

การจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกหนึ่งในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำด้วยวิธี พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับวิธีเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่อง

ปฏิวดี คมวชิรกุล^{1*}, สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา², ธนิต สวัสดิ์เสวี³, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์¹

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถนนประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

ผู้เขียนติดต่อ: ปฏิวดี คมวชิรกุล E-mail: pati_sdt@hotmail.com

บทคัดย่อ

แม้จะมีงานวิจัยในอดีตที่แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแบบกระแสน้ำ เป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกหนึ่ง แต่การอบแห้งเพียงขั้นตอนเดียวไม่เพียงพอสำหรับข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกหนึ่งในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำแบบหลายขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยเครื่องอบแห้งทั้งในช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง ทั้งนี้อาศัยวิธีการจำลองแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับวิธีเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่องในการจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกหนึ่งในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำเป็นจำนวน 7 รอบ ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 150, 170 และ 190°C อัตราการป้อนข้าวเปลือกหนึ่ง 110 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วอากาศเข้า 25 เมตรต่อวินาที และระยะห่างการชน 5 เซนติเมตร โดยในแต่ละรอบการอบแห้งจะมีการพักเมล็ดข้าวในที่อบอากาศเป็นระยะเวลา 4 นาที จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายผลค่าความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกหนึ่งได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยผลอัตราการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกหนึ่งขึ้นอยู่กับทั้งอุณหภูมิอากาศร้อนและจำนวนรอบการอบแห้ง

คำสำคัญ: พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับวิธีเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่อง, การอบแห้งแบบรวดเร็ว, การถ่ายโอนความร้อนและมวล, การอบแห้งแบบกระแสน้ำ

CFD-DEM simulation of parboiled paddy drying in an impinging stream dryer

Patiwat Khomwachirakul^{1*}, Sakamon Devahastin², Thanit Swasdisevi³, Somchart Soponronnarit¹

¹Division of Energy Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha u-tid Road, Tungkrui, Bangkok 10140.

²Advanced Food Processing Research Laboratory, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha u-tid Road, Tungkrui, Bangkok 10140.

³Division of Thermal Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha u-tid Road, Tungkrui, Bangkok 10140.

Corresponding author: Patiwat Khomwachirakul. E-mail: pati_sdt@hotmail.com

Abstract

Although previous research has been shown that impinging stream drying (ISD) can be an attractive alternative for parboiled paddy drying, single stage ISD is not adequate due to the higher moisture nature of paddy. The aim of this study was to investigate the simulation of a multi-stage drying of parboiled paddy in an impinging stream dryer during the constant and falling drying rate periods. Computational fluid dynamics with the incorporation of the discrete element method (CFD-DEM) was used to simulate the drying of parboiled paddy in an impinging stream dryer during seven cycles of ISD at inlet air temperatures of 150, 170 and 190 °C; parboiled paddy feed rate of 110 kg_{dry paddy}/h; inlet air velocity of 25 m/s and impinging distance of 5 cm. During each cycle the paddy was tempered for 4 min, after which the paddy was again fed back into the dryer. The results showed that the model gave predictions that were in good agreement with the experimental mean parboiled paddy moisture content and temperature data. The simulated results revealed that the moisture reduction rate of the parboiled paddy depended both on the inlet drying air temperature and number of drying cycles.

Keywords: CFD-DEM, Flash drying, Heat and mass transfer, Impinging stream drying.

1. บทนำ

เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ (Impinging stream dryer, ISD) เป็นเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับการอบแห้งวัสดุอนุภาคที่มีความชื้น

ที่ผิวสูง (Kudra and Mujumdar, 1989 and 2007). มีหลักการพื้นฐานคือ การนำกระแสของไหลสองกระแสหรือมากกว่า ซึ่งมีอุณหภูมิและความเร็วสูงโดยมีทิศทางตรงกันข้ามมาชนกัน สำหรับ

วัสดุอนุภาคที่ต้องการจะอบแห้งสามารถป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งไปพร้อมกับกระแสของไหลกระแสใดกระแสหนึ่งหรือทุกกระแสของไหลก็ได้ ซึ่งในบริเวณการชนมีความปั่นป่วนสูง ทำให้เกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในอัตราที่สูง ดังนั้นความชื้นของอนุภาคจึงระเหยออกไปอย่างรวดเร็วส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง

เนื่องจากพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำมีความซับซ้อน ดังนั้นแบบจำลองการไหลจึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งในระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำ ซึ่งที่ผ่านมา Khomwachirakul et al. (2016) ได้ศึกษาคุณลักษณะการไหลและการอบแห้งอนุภาคความชื้นสูงในระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำ ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับวิธีเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่อง (CFD-DEM) โดยศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า ความเร็วของอากาศร้อน อัตราการป้อนวัสดุอนุภาคและระยะห่างการชนที่มีผลต่อคุณลักษณะของการอบแห้ง จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง CFD-DEM สามารถทำนายค่าความชื้นและเวลาที่อนุภาคอยู่ในระบบอบแห้งได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง อย่างไรก็ตามในการศึกษาของ Khomwachirakul et al. (2016) ที่ผ่านมามุ่งเน้นศึกษาเฉพาะการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวเท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอเมื่ออนุภาคที่ต้องการอบแห้งมีความชื้นที่สูง สำหรับข้าวเปลือกหนึ่ง ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่มีความชื้นสูง การอบแห้งแบบหลายขั้นตอนในระบบกระแสน้ำนับว่าเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการลดความชื้นของข้าวเปลือกหนึ่งให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับการเก็บรักษา ในการศึกษานี้จึงใช้แบบจำลอง CFD-DEM ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกหนึ่งในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำแบบหลายขั้นตอน ซึ่งมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าและจำนวนรอบการอบแห้ง ที่มีผลต่อค่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกหนึ่งที่ทางออกของห้องอบแห้ง และอุณหภูมิของข้าวเปลือกหนึ่ง

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.1 ในการศึกษานี้สมการควบคุมการไหลของของไหลถูกพิจารณา ดังสมการต่อไปนี้ (Khomwachirakul et al. 2016)

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha\rho u_i) = M_m \quad (1)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha\rho u_i u_j) = -\alpha \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha \left(\mu + \mu_t \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \alpha p g + M_F \quad (2)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha\rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + M_h \quad (3)$$

สมการอนุรักษ์มวลย่อย

$$\frac{\partial(\alpha\rho C)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha\rho u_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \left(\rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + M_m \quad (4)$$

2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน

ในการศึกษานี้ใช้แบบจำลอง Realizable k- ϵ model ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (Khomwachirakul et al., 2016)

$$\frac{\partial(\alpha\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \alpha G_k - \alpha\rho\epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\alpha\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha\rho\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - \alpha\rho \left(C_1 S\epsilon - C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu\epsilon}} \right) \quad (6)$$

2.3 สมการควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาค

สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถกำหนดได้ดังสมการต่อไปนี้

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_g + F_D + F_C \quad (7)$$

โดยที่ F_g คือ แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง F_D คือ แรงจุดลากและ F_C คือ ผลรวมของแรงปฏิสัมพันธ์กันระหว่างอนุภาคกับอนุภาค ซึ่งรายละเอียดดูได้จาก Khomwachirakul et al. (2016)

2.4 การถ่ายโอนความร้อนและมวลของอนุภาค

การจำลองการถ่ายโอนความร้อนและมวลของข้าวเปลือกหนึ่ง ในแต่ละรอบของการอบแห้ง แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

2.4.1 ขั้นตอนการอบแห้ง

สมการการถ่ายโอนความร้อนพิจารณาได้จาก (Meeso et al., 2007)

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{k_p}{\rho_p c_p} \left[\frac{\partial^2 T_p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_p}{\partial r} \right] \text{ เมื่อ } 0 \leq r \leq R_p \quad (8)$$

สมการการถ่ายโอนมวลพิจารณาได้จาก

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left[\frac{\partial^2 M_p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M_p}{\partial r} \right] \text{ เมื่อ } 0 \leq r \leq R_p \quad (9)$$

