

# การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในระบบอบแห้งกระแสแบบแนวโค้งด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ปฏิวดี คมวชิรกุล<sup>1\*</sup> ปิติ ชันโพธิ์<sup>1</sup> และ กิตติ สถาพรประสาธน์<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

\* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: patiwat.k@rmutp.ac.th

วันที่รับบทความ: 31 สิงหาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 23 กุมภาพันธ์ 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 9 มีนาคม 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 เมษายน 2569

**บทคัดย่อ:** งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกในระบบอบแห้งกระแสแบบแนวโค้ง ทั้งนี้อาศัยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในการศึกษานี้แบบจำลอง 3 มิติที่สภาวะคงตัวถูกใช้คำนวณคุณลักษณะการอบแห้งในเครื่องอบแห้งกระแสแบบแนวโค้ง การแก้สมการในเฟสของแก๊สและของแข็งใช้ระเบียบวิธี Eulerian และ Lagrangian ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลองใช้ทำนายผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเร็วของแก๊สขาเข้าที่ 25 m/s อุณหภูมิของแก๊สขาเข้าที่ 70 90 และ 110 °C และอัตราการป้อนของข้าวเปลือกที่ 20 35 และ 56 kg/h ที่ส่งผลต่อค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ ความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกและอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร โดยผลการจำลองถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองสามารถให้ผลการทำนายค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ และค่าความชื้นเฉลี่ยสุดท้ายใกล้เคียงกับผลการทดลองที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 6\%$  การลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแก๊สและอัตราการป้อนข้าวเปลือก อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $62.72 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$  ที่ความเร็วของแก๊สขาเข้า 25 m/s อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า 110 °C และอัตราการป้อนของข้าวเปลือก 56 kg/h และจากผลการจำลองพบว่า อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่เหมาะสมกับระบบอบแห้งกระแสแบบแนวโค้งนี้มีค่าประมาณ 80 kg/h.

**คำสำคัญ:** กระแส; ข้าวเปลือก; ความชื้น; อบแห้ง; อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

# Investigation of Paddy Drying in a Curvilinear Impinging Stream Drying System Using Computational Fluid Dynamics

Patiwat Khomwachirakul<sup>1\*</sup>, Piti Khunpho<sup>1</sup> and Kitti Sathapornprasath<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

\* Corresponding author, E-mail: patiwat.k@rmutp.ac.th

Received: 31 August 2025; Revised: 23 February 2026; Accepted: 9 March 2026

Online Published: 20 April 2026

**Abstract:** This research was to investigate the simulation of paddy drying in a curvilinear impinging stream drying system by computational fluid dynamics. In this study, a three-dimensional steady-state model was used to calculate the drying characteristics in a curvilinear impinging stream dryer. The gas and solid phase equations were solved using the Eulerian and Lagrangian methods, respectively. The model was used to simulate the effects of various parameters including inlet air velocity of 25 m/s, inlet drying air temperatures of 70, 90 and 110 °C, paddy feed rate of 25, 35 and 56 kg/h on the paddy mean residence time, paddy mean moisture content and volumetric evaporation rate. Simulated results were compared with experimental data. The results showed that the model could predict the paddy mean residence time and paddy mean moisture content were close to the experimental results within  $\pm 6\%$ . The simulated results revealed that the moisture reduction rate of the paddy depended both on the inlet drying air temperature and paddy feed rate. The maximum volumetric water evaporation rate was 62.72  $\text{kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$  when using inlet air velocity of 25 m/s, inlet drying air temperatures of 110 °C and paddy feed rate of 56 kg/h. Based on the simulated results, the optimum paddy feed rate of this curvilinear impinging stream drying system was around 80 kg/h.

**Keywords:** Impinging stream; Paddy; Moisture content; Drying; Volumetric evaporation rate



## 1. บทนำ

เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ (Impinging Stream Dryer) ถือว่าเป็นเครื่องอบแห้งที่มีสมรรถนะสูงและเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในเรื่องของการลดความชื้นของข้าวเปลือก เนื่องจากมีความสามารถในการดึงเอาความชื้นให้ออกจากบริเวณผิวของข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็ว ทั้งยังเป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อน และมีอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกสูง [1, 2] สำหรับการอบแห้งแบบกระแสน้ำมีหลักการพื้นฐานคือ การนำกระแสน้ำของไพลของตัวกลางการอบแห้งสองกระแสน้ำหรือมากกว่า ซึ่งมีอุณหภูมิและความเร็วสูงโดยมีทิศทางตรงกันข้ามมาชนกัน ผลของการชนกันของกระแสน้ำของไพลทำให้เกิดความปั่นป่วนในบริเวณการชนสูง ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทมวล ความร้อนและโมเมนตัมสูง ทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงเฉื่อยและความปั่นป่วนของกระแสน้ำของไพลที่มีค่าสูงในบริเวณดังกล่าว สำหรับวัสดุอนุภาคที่ต้องการจะอบแห้งสามารถป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งไปพร้อมกับกระแสน้ำของไพลกระแสใดกระแสหนึ่งหรือทุกกระแสน้ำของไพลก็ได้ ในบริเวณการชนของตัวกลางการอบแห้ง วัสดุอนุภาคจะเกิดการเคลื่อนที่สวนกระแสตรงกันข้ามและมีการเคลื่อนที่กลับไป-มา (Oscillatory Motion) ซึ่งการเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งความเร็วของวัสดุอนุภาคลดลงถึงค่า ๆ หนึ่งก็จะถูกกระแสน้ำของไพลของตัวกลางการอบแห้งนำออกจากระบบอบแห้ง ซึ่งการเคลื่อนที่ลักษณะนี้ทำให้วัสดุอนุภาคอยู่ในระบบได้นานขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการถ่ายเทมวลและความร้อนจากตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและการถ่ายเทมวลในอัตราที่สูง ทำให้สมรรถนะของเครื่องอบแห้งสูงขึ้น [3] ที่ผ่าน

