

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดของข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูป
Mathematical modeling of fluidized bed drying
of instant germinated brown rice

ชนาพร สรวงเทพ¹ และ เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

*ติดต่อ: cheevitsopon@gmail.com, +66(0) 2-329-8356-8

บทคัดย่อ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดของข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูปมีความจำเป็นสำหรับการออกแบบ การควบคุม และการทำให้กระบวนการอบแห้งข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูปที่ดีที่สุด ทดลองอบแห้งตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นน้อยกว่า 12% d.b. นำข้อมูลอัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 12 รูปแบบ เพื่ออธิบายการอบแห้งข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูป ทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ค่าโคสแควร์ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของแต่ละแบบจำลอง ผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าระหว่าง 2.73×10^{-7} ถึง 4.63×10^{-7} m^2/s ที่ช่วงอุณหภูมิอบแห้งเป็น 120-160°C อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีความสัมพันธ์แบบสมการอาร์เรเนียส พลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้นมีค่าเท่ากับ 18.77 kJ/mol แบบจำลองของ Modified Henderson and Pabis สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดของข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูปได้ดีที่สุดในช่วงของอุณหภูมิอบแห้งที่ทำการศึกษา

คำหลัก: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, การอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด, ข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูป

Abstract

The kinetic study of a fluidized bed drying of instant germinated brown rice (IGBR) are needed in design, control and optimization of the IGBR drying process. Cooked germinated brown rice samples were dried using a fluidized bed dryer at the temperatures of 120, 140, and 160°C until its moisture reached 12% dry basis (d.b.). The moisture ratio values of samples were fitted to the twelve different mathematical drying models for describing IGBR drying. The models were compared with their coefficients of determination, the reduced chi-square, root mean square error, and the mean relative percent deviation. The results indicated that the effective diffusivity values are in the range of 2.73×10^{-7} to 4.63×10^{-7} m^2/s at drying temperatures of 120-160°C. The effect of drying temperature on effective diffusivity of dried IGBR was found to be an Arrhenius-type relationship. The activation energy for moisture diffusion was 18.77 kJ/mol. The Modified Henderson and Pabis model was the best model for describing behavior of the IGBR drying using a fluidized bed technique in the studied temperature range.

Keywords: mathematical modeling, fluidized bed drying, instant germinated brown rice

1. บทนำ

ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์และมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าข้าวกล้อง ซึ่งเป็นการนำข้าวกล้องมาผ่านกระบวนการงอก โดยการนำข้าวกล้องแช่น้ำที่มีการควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 12-48 ชั่วโมง [1] น้ำไปกระตุ้นเอนไซม์ในเมล็ดข้าวกล้องทำให้เกิดการย่อยสลายของสารอาหารในเมล็ดข้าวได้เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง รวมทั้งยังพบการสะสมสารเคมีสำคัญต่างๆ โดยเฉพาะสารแกมมาอะมิโนบิวทริกแอซิด (Gamma-aminobutyric acid) หรือที่รู้จักกันว่า สารกาบา (GABA) ซึ่งพบว่าข้าวกล้องงอกมีสารกาบามากกว่าข้าวกล้องปกติถึง 10-15 เท่า สารกาบามีบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาทในระบบประสาทส่วนกลาง ประเภทสารยับยั้งโดยทำหน้าที่รักษาสมดุลในสมอง ทำให้เกิดการผ่อนคลายและนอนหลับสบาย อีกทั้งช่วยป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ และช่วยลดการเกิดโรคความดันโลหิตสูงและยับยั้งการเกิดโรคมะเร็งได้อีกด้วย [2]

ข้าวกล้องสำเร็จรูป (Instant rice) เป็นผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีวิธีการเตรียมรับประทานได้สะดวก และใช้ระยะเวลาสั้น โดยการเติมน้ำร้อน หรือเติมน้ำและให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟเพื่อให้เกิดการคืนรูป [3] เหมาะกับรูปแบบวิถีชีวิตอันเร่งรีบของคนในสังคมเมืองในปัจจุบันซึ่งมีเวลาน้อยในการเตรียมอาหาร

ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป (Instant germinated brown rice) เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งของข้าวกล้องงอก การผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน คือ การทำข้าวกล้องงอก การทำข้าวกล้องงอกหุงสุก และการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ทำให้เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานขึ้น โดยการลดความชื้นหรือปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์ซึ่งมีผลต่อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียของอาหาร ทำให้ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเบดเหมาะสำหรับใช้อบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก และมีความชื้นสูงได้อย่างรวดเร็ว ทั้งถึงและสม่ำเสมอภายในระยะเวลาสั้น เนื่องจากตัวกลางในการอบแห้งกับผลิตภัณฑ์สามารถสัมผัสกันได้เป็นอย่างดี [4] ได้มีการศึกษาอิทธิพลของตัวกลางในการอบแห้งแบบฟลูอิดเบดต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกเมื่อนำมาคืนรูปพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมลร้อนอบแห้งทำให้ค่าความชื้น

และค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น [5] และได้มีการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้งแบบฟลูอิดเบดต่อการหุงสุกของข้าวเหนียวกึ่งสำเร็จรูปและเมื่อนำมาคืนรูปผลต่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้นแต่ค่าความเหนียวลดลงที่อุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ สมการทฤษฎี (Theoretical) สมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical) และสมการจากการทดลอง (Empirical) โดยแบบแรกคำนวณจากความต้านทานภายในการส่งผ่านความชื้น ในขณะที่อีก 2 แบบพิจารณาจากความต้านทานภายนอกในการส่งผ่านความชื้นระหว่างผลิตภัณฑ์และตัวกลางอบแห้ง ซึ่งถูกพัฒนามาจากกฎข้อที่สองของ Fick ในการแพร่ของน้ำซึ่งเป็นสมการทางทฤษฎี ได้มีนักวิจัยหลายท่านที่ประสบความสำเร็จในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้งโดยใช้กฎข้อที่สองของ Fick ในอาหารประเภทต่างๆ ได้แก่ กุ้ง [6] ถั่วเหลือง [7] และทุเรียนแผ่น [8] เป็นต้น รวมทั้งสมการกึ่งทฤษฎีและสมการจากการทดลองถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่ออธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน ได้แก่ การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบฟลูอิดเบดของเมล็ดน้ำมันมะพร้าว [9] การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งของข้าวเปลือก [10] ใบกระวาน [11] มะเขือม่วง [12] และกากแอปเปิล [13] เป็นต้น ซึ่งมีประโยชน์ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการอธิบายกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดเบดของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และพลังงานกระตุ้นระหว่างการอบแห้ง รวมทั้งผลของอุณหภูมิมลร้อนที่ใช้ในการอบแห้งต่อค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมข้าวกล้อง

ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (KDML 105) นำมาผ่านการกะเทาะเปลือกออกจากเมล็ดด้วยเครื่อง

กะเทาะเปลือกเพื่อให้ได้ข้าวกล้อง และคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาด

2.2 การเตรียมข้าวกล้องงอก

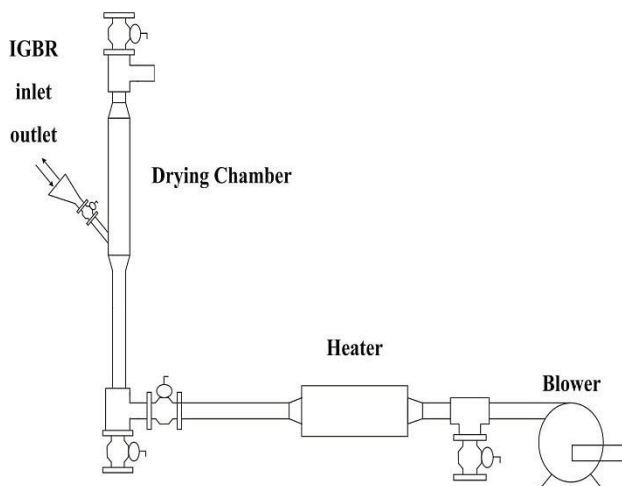
ข้าวกล้องจำนวน 500 g แช่น้ำในอ่างที่ 35°C เป็นเวลา 4 h และเพาะงอกโดยการบ่มที่อุณหภูมิ 35°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% เป็นเวลา 20 h ได้เป็นข้าวกล้องงอก โดยมีการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 5 h [14]

2.3 การเตรียมข้าวกล้องงอกหุงสุก

ข้าวกล้องงอกจำนวน 500 g นำมาหุงสุกด้วยเครื่องนึ่งไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100±2°C เป็นเวลา 5 min แล้วนำมาแช่น้ำที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 7 min และนำมานึ่งด้วยเครื่องนึ่งไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100±2°C เป็นเวลา 5 min อีกครั้ง แล้วนำมาพักที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 min ดัดแปลงจาก [15]