สภาวะเงื่อนไขเริ่มต้น

$$T_p = T_0 \text{ เมื่อ } t = 0 \text{ และ } 0 \leq r \leq R_p \quad (10)$$

$$M_p = M_0 \text{ เมื่อ } t = 0 \text{ และ } 0 \leq r \leq R_p \quad (11)$$

เงื่อนไขขอบเขต

$$\frac{\partial T_p}{\partial r} = 0 \text{ เมื่อ } t > 0 \text{ และ } r = 0 \quad (12)$$

$$k_p \frac{\partial T_p}{\partial r} = h_c(T_g - T_p) - \rho_p h_{fg} \frac{V_p}{A_p} \frac{\partial M_p}{\partial t} \quad (13)$$

$$\frac{\partial M_p}{\partial r} = 0 \text{ เมื่อ } t > 0 \text{ และ } r = 0 \quad (14)$$

$$D_{\text{eff}} \frac{\partial M_p}{\partial r} = h_m(M_e - M_s) \text{ เมื่อ } t > 0 \text{ และ } r = R_p \quad (15)$$

2.4.2 ขั้นตอนการพอกเมล็ดข้าวในที่อับอากาศ

ในขั้นตอนนี้ สมการการถ่ายโอนความร้อนและมวลเป็นดังสมการที่ 8 และ 9 ตามลำดับ สำหรับเงื่อนไขที่สภาวะเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตแสดงดังสมการต่อไปนี้

สภาวะเงื่อนไขเริ่มต้น

$$T_p = T(r) \text{ เมื่อ } t = 0 \text{ และ } 0 \leq r \leq R_p \quad (16)$$

$$M_p = M(r) \text{ เมื่อ } t = 0 \text{ และ } 0 \leq r \leq R_p \quad (17)$$

เงื่อนไขขอบเขต

$$\frac{\partial T_p}{\partial r} = 0 \text{ เมื่อ } t > 0 \text{ และ } r = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial r} = 0 \text{ เมื่อ } t > 0 \text{ และ } r = R_p \quad (19)$$

$$\frac{\partial M_p}{\partial r} = 0 \text{ เมื่อ } t > 0 \text{ และ } r = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial M_p}{\partial r} = 0 \text{ เมื่อ } t > 0 \text{ และ } r = R_p \quad (21)$$

ขณะที่สัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(\frac{-E_0}{RT_p}\right) \quad (22)$$

สำหรับคุณสมบัติของข้าวและความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและมวลแสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของข้าวเปลือก

คุณสมบัติ	ค่าที่ใช้ในการจำลอง
c_p	1110+44.8 M_w (Meeso et al., 2007)
k_p	0.0863+0.00134 M_w (Meeso et al., 2007)
ρ_p	(552+282 M_p)/(1-(0.623-0.25 M_p)) (Meeso et al., 2007)
h_{fg}	(2502-2.386($T_{p,av}$ -273.15))(1+2.496exp(-21.733 M_p)) $\times 10^3$ (Madhiyanon et al., 2006)
D_0	2.55×10^{-7} (Pitipat et al., 2016)
E_0	20580 (Pitipat et al., 2016)

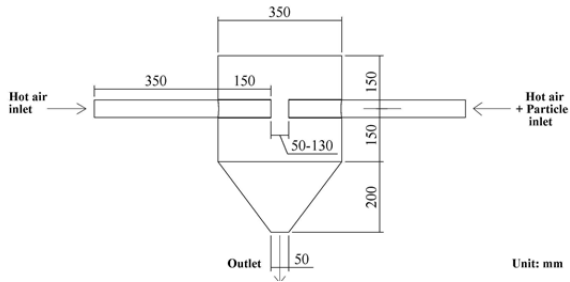
ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและมวล

คุณสมบัติ	ค่าที่ใช้ในการจำลอง
M_e	$0.01 \left[\frac{\ln(1-RH)}{-4.723 \times 10^{-6}(T_g - 273.15)} \right]^{1/2.386}$ (Meeso et al., 2007)
h_c	$Nu k_g / d_p$ (Patiwat et al., 2016)
Nu	$2+0.6Re^{1/2}Pr^{1/3}$ (Patiwat et al., 2016)
h_m	$(Sh/d_p) \times D$ (Patiwat et al., 2016)
Sh	$2+0.6Re^{1/2}Sc^{1/3}$ (Patiwat et al., 2016)
D	$4.56 \times 10^{-9} T_g^{1.5}$ (Rahimi et al., 2010)