มาได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษารอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ และพบว่าเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็ว ข้าวเปลือกใช้เวลาอยู่ในระบบด้วยเวลาอันสั้น และมีอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกสูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบอื่น [1-2] ต่อมา P. Kumklam et al. [4] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการอบแห้งข้าวเปลือกหนึ่งด้วยระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำ จากการศึกษาพบว่าระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกหนึ่งได้อย่างรวดเร็ว คุณภาพของข้าวเปลือกหนึ่งหลังการอบแห้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

อย่างไรก็ตามการศึกษารากฏการณ์ต่างๆ ในระบบกระแสน้ำด้วยการทดลองนั้น ทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากเป็นระบบปิดและเวลาที่อนุภาคอยู่ในระบบสั้น ตลอดจนมีตัวแปรหลายตัวที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ ด้วยเหตุนี้การศึกษาแบบจำลองการไหลและปรากฏการณ์ด้วยระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลในระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำนับว่ามีความจำเป็น ทั้งนี้เพื่อศึกษาและทำนายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคและของไหลสำหรับนำไปออกแบบให้ระบบการอบแห้งมีประสิทธิภาพสูงสุด จากรายงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้ใช้ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ในระบบกระแสน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในระบบกระแสน้ำแบบแนวแกน (Coaxial Impinging Stream) เช่น การศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคและของไหลในระบบอบแห้ง [5] การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งในระบบอบแห้งกระแสน้ำ [6-9] ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถ

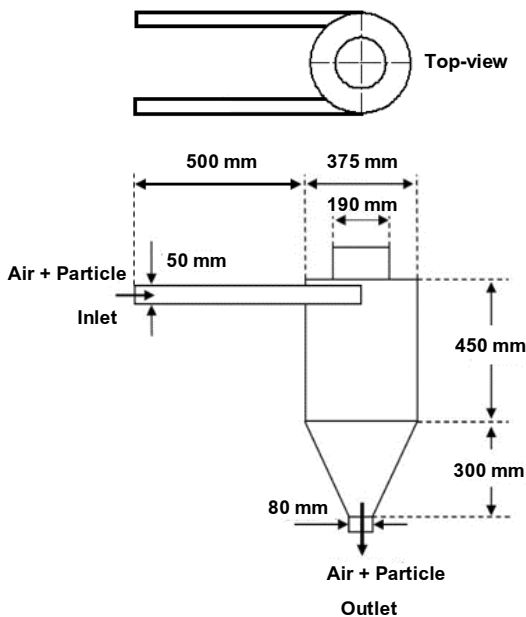


ทำนายและอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ในระบบกระแสชนได้ดีและผลของการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลอง สำหรับการศึกษาระบบกระแสชนแบบแนวโค้ง (Curvilinear Impinging Stream) ยังมีไม่มากนัก ระบบกระแสชนแบบแนวโค้งนี้มีหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกันกับระบบกระแสชนแบบแนวแกน จะต่างกันที่กระแสน้ำไหลของตัวกลางการอบแห้งสองกระแสหรือมากกว่าเคลื่อนที่ตามแนวโค้งของห้องอบแห้งและเกิดการชนกันของกระแสการไหลของตัวกลางการอบแห้งซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณการชน การเคลื่อนที่ลักษณะดังกล่าวทำให้มีข้อได้เปรียบระบบกระแสชนแบบแนวแกน กล่าวคือเพิ่มระยะห่างระหว่างการชนของกระแสของการไหลของตัวกลางการอบแห้งและพื้นที่บริเวณการชน ทำให้วัสดุอนุภาคมีโอกาสที่จะอยู่ในบริเวณการชนได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งบริเวณการชนเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทมวล ความร้อนและโมเมนตัมสูง [3] โดย Ghasemi et al. [10] ได้แสดงแบบจำลองการไหลและปรากฏการณ์สำหรับของแข็งและของเหลวในระบบอบแห้งแบบกระแสชนแบบโค้งด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลจากการจำลองได้อธิบายคุณลักษณะของการไหลของอนุภาคในระบบอบแห้ง รวมทั้งเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบและปริมาณการคงอยู่ของวัสดุในระบบได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง การจำลองโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถที่จะอธิบายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของของไหล ทั้งยังสามารถที่จะกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของห้องอบแห้ง และการจำลองยังสามารถช่วยในเรื่องของการลดระยะเวลาในการทดลอง และค่าใช้จ่ายอีกด้วย [11-13] ด้วยเหตุนี้การจำลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วย

ระบบกระแสชนจึงมีความน่าสนใจและเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเฉพาะระบบกระแสชนแบบแนวโค้งซึ่งมีข้อมูลอยู่จำกัด ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจำลองคุณลักษณะการอบแห้งในระบบอบแห้งกระแสชนแบบแนวโค้งด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การจำลองพิจารณาเป็นแบบ 3 มิติ ขณะที่การแก้สมการในเฟสของแก๊สใช้ระเบียบวิธี Eulerian และเฟสของแข็งใช้ระเบียบวิธี Lagrangian ซึ่งแบบจำลองทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ แก๊สเข้า และอัตราการป้อนข้าวเปลือก ที่มีต่อค่าความชื้นของข้าวเปลือก เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ (Residence Time) และอัตราการเหยน้ำเชิงปริมาตรของเครื่องอบแห้ง โดยผลของการจำลองถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการสร้างแบบจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกในระบบกระแสชนแบบโค้งได้นำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Buatum [14] ซึ่งขนาดของห้องอบแห้ง (รูปที่ 1) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 375 mm ท่อทางเข้าห้องอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ความสูงของห้องอบแห้งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนด้านบนเป็นทรงกระบอกมีความสูง 450 mm และส่วนด้านล่างเป็นทรงกรวยมีความสูง 300 mm ที่ทางออกห้องอบแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 mm เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาได้แก่อุณหภูมิแก๊สที่ใช้ในการอบแห้ง 70 90 และ 110 °C ความเร็วแก๊สที่ท่อทางเข้าห้องอบแห้ง 25 m/s และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 20 35 และ 56 kg/h



