



แบบจำลอง CFD-DEM สำหรับพลศาสตร์ของก๊าซ-ของแข็ง  
ในระบบฟลูอิดไชน์เบดแบบต่อเนื่อง  
CFD-DEM Simulation of the Gas-Solid Flow Dynamics in  
a Continuous Fluidized Bed

ปรีดา ปรากฏมาก

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน  
ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140  
ติดต่อ: fengpdpr@ku.ac.th

### บทคัดย่อ

การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งและก๊าซเป็นปรากฏการณ์หลักในระบบฟลูอิดไชน์เบดแบบสองเฟส บทความนี้ นำเสนอแนวทางการคำนวณของพลศาสตร์ของไหล ควบคู่ไปกับวิธีการคำนวณอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (CFD-DEM) เพื่อจำลอง พฤติกรรมและอันตรกิริยาระหว่างของไหลกับอนุภาคของแข็งในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดแบบต่อเนื่อง แบบจำลอง DEM ถูกใช้เพื่อจำลองระบบอนุภาคแบบเม็ด ในขณะที่ CFD ใช้ในการจำลองการไหลของของไหลโดยการแก้สมการ Navier-Stokes อิทธิพลของความเร็วก๊าซ อัตราการไหลเชิงมวล อุณหภูมิของอนุภาคและระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาค ภายในห้องอบแห้ง (Residence time) ที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งได้ถูกรายงานในงานวิจัยนี้ การทำนายระยะเวลาของ อนุภาคที่อยู่ในห้องอบแห้งสามารถช่วยในการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการฟลูอิดไชน์เบดชนิดทำงานแบบต่อเนื่อง

**คำหลัก:** การไหลหลายสถานะ; พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; ฟลูอิดไชน์เบด; อนุภาคไม่ต่อเนื่อง

### Abstract

Gas-solid two-phase flow is the main phenomena in the fluidized bed system. This paper presents a coupled Computational Fluid Dynamics and Discrete Element Method (CFD-DEM) approach to simulate the behavior of fluid-particle interaction in a continuous fluidized bed dryer. DEM is employed to model the granular particle system, whilst the CFD is used to simulate the fluid flow by solving the locally averaged Navier-Stokes equation. Influence of the superficial gas velocity, mass flow rate, particle temperature and residence time of solid particles on the drying process have been reported. The prediction of residence time can help to optimize continuously operated fluidized process.

**Keywords:** Multi phase flow; CFD; Fluidized bed; DEM

### 1. บทนำ

จากงานวิจัยการเคลื่อนย้ายสารร่วมกับเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดชนิดเม็ดผสมสารเคลื่อนย้ายจากด้านบน [1] ยังมีข้อจำกัดในด้านการผลิตโดยเครื่องที่ออกแบบสามารถทำงานในลักษณะเป็นงวด (Batch) ครั้งละ 4 kg ต้องอาศัยแรงงานในการนำเมล็ดข้าวเข้า-ออกห้องอบแห้ง ทำให้เกิดความล่าช้าในการผลิตและอาจได้ผลิตภัณฑ์ที่มี

คุณภาพลดลง เนื่องจากในระหว่างกระบวนการผลิต จำเป็นต้องเปิด-ปิดเครื่อง เพื่อตั้งค่าอุปกรณ์พ่นเคลือบสารละลายและต้องรอให้อุณหภูมิของระบบคงที่ก่อนการนำเมล็ดข้าวเข้าห้องอบในงวดถัดไป การปรับปรุงเครื่องให้สามารถทำงานแบบต่อเนื่องจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตและช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงขึ้น เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการสร้าง

เครื่องต้นแบบ การศึกษาแบบจำลองฟลูอิดซ์เบดชนิดทำงานแบบต่อเนื่องจึงมีความจำเป็นสำหรับการพัฒนาเครื่องอบแห้งชนิดนี้ต่อไป

ในอดีตที่ผ่านมาการศึกษาพลศาสตร์ของอนุภาคและของไหลเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมเคลื่อนที่ด้วยการทดลองต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายมาก นอกจากนี้การวัดค่าต่างๆ ในระหว่างการทดลองเป็นการรบกวนระบบทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องน้อยลง สำหรับกระบวนการฟลูอิดซ์เบดสองสถานะ (Two-phase Fluidization) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการที่เม็ดของแข็งหรืออนุภาคสัมผัสกับของไหลแล้วทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปตามกระแสการไหลและประพัตต์ตัวคล้ายกับของไหล จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแบบจำลองที่สามารถอธิบายปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและอนุภาคคือแบบจำลอง CFD-DEM [2] โดยวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method; DEM) ร่วมกับ (Coupling) วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) ซึ่งวิธี DEM ทำการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากกฎของนิวตัน (Newton's second law) โดยพิจารณาถึงปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและอนุภาคกับห้องอบแห้ง ส่วนการเคลื่อนที่ของของไหลนั้นจะวิเคราะห์ด้วยวิธี CFD เพื่อคำนวณอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับของไหล แบบจำลอง CFD-DEM เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคภายในฟลูอิดซ์เบดและให้รายละเอียดมากกว่าการทดลองจริง สามารถเก็บรายละเอียดข้อมูลของการไหลที่ซับซ้อนได้โดยไม่รบกวนลักษณะทางกายภาพของการไหล และสามารถทดสอบเกินขอบเขตช่วงการทำงานจริงได้ ซึ่งการทดลองจริงนั้นทำได้ยากหรืออาจต้องใช้งบประมาณสูง ในปัจจุบันนักวิจัยได้ใช้แบบจำลอง CFD-DEM ศึกษาพฤติกรรมของการไหลแบบหลายสถานะ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากต่อวงการอุตสาหกรรม เช่น การอบแห้ง (Drying) [3] การผสมวัสดุ (Mixing) [4] ระบบลำเลียงวัสดุด้วยลม (Pneumatic conveyor) [5] และการศึกษาการยึดเกาะกันของอนุภาคเปียก (Wet particle agglomerates) [6] เป็นต้น นอกจากนี้แบบจำลอง CFD-DEM ยังช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนและการกระจายตัวของอนุภาคภายในระบบ ยกตัวอย่างเช่นระบบอบแห้ง

แบบฟลูอิดซ์เบด ทำให้ทราบข้อจำกัดของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งเพื่อป้องกันการเสียหายตลอดจนศึกษาพฤติกรรมรวมกันของอนุภาคในระหว่างการเกิดฟลูอิดซ์เบดเพื่อเลือกใช้ความเร็วอากาศที่เหมาะสม ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถนำไปใช้ในการออกแบบห้องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด ทำให้ทราบตำแหน่งจุดอับ (Dead zone) ที่เกิดฟลูอิดซ์เบดไม่ทั่วถึง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการนำเอาเทคนิคอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่องมาใช้ร่วมกับการอบแห้งหรือการพ่นเคลือบผลิตภัณฑ์ (Coating) สามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ แต่ระบบนี้ยังไม่แพร่หลายมากนักนักวิจัยได้พยายามปรับปรุงให้ระบบฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่องทำงานอย่างมีประสิทธิภาพดีขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งส่วนใหญ่ยังอยู่ในห้องปฏิบัติการ [7] การสร้างแบบจำลอง CFD-DEM ของระบบฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่องจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบระบบ ช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการลองผิดลองถูกในการสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อลดความซับซ้อนและลดระยะเวลาในการจำลองปัญหาในแบบจำลอง CFD-DEM งานวิจัยนี้จะไม่คำนึงถึงการถ่ายเทมวลของอนุภาค พิจารณาเฉพาะพลศาสตร์ของก๊าซ-ของแข็งและการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคในระบบฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่องเท่านั้น บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลอง CFD-DEM ของระบบฟลูอิดซ์เบดแบบสองคอลัมน์ เพื่อทำนายพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ทำนายอุณหภูมิของอนุภาค ทำนายระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Residence time) และหาอัตราการผลิตที่เหมาะสม เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างเครื่องชนิดนี้ต่อไป