3. สมมติฐานที่ใช้ในการจำลอง

ในการศึกษานี้ อากาศมีค่าความหนืด ค่าการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของอากาศ (Frydman et al., 1998) โดยที่ไม่พิจารณาความร้อนสูญเสียผ่านผนัง ขณะที่อนุภาคพิจารณาให้เป็นทรงกลมและมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่อนุภาคไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างในขณะที่อนุภาคเกิดการชนกันหรือหลังจากชนกัน สำหรับการถ่ายโอนความร้อนและมวลภายในอนุภาคพิจารณาในแนวทิศทางรัศมีของอนุภาคเพียงอย่างเดียว ซึ่งอนุภาคมีความชื้นและอุณหภูมิภายในเมล็ดสม่ำเสมอในช่วงเริ่มต้น และอนุภาคถูกป้อนเข้าสู่ระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนจำนวน 50 อนุภาค

การศึกษานี้จะใช้รูปร่างของห้องอบแห้งของระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนในการจำลองแบบ (Patiwat et al., 2016) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 กริดที่สร้างขึ้นมีจำนวน 227,142 เอลิเมนต์ ในการจำลองข้าวเปลือกหนึ่งลูกอบแห้งทั้งหมด 7 รอบการอบแห้ง ซึ่งในแต่ละรอบการอบแห้ง จะถูกพักในที่อับอากาศเป็นเวลา 4 นาที หลังจากนั้นข้าวเปลือกหนึ่งจะถูกนำกลับเข้าสู่เครื่องอบแห้งอีกครั้ง สำหรับตัวแปรในการจำลองได้แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 1 แผนผังห้องอบแห้งที่ใช้ในการจำลอง (Patiwat et al., 2016)

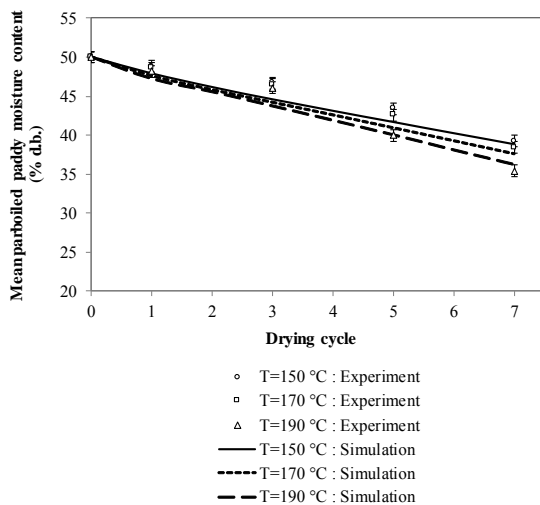
4. สภาวะเงื่อนไขของเขต

กำหนดให้บริเวณท่อทางเข้า อากาศร้อนมีค่าความชื้นของอากาศ 5% ขณะที่ผนังพิจารณาเป็นแบบไม่ลื่น และบริเวณทางออกห้องอบแห้งอากาศมีค่าความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ

ตารางที่ 3 ตัวแปรสำหรับการจำลอง

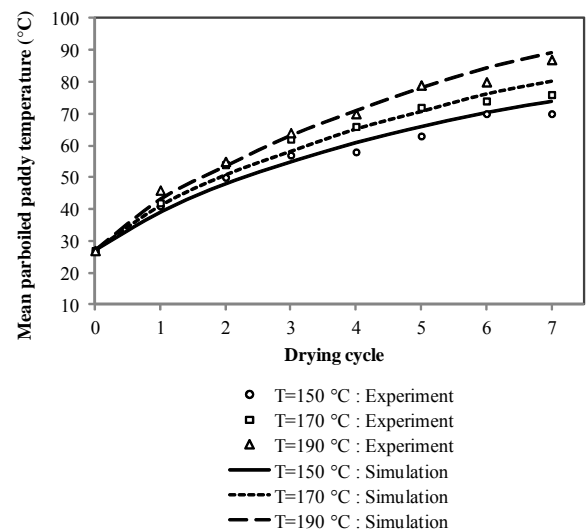
ตัวแปร	การจำลอง (CFD-DEM)	การทดลอง
เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (mm)	3.9	3.9
ค่าคงที่ของสปริง (N/m)	1000	-
สัมประสิทธิ์การขัดเซย		
ระหว่างอนุภาคกับผนัง	0.9	-
ระหว่างอนุภาคกับอนุภาค	0.9	-
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.3	-
อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (°C)	150, 170, 190	150, 170, 190
ความเร็วอากาศร้อนขาเข้า (m/s)	25	25
อัตราการป้อนวัสดุอนุภาค (kg _{dry solid} /h)	110	110
ระยะห่างการชน (cm)	5	5
จำนวนรอบการอบแห้ง	7	7