รูปที่ 1 ขนาดห้องอบแห้งกระแสนแบบโค้ง [14]

การจำลองจะพิจารณาข้าวเปลือกจากรูปทรงรีเป็นรูปทรงกลม [15] ข้าวเปลือกที่ทำกรวิจัยทำการวัดขนาดความกว้าง ( $W$ ) ความยาว ( $L$ ) และความหนา ( $T$ ) ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์จำนวน 100 ซ้ำแล้วคำนวณค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (Effective Diameter,  $D_e$ ) จากสมการที่ (1) [16]

$$D_e = (LWT)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

## 2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการศึกษาที่ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกและแก๊ส รวมทั้งทำนายความชื้นของข้าวเปลือกในระบบอบแห้งแบบกระแสนแบบโค้ง

### 2.1.1 สมการควบคุมในเฟสแก๊ส

สมการควบคุมสำหรับการไหลในเฟสแก๊สถูกพิจารณาด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการอนุรักษ์พลังงาน สมการอนุรักษ์มวลย่อย และแบบจำลองความปั่นป่วน แสดงดังนี้ สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = M_m \quad (2)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของแก๊ส ( $\text{kg/m}^3$ )  $t$  คือ เวลา (s) และ  $M_m$  คือเทอมของการถ่ายโอนมวลสารจากเฟสของอนุภาคไปสู่เฟสของแก๊ส หาได้จากสมการที่ (3) [6]

$$M_m = \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \frac{dm_{p,0}}{dt} \quad (3)$$

เมื่อ  $\Delta m_p$  คือ มวลของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงในปริมาตรควบคุม (kg)  $m_{p,0}$  คือ มวลเริ่มต้นของอนุภาค (kg) และ  $\frac{dm_{p,0}}{dt}$  คือ อัตราการระเหยความชื้นของอนุภาคเริ่มต้น (kg/s)

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g + M_F \quad (4)$$

เมื่อ  $u_i, u_j$  คือความเร็วของแก๊ส (m/s)  $P$  คือความดัน ( $\text{N/m}^2$ )  $\mu$  คือความหนืดสัมบูรณ์ ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ )  $\mu_t$  คือความหนืดของความปั่นป่วน ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ )  $g$  คือค่าแรงโน้มถ่วง ( $\text{m/s}^2$ ) และ  $M_F$  คือเทอมของการถ่ายโอนโมเมนตัมจากเฟสของแก๊สไปยังเฟสของอนุภาค หาได้จากสมการที่ (5) [6]



$$M_F = \sum \left( \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u_g) \right) \frac{dm_p}{dt} \Delta t \quad (5)$$

เมื่อ  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์แรงจลลาค  $Re$  คือตัวเลขเรย์โนลด์  $\rho_p$  คือความหนาแน่นของอนุภาค ( $\text{kg/m}^3$ )  $d_p$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)  $u_p, u_g$  คือความเร็วของอนุภาคและแก๊ส (m/s) ตามลำดับ

#### สมการอนุรักษ์พลังงาน

กลไกสำคัญในกระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สและอนุภาคในเครื่องอบแห้งแบบกระแสนคือการพาความร้อน สมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับเฟสแก๊สสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + M_h \quad (6)$$

เมื่อ  $c_p$  คือค่าความจุความร้อนของแก๊ส ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )  $T$  คือ อุณหภูมิของแก๊ส (K)  $k$  คือค่าการนำความร้อนของแก๊ส ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) และ  $M_h$  คือเทอมของการถ่ายโอนความร้อนจากเฟสของแก๊สไปยังเฟสของอนุภาค หาได้จากสมการที่ (7) [6]

$$M_h = \left[ \frac{\dot{m}_p}{m_{p,0}} c_p \Delta T_p + \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \left( -h_{fg} + \int_{T_{ref}}^{T_p} c_{p,i} dT \right) \right] \frac{dm_{p,0}}{dt} \quad (7)$$

เมื่อ  $T_p$  คือ อุณหภูมิของอนุภาค (K)  $h_{fg}$  คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากอนุภาค ( $\text{J/kg}$ )

#### สมการอนุรักษ์มวลย่อย

สมการอนุรักษ์มวลย่อยสำหรับเฟสแก๊สสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + M_m \quad (8)$$

เมื่อ  $D$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำในเฟสแก๊ส ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) และ  $Sc_t$  คือ ตัวเลขชมิทธ์ของความปั่นป่วน

#### แบบจำลองความปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable  $k - \varepsilon$  ถูกนำมาใช้ในการคำนวณสำหรับความปั่นป่วนในเฟสแก๊ส ซึ่งแสดงดังสมการที่ (9) และ (10) [6]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (10)$$

โดยค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน สามารถสืบค้นจาก Choicharoen et al. [6]

#### 2.1.2 สมการควบคุมในเฟสอนุภาค

สมการที่ใช้สำหรับการทำนายการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะพิจารณาสมดุลแรงที่กระทำกับอนุภาคซึ่งถูกพิจารณาด้วยแรงจุด และแรงโน้มถ่วง พิจารณาได้ดังสมการที่ (11) [6]

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} (u_g - u_p) + g_i \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_p} \quad (11)$$



