	0.99965	0.00466	0.00003	0.99974

จากรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายโดยใช้แบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) และ Midilli et al.

(2002) พบว่าทั้งสองแบบจำลองให้ผลการทำนายสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) มีความแม่นยำสูงกว่าโดยเฉลี่ยร้อยละ 2.6

ตารางที่ 3 ค่าคงที่แบบจำลองและผลวิเคราะห์ความแม่นยำในการใช้งาน

Model No.	C	Model constants				RMSE	χ^2	r
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄			
1	k	-0.01056	0.00034	0.00059	-0.00002	0.05261	0.00282	0.97804
2	k	0.00729	0.00003	-0.00045	0.00000	0.04353	0.00197	0.98457
	n	0.65398	0.00608	0.02146	-0.00032			
3	a	1.05768	-0.00104	-0.00429	0.00010	0.05121	0.00272	0.97874
	k	-0.00791	0.00030	0.00039	-0.00001			
4	a	0.40824	0.01067	0.13148	-0.00106	0.02790	0.00084	0.99380
	k	-0.00505	0.00015	0.00009	0.00000			
	b	0.54817	-0.01030	-0.13173	0.00106			
5	g	0.00507	-0.00015	-0.00122	0.00003	0.06693	0.00465	0.96503
	a	0.00378	-0.00020	-0.00023	0.00001			
	b	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000			
6	a	-0.20787	0.02231	0.06771	-0.00105	0.04019	0.00171	0.98690
	k	0.00540	0.00004	-0.00032	0.00000			
7	c	1.20662	-0.02276	-0.06965	0.00111	0.02819	0.00084	0.99352
	a	0.30065	-0.00571	-0.08384	0.00064			
	k	0.01662	-0.00034	-0.00227	0.00005			
8	g	-0.00253	0.00014	-0.00005	0.00000	0.02586	0.00071	0.99482
	k	-0.00526	0.00001	0.00098	0.00000			
	l	-0.55484	0.00067	0.16700	-0.00003			
9	n	1.09021	-0.00019	-0.02029	0.00035	0.02764	0.00081	0.99378
	a	3.94726	-0.06902	-0.23008	0.00394			
	k	-0.02940	0.00060	0.00201	-0.00002			
10	b	1.13633	-0.00001	-0.07070	0.00023	0.01860	0.00039	0.99719
	a	0.37246	0.00072	0.04667	-0.00003			
	k	0.00661	0.00004	-0.00040	0.00000			
	b	0.02526	-0.00107	-0.00471	0.00009			
	g	0.03146	-0.00059	-0.00188	0.00003			
	c	0.58548	0.00028	-0.04171	-0.00004			
11	h	-0.03960	0.00078	0.00378	-0.00007	0.02119	0.00048	0.99636
	a	1.00081	-0.00018	0.00192	0.00000			
	k	0.01828	0.00000	-0.00072	0.00000			
12	n	0.08719	0.01009	0.07547	-0.00118	0.03353	0.00121	0.99091
	b	0.00272	-0.00009	0.00010	0.00000			
	a	2.40392	0.01557	-0.13147	-0.00020			
	k	-0.00167	0.00003	0.00023	0.00000			
12	b	-0.01949	-0.00013	0.00186	0.00001	0.03353	0.00121	0.99091
	c	-1.36762	-0.01506	0.12540	0.00018			



รูปที่ 3 อัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง

3.2 การจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

โดยทั่วไปการวิเคราะห์หาค่า D_{eff} มักพิจารณาจากสมการที่ (3) โดยใช้เพียงพจน์แรก ($n=1$) ด้วยลดความซับซ้อนในการดำเนินการ (ผลของการตัดพจน์ที่ $n \geq 2$ ออกไปทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 16) จากนั้นจึงจัดรูปอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยใน

รูปแบบลอการิทึมดังสมการที่ (11) หาอนุพันธ์เทียบกับเวลา ($d(\ln MR)/dt$) แล้วจัดรูปเพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D_{eff}) ตามสมการที่ (12) ในทางปฏิบัติความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) และเวลาอบแห้ง (t) มาจากการทดลอง หากนำทั้งสองตัวแปรไปแสดงผลกราฟในรูป $\ln MR$ เทียบกับ t จะได้ว่า $d(\ln MR)/dt$ ก็คือความชันของกราฟนั่นเอง

$$\ln MR = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r_o^2} \tag{11}$$

$$D_{eff} = -\left(\frac{r_o^2}{\pi^2}\right) \frac{d \ln MR}{dt} \tag{12}$$

งานวิจัยทั่วไปมักกำหนดสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเป็นค่าคงที่ หมายความว่า $d(\ln MR)/dt$ เป็นค่าคงที่ อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงค่าดังกล่าวเปลี่ยนแปลงตามมวล อุณหภูมิ และเวลาอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4 งานวิจัยนี้จึงนำเสนอสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในรูปแบบใหม่ที่ไม่ใช่ค่าคงที่ ซึ่งจากการสืบค้นยังไม่พบบางงานวิจัยที่นำเสนอในรูปแบบนี้

จากรูปที่ 4 พบว่าลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเหมาะกับการฟิตด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียล ดังนั้นในที่นี้จึงเลือกฟิตข้อมูลดังกล่าวด้วยรูปแบบโพลีโนเมียลอันดับสอง ดังสมการที่ (13)

$$\ln MR_{\text{model}} = At^2 + Bt \tag{13}$$

ค่า A และ B ที่ได้จากการฟิตข้อมูลในสมการที่ (13) เป็นดังตารางที่ 4 พบว่า A และ B เป็นฟังก์ชันของมวล (กิโลกรัม) กับอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เมื่อนำข้อมูล A และ B ในตารางที่ 4 ไปแสดงกราฟความสัมพันธ์เทียบกับมวลและอุณหภูมิพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวที่เหมาะสมต่อการฟิตได้ด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ดังนั้นพารามิเตอร์ A และ B จึงถูกจำลองในรูปความสัมพันธ์ดังสมการที่ (14)

$$A = (a_1 \exp(a_2 m) + a_3) \exp\left(-\frac{a_4}{T}\right) \quad (14a)$$

$$a_1 = -0.2285, \quad a_2 = -0.4291, \quad a_3 = -0.0024, \\ a_4 = 488.2244, \quad b_1 = -0.0244, \quad b_2 = -0.0696, \\ b_3 = 50.4989$$

$$B = (b_1 \exp(b_2 m)) \exp\left(\frac{-b_3}{T}\right) \quad (14b)$$

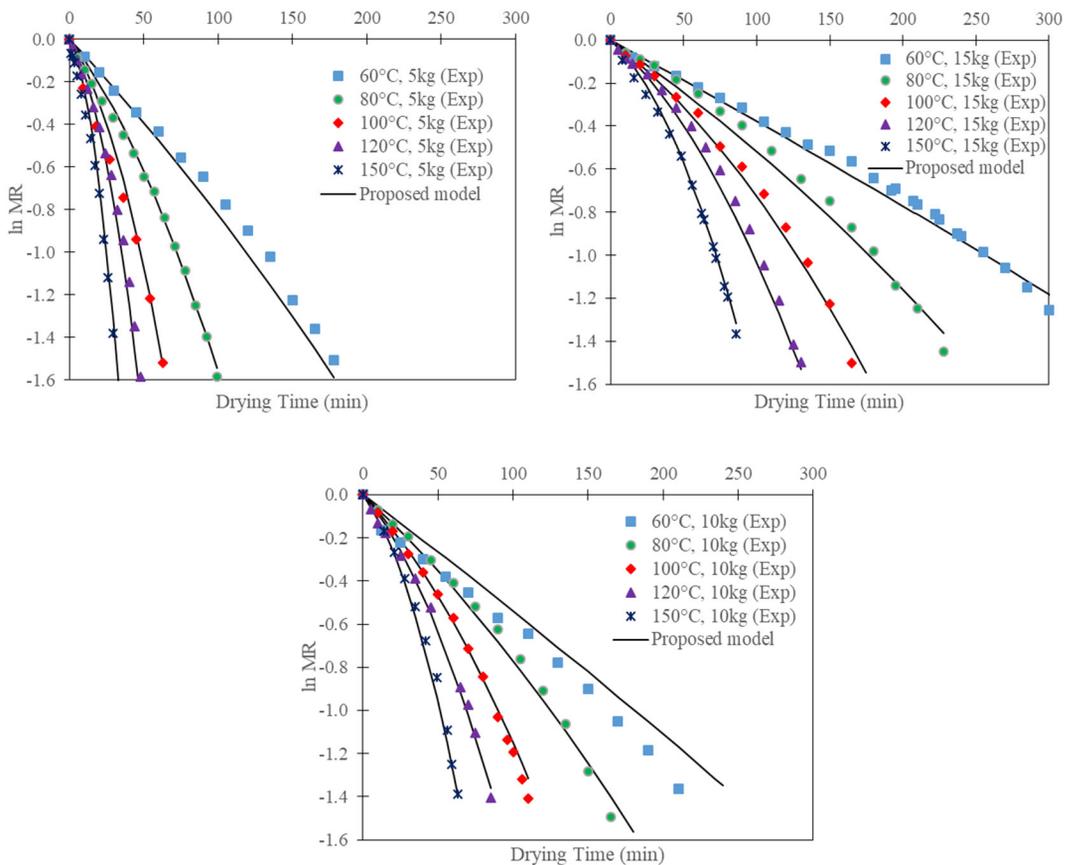
จากสมการที่ (11) จัดรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ (15) ดังนี้