2.4 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยลมร้อน

ระบบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยลมร้อน แสดงดังรูปที่ 1 ระบบประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงกระบอกสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 cm สูง 120 cm ฮีตเตอร์ไฟฟ้า 15 kW พัดลมแบบใบพัดโค้งหลัง ขนาดมอเตอร์ 2.2 kW และระบบท่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 cm และหุ้มฉนวนความร้อนแบบแร่ใยหิน



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยลมร้อน

2.5 การอบแห้งข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยลมร้อน

นำข้าวกล้องงอกหุงสุก 300 g มาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิลมร้อนอบแห้งเท่ากับ 120, 140 และ 160°C ที่ความเร็วลมที่ทำ

ให้เกิดพฤติกรรมการลอยตัวของเมล็ดข้าวแบบฟลูอิดไรซ์เท่ากับ 3.5 m/s ความสูงเบด 6.5 cm สุ่มตัวอย่างเพื่อหาปริมาณความชื้นที่ลดลงทุก ๆ 1 min จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นประมาณ 12% d.b. ซึ่งหาความชื้นของตัวอย่างโดยการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 105°C เป็นเวลา 24 h ดัดแปลงจาก [16]

2.6 สมการการอบแห้ง

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดของข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูป สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งในรูปของสมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical) และสมการจากการทดลอง (Empirical) เพื่อหาสมการที่ดีที่สุด จากตารางที่ 1 อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คำนวณได้จาก

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

เมื่อ M_t , M_0 และ M_e คือความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล (% d.b.) ตามลำดับ

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

No.	Model name	Model	[Reference]
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	[17]
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[18]
3	Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$	[19]
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[20]
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[21]
6	Two term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	[22]
7	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	[23]
8	Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	[24]
9	Two term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	[25]
10	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$	[26]
11	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[27]
12	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[28]

2.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การหาค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการอบแห้งโดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยโปรแกรม SPSS เงื่อนไขการพิจารณาความสามารถในการทำนายของแบบจำลองคือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่าไคสแควร์ (The reduced chi-square, χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Mean relative percent deviation, EMD) โดยมีค่า R^2 สูง และมีค่า χ^2 , RMSE และ EMD ต่ำ ซึ่งคำนวณได้จาก

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

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

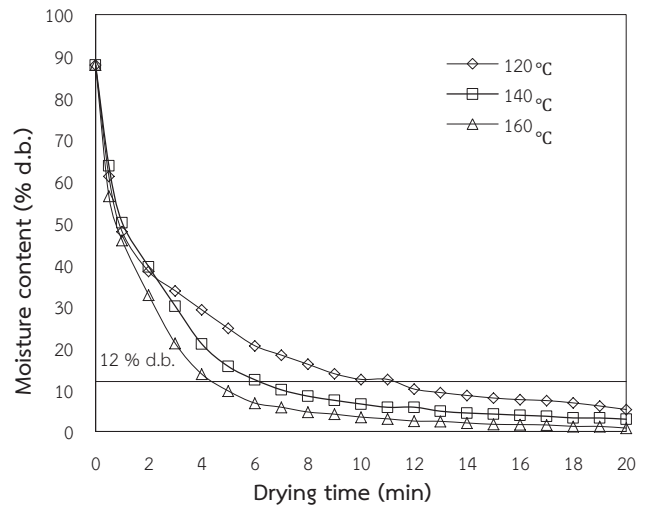
$$EMD = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|MR_{exp,i} - MR_{pre,i}|}{MR_{exp,i}} \quad (4)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ เป็นค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง $MR_{pre,i}$ เป็นค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ N คือ จำนวนข้อมูลการทดลอง และ Z คือ จำนวนตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