เมื่อ  $u_g, u_p$  คือความเร็วของแก๊สและอนุภาค (m/s)  $\rho_g, \rho_p$  คือความหนาแน่นของแก๊สและอนุภาค ( $\text{kg/m}^3$ )  $Re$  คือตัวเลขเรย์โนลด์ และ  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์ของแรงจุด การคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และสัมประสิทธิ์ของแรงจุด ใช้สมการที่พิจารณาอนุภาคเป็นทรงกลม [17] โดยค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และสัมประสิทธิ์ของแรงจุด สามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ (12) และ (13) ตามลำดับ [17]

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u_g|}{\mu} \quad (12)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re} \quad (13)$$

เมื่อ  $a_1, a_2, a_3$  เป็นค่าคงที่และมีค่าขึ้นอยู่กับตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งสามารถสืบค้นจาก Jakobsen [18]

### 2.1.3 สมการถ่ายโอนความร้อนและมวลระหว่างแก๊สและอนุภาค

การถ่ายโอนความร้อนจะถ่ายโอนจากกระแสของแก๊สไปยังผิวของอนุภาค ทำให้ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้เพื่อการระเหยความชื้นของอนุภาค ในกรณีที่อุณหภูมิของอนุภาคต่ำกว่าอุณหภูมิการระเหยความชื้น ซึ่งในช่วงนี้จะไม่เกิดการระเหยความชื้นจากอนุภาค ซึ่งสมการสมดุลความร้อนพิจารณาจากสมการที่ (14) [6]

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_g - T_p) \quad (14)$$

สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการไหลผ่านอนุภาคจะพิจารณาตามความสัมพันธ์ของ Ranz และ Marshall [6-7]

$$Nu = \frac{h d_p}{k_g} = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (15)$$

โดยที่  $Nu, Re, Pr$  คือตัวเลขนัสเซลท์ ตัวเลขเรย์โนลด์ และตัวเลขพรนด์เทิล ตามลำดับ  $c_p$  คือค่าความจุความร้อนของอนุภาค ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )  $T_p$  คืออุณหภูมิของอนุภาค ( $\text{K}$ )  $T_g$  คืออุณหภูมิของแก๊ส ( $\text{K}$ )  $h$  คือสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน ( $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ) และ  $k_g$  คือสภาพนำความร้อนของแก๊ส ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) สำหรับกระบวนการถ่ายโอนมวลสาร เมื่ออุณหภูมิของอนุภาคมีค่าถึงอุณหภูมิของการระเหยความชื้น และอนุภาคมีการระเหยความชื้นเกิดขึ้น อัตราการระเหยความชื้นที่ผิวของอนุภาคจะพิจารณาจากผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นไอที่ผิวของอนุภาคและในเฟสแก๊สดังนี้ [6, 7]

$$N_i = k_c (C_{i,s} - C_{i,g}) \quad (16)$$

ซึ่ง  $C_{i,s}, C_{i,g}$  คือเข้มข้นไอที่ผิวของอนุภาคและในเฟสแก๊สตามลำดับ สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ( $k_c$ ) พิจารณาจากความสัมพันธ์ของตัวเลขเชอร์วูด [6, 7]

$$Sh = \frac{k_c d_p}{D} = 2.0 + 0.6 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (17)$$

เมื่อ  $Sc$  คือ ตัวเลขชmidt และสมการถ่ายโอนมวลระหว่างแก๊สและอนุภาคสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (18) [6, 7]

$$\frac{dm_p}{dt} = -N_i A_p M_{w,i} \quad (18)$$

เมื่อ  $M_{w,i}$  คือมวลโมเลกุลของไอน้ำ ( $\text{kg/kmol}$ ) ดังนั้นสมการถ่ายโอนความร้อนระหว่างอนุภาคและแก๊ส



สามารถพิจารณาได้จากสมการสมดุลความร้อนดังนี้ [6, 7]

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p (T_g - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (19)$$

สำหรับสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ สามารถประเมินได้ในเทอมของอัตราการเหยน้ำเชิงปริมาตร (Volumetric water evaporation rate) ดังสมการที่ (20) [1-3]

$$N_v = \frac{W_p (X_i - X_o)}{V_r} \quad (20)$$

เมื่อ  $N_v$  คืออัตราการเหยน้ำเชิงปริมาตร ( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ )  $W_p$  คืออัตราการป้อนข้าวเปลือก  $X_i - X_o$  คือผลต่างของความชื้นของข้าวเปลือกก่อนและหลังการอบแห้ง และ  $V_r$  คือปริมาตรของห้องอบแห้ง

## 2.2 สมมติฐานของแบบจำลองและเงื่อนไข

### 2.2.1 สมมติฐานที่ใช้ในการจำลอง

ในการศึกษานี้การจำลองการไหลถูกพิจารณาให้ อยู่ในสภาวะคงที่ (Steady State) สำหรับอนุภาค (ข้าวเปลือก) ถูกพิจารณาให้เป็นลักษณะทรงกลม [15] มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากการคำนวณตามสมการที่ 1 เท่ากับ 0.0036 m และไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตลอดการอบแห้ง ไม่พิจารณาการชนกันของอนุภาคกับอนุภาค และไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคกับผนังห้องอบแห้ง สำหรับแก๊สกำหนดให้เป็น Ideal gas และไม่พิจารณาความร้อนสูญเสียผ่านผนังห้องอบแห้ง คุณสมบัติของแก๊สและอนุภาค (ข้าวเปลือก) แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ การจำลองการ