โดยค่าคงที่แบบจำลองในสมการที่ (14) เป็นดังนี้

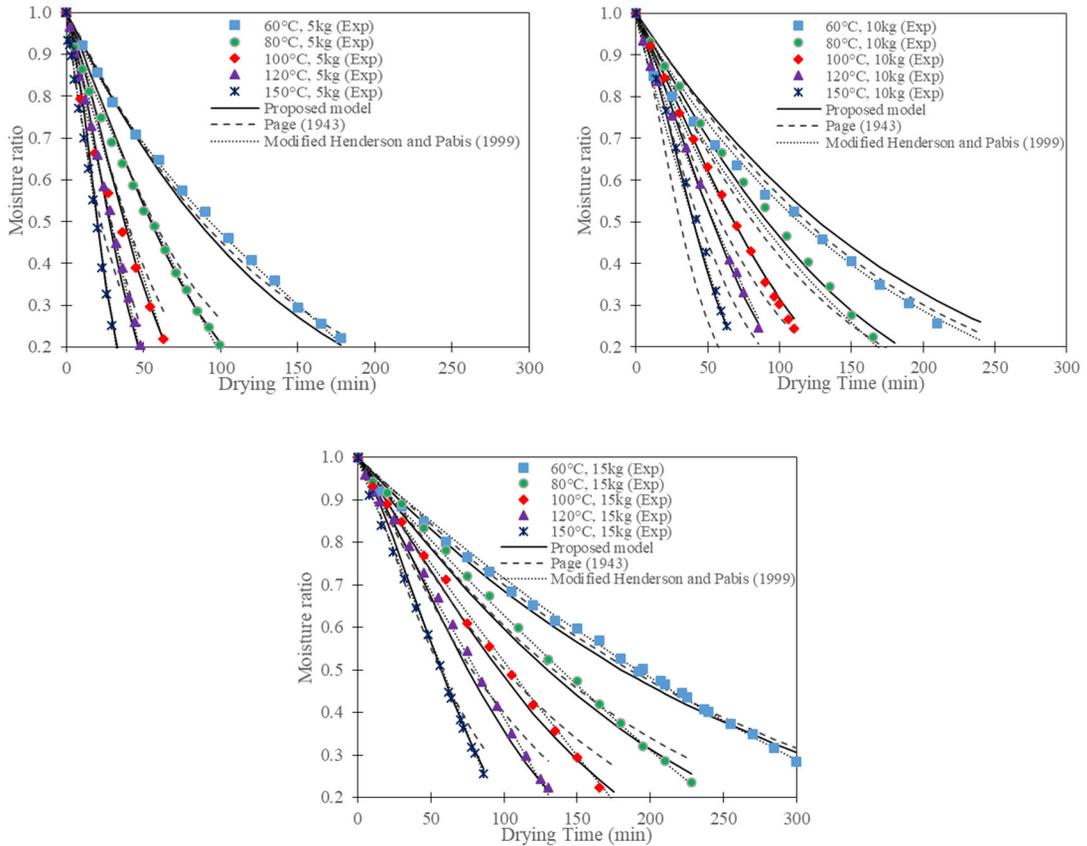
$$D_{eff} = \left(\ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \ln MR \right) \left(\frac{r_o^2}{\pi^2 t} \right) \quad (15)$$

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ A และ B ในสมการที่ (14)