5. ผลและวิจารณ์



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกหนึ่งหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ ในแต่ละรอบการอบแห้งระหว่างผลของการจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลอง

จากรูปที่ 2 จะพบว่า เมื่ออัตราการป้อนวัสดุอนุภาค ความเร็วอากาศร้อนขาเข้าและระยะห่างการชนมีค่าที่ อัตราการลดความชื้นของข้าวเปลือกหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตัวกลางการอบแห้ง คือ อากาศร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิตัวกลางการอบแห้งขาเข้าที่สูงขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกหนึ่งเพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิวข้าวเปลือกหนึ่งเพิ่มมากขึ้น ในกรณีผลกระทบของจำนวนรอบการอบแห้งที่มีผลต่อค่าความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกหนึ่ง พบว่า การเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบการอบแห้งทำให้ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกหนึ่งลดลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของการจำลองกับการทดลองพบว่า ผลของการจำลองให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลอง และมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 5\%$



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของข้าวเปลือกหนึ่งหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ ในแต่ละรอบการอบแห้งระหว่างผลของการจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลอง

จากรูปที่ 3 จะพบว่า เมื่ออัตราการป้อนวัสดุอนุภาค ความเร็วอากาศร้อนขาเข้าและระยะห่างการชนมีค่าที่ อุณหภูมิของข้าวเปลือกหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตัวกลางการอบแห้ง คือ อากาศร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในกรณีผลกระทบของจำนวนรอบการอบแห้งที่มีผลต่อค่าความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกหนึ่ง พบว่า การเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบการอบแห้งทำให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกหนึ่งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นทำให้ข้าวเปลือกหนึ่งอยู่ในระบบอบแห้งได้มากขึ้นส่งผลให้มีความร้อนสะสมอยู่ในเมล็ดข้าวหนึ่งได้สูงขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของการจำลองกับการทดลองพบว่า ผลของการจำลองให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลอง และมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 5\%$

6. สรุป

การจำลองแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับวิธีเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่องได้ถูกนำมาใช้ในการจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกหนึ่งแบบหลายขั้นตอน สำหรับทำนายผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อค่าความชื้นสุดท้ายและอุณหภูมิของข้าวเปลือกหนึ่งในระบบอบแห้งแบบกระแสนิ่งซึ่งพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง และมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 5\%$ โดยผลอัตราการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกหนึ่งขึ้นอยู่กับทั้งอุณหภูมิอากาศร้อนและจำนวนรอบการอบแห้ง

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โดยผ่านทางทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำหรับศาสตราจารย์ ดร. สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา (Grant no. RTA 5880009) และ ทุนศาสตราจารย์วิจัยดีเด่น สำหรับศาสตราจารย์ ดร. สมชาติ โสภณธรณฤทธิ (Grant no. DPG 5980004)