ไหลถูกจำลองผ่านโปรแกรม ANSYS FLUENT (Version 21.0) ด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) รูปร่างของห้องอบแห้งแบบกระแสน้ำแบบแนวโค้ง [14] แสดงดังรูปที่ 1 การทดสอบความเหมาะสมของจำนวนกริด (Grid Independent) ด้วยการศึกษาค่าผลของการป้อนความเร็วแก๊สที่แตกต่างกันและอุณหภูมิของแก๊สที่แตกต่างกันที่ทางเข้าห้องอบแห้ง แล้วดูผลการจำลองความเร็วแก๊สและอุณหภูมิของแก๊สที่ทางออกห้องอบแห้ง กริดที่สร้างขึ้นเป็นกริดแบบสามเหลี่ยม (tetrahedral) โดยทดสอบที่จำนวนกริดได้แก่ 257284 305250 351675 404279 และ 45991 เอลิเมนต์ตามลำดับ จากการจำลองพบว่า ที่จำนวนกริด 351675 404279 และ 45991 เอลิเมนต์ ให้ผลความแตกต่างของความเร็วแก๊สและอุณหภูมิแก๊สที่ทางออกห้องอบแห้งต่ำกว่า 5% [7] ดังนั้นจึงเลือกจำนวนกริด 351675 เอลิเมนต์ (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 รูปร่างห้องอบแห้งและกริดที่ใช้ในการจำลอง



ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแก๊ส [7, 9]

คุณสมบัติ	ค่าที่ใช้ในการจำลอง
ความจุความร้อน (kJ/kg·K)	$0.99-1.77 \times 10^{-5} T_g$ $+1.91 \times 10^{-7} T_g^2$
การนำความร้อน (W/m·K)	$1.3 \times 10^{-3} + 9.11 \times 10^{-5} T_g$ $-2.52 \times 10^{-8} T_g^2$
ความหนืด (Pa·s)	$3.55 \times 10^{-6} + 5.54 \times 10^{-8} T_g$ $-1.7 \times 10^{-11} T_g^2$

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของข้าวเปลือก [19]

คุณสมบัติ	ค่าที่ใช้ในการจำลอง
ความจุความร้อน (J/kg·K)	$1110 + 44.8M_w$
การนำความร้อน (W/m·K)	$0.0863 + 0.00134M_w$
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{552 + 282M_d}{1 - (0.623 - 0.25M_d)}$

เมื่อ  $M_d$  และ  $M_w$  คือปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกตามมาตรฐานแห้ง (d.b) และมาตรฐานเปียก (w.b) ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง

ตัวแปร	ค่าในแบบจำลอง
อุณหภูมิแก๊สขาเข้า (°C)	70, 90, 110
ความเร็วแก๊สขาเข้า (m/s)	25
อัตราการป้อนข้าวเปลือก (kg/h)	20, 35, 56
สัมประสิทธิ์การคืนตัว [9] (coefficient of restitution) (ข้าวเปลือก-ผนังห้องอบแห้ง)	0.6

## 2.2.2 เงื่อนไขการจำลอง

บริเวณท่อทางเข้า แก๊สมีความเร็วเท่ากันทั้งสองข้างและมีค่าความเข้มของความปั่นป่วน (Turbulence Intensity) เท่ากับ 5% [6-7] ข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้น 28% (d.b) มีอุณหภูมิเริ่มต้น 30 °C ความเร็วเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ทางเข้าห้องอบแห้งกำหนดให้เป็นศูนย์ และข้าวเปลือกจะถูกป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ทางเข้าเพียงข้างเดียวเท่านั้น บริเวณผนังห้องอบแห้งพิจารณาเป็นแบบไม่ลื่น (No Slip Condition) และไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังห้องอบแห้ง ขณะที่บริเวณทางออกห้องอบแห้งแก๊สมีค่าความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ (0.1013 MPa) สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง ดูได้ตามตารางที่ 3

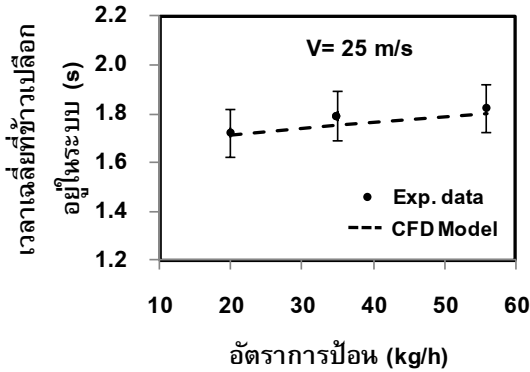
## 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ (Residence Time) ความชื้นของข้าวเปลือก พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคและแก๊ส รวมทั้งอัตราการเหวี่ยงน้ำซึ่งปริมาตรของเครื่องอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งถูกศึกษาด้วยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

### 3.1 ผลการจำลองในเครื่องอบแห้ง

#### 3.1.1 ค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ

รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบระหว่างการจำลองและการทดลอง สำหรับค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณคงเหลือของข้าวเปลือกที่อยู่ในระบบอบแห้งต่ออัตราการป้อนข้าวเปลือก [10] โดยพบว่า

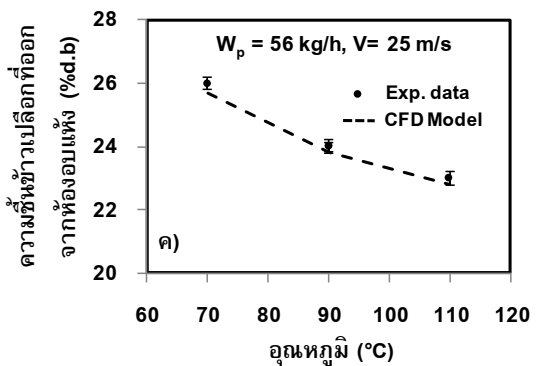
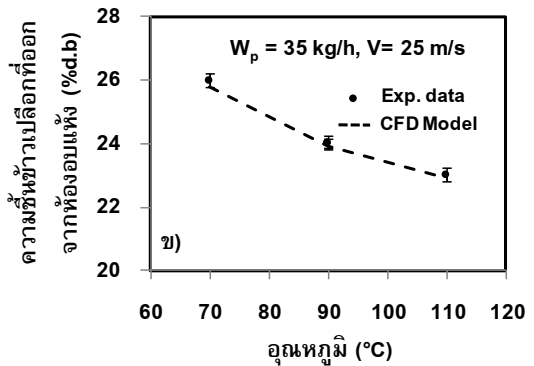
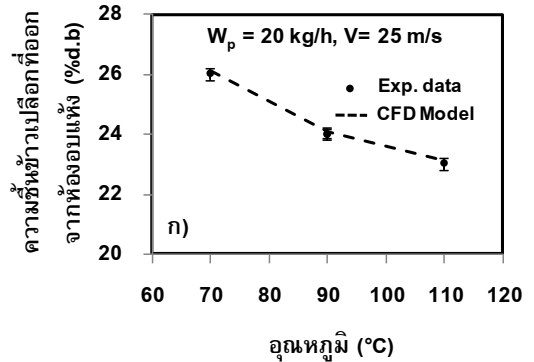