T(°C)	m=5kg		m=10kg		m=15kg	
	A	B	A	B	A	B
60	-8.52×10^{-6}	-7.41×10^{-3}	-1.62×10^{-6}	-5.23×10^{-3}	-8.08×10^{-7}	-3.69×10^{-3}
80	-6.52×10^{-5}	-9.15×10^{-3}	-1.24×10^{-5}	-6.46×10^{-3}	-6.18×10^{-6}	-4.56×10^{-3}
100	-2.21×10^{-4}	-1.04×10^{-2}	-4.19×10^{-5}	-7.33×10^{-3}	-2.09×10^{-5}	-5.17×10^{-3}
120	-4.98×10^{-4}	-1.13×10^{-2}	-9.45×10^{-5}	-7.97×10^{-3}	-4.73×10^{-5}	-5.63×10^{-3}
150	-1.12×10^{-3}	-1.23×10^{-2}	-2.13×10^{-4}	-8.67×10^{-3}	-1.07×10^{-4}	-6.12×10^{-3}



รูปที่ 4 ลอการิทึมของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง



รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลการทำนายจากแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองอื่นและผลการทดลอง

เมื่อกำหนดค่าของ m , T , และ t ในสมการที่ (13), (14) สามารถหาค่าอัตราส่วนความชื้น ที่ $T=60, 80, 100, 120$ และ 150 องศาเซลเซียส ที่ $m=5, 10$ และ 15 กิโลกรัม ตามลำดับดังรูปที่ 5 ผลการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ (สมการที่ (13)-(14)) ใช้ค่าคงที่แบบจำลองเพียง 7 ตัว พบว่าให้ค่า RMSE และค่า χ^2 ต่ำสุดที่ 0.02935 และ 0.00089 ตามลำดับ ค่า r เท่ากับ 0.99421 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้จำนวนค่าคงที่แบบจำลองใกล้เคียงกันคือ Page (1943) (ตารางที่ 3) ซึ่งใช้ 8 ตัว พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอให้ความแม่นยำมากกว่า โดยให้ค่าแม่นยำเทียบเท่าแบบจำลอง Verma et al. (1985) ที่ใช้ค่าคงที่แบบจำลองถึง 12 ตัว นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Modified Henderson

and Pabis (1999) ซึ่งถือว่ามีค่าความแม่นยำสูงสุดในจำนวน 12 แบบจำลอง แต่มีการใช้ค่าคงที่แบบจำลองถึง 24 ตัว พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอ (ที่ใช้เพียง 7 ตัว) ให้ค่าการทำนายผลที่เทียบเท่ากันโดยให้ผลแตกต่างกันเฉลี่ยเพียงร้อยละ 1.8

4. สรุป

งานวิจัยนี้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่นหล่นอิสระ ตามเงื่อนไขการออกแบบเพื่อให้เป่าพ่นได้อย่างเสถียรและป้องกันการเกิดขอบเขตนิ่งของวัสดุ ผลการทดลองเครื่องอบแห้งพบว่าอุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นลดลงส่งผลให้เวลาอบแห้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นได้ศึกษาแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางที่

นิยมใช้ 12 แบบจำลอง เพื่อทำนายผลทดลองการอบแห้ง โดยใช้อุณหภูมิลมร้อน 60-150 องศาเซลเซียส มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5-15 กิโลกรัม และความเร็วลมร้อน 19 เมตรต่อวินาที โดยการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตัวแปรในแต่ละกรณี เมื่อพิจารณาทั้งอิทธิพลอุณหภูมิลมร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น พบว่าแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) เหมาะสมที่สุด

แบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ใช้ได้ครอบคลุมทั้งปัจจัยผลกระทบอุณหภูมิลมร้อน มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น และเวลาอบแห้ง ผลการจำลองพบว่ามีความแม่นยำสูง โดยให้ค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.02935 และค่า r เท่ากับ 0.99421 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้จำนวนค่าคงที่แบบจำลองใกล้เคียงกัน พบว่าให้ความแม่นยำในการทำนายผลสูงกว่าและเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีความแม่นยำสูงสุดในจำนวน 12 แบบจำลองที่นำมาศึกษา พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอให้ผลที่แตกต่างเฉลี่ยเพียงร้อยละ 1.8