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลของวัสดุ และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง CFD-DEM แสดงในตารางที่ 1 ขั้วสารที่นำมาพิจารณา คือสายพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ทำการวัดขนาด ความยาว(L) กว้าง(W) และหนา(T) ด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์คาลิเปอร์จำนวน 50 ซ้ำแล้วหาค่าเฉลี่ย งานวิจัยนี้จะจำลองเมล็ดข้าวจากรูปทรงรีให้เป็นทรงกลมเพื่อลดความซับซ้อนและระยะเวลาการจำลองปัญหา โดยคำนวณเส้นผ่าน

ศูนย์กลางเทียบเท่า (Effective diameter,  $D_e$ ) [8] จากสมการ

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

เนื่องจากสมบัติวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองเป็นชนิดเดียวกันและมาจากงานวิจัยต่อเนื่อง สามารถสืบค้นวิธีการทดลองและที่มาของค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 จากงานวิจัยของ Prakotmak et al. [9, 10]

ตารางที่ 1 สมบัติวัสดุและพารามิเตอร์ในแบบจำลอง

ชนิด	พารามิเตอร์	ค่ากำหนด
อนุภาค (ข้าว สุพรรณบุรี 1)	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	1450
	Poisson ratio	0.25
	Shear modulus, $G_p$ (Pa)	$3.75 \times 10^8$
	Initial particle temperature and air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	29, 60
	Effective diameter, $D_e$ (mm)	3.5
ห้องอบแห้ง (สแตนเลส)	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	8000
	Poisson ratio	0.3
	Shear modulus, $G_p$ (Pa)	$7.5 \times 10^{10}$
อนุภาค-อนุภาค	Restitution coefficient, e	0.6
	Coefficient of static friction, $\mu_s$	0.3
	Coefficient of rolling friction, $\mu_r$	0.01
อนุภาค-ห้องอบแห้ง	Restitution coefficient, e	0.5
	Coefficient of static friction, $\mu_s$	0.2
	Coefficient of rolling friction, $\mu_r$	0.01
Simulation	Grid type	Hexahedron
	Grid number (CFD)	1736
	CFD time step (s)	$3.5 \times 10^{-4}$
	DEM time step (s) [12]	$3.5 \times 10^{-6}$
	Simulation duration (s)	15

## 2.1 แบบจำลอง CFD-DEM

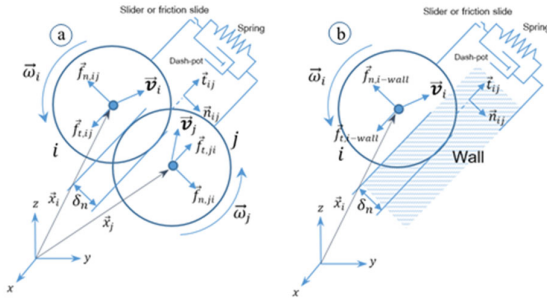
งานวิจัยนี้จำลองการชนกันเป็นชนิดทรงกลมอ่อน (Soft sphere model) พิจารณาจากการเปลี่ยนรูปร่างจริงของการชนกันระหว่างอนุภาคสองอนุภาค โดยสมมติให้เกิดการกระจัดเหลื่อม  $\delta$  แทนการเกิดการเปลี่ยนรูปร่างจริง ดังรูปที่ 1 แรงที่เกิดขึ้นระหว่างการชนกันเป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic contact force model) ทำให้อนุภาคมีการเสียพลังงานจลน์ พิจารณาจาก สปริง ตัวหมุนง และสไลเดอร์ เมื่อเกิดการชนกันระหว่างอนุภาค (รูปที่ 1a) หรืออนุภาคกับผนัง (รูปที่ 1b) จะพิจารณาว่าอนุภาคเกิดการเหลื่อมกัน (Overlapping distance,  $\delta$ ) ทำให้เกิดการกระจัดและแรงสัมผัส (Contact force) โดยแรงสัมผัสและการกระจัดหาได้จากการคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละอนุภาค วิธี DEM จะประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's second law) และใช้กฎของฮุค (Hooke's law) มาพิจารณาขณะที่เกิดแรงสัมผัสระหว่างอนุภาคหรืออนุภาคกับผนัง โดยขนาดการเหลื่อมกันที่จุดสัมผัสจะสัมพันธ์กับแรงสัมผัสโดยตรงและขนาดของการเหลื่อมนี้จะน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาค สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองของ Hertz-Mindlin [11] ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมการที่ใช้ในแบบจำลอง Hertz-Mindlin

ตัวแปร	สมการ
Normal forces	
-Normal spring force	$F_n^s = -k_n \delta_n^{3/2}, k_n = \frac{4}{3} Y^{eq} \sqrt{R^{eq}}$
-Normal damping force	$F_n^d = -2\beta \sqrt{\frac{5}{4} k_n m^{eq} \delta_n^{1/2} V_n^{rel}}$ , โดย $\beta = \frac{lne}{\sqrt{ln^2 e + \pi^2}}$
Tangential forces	$F_t = \begin{cases} F_t^s + F_t^d, & \text{ถ้า }  F_t  \leq \mu_s  F_n  \\ -\mu_s F_n, & \text{ถ้า }  F_t  > \mu_s  F_n  \end{cases}$
-Tangential spring forces	$F_t^s = -S_t \delta_t, S_t = 8G^{eq} \sqrt{R^{eq} \delta_n}$
-Tangential damping forces	$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{4}} \beta \sqrt{S_t m^{eq} V_t^{rel}}$ , โดย $\beta = \frac{lne}{\sqrt{ln^2 e + \pi^2}}$
Rolling friction torque	$T_r = -\mu_r F_n R_i \omega_i$

โดยค่า  $Y^{eq}$ ,  $R^{eq}$ ,  $m^{eq}$ ,  $\delta$ ,  $k_n$ ,  $S_t$ ,  $\mu_s$  และ  $\mu_r$  คือ Equivalent Young's modulus, Equivalent radius, Equivalent mass, ระยะเยื้อง (Particle overlap), Normal spring stiffness, Tangential spring stiffness, Coefficient of sliding friction, Coefficient of rolling

friction ตามลำดับ  $\beta$  คือ Damping factor โดยเป็น ฟังก์ชันของ Restitution coefficient ( $e$ ) ซึ่งค่า  $e$  คำนวณมาจากการทดลอง [9, 10] สำหรับรายละเอียด ที่มาของสูตรในตารางที่ 2 สามารถสืบค้นได้จาก [12]



รูปที่ 1 แรงสัมผัสที่เกิดขึ้น a) การชนกันระหว่างอนุภาค กับอนุภาค b) การชนกันระหว่างอนุภาคกับผนัง

แบบจำลองที่สร้างในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะ พลศาสตร์ของก๊าซ-ของแข็งและการถ่ายเทความร้อนในระบบฟลูอิดส์เบดแบบต่อเนื่องเท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลหรือความชื้นระหว่างอนุภาค กับอนุภาค และอนุภาคกับอากาศร้อน ภายในฟลูอิดส์เบดมีอนุภาคของแข็งและก๊าซซึ่งมีอันตรกิริยาระหว่างกัน ในงานวิจัยนี้ทำการจำลองการไหลของอากาศ (CFD) ด้วยวิธี Eulerian-Lagrangian ร่วมกับการวิเคราะห์อนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DEM) การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค (index  $i$ ) มวล  $m_i$  และปริมาตร  $V_i$  ในระบบจะคำนวณโดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) ดังนี้

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{d^2r_i}{dt^2} = -V_i \nabla p + \frac{V_i \beta^i}{1-\epsilon} (\mathbf{u}_g - \mathbf{v}_i) + m_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_{c,i} + \mathbf{F}_{A,i} \quad (2)$$