รูปที่ 3 การเปรียบเทียบค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบระหว่างการจำลองและการทดลอง [14]

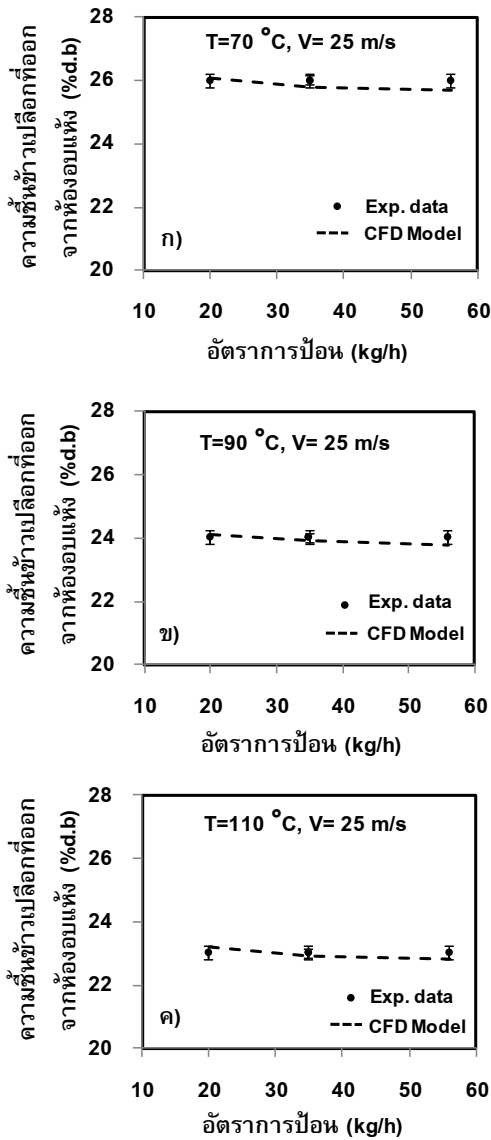
เมื่อความเร็วของแก๊สคงที่ อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณของข้าวเปลือกคงอยู่ในระบบเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และแบบจำลองให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับการทดลอง [14] ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 5\%$

### 3.1.2 ค่าความชื้นของข้าวเปลือก

รูปที่ 4 และ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ออกจากห้องอบแห้งระหว่างการจำลองและการทดลอง โดยรูปที่ 4(ก)-(ค) พบว่าเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกและความเร็วแก๊สมีค่าคงที่ อัตราการลดความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแก๊สสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิตัวกลาง การอบแห้งที่สูงขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแก๊สกับอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิวข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้น ขณะที่



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิมอบแห้งที่มีต่อค่าความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างการจำลองและการทดลอง [14]



**รูปที่ 5** การเปรียบเทียบผลของอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อค่าความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างการจำลองและการทดลอง [14]

รูปที่ 5(ก)-(ค) เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งและความเร็วแก๊สมี ค่าคงที่ พบว่าเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้น การลดลงของค่าความชื้นของข้าวเปลือกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากข้าวเปลือกมีค่าเวลาเฉลี่ยอยู่ในระบบอบแห้งเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนข้าวเปลือก (ดูรูปที่ 3) และแบบจำลองให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลอง [14] ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 6\%$

### 3.1.3 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของเฟสแก๊ส

รูปที่ 6 แสดงผลการจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของเฟสแก๊สในห้องอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งจากการจำลอง พบว่าเมื่อนำกระแสของการไหลของแก๊สสองกระแส ซึ่งมีความเร็วสูงป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง กระแสการไหลของแก๊สทั้งสองจะเคลื่อนที่ตามเส้นขอบส่วนโค้งรัศมีของห้องอบแห้งและมาชนกัน ผลการชนกันของกระแสการไหลของแก๊สทั้งสองคือ การเกิดบริเวณการชน และมีความปั่นป่วนของกระแสการไหลของแก๊สสูงขึ้น ทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อน มวลสารและโมเมนตัมสูง [3, 6, 10]

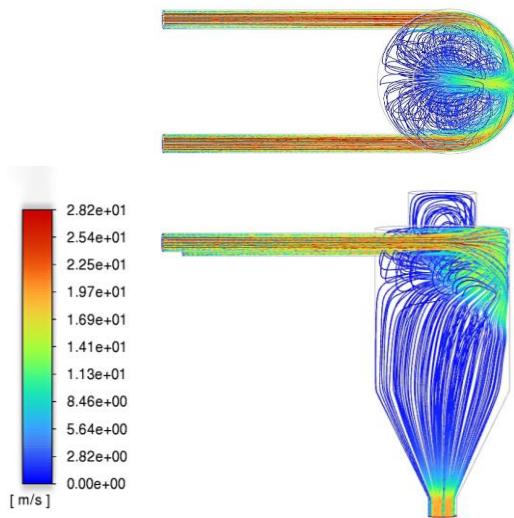
### 3.1.4 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาค

รูปที่ 7 แสดงผลการจำลองการติดตามพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคเดี่ยว (ข้าวเปลือก) ในห้องอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้ง เนื่องจากค่าเวลาคงอยู่ของอนุภาคในระบบกระแสนสั้น การติดตามพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคเดี่ยวนับว่ามีความสำคัญต่อการศึกษาและพัฒนาระบบอบแห้งกระแสน [9] ซึ่งการจำลองได้ติดตามทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเดี่ยว (ข้าวเปลือก) ตั้งแต่ถูกป้อนเข้าสู่

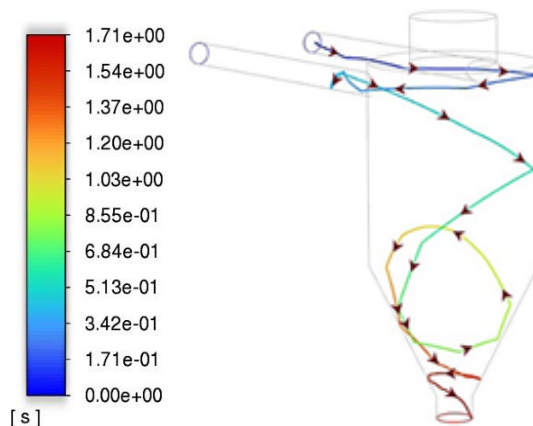


ระบบอบแห้งจนกระทั่งออกจากห้องอบแห้ง จากการจำลองพบว่าข้าวเปลือกเคลื่อนที่ตามแนวส่วนโค้งของห้องอบแห้งและเคลื่อนที่สวนเข้าไปในกระแสการไหลตรงกันข้ามและเคลื่อนที่กลับจนกระทั่งถูกกระแสการไหลของแก๊สพาออกไปจากห้องอบแห้งซึ่งสอดคล้องกับ

Tamir [3] ด้วยลักษณะการเคลื่อนที่แบบดังกล่าวถือว่าเป็นลักษณะพิเศษของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนซึ่งจะทำให้อนุภาคอยู่ในระบบอบแห้งได้นานเพิ่มมากขึ้นซึ่งทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารสูงตามไปด้วย [3, 6]



รูปที่ 6 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของเฟสแก๊สในห้องอบแห้งกระแสนแบบโค้ง



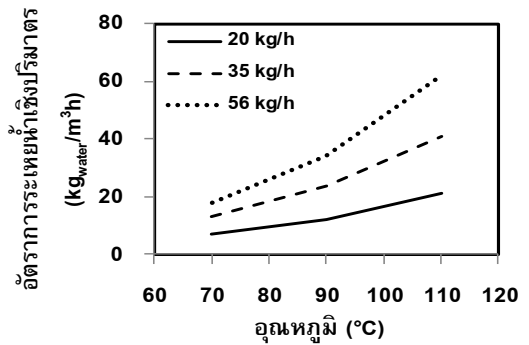
รูปที่ 7 ผลการจำลองการติดตามพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคเดี่ยว (ข้าวเปลือก) ในห้องอบแห้งกระแสนแบบโค้ง



### 3.1.5 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองอิทธิพลของอุณหภูมิของแก๊สขาเข้าและอัตราการป้อนข้าวเปลือก ที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบอบแห้งในรูปของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรในห้องอบแห้งกระแสนแบบโค้ง โดยพิจารณาจากสมการที่ 20 พบว่าเมื่อความเร็วของแก๊สขาเข้าคงที่ การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของแก๊ส ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของแก๊สขาเข้าที่เพิ่มสูงขึ้น จึงเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิของแก๊สและอุณหภูมิที่ผิวของข้าวเปลือกมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารมีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิวของข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้น

ในกรณีของอัตราการป้อนข้าวเปลือก พบว่าเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้น การระเหยความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าเพิ่มขึ้นดังได้กล่าวมาแล้ว (รูปที่ 5) ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรจึงเพิ่มขึ้นไปด้วย โดยอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $62.72 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$  ที่ความเร็วอากาศขาเข้า  $25 \text{ m/s}$  อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า  $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และอัตราการป้อนข้าวเปลือก  $56 \text{ kg/h}$  หากพิจารณาตามรูปที่ 8 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นได้อีกเมื่อมีการป้อนข้าวเปลือกมากกว่า  $56 \text{ kg/h}$  นั้นบ่งบอกว่าเครื่องอบแห้งยังคงมีขีดความสามารถเพียงพอที่จะระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือกได้ จนกระทั่งถึงค่าค่าหนึ่งที่ระบบอบแห้งไม่สามารถที่จะเพิ่มการระเหยความชื้นได้อีก และค่านี้จะเป็นค่าอัตราการป้อนข้าวเปลือกสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับระบบอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งนี้ [20]



รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองอิทธิพลของอุณหภูมิของแก๊สขาเข้าและอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีผลต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรในห้องอบแห้งกระแสนแบบโค้ง

ตารางที่ 4 ผลการจำลองอิทธิพลของอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่ออัตราการระเหยความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ  $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อัตราการป้อนข้าวเปลือก (kg/h)	อัตราการระเหยความชื้น (kg/s)
20	$6.81 \times 10^{-7}$
40	$7.06 \times 10^{-7}$
60	$7.22 \times 10^{-7}$
80	$7.38 \times 10^{-7}$
100	$6.80 \times 10^{-7}$
120	$6.34 \times 10^{-7}$