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุนวิจัย เครื่องมือ และสถานที่ จงงานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Thongma, "Paddy Drying by Spouted Bed Technique for Industrial Scale," M.S. thesis, Dept., Energy Tech., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 1999.
- [2] P. Praneetpolkrang and K. Sathapornprasath, "Application of a Combined Jet Spouted Bed and Ultrasound Waves for Drying of Agricultural Products," *Srinakharinwirot Engineering Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 163-175, 2017.
- [3] S. Meesukchaosumran and T. Chitsomboon, "Effects of resting periods, air temperatures and air velocities on free-fall paddy dryer performances," *Suranaree Journal of Science and Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 11-26, Jan. 2018.
- [4] S. Khaengkarn, S. Meesukchaosumran and T. Chitsomboon, "Genetic algorithm for the selection of rough rice drying model for the free-fall paddy dryer," *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 63-75, 2011.
- [5] C. J. Lim and J. R. Grace, "Spouted bed hydrodynamics in a 0.91 m diameter vessel," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 65, no. 3, pp. 366-372, 1987.
- [6] N. Epstein and J. R. Grace, *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications*, 1st ed. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [7] M. J. San José, M. Olazar, R. Llamosas, M. A. Izquierdo and J. Bilbao, "Study of dead zone and spout diameter in shallow spouted beds of cylindrical geometry," *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*, vol. 64, no. 3, pp. 353-359, 1996.
- [8] S. Jongjam and U. Teeboonma, "Murdannia Lorifomis Drying Using Infrared-vacuum Technique," *Journal of Science &*

- Technology, Ubon Ratchathani University*, vol. 12, no. 3, pp. 75-85, 2010.
- [9] O. A. Aregbesola, B. S. Ogunsina, A. E. Sofolahan and N. N. Chime, "Mathematical modeling of thin layer drying characteristics of dika (*Irvingia gabonensis*) nuts and kernels," *Nigerian Food Journal*, vol. 33, no. 1, pp. 83-89, Jun. 2015.
- [10] I. Alibas, "Selection of the Best Suitable Thin-Layer Drying Mathematical Model for Vacuum Dried Red Chili Pepper," *Journal of Biological and Environmental Sciences*, vol. 6, pp. 161-170, Jan. 2012.
- [11] H. M. THAO and A NOOMHORM, "Modeling and effects of various drying methods on sweet potato starch properties," *Walailak Journal of Science and Technology*, vol. 8, pp. 139-158, 2011.
- [12] N. Kumar, B. C. Sarkar and H. K. Sharma, "Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace," *Journal of food science and technology*, vol. 49, no. 1, pp. 33-41, 2012.
- [13] J. Zhang, P. Ma, X. Zhang, B. Wang, J. Wu and X. Xing, "Isothermal drying kinetics of paddy using thermogravimetric analysis," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 134, no. 3, pp. 2359-2365, Dec. 2018.
- [14] S. Mujaffar and S. John, "Thin-layer drying behavior of West Indian lemongrass (*Cymbopogon citratus*) leaves," *Food Science & Nutrition*, Report no. 4, p. 1085, 2018.
- [15] C. L. Hii, C. L. Law and M. Cloke, "Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa," *Journal of Food Engineering*, vol. 90, no. 2, pp. 191-198, Jan. 2009.
- [16] M. Özdemir and Y. Onur Devres, "The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting," *Journal of Food Engineering*, vol. 42, no. 4, pp. 225-233, Jan. 1999.
- [17] G. K. Jayatunga and B. M. W. P. K. Amarasinghe, "Drying kinetics, quality and moisture diffusivity of spouted bed dried Sri Lankan black pepper," *Journal of Food Engineering*, vol. 263, pp. 38-45, 2019.
- [18] O. Hacıhafizoğlu, A. Cihan, K. Kahveci and A. G. B. de Lima, "A liquid diffusion model for thin-layer drying of rough rice," *European Food Research and Technology*, vol. 226, no. 4, pp. 787-793, 2008.
- [19] L. N. Kahyaoglu, S. Sahin and G. Sumnu, "Spouted bed and microwave-assisted spouted bed drying of parboiled wheat," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 90, no. 2, pp. 301-308, 2012.
- [20] M. Khanali, A. Banisharif and S. Rafiee, "Modeling of moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in fluidized bed drying of rough rice," *Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 11, pp. 2541-2549, 2016.
- [21] D. I. Onwude, N. Hashim, R. B. Janius, N. M. Nawi and K. Abdan, "Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review," *Comprehensive Reviews in Food*

Science and Food Safety, vol. 15, no. 3, pp. 599-618, 2016.

[22] Z. Erbay and F. Icier, "A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and

Experimental Results," *Critical reviews in food science and nutrition*, vol. 50, pp. 441-464, 2010.