เมื่อ  $\mathbf{v}_i$  คือความเร็วของอนุภาค  $i$ ,  $\mathbf{u}_g$  คือ ความเร็วของก๊าซและ  $\mathbf{r}_i$  คือเวกเตอร์แสดงตำแหน่งของอนุภาค  $i$  ส่วนแรงที่แสดงด้านขวาของสมการที่ (2) คือ ความแตกต่างของความดัน (Pressure gradient,  $-V_i \nabla p$ ) แรงต้านอากาศ (Drag) แรงโน้มถ่วง (Gravity,  $m_i \mathbf{g}$ ) แรงสัมผัส (Contact force,  $\mathbf{F}_{c,i}$ ) และแรงดึงดูดระหว่างมวล (Van der Waals,  $\mathbf{F}_{A,i}$ ) ซึ่งแรงนี้จะไม่คิดในแบบจำลอง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์  $\beta^i$  จะพิจารณาจากความพรุน  $\epsilon$  ของอนุภาคสามารถสืบค้นจาก Prakatmak et

al. [9, 10] ในระหว่างการเคลื่อนที่อนุภาคอาจเกิดการหมุนอธิบายจากสมการโมเมนต์เชิงมุมดังนี้

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \mathbf{T}_i \quad (3)$$

เมื่อ  $\mathbf{T}_i$  คือทอร์ก  $I_i$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของอนุภาค  $i$  สำหรับของไหลจะพิจารณาให้อยู่ในรูปการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuum) ห้องอบแห้งจะถูกแบ่งในรูปแบบตารางโครงข่าย (Mesh) การเคลื่อนที่ของของไหลจะถูกคำนวณโดยการเฉลี่ยปริมาตร (Volume-averaged) จากสมการ Navier-Stokes ในรูปสมการสมดุลโมเมนต์ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \rho_g \mathbf{u}_g) + \nabla \cdot (\rho_g \epsilon \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\epsilon \nabla p - \nabla \cdot (\epsilon \tau_g) + \rho_g \epsilon \mathbf{g} - \mathbf{S}_p \quad (4)$$

เมื่อ  $\rho_g$  คือความหนาแน่นของก๊าซ สามารถเขียนสมการความปั่นป่วน (Turbulence) ของของไหล เป็นแบบ Standard  $k - \epsilon$  ค่าความเค้นในของไหล ( $\tau_g$ ) สำหรับแทนค่าในสมการที่ (4) เขียนอยู่ในรูปของเทนเซอร์ได้ดังนี้

$$\tau_g = -\left(\lambda_g - \frac{2}{3}\mu\right) (\nabla \cdot \mathbf{u}_g) \mathbf{I} - \mu \left( (\nabla \cdot \mathbf{u}_g) + (\nabla \cdot \mathbf{u}_g)^T \right) \quad (5)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ Dynamic viscosity สำหรับของไหลค่า Bulk viscosity ( $\lambda_g$ ) กำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ อนุภาคในห้องอบแห้งเปรียบเสมือนสิ่งกีดขวางการไหลซึ่งมีอิทธิพลต่อความเร็วของของไหลที่วิ่งผ่าน อนุภาคจะถูกเป่าให้ลอยขึ้นและตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ขณะเดียวกันทิศทางและความเร็วของอนุภาคเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เนื่องจากการชนกันกับอนุภาคอื่นๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ  $\mathbf{S}_p$  (Momentum exchange) เพื่อใช้แทนค่าลงในสมการที่ (4)

$$\mathbf{S}_p = \frac{1}{V_{cell}} \int_{V_{cell}} \sum_{i=0}^{N_p} \frac{V_i \beta^i}{1-\epsilon} (\mathbf{u}_g - \mathbf{v}_i) D(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) dV \quad (6)$$

เมื่อ  $V_{cell}$  คือปริมาตรของ Mesh cell และ  $N_p$  คือจำนวนอนุภาคทั้งหมดภายใน Mesh โดยคำนวณฟังก์ชันการกระจายตัวของแรงที่กระทำบนของไหล ( $D$ ) ด้วย Eulerian grid [10] การถ่ายเทความร้อนในงานวิจัยนี้พิจารณาจากสมการที่ (7) โดยมีสมมติฐานที่ว่าอัตราการเพิ่มของพลังงานในอนุภาคแต่ละตัว (เทอมซ้ายมือ) จะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนรวมกับการนำความร้อนระหว่างอนุภาค (เทอมขวามือ)

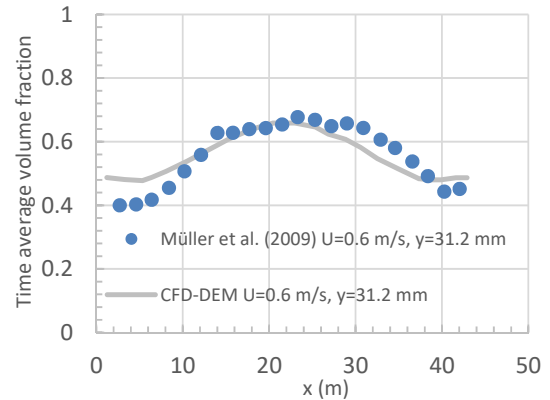
$$m_p C_p \frac{dT}{dt} = h_{PF} A_p \Delta T_{PF} + h_c \Delta T_{P_1 P_2} \quad (7)$$

เมื่อ  $m_p$ ,  $C_p$ ,  $T$  คือมวล ความร้อนจำเพาะ และ อุณหภูมิของอนุภาคตามลำดับ  $h_{pF}$  คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $A_p$  คือพื้นที่ผิวของอนุภาค  $\Delta T_{pF}$  คือผลต่างอุณหภูมิระหว่างอนุภาคกับอากาศร้อน  $h_c$  คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และ  $\Delta T_{p_1 p_2}$  คือผลต่างอุณหภูมิระหว่างอนุภาค ที่มาของค่า  $h_{pF}$  และ  $h_c$  สามารถสืบค้นจากงานวิจัยของ Hobbs [13]

หลักการคำนวณของวิธี CFD-DEM และความสัมพันธ์ของสมการที่เกี่ยวข้องทั้งหมดสามารถสืบค้นจากงานวิจัยของ Prakotmak [10] สำหรับงานวิจัยนี้จำลอง CFD-DEM ด้วย ANSYS Fluent โดยคำนวณแลกเปลี่ยนข้อมูล (Coupling) กับ EDEM บนเครื่อง Workstation Xeon E5-2665 จำนวน 16 Cores 32 Threads ประมวลผลร่วมกับ GPU GTX 1080Ti การจำลอง 15 s ในแต่ละเงื่อนไขดังตารางที่ 3 จะใช้ CPU Time ประมาณ 156-160 h