จากตารางที่ 4 ผลการจำลอง พบว่า เมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้น อัตราการระเหยความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอัตราการป้อนข้าวเปลือกมีค่า  $80 \text{ kg/h}$  หลังจากนั้นอัตราการระเหยความชื้นของข้าวเปลือกจะลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่อัตราการป้อนดังกล่าว ระบบอบแห้งอยู่ภายใต้



สภาวะอัน (Choking Point) [6, 20] ซึ่งคือสภาวะที่อากาศไม่สามารถรับความชื้นจากอนุภาคเพิ่มได้อีก เนื่องจากอากาศในห้องอบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์สูงจนถึงจุดอิ่มตัว ส่งผลให้กระบวนการดึงน้ำออกจากอนุภาคหยุดชะงัก นั่นแสดงว่าเครื่องอบแห้งนี้มีขีดความสามารถที่จะระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือกได้สูงสุดที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกประมาณ 80 kg/h ดังนั้นอัตราการป้อนข้าวเปลือกสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งที่ศึกษานี้มีค่าประมาณ 80 kg/h

#### 4. สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกสำหรับทำนายผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ ความชื้นของข้าวเปลือก พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาค (ข้าวเปลือก) และแก๊ส รวมทั้งอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ซึ่งพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลอง เมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบเพิ่มขึ้น และการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแก๊สและอัตราการป้อนข้าวเปลือก โดยพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของแก๊สและอนุภาคในระบบอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งช่วยสนับสนุนให้การลดความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ขณะที่อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $62.72 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$  ที่ความเร็วอากาศขาเข้า 25 m/s อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า  $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 56 kg/h นอกจากนี้จากผลการจำลองพบว่าอัตราการป้อนข้าวเปลือกสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งนี้มีค่าประมาณ 80 kg/h

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษานานวิจัยนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Nimmol and S. Devahastin, Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy, *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30, 2204–2212.
- [2] C. Nimmol, K. Sathapomprasath and S. Devahastin, Drying of high-moisture paddy using a combined impinging stream drying and pneumatic drying system, *Drying Technology*, 2012, 30, 1854–1862.
- [3] A. Tamir, *Impinging stream-reactor*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1994.
- [4] P. Kumklam, S. Prachayawarakom, S. Devahastin and S. Soponronarit, Effects of operating parameters of impinging stream dryer on parboiled rice quality and energy consumption, *Drying Technology*, 2020, 38, 634–645.
- [5] X. Liu, S. Yue, L. Lu, W. Gao and J. Li, Simulations of an asymmetric gas–solid two-phase impinging stream reactor, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2018, 74, 1032-1051.



- [6] K. Choicharoen, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, Numerical simulation of multiphase transport phenomena during impinging stream drying of a particulate material, *Drying Technology*, 2012, 30, 1227–1237.
- [7] P. Khomwachirakul, S. Devahastin, T. Swasdisevi and S. Soponronnarit, Simulation of flow and drying characteristics of high-moisture particles in an impinging stream dryer via CFD-DEM, *Drying Technology*, 2016, 34, 403- 419.
- [8] C. Li, S. Yue and M. Li, Numerical simulation of the drying characteristics of a high-moisture particle in dynamic asymmetry impinging stream reactor, *Chemical Papers*, 2022, 76, 41-56.
- [9] T. Swasdisevi, W. Thianngoen and S. Prachayawarakorn, Mathematical modeling and design of parboiled paddy-impinging stream dryer using the CFD-DEM model, *Foods*, 2024, 13, 1559.
- [10] N. Ghasemi, M. Sohrabi, M. Khosravi, A.S. Mujumdar and M. Goodarzi, CFD simulation of solid-liquid flow in a two impinging streams cyclone reactor: Prediction of mean residence time and holdup of solid particles, *Chemical Engineering and Processing*, 2010, 49, 1277-1283.
- [11] J. He, B. Meng, H. Li, B. Tian and J. Li, Heterogeneous detonation in gas-particle mixtures with full pattern flow: Numerical model, method and verification, *Computer Physics Communications*, 2025, 316, 109797.
- [12] M.E. Gamal, A. Mohammad, B. Abu-Jdayil and I.B. Salem, Computational study of gas-solid: Two-phase interaction system and particle kinetics establishing 3D analysis, *Results in Engineering*, 2024, 24, 103562.
- [13] C. Korkmaz and I. Kacar, XDEM simulation of an industrial-scale rotary drum dryer for organo-mineral fertiliser, *Biosystems Engineering*, 2026, 261, 104320.
- [14] P. Buatam, Paddy dehydration process using tangential-horizontal impinging stream dryer, Thesis, Srinakharinwirot University, Thailand, 2012.
- [15] P. Prakotmak, CFD-DEM simulation of the gas-solid flow dynamics in a continuous fluidize bed, *Research and Development Journal of The Engineering Institute of Thailand*, 2019, 30(3), 73-89. (in Thai)
- [16] A.R.A. Adebowale, L.O. Sanni, H.O. Owo and O.R. Karim, Effect of variety and moisture content on some engineering properties of paddy rice, *Journal of Food Science and Technology*, 2011, 48(5), 551-559.



- [17] P. Khomwachirakul and W. Ritthong, Numerical study of high-moisture parboiled paddy drying in an impinging stream dryer, The 10th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018), Proceeding, 2018, 328-333.
- [18] H.A. Jakobsen, Chemical reactor modeling, Springer, Berlin, Germany, 2008.
- [19] N. Meeso, A. Nathakaranakule, T. Madhiyanon and S. Soponronnarit, Modelling of far infrared irradiation in paddy drying process, Journal of Food Engineering, 2007, 78, 1248-1258.
- [20] A. Kitron, R. Buchmann, K. Luzzatto and A. Tamir, Drying and mixing of solids and particles residence time distribution in four impinging streams and multistage two impinging streams reactor, Industrial and Engineering Chemistry Research, 1987, 26, 2454-2461.