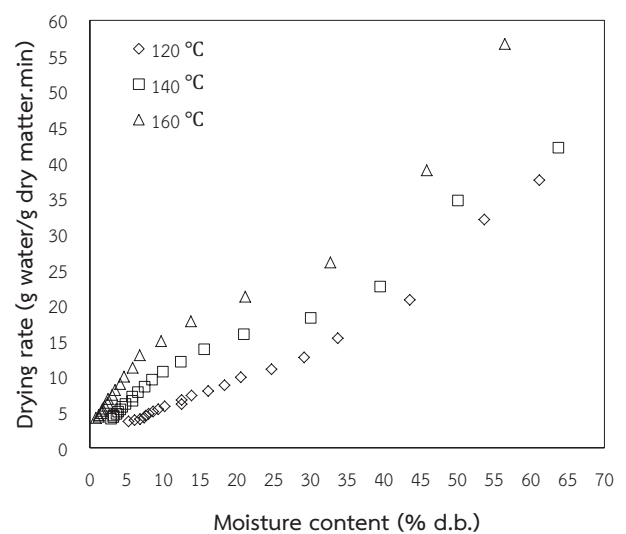
3.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง

ข้าวกล้องงอกหุงสุกมีความชื้นเริ่มต้น 87.92 ± 0.07 % d.b. ถูกอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิร้อน 120, 140 และ 160°C การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นกับเวลาของการอบแห้งแสดงอยู่ในรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาของการอบแห้ง และเมื่ออุณหภูมิร้อนเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง เวลาที่ใช้ในการลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ 12% d.b. เท่ากับ 11.22, 6.18 และ 4.44 min ที่อุณหภูมิร้อน 120, 140 และ 160°C ตามลำดับ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งกับปริมาณความชื้นแสดงในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าระหว่างการอบแห้งความชื้นและอัตราการอบแห้งลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) เป็นช่วงที่อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเมล็ดข้าวที่แพร่มาที่ผิวหน้าช้ากว่าอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าทำให้อัตราการอบแห้งลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิร้อนทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดของข้าวกล้อง [29] และข้าวกล้องงอก [4]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้น

3.2 สัมประสิทธิ์การแพร่และพลังงานกระตุ้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมล็ดข้าวคำนวณโดยใช้กฎข้อที่สองของ Fick ดังสมการ (5) โดยสมมติให้เมล็ดข้าวกลิ้งงอกแห้งเป็นทรงกลม

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D_{eff}\pi^2}{R_e^2} t\right) \quad (5)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s), t คือเวลาในการอบแห้ง (วินาที) และ R_e คือ รัศมีของเมล็ดข้าว (m) จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดของข้าวกลิ้งงอกแห้งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิลมร้อน 120 ถึง 160°C มีค่าระหว่าง 2.73×10^{-7} ถึง $4.63 \times 10^{-7} m^2/s$ โดยที่สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนเนื่องจากอุณหภูมิลมร้อนเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของเมล็ดข้าว

พลังงานกระตุ้นคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมล็ดข้าวกับอุณหภูมิลมร้อน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Arrhenius ดังสมการ (6)

$$D_{eff} = D_{\infty} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (6)$$

เมื่อ D_{∞} คือ ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s), E_a คือ พลังงานกระตุ้น (J/mol), R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ ($8.3145 J/mol.K$) และ T_a คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) พลังงานกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $1/T_a$ ซึ่งความสัมพันธ์ตรงสามารถหาพลังงานกระตุ้นได้จาก E_a/R พลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 18.77 kJ/mol

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

ข้อมูลของปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดลองการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันนำมาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 12 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดด้วยลมร้อนของข้าวกลิ้งงอกแห้งสำเร็จรูป ดังตารางที่ 1

โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งพิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า χ^2 , RMSE และ EMD ต่ำที่สุด ดังตารางที่ 2 พบว่าแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ทั้งหมดมี ค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.5304 ถึง 0.9994 มีค่า χ^2 อยู่ระหว่าง 4.79×10^{-5} ถึง 3.22×10^{-7} มีค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.0059 ถึง 0.1711 และมีค่า EMD อยู่ระหว่าง 2.87 ถึง 347.10 ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis มีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า χ^2 , RMSE และค่า EMD ต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Modified Henderson and Pabis อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดด้วยลมร้อนของข้าวกลิ้งงอกแห้งสำเร็จรูปได้ดีที่สุด

การหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนกับค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis คือ a, k, b, g, c และ h ได้จากการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ ดังสมการ (7) ถึง (12)

$$a = 3.39 \times 10^{-4}T^2 - 0.1013T + 8.2666 \quad (7)$$

$$k = -1.28 \times 10^{-3}T^2 + 0.3882T - 28.9768 \quad (8)$$

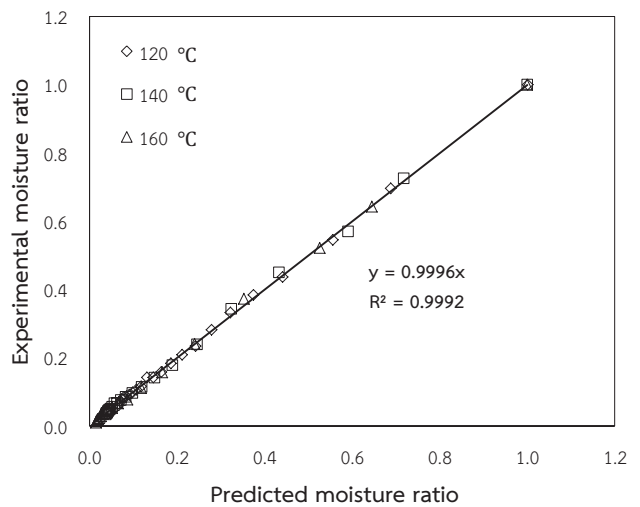
$$b = 4.75 \times 10^{-4}T^2 - 0.1424T + 10.8269 \quad (9)$$

$$g = 6.44 \times 10^{-2}T^2 - 16.5382T + 1055.8827 \quad (10)$$

$$c = -1.03 \times 10^{-3}T^2 - 0.3084T - 22.9187 \quad (11)$$

$$h = -8.90 \times 10^{-4}T^2 + 0.2687T - 20.1393 \quad (12)$$

ซึ่งสมการนี้สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าอัตราส่วนความชื้นของข้าวกลิ้งงอกแห้งสำเร็จรูปในเวลาใดๆ ระหว่างกระบวนการอบแห้งภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขของการทดลองซึ่งทำให้ได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับการทำนาย

ตารางที่ 2 ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบฟลูอิดไอซ์เบด

No.	T(°C)	Model constants and coefficients	R ²	χ^2	RMSE	EMD
1	120	k = 0.2692	0.8492	8.52×10^{-3}	0.0902	50.24
	140	k = 0.3682	0.9610	2.64×10^{-3}	0.0502	53.98
	160	k = 0.5214	0.9732	1.75×10^{-3}	0.0409	64.56
2	120	k = 0.5548 ; n = 0.5344	0.9981	1.15×10^{-4}	0.0102	3.58
	140	k = 0.5367 ; n = 0.6803	0.9964	2.57×10^{-4}	0.0153	17.97
	160	k = 0.6679 ; n = 0.6979	0.9976	1.67×10^{-4}	0.0123	23.65
3	120	k = 0.3321 ; n = 0.5344	0.9981	2.25×10^{-4}	0.0102	3.58
	140	k = 0.4006 ; n = 0.6803	0.9964	2.88×10^{-4}	0.0162	19.73
	160	k = 0.5608 ; n = 0.6979	0.9976	1.67×10^{-4}	0.0123	23.65
4	120	a = 0.7933 ; k = 0.1929	0.9199	4.75×10^{-3}	0.0657	31.12
	140	a = 0.8987 ; k = 0.3187	0.9729	1.92×10^{-3}	0.0418	45.99
	160	a = 0.9137 ; k = 0.4606	0.9807	1.32×10^{-3}	0.0347	8.26
5	120	a = 0.7760 ; k = 0.3396 ; c = 0.0995	0.9620	2.37×10^{-3}	0.0452	17.19
	140	a = 0.8819 ; k = 0.4038 ; c = 0.0510	0.9900	7.49×10^{-4}	0.0254	14.09
	160	a = 0.9030 ; k = 0.5233 ; c = 0.0285	0.9879	8.76×10^{-4}	0.0275	35.19
6	120	a = 0.4787 ; k ₀ = 1.6790 ; b = 0.5205 ; k ₁ = 0.1207	0.9972	1.82×10^{-4}	0.0122	8.26
	140	a = 0.5841 ; k ₀ = 0.7805 ; b = 0.3913 ; k ₁ = 0.1553	0.9939	4.82×10^{-4}	0.0199	16.31
	160	a = 0.2705 ; k ₀ = 4.2361 ; b = 0.7294 ; k ₁ = 0.3536	0.9967	2.49×10^{-4}	0.0143	43.88
7	120	a = 0.4043 ; k = 2.1624 ; b = 0.5426 ; g = 0.1759 ; c = 0.0545 ; h = 0.031	0.9994	4.79×10^{-5}	0.0059	2.87
	140	a = 0.7388 ; k = 0.3357 ; b = 0.2037 ; g = 3.4537 ; c = 0.0581 ; h = 0.0228	0.9989	9.78×10^{-5}	0.0084	4.58
	160	a = 0.7490 ; k = 0.4348 ; b = 0.2073 ; g = 59.2975 ; c = 0.0437 ; h = 0.0543	0.9994	4.87×10^{-5}	0.0060	8.63
8	120	a = 0.4793 ; k = 1.6823 ; g = 0.1207	0.9972	1.72×10^{-4}	0.0122	8.26
	140	a = -0.8669 ; k = 0.3682 ; g = 0.3682	0.9610	2.91×10^{-3}	0.0502	53.98
	160	a = -1.5549 ; k = 0.5214 ; g = 0.5214	0.9732	1.93×10^{-3}	0.0409	64.56
9	120	a = 0.2111 ; k = 1.0025	0.9130	5.16×10^{-3}	0.0685	38.25
	140	a = 0.2150 ; k = 1.3467	0.9825	1.24×10^{-3}	0.0336	41.52
	160	a = 0.1981 ; k = 2.0941	0.9896	7.13×10^{-4}	0.0255	53.12
10	120	a = 0.4793 ; k = 1.6823 ; b = 0.0717	0.9972	1.72×10^{-4}	0.0122	8.24
	140	a = 0.4887 ; k = 1.0980 ; b = 0.1705	0.9937	4.74×10^{-4}	0.0202	22.14
	160	a = 0.2706 ; k = 4.2371 ; b = 0.0834	0.9967	2.36×10^{-4}	0.0143	43.84
11	120	a = 1.0003 ; k = 0.5570 ; n = 0.5268 ; b = -0.0003	0.9981	1.25×10^{-4}	0.0101	8.24
	140	a = 0.9962 ; k = 0.5198 ; n = 0.7320 ; b = 0.0014	0.9981	1.49×10^{-4}	0.0110	5.61
	160	a = 0.9946 ; k = 0.6583 ; n = 0.7210 ; b = 0.0006	0.9980	1.53×10^{-4}	0.0112	10.98
12	120	a = -0.1467 ; b = 0.0054	0.6386	2.14×10^{-2}	0.1396	63.55
	140	a = -0.1621 ; b = 0.0061	0.6921	2.19×10^{-2}	0.1411	126.37
	160	a = -0.1735 ; b = 0.0067	0.5304	3.22×10^{-2}	0.1711	347.10

ในการทวนสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis ดังรูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิดไอซ์เบดด้วยลมร้อนของข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูปพบว่าใกล้เคียงกันมีค่า R² เท่ากับ 0.9992 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำนายอัตราส่วนความชื้นสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองตลอดกระบวนการอบแห้งทำให้

ยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis เหมาะสมในอธิบายพฤติกรรม การอบแห้งแบบฟลูอิดไอซ์เบดด้วยลมร้อนของข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูป

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งแบบฟลูอิดไอซ์เบดของข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูปพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน และอัตราการทำให้แห้งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน ที่

อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C สัมประสิทธิ์การแพร่ของการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยลมร้อนมีค่าระหว่าง 2.73×10^{-7} ถึง 4.63×10^{-7} m^2/s ที่อุณหภูมิลมร้อนระหว่าง 120 ถึง 160°C ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในตัวอย่างขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการอบแห้ง และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ด้วยสมการ Arrhenius และพลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้นมีค่าเท่ากับ 18.77 kJ/mol แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยลมร้อนของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปได้ดีที่สุด