รายการสัญลักษณ์

A_p	= พื้นที่ผิวของอนุภาค (m^2)
c_p	= ค่าความจุความร้อนของอนุภาค ($J/kg \cdot K$)
C_D	= สัมประสิทธิ์แรงฉุดลาก
d_p	= เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (m)
D	= สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s)
D_0	= ปัจจัยก่อนเลขชี้กำลัง (m^2/s)
D_{eff}	= สัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล (m^2/s)
E_a	= พลังงานกระตุ้น ($J/mol \cdot K$)
F_C	= ผลรวมของแรงปฏิสัมพันธ์กันระหว่างอนุภาคกับอนุภาค (N)
F_D	= แรงฉุดลาก (N)
F_g	= แรงโน้มถ่วง (N)
g	= ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
h	= สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot K$)
h_{fg}	= ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากวัสดุ (J/kg)
k	= ค่าของการนำความร้อน ($W/m \cdot K$)
k_c	= สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (m/s)
m_p	= มวลของอนุภาค (kg)
M_p	= ความชื้นของอนุภาค (decimal d.b.)
M_e	= ความชื้นสมดุล (decimal d.b.)
M_F	= เทอมของสมการโมเมนตัม
M_h	= เทอมของสมการพลังงาน
M_m	= เทอมของสมการความต่อเนื่อง
r	= ระยะห่างตามแนวรัศมี (m)
R	= ค่าคงที่ของแก๊ส ($J/mol \cdot K$)
R_p	= รัศมีของอนุภาค (m)
t	= เวลา (s)

T_g	= อุณหภูมิของอากาศ (K)
T_p	= อุณหภูมิของอนุภาค (K)
T_{p_av}	= อุณหภูมิเฉลี่ยของอนุภาค (K)
u_g	= ความเร็วของแก๊ส (m/s)
u_p	= ความเร็วของอนุภาค (m/s)
V_p	= ปริมาตรของอนุภาค (m^3)
x_i, x_j	= ระยะพิกัด (m)

สัญลักษณ์กรีก

α	= สัดส่วนของช่องว่าง
μ	= ความหนืดเชิงพลศาสตร์ ($kg/m \cdot s$)
μ_t	= ความหนืดของความปั่นป่วน ($kg/m \cdot s$)
ν	= ความหนืดเชิงจลนศาสตร์ (m^2/s)
ρ	= ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m^3)
ρ_p	= ความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m^3)
σ_k	= ตัวเลขแพลนด์เทิลสำหรับพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
σ_ϵ	= ตัวเลขแพลนด์เทิลสำหรับกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
σ_T	= ตัวเลขแพลนด์เทิลสำหรับความปั่นป่วน

เลขไร้มิติ

Nu	= เลขนัสเซลท์
Pr	= เลขพรานด์เทิล
Re	= เลขเรย์โนลด์
Sc	= เลขชมิทท์
Sc_t	= เลขชมิทท์สำหรับความปั่นป่วน
Sh	= เลขเชอร์วูด

8. เอกสารอ้างอิง

- Bootkote, P., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. 2016. Process of producing parboiled rice with difference colors by fluidized bed drying technique including tempering. Food Bioprocess Technol 9, 1574-1586.
- Frydman, A., Vasseur, J., Moureh, J., Sionneau, M., Tharrault, P. 1998. Comparison of superheated steam and air operated spray dryers using computational fluid dynamics. Drying Technology 16, 1305-1338.
- Kudra, T., Mujumdar, A.S. 1989. Impingement stream dryers for particles and pastes. Drying Technology 7, 219-266.
- Kudra, T., Mujumdar, A.S. 2007. Impinging stream dryers. In Handbook of Industrial Drying, 3rd ed.; Mujumdar, A.S. (Ed.); CRC Press: New York; 479-488.

- Khomwachirakul, P., Devahastin, S., Swasdisevi, T., Soponronnarit, S. 2016. Simulation of flow and drying characteristics of high-moisture particles in an impinging stream dryer via CFD-DEM. *Drying Technology* 34, 403-419
- Madhiyanon, T., Techaprasan, A., Soponronnarit, S. 2006. Mathematical models based on heat transfer and coupled heat and mass transfer for rapid high temperature treatment in fluidized bed: Application for grain heat disinfestations. *International Journal of Heat and mass Transfer* 49, 2277-2290.
- Meeso, N., Nathakarakakule, A., Madhiyanon, T., Soponronnarit, S. 2007. Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process. *Journal of Food Engineering* 78, 1248-1258.
- Rahimi, A., Niksiar, A. 2010. Mathematical modeling and simulation of drying of a single wet particle in a coaxial impinging stream dryer. *Chemical Engineering Communications* 197, 692-708.
- Tamir, A. 1994. *Impinging-stream reactors: Fundamentals and applications*; Elsevier: Amsterdam.