## 2.2. การตรวจสอบแบบจำลอง (Model validation) และกำหนดเงื่อนไขการจำลอง

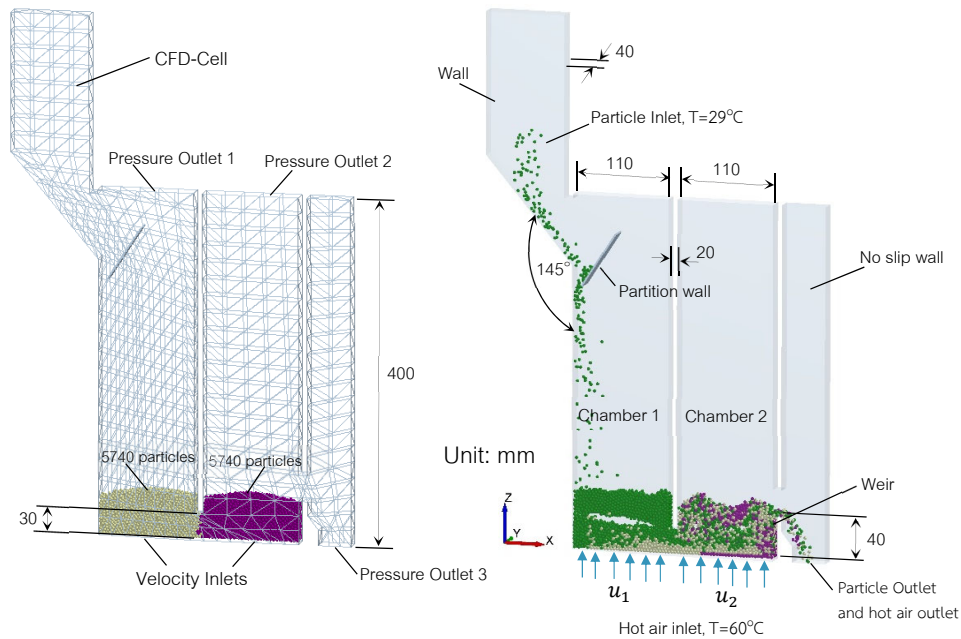
งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลอง CFD-DEM เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Müller et al. [14] จากการทดสอบปรากฏการณ์ฟลูอิดไอเซชันของอนุภาคทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm ความหนาแน่นของอนุภาคเท่ากับ  $1000 \text{ kg/m}^3$  จำนวนตัวอย่าง 9240 อนุภาค ในเบดขนาด  $44 \text{ m} \times 10 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$  (กว้าง×ยาว×สูง) ที่เงื่อนไขความเร็วอากาศ 0.6 m/s โดยการวัดสัดส่วนช่องว่าง (Void fraction) ด้วยเรโซแนนซ์แม่เหล็ก (Magnetic resonance, MR) ตามความกว้างของเบด ที่ระดับความสูงจากฐานเบดเท่ากับ 31.2 mm งานวิจัยนี้ได้สร้างโดเมนที่มีขนาดเท่ากัน และกำหนดวัสดุที่มีสมบัติเหมือนกันกับงานวิจัยดังกล่าว จากการจำลองปัญหาในระยะเวลา 23 s และเก็บข้อมูลค่าสัดส่วนช่องว่างที่ระดับความสูงเบดเท่ากับ 31.2 mm ทุกๆ 0.01 s ดังนั้นจะมีจำนวนข้อมูล 2300 ชุดซึ่งถูกแปลงเป็นไฟล์ Excel จากนั้นทำการเขียนโปรแกรม MATLAB® เพื่ออ่านไฟล์เหล่านั้นแล้วคำนวณค่าเฉลี่ยของสัดส่วนช่องว่างอากาศตามระยะความกว้างของเบด ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสัดส่วนช่องว่างอากาศจากเทคนิค MR [20] กับผลที่ได้จากแบบจำลอง CFD-DEM ที่ความเร็วสูง 31.2 mm

จากรูปที่ 2 พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายโปรไฟล์สัดส่วนช่องว่างอากาศที่มาจากผลการทดลองของ Müller et al. [14] ได้สอดคล้องกัน โดยเฉพาะในช่วงกึ่งกลางเบดจะมีสัดส่วนช่องว่างสูงกว่าด้านข้างซึ่งมีแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคกับผนังเบด เนื่องจากเป็นแบบไม่ลื่นไถล (No slip wall) อนุภาคบริเวณกึ่งกลางเบดจะมีความเร็วสูงสุดและมีโอกาสเกิดฟองอากาศ (Bubble) ทำให้มีช่องว่างอากาศมากกว่าตำแหน่งอื่นๆ จากผลการจำลองด้วย CFD-DEM สามารถทำนายสัดส่วนช่องว่างอากาศและความเร็วอนุภาคได้สอดคล้องกับการทดลองของ Müller et al. [14] ดังนั้นแบบจำลองฟลูอิดไอเซชันที่สร้างขึ้นด้วยวิธี CFD-DEM น่าจะสามารถทำนายปรากฏการณ์ฟลูอิดไอเซชันที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและระหว่างอนุภาคกับของไหลได้เช่นเดียวกัน

งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงห้องอบแห้งจากงานวิจัยของ Vollmari and Kruggel-Emden [15] เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบห้องอบแห้งแบบสองคอลัมน์ (Dual-chamber) รูปที่ 3 แสดงโดเมน CFD-DEM ของระบบ Dual-chamber fluidized bed ได้ทดลองหาจำนวน Grid ที่เหมาะสม (Grid independent) โดยกำหนดให้ Grid หยิบขึ้นเพื่อให้มีจุดคำนวณน้อยลงแต่ต้องไม่ส่งผลกระทบต่อคำตอบที่ได้ จะช่วยให้การคำนวณทำได้เร็วยิ่งขึ้น



รูปที่ 3 ขนาดโดเมนที่พิจารณาในแบบจำลองฟลูอิดเซชัน ในช่วงเริ่มต้น ( $t=0$ )  
ภายในเบตบรรจุอนุภาคจำนวน 11480 อนุภาค

การทดสอบ Grid independent ทำโดยการบรรจุอนุภาคจำนวน 11480 อนุภาคแล้วกำหนดฟังก์ชันความเร็วอากาศเข้าเบตทางด้านล่างให้เพิ่มขึ้นตามเวลาในโปรแกรม ANSYS Fluent ซึ่งสามารถดูรายละเอียดวิธีนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [9, 10] แล้วคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ( $u_{mf}$ ) โดยทดสอบที่จำนวน Grid เท่ากับ 1380, 1736, 1946, 2719, และ 3323 ตามลำดับ จากการจำลองพบว่าค่า  $u_{mf}$  มีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อมีจำนวน Grid มากกว่าหรือเท่ากับ 1736 งานวิจัยนี้จึงเลือกจำนวน Grid นี้ทุกเงื่อนไขการจำลอง

จากรูปที่ 3 ในตอนเริ่มต้นอนุภาคจะถูกป้อนลงใน Chamber 1 และ Chamber 2 จำนวน Chamber ละ 5740 อนุภาค โดยจำนวนอนุภาคคำนวณนี้มาจากการปล่อยให้ตกอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วงจนมีความสูงเท่ากับ ความสูงผนังกัน (Weir) ห้องอบทั้งสองจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยช่องว่างความสูง 30 mm จากฐานเบตเมื่อเริ่มอบแห้งจะปล่อยอนุภาคเข้าสู่ Chamber 1 (อนุภาคกลุ่มสีเขียว) กำหนดให้เป็นอัตราการไหลเชิงมวลต่อเวลาโดยจำลองการป้อนแบบ Rotary feeder ดังรูปที่ 3 เมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชันการเคลื่อนที่ของ

อนุภาคจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องจาก Chamber 1 เคลื่อนที่ผ่านช่องความสูง 30 mm เพื่อเข้าสู่ Chamber 2 หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ข้ามผนังกันออกจาก Chamber 2 ในอัตราการไหลเชิงมวลค่าหนึ่ง จะเห็นว่าอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วอากาศเข้าแล้ว ยังถูกควบคุมอัตราการไหลจากขนาดของช่องทางผ่านระหว่าง Chamber และ ความสูงผนังกันก่อนออกจาก Chamber 2 ดังนั้นสามารถทดลองปรับขนาดพารามิเตอร์ดังกล่าว เพื่อเพิ่มระยะเวลาการอยู่ในห้องอบ (Residence time) ให้สอดคล้องกับวัสดุแต่ละชนิดที่จำเป็นต้องลดความชื้นให้เหมาะสมกับการเก็บรักษา โดยการลดความชื้นในอนุภาคขึ้นกับปัจจัยหลัก 2 อย่างคือ 1. อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง 2. ระยะเวลาที่อนุภาคอยู่ในห้องอบแห้ง ในงานวิจัยนี้ได้เลือกขนาดของช่องทางผ่านและความสูงผนังกันให้มีขนาดโตกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคประมาณ 10 เท่า เพื่อใช้เป็นข้อมูลศึกษาระยะเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ภายในห้องอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองนี้

การกำหนดความเร็วอากาศเข้าห้องอบแห้ง (Drying chamber) ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลความเร็วต่ำสุดในการเกิด

ฟลูอิดเซชัน ( $u_{mf}$ ) จากงานวิจัยที่ผ่านมา [9, 10] มีค่า  $u_{mf} = 1.5$  m/s ซึ่งคำนวณมาจากสมบัติวัสดุเดียวกันโดยทั่วไปเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนอนุภาคได้อย่างทั่วถึงความเร็วในการเกิดฟลูอิดเซชันจะมีค่าสูงกว่า  $u_{mf}$  ประมาณ 1.1-1.5 เท่า ถ้าใช้ความเร็วอากาศสูงจะทำให้อัตราการอบแห้งสูง แต่เมล็ดข้าวอาจเกิดการแตกร้าวหรือลอยออกจากห้องอบแห้งและยังเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน งานวิจัยนี้จะกำหนดความเร็วอากาศขาเข้าใน Chamber 1 และ Chamber 2 จากสมมติฐาน ในช่วงเริ่มต้นวัสดุที่มีความชื้นสูงจะอยู่ใน Chamber 1 ซึ่งเกิดการถ่ายเทมวลและความร้อนสูงกว่า Chamber 2 ดังนั้นในแบบจำลอง Case 1 (ตารางที่ 3) จึงกำหนดให้อากาศขาเข้า Chamber 1 ( $u_1$ ) มากกว่า Chamber 2 ( $u_2$ ) ส่วนในกรณีการจำลองเงื่อนไขอื่นๆ กำหนดค่าให้มีความแตกต่างกันเพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิง

มวลของอนุภาคที่เปลี่ยนไปตามเวลา ดังแสดงในตารางที่ 3

จากการจำลองเพื่อหาอัตราการไหลเชิงมวลในระยะเวลา 15 s กำหนดค่า  $u_1 = 2.0$  m/s ( $1.33u_{mf}$ ) และ  $u_2 = 1.6$  m/s ( $1.06u_{mf}$ ) พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลที่ทางออกมีค่า  $\dot{m}_{sim}$  ประมาณ 2400-2480 g/min ซึ่งต้องใช้อัตราการป้อน ( $\dot{m}_{input}$ ) เพื่อกำหนดอนุภาคเข้าระบบด้วยอัตราการไหลเชิงมวลในช่วงดังกล่าว เพื่อให้อัตราการเคลื่อนที่เข้า-ออกห้องอบแห้งมีค่าคงที่หรือใกล้เคียงกันมากที่สุด นอกจากนี้ในการปล่อยอนุภาคเข้าระบบจะมีผนัง (Partition wall) เพื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าทางตอนต้นของ Chamber 1 เพื่อให้มีระยะเวลาการเคลื่อนที่ในห้องอบแห้งที่ยาวนานขึ้น

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการจำลอง (ค่า  $\dot{m}_{sim}$  มาจากการคำนวณด้วยแบบจำลองจะกล่าวถึงในหัวข้อผลการจำลอง)

Case	$u_1$ (m/s)	$u_2$ (m/s)	$\dot{m}_{input}$ , g/min (kg/s)	$\dot{m}_{sim}$ , g/min (kg/s)
1	2.0	1.6	2400 (0.04)	2298 (0.0383)
2	1.6	2.0	2400 (0.04)	2466 (0.0411)
3	2.0	2.0	2400 (0.04)	2526 (0.0421)
4	1.6	1.6	2400 (0.04)	2280 (0.0380)
5	2.0	1.6	3600 (0.06)	3426 (0.0571)
6	2.0	1.6	1200 (0.02)	1190 (0.0198)

### 3. ผลการจำลองและวิจารณ์

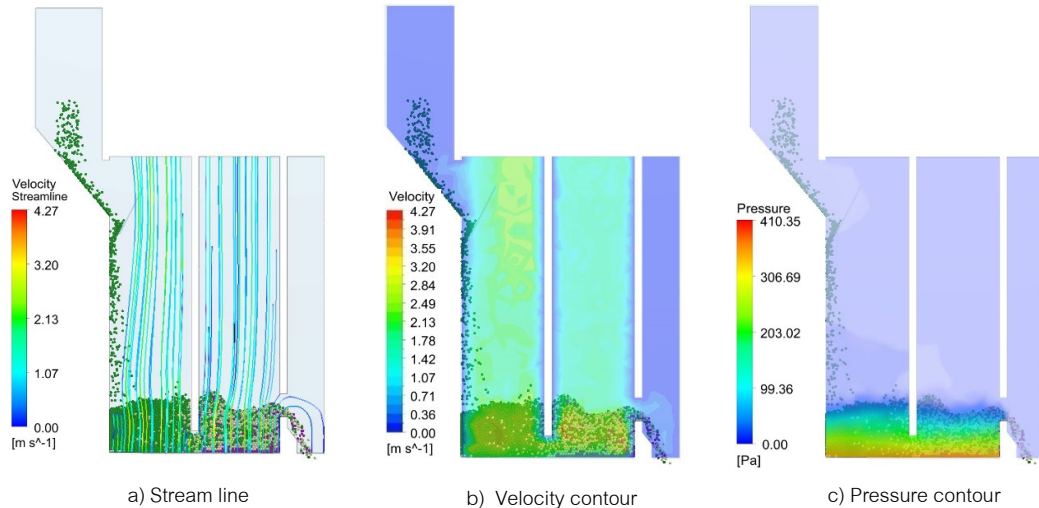
จากรูปที่ 4 แสดง Stream line, Velocity contour และ Pressure contour ของอากาศในขณะที่เคลื่อนผ่านอนุภาคที่เวลา 6 s เงื่อนไขการจำลอง Case 1 (ดังตารางที่ 3) รูปที่ 4a พบว่าการไหลของอากาศขณะเคลื่อนผ่านวัสดุจะมีความเร็วสูงและมีความเร็วลดลงหลังจากผ่านกองวัสดุไปแล้ว รูปที่ 4b พบว่าความเร็วของอากาศใน Chamber 1 มีค่าสูงกว่าใน Chamber 2 สอดคล้องกับความเร็วอากาศที่กำหนดไว้ในแบบจำลอง บริเวณผนังห้องอบมีความเร็วของอากาศเท่ากับศูนย์ตรงตามเงื่อนไขแบบจำลองที่กำหนดให้ผนังเป็นแบบไม่ลื่นไถล (No slip) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างผนังกับอากาศ ส่วนรูปที่ 4c พบว่าความดันสูงจะเกิดที่ด้านล่างเนื่องจากอากาศพยายามเคลื่อนที่ผ่านกองวัสดุจาก

ด้านล่างของห้องอบแห้ง ทำให้เกิดความดันสูงสุดประมาณ 410 Pa (Gauge) ความดันจะลดลงเรื่อยๆ ตามการทะลุผ่านชั้นวัสดุ เนื่องจากวัสดุเกิดการลอยตัวความพรุนของวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้อากาศไหลผ่านได้ง่ายกว่าชั้นล่างซึ่งวัสดุกองทับกันอย่างหนาแน่น

รูปที่ 5 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเวลาต่างๆ ที่เงื่อนไขของ Case 1 เพื่อความง่ายต่อการสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแบบจำลองได้กำหนดสีของอนุภาคเป็น 3 กลุ่ม ที่เวลาเริ่มต้น  $t=0$  s อนุภาค Group 1 (สีเทา) และ Group 2 (สีม่วง) เป็นอนุภาคที่บรรจุอยู่ใน Chamber 1 และ 2 ตามลำดับ โดยมีความสูงเบตเริ่มต้นเท่ากับ ความสูงของผนังกัน (Weir) ส่วน Group 3 (สีเขียว) จะเริ่มปล่อยอนุภาคเมื่อเวลา  $t > 0$  ด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ ( $\dot{m}_{input}=2400$  g/min) อนุภาคจะ

เคลื่อนที่จาก Chamber 1 เข้าสู่ Chamber 2 แล้วยกตัวข้ามผนังกันและออกจากระบบ ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}_{sim}$ ) ในแบบจำลองได้จากการนับมวลที่วิ่งผ่าน Sensor ต่อหน่วยเวลาหาค่าเฉลี่ยตลอด 15

s จากการคำนวณพบว่ามีความ  $\dot{m}_{sim}=2298$  g/min ซึ่งมีค่าต่ำกว่า  $\dot{m}_{input}$  เมื่อเวลาผ่านไปอาจทำให้อุณหภูมิสะสมในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



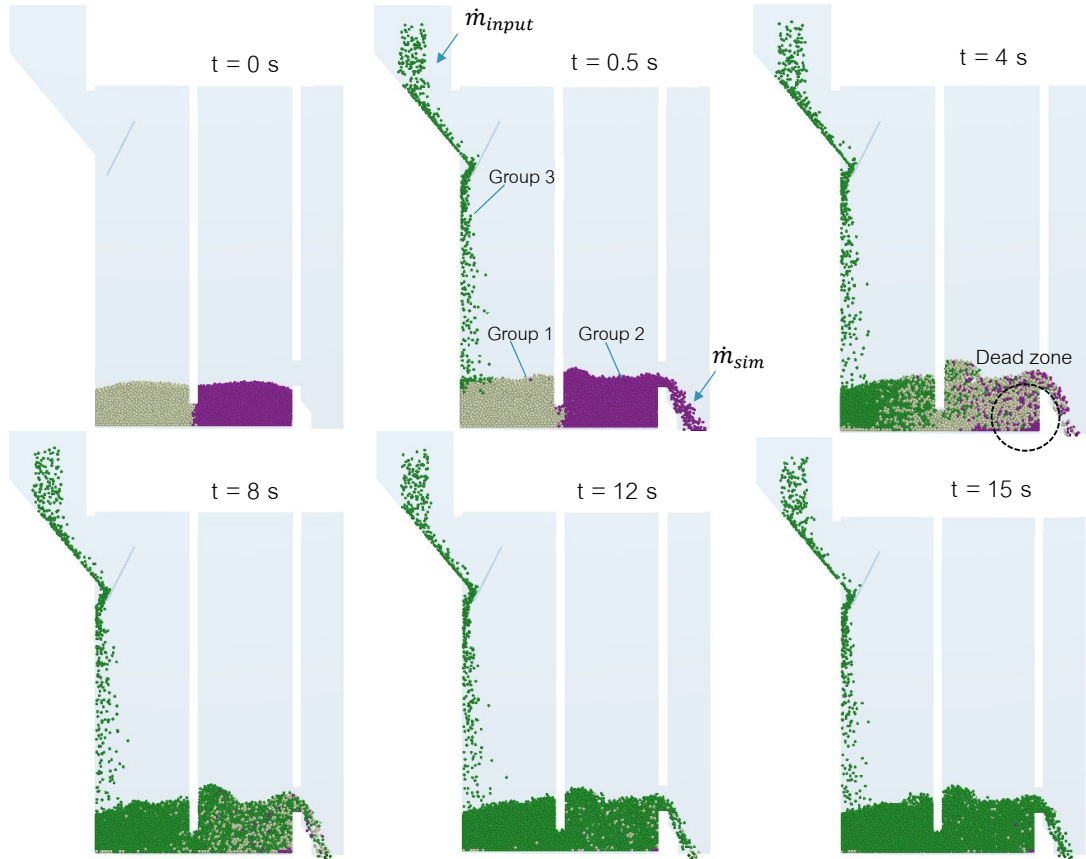
รูปที่ 4 Stream line, Velocity contour และ Pressure contour ของอากาศที่  $t = 6$  s  
เงื่อนไข  $u_1 = 2.0$  m/s,  $u_2 = 1.6$  m/s และ  $\dot{m}_{input}=2400$  g/min

จากรูปที่ 5 พบว่าที่เวลา 4 s อุณหภูมิ Group 1 เคลื่อนที่เข้าผสมกับ Group 2 และผลักดันให้อุณหภูมิ Group 2 ออกจากระบบ เมื่อเวลาผ่านไป 12 s อุณหภูมิ Group 3 มีปริมาณมากในระบบ และที่เวลา 15 s อุณหภูมิ Group 1 และ 2 หลงเหลืออยู่ในระบบเพียงเล็กน้อย สอดคล้องกับรูปที่ 6 แสดงจำนวนของอนุภาคกลุ่มต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา จากรูปที่ 6 พบว่า ในระยะเวลา 12 s อุณหภูมิ Group 2 ลดลงจากจำนวนเริ่มต้น 5470 อนุภาคเหลือเพียง 352 อนุภาค ที่เวลา 14 s อุณหภูมิ Group 1 มีจำนวนการลดลงใกล้เคียงกับ Group 2 ตรงข้ามกับอนุภาค Group 3 ที่เพิ่มจำนวนในระบบมากขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลา นอกจากนี้ผลการจำลองในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นจุด Dead zone ที่บริเวณผนังกันก่อนที่อนุภาคจะออกจากระบบ มีอนุภาคตกค้างในระบบเพราะไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามผนังกันได้ ซึ่งอาจแก้ปัญหากด้วยการออกแบบผนังกันให้ลาดเอียง จากระบบในรูปที่ 5 หากใช้ความเร็วอากาศสูงกว่าค่า  $u_{mf}$  หลายเท่า จะทำให้อนุภาคหลุดลอยออกจากห้องอบแห้ง ลักษณะการทำงานจะคล้ายคลึงกับระบบลำเลียงวัสดุโดยลม

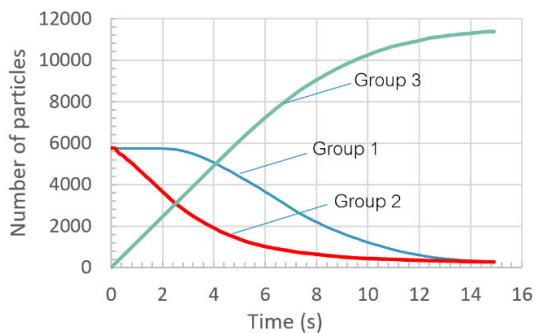
(Pneumatic conveyor) ซึ่งใช้สำหรับลำเลียงวัสดุเม็ดแห้งในพื้นที่ที่ค่อนข้างจำกัด ถ้าใช้ความเร็วที่เหมาะสมต่อการลอยตัวของอนุภาคสามารถเรียกระบบนี้ว่า การทำแห้งด้วยลม (Pneumatic drier) ได้เช่นกัน

รูปที่ 7 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเงื่อนไขการจำลองในตารางที่ 3 ที่เวลา 2 s หลังจากเกิดฟลูอิดเซชัน พบว่า Case 5 อนุภาคทั้ง 3 กลุ่ม มีการผสมกันมากที่สุด และผสมกันน้อยที่สุดใน Case 6 แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคใน Case 5 สามารถผลักดันให้อนุภาคออกจากระบบได้มากที่สุด สอดคล้องกับรูปที่ 8 ซึ่งแสดงจำนวนอนุภาคที่ตกค้างในระบบในระยะเวลา 15 s พบว่า Case 5 มีจำนวนอนุภาคที่ตกค้างในระบบน้อยที่สุด แม้ว่าจะมีค่า  $\dot{m}_{input} = 3600$  g/min ที่ป้อนเข้าระบบสูงที่สุด ซึ่งอนุภาคในระบบของ Case 5 มีความเร็วเฉลี่ยการเคลื่อนที่ของอนุภาคสูงที่สุดเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 9 และข้อมูลในตารางที่ 3





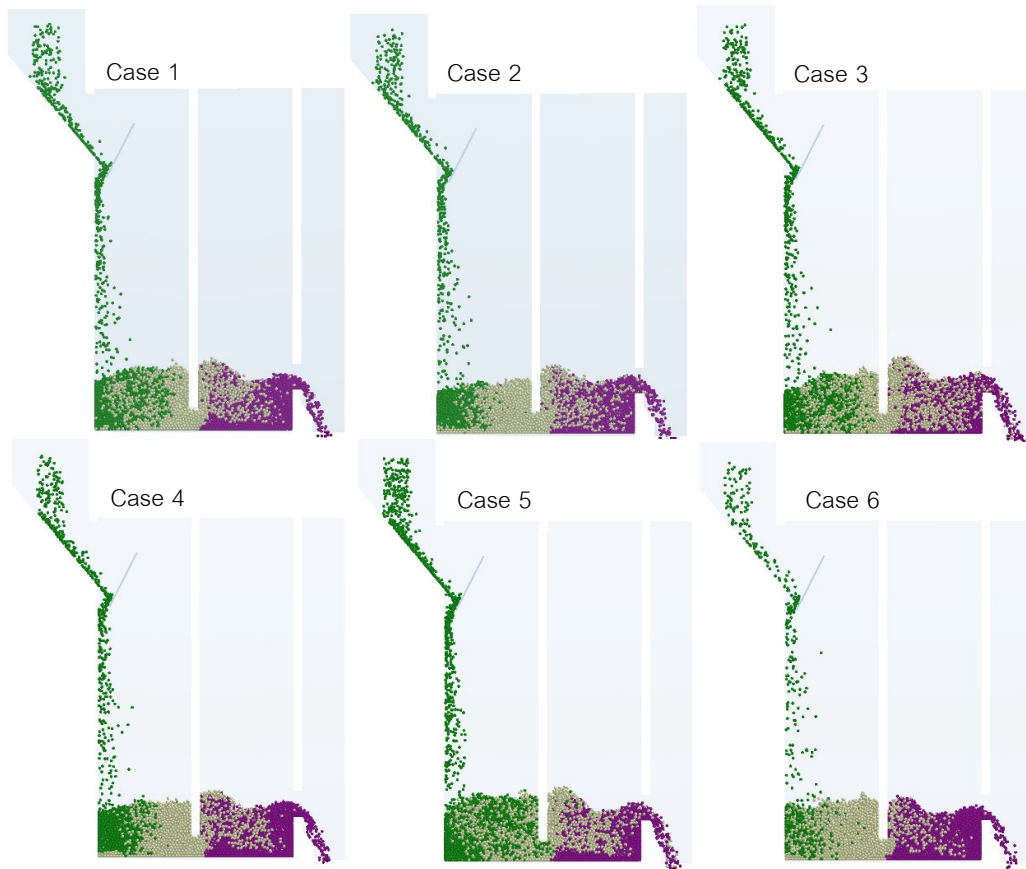
รูปที่ 5 การเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเวลา ที่เงื่อนไข  $u_1 = 2.0 \text{ m/s}$ ,  $u_2 = 1.6 \text{ m/s}$  และ  $\dot{m}_{input} = 2400 \text{ g/min}$



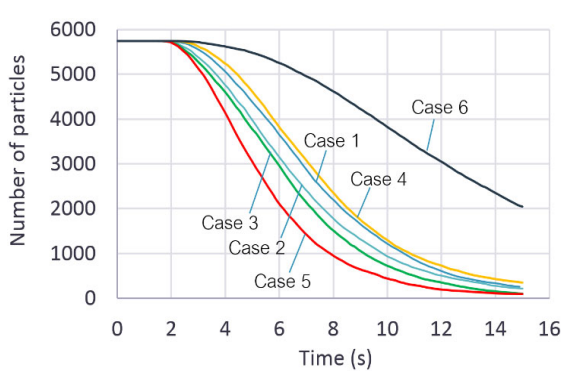
รูปที่ 6 จำนวนของอนุภาคแต่ละกลุ่มที่อยู่ในระบบ  
เงื่อนไข  $u_1 = 2.0 \text{ m/s}$ ,  $u_2 = 1.6 \text{ m/s}$  และ  
 $\dot{m}_{input} = 2400 \text{ g/min}$

จากตารางที่ 3 พบว่าค่า  $\dot{m}_{sim}$  มีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่ม  $\dot{m}_{input}$  เนื่องจากจำนวนของอนุภาคในระบบที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเกิดฟลูอิดไอเซชันที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (ความพรุนลดลง) อนุภาคจะเคลื่อนที่ข้ามผนังกันออกจาก

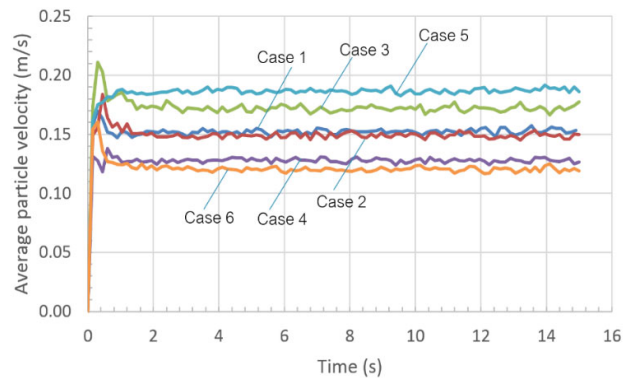
Chamber 2 ในปริมาณที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้า  $u_2$  มีค่าสูงกว่า  $u_1$  จะทำให้  $\dot{m}_{sim}$  มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันจากตารางที่ 3 การเพิ่ม  $\dot{m}_{input}$  เป็น 3600 g/min (กรณีที่ 5) และลด  $\dot{m}_{input}$  เป็น 1200 g/min (กรณีที่ 6) พบว่า  $\dot{m}_{sim}$  มีค่าใกล้เคียงกับ  $\dot{m}_{input}$  แสดงให้เห็นว่าการเกิดฟลูอิดไอเซชันสามารถถ่ายเทอนุภาคเข้า-ออกระบบให้อยู่ในระดับเกือบคงที่ จากรูปที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ 2, 5 และ 6 ซึ่งทั้งสามกรณีมีค่า  $u_1$  และ  $u_2$  เท่ากัน แต่มี  $\dot{m}_{input}$  ต่างกัน พบว่ากรณีที่ 5 ( $\dot{m}_{input} = 3600 \text{ g/min}$ ) มีความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคสูงที่สุด เนื่องจากมีจำนวนอนุภาคมากเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ความดันตกคร่อมเบตจะมีค่าสูงสุดส่งผลให้อนุภาคเกิดฟลูอิดไอเซชันที่ความเร็วสูง ตรงข้ามกับกรณีที่ 6 ( $\dot{m}_{input} = 1200 \text{ g/min}$ ) มีจำนวนอนุภาคในระบบต่ำที่สุด ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคจึงต่ำกว่ากรณีที่ 5



รูปที่ 7 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอนุภาคในเงื่อนไข Case 1-6 (ตารางที่ 3) ที่เวลา 2 s



รูปที่ 8 เปรียบเทียบจำนวนอนุภาค Group 1

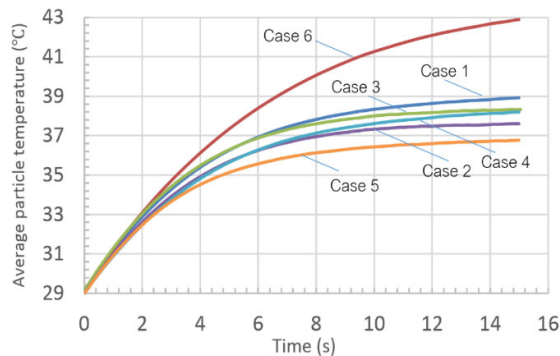


รูปที่ 9 ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคทั้งหมดภายในระบบ

รูปที่ 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของอนุภาคจากการจำลองตามเงื่อนไขในตารางที่ 3 ในระยะเวลา 15 s โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของอนุภาคเท่ากับ 29 °C และกำหนดอุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 60 °C จากผลการจำลองพบว่า Case 6 มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุด โดยมี

ค่าประมาณ 43°C ส่วนใน Case 1-5 มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยใกล้เคียงกันโดยมีค่าสูงสุดประมาณ 37-39°C ซึ่งมีค่าต่ำกว่า Case 6 ประมาณ 4-6°C จากรูปที่ 10 อุณหภูมิของ Case 6 มีค่าเฉลี่ยสูงสุด เนื่องจากมีอัตราการป้อนอนุภาค  $\dot{m}_{input} = 1200 \text{ g/min}$  ซึ่งมีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับกรณี

อื่นๆ เมื่อจำนวนอนุภาคในระบบน้อยที่สุดทำให้สามารถรับความร้อนจากอากาศร้อนได้ดี ตรงข้ามกับ Case 5 ที่มีค่า  $\dot{m}_{input}=3600$  g/min ปริมาณอนุภาคป้อนเข้าระบบสูงจึงทำให้อนุภาคมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำที่สุด สอดคล้องกับรูปที่ 9 ซึ่งพบว่าใน Case 5 อนุภาคมีความเร็วเฉลี่ยสูงที่สุดมีโอกาสที่มีระยะเวลาในการอยู่ในห้องอบแห้งต่ำ จึงมีระยะเวลารับพลังงานความร้อนต่ำตามไปด้วย ส่วนในกรณี Case 6 มีความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่น้อยที่สุดทำให้มีระยะเวลาในการรับความร้อนยาวนานกว่ากรณีอื่นๆ นอกจากนี้ Case 1-4 มีค่า  $\dot{m}_{input}=2400$  g/min เท่ากันจะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยใกล้เคียงกันซึ่งแตกต่างกันไม่ประมาณ  $2^{\circ}\text{C}$  ความแตกต่างของอุณหภูมินี้เป็นผลมาจากการใช้ความเร็วขาเข้า  $u_1$  และ  $u_2$  ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 10 อุณหภูมิเฉลี่ยของอนุภาคในระหว่างการอบแห้งตามเงื่อนไขในตารางที่ 3 ระยะเวลาอบแห้ง 15 s

เมื่อวิเคราะห์ความถี่ (Frequency) ของ Residence time ของอนุภาคทั้งหมดที่เคลื่อนที่ภายในระบบ พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่มี Residence time ประมาณ 8 s สอดคล้องกับการทดลองของ Vollmari and Kruggel-Emden [15] ซึ่งมีขนาดห้องอบใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ Vollmari and Kruggel-Emden ทำการทดลองโดยฝัง RFID-tag ไว้ในอนุภาคทรงกลมรัศมี 3.6 mm แล้วปล่อยอนุภาคเคลื่อนที่ในห้องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน RFID reader ซึ่งใช้คลื่นวิทยุความถี่สูง (UHF) ตรวจจับอนุภาคและทำการบันทึกเวลาไว้ ผลการทดลองพบว่ามีความถี่ของ Residence time ของอนุภาคสูงสุดในช่วง 8-10 s

การจำลองโดยใช้แบบจำลอง CFD-DEM ในงานวิจัยนี้ทำให้ทราบเพียงพฤติกรรมไหลของของไหล (Gas)

และการเคลื่อนที่ของของแข็ง (Solid) ในระบบฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่อง ซึ่งระบบอบแห้งพร้อมกับการเคลื่อนที่วัสดุชนิดฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่อง ที่ผู้วิจัยจะสร้างแบบจำลองต่อไปจะมีกระบวนการฉีดพ่นสารเคลือบซึ่งทำให้อนุภาคมีความชื้นเพิ่มขึ้นสลับกับการอบแห้งในระหว่างที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านโซนการเคลือบ และหากประยุกต์ใช้สำหรับการเคลือบเมล็ดข้าวสารนั้นความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ควรใกล้เคียงหรือเท่ากับความชื้นเริ่มต้นเพื่อไม่ให้เมล็ดข้าวเสียหายระหว่างการเก็บรักษา [1] แต่ในระบบอบแห้งนั้นความชื้นของผลิตภัณฑ์จะลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้น้ำหนักและความหนาแน่นของอนุภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะมีผลต่อพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของของแข็ง นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ระบบเคลือบแบบฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่องสำหรับการเคลือบเมล็ดข้าวสารควรคำนึงถึงการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomeration) ในระหว่างการเคลือบ ประสิทธิภาพการเคลือบ (Coating efficiency) รวมทั้งความสม่ำเสมอของการเคลือบของระบบด้วยเช่นกัน เนื่องจาก Particle residence time ถูกกำหนดด้วยลักษณะการทำงานของระบบที่สร้างขึ้น

#### 4. สรุปผลการจำลอง

แบบจำลอง CFD-DEM สามารถทำนายการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบในระบบฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่องได้ การเกิดฟลูอิดซ์ชันของระบบสามารถถ่ายเทอนุภาคด้วยอัตราการไหลเชิงมวลเข้า-ออกระบบที่มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลป้อนเข้าระบบจะทำให้อนุภาคเกิดฟลูอิดซ์ชันที่ความเร็วสูงขึ้นและมีอัตราการถ่ายเทอนุภาคออกจากระบบเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิเฉลี่ยของอนุภาคจะมีค่าต่ำเนื่องจาก Residence time ลดลง การกำหนดความเร็วอากาศเข้า Chamber สุดท้าย ( $u_2$ ) ให้มีค่าสูงกว่า Chamber ก่อนหน้า ( $u_1$ ) จะทำให้การถ่ายเทอนุภาคออกจากระบบมีอัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้น โดยการจำลองที่เงื่อนไข  $u_1 = 2.0$  m/s,  $u_2 = 1.6$  m/s และ  $\dot{m}_{input}=2400$  g/min มีค่า Residence time สูงสุดที่ 8 s

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และ ผศ.ดร.สถาพร วังฉาย ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ และโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Palamanit, A., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Tungtrakul, P. *Effects of inlet air temperature and spray rate of coating solution on quality attributes of turmeric extract coated rice using top-spray fluidized bed coating technique*. Journal of Food Engineering, 2013, Vol. 1, pp. 132-138.
- [2] Ma, H., Xu, L. and Zhao, Y. *CFD-DEM simulation of fluidization of rod-like particles in a fluidized bed*. Powder Technology, 2017, Vol. 314, pp. 355-366.
- [3] Scherer, V., Mönnigmann, M., Berner, M.O., Sudbrock, F. *Coupled DEM-CFD simulation of drying wood chips in a rotary drum-Baffle design and model reduction*. Fuel, 2016, Vol. 184, pp. 896-904.
- [4] Oke, O., Wachem, B.V., Mazzeia, L. *Lateral solid mixing in gas-fluidized beds: CFD and DEM studies*. Chemical Engineering Research and Design, 2016, Vol. 114, pp. 148-161.
- [5] Zhou, F., Hu, S., Liu, S., Liu, C. and Xia, T. *CFD-DEM simulation of the pneumatic conveying of fine particles through a horizontal slit*. Particuology, 2014, Vol. 16, pp. 196-205.
- [6] Song, C., Liu, D., Ma, J., Chen, X. *CFD-DEM simulation of flow pattern and particle velocity in a fluidized bed with wet particles*. Powder Technology, 2017, Vol. 314, pp. 