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] งามชื่น คงเสี. (2546). ข้าวและผลิตภัณฑ์ข้าว. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [2] Komatsuzaki, N., Tsukahara, K., Toyoshima, H., Suzuki, T., Shimizu, N. and Kimura, T. (2007). Effect of soaking and gaseous treatment on GABA content in germinated brown rice. *Journal of Food Engineering*, 78, pp.556–560.
- [3] ดร.รุณี ปันคำ, เบ็ญจรัก วายุภาพ, และวราพร ลักษณะลม้าย. (2552). กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุกเร็ว. *การประชุมนำเสนอผลงานระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยรังสิต*.
- [4] Srisang, N., Varayanond, W., Soponronarit, S. and Prachayawarakorn, S. (2011). Effects of heating media and operating conditions on drying kinetics and quality of germinated brown rice. *Journal of Food Engineering*, 107, pp. 385-392.
- [5] Jaiboon, P., Prachayawarakorn, S., Devahastin, S., Tungtrakul, P. and Soponronarit, S. (2011). Effect of high-temperature fluidized-bed drying on cooking, textural and digestive properties of waxy rice. *Journal of Food Engineering*, 105, pp. 89-97
- [6] Prachayawarakorn, S., Soponronarit, S., Wetchacama, S. and Jaisut, D. (2002). Desorption isotherms and drying characteristics of shrimp in superheated steam and hot air, *Drying Technology*, 20, pp. 669-698
- [7] Prachayawarakorn, S., Prachayawasin, P. and Soponronarit, S. (2006). Heating process of soybean using hot air and superheated steam fluidized-bed drying, *LWT-Food Science and Technology*, 39, pp. 770-778
- [8] Jamradloedluk, J., Nathakarakakule, A., Soponronarit, S. and Prachayawarakorn, S. (2007). Influences of drying medium and temperature on drying kinetics and quality attributes of durian chip, *Journal of Food Engineering*, 78, pp 198-205.
- [9] Cheevitsopon, E. and Noomhorm, A. (2011). Effects of parboiling and fluidized bed drying on the physicochemical properties of germinated brown rice. *International Journal of Food Science and Technology*, 46, pp. 2498-2504.
- [10] Perea-Flores, M., Garibay-Febles, V., Chanona-Pérez, J., Calderón-Domínguez, G., Méndez-Méndez, J., Palacios-González, E. and Gutiérrez-López G. (2012). Mathematical modelling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. *Industrial Crops and Products*, 38, pp. 64–71
- [11] Hacıhafızoglu, O., Cihan A. and Kahveci, K. (2008). Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice. *Food and Bioprocess Technology*, 86, pp. 268–275
- [12] Gunhan, T., Demir, V., Hancıoğlu, E. and Hepbaslı, A. (2005). Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46, pp. 1667–1679
- [13] Ertekin, C. and Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, pp. 349-359
- [14] Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J. and Hu, X. (2007). Mathematical

modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 40(1), pp. 39–46

[15] Sripinyowanich, J. (2011). Application of microwave-vibro-fluidized drying in production of instant rice. *Master of Science in Food Engineering and Bioprocess Technology* Asian Institute of Technology, Thailand.

[16] AOAC, (2000). *Official Methods of Analysis of AOAC International*, 17th ed., AOAC International, Gaithersburg, Maryland.

[17] Lui, Q. and Bakker-Arkema, F. (1997). Stochastic modelling of grain drying. Part 2: Model development. *J Agricult Eng Res*, 66, pp. 275–280.

[18] Agrawal, Y. and Singh, R. (1997). Thin layer drying studies on short grain rough rice. *ASAE*, pp. 3531

[19] White, G., Ross, I. and Ponekert, R. (1981). Fully exposed drying of popcorn. *Trans ASAE*, 24, pp. 466–468.

[20] Chhinnan, M. (1984). Evaluation of few selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans. *Trans ASAE*, 27(2), pp. 610–615.

[21] Yaldiz, O. and Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying of some different vegetables. *Drying Technology*, 19(3), pp. 583–596.

[22] Rahman, M., Perera, C. and Theband, C. (1998) Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Res Int*, 30, pp. 485–491.

[23] Karathanos, V. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39, pp. 337–344.

[24] Verma, L., Bucklin, R., Endan, J. and Wratten, F. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Trans ASAE*, 28, pp. 296–301.

[25] Sharaf-Elden, Y., Blaisdell, J. and Hamdy, M. (1980). A model for ear corn drying. *Trans ASAE*, 23, pp. 1261–1265.

[26] Kassem, A. (1998). Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In: *13th international congress on agricultural engineering*, 6, 2–6 February, Morocco,

[27] Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z. (2002) A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20(7), pp. 1503–13.

[28] Wang, C. and Singh, R. (1978) A single layer drying equation for rough rice. *ASAE*, pp. 3001

[29] Rattanamechaiskul, C., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. (2014). Glycemic response to brown rice treated by different drying media. *Journal of Food Engineering*, 144, pp. 48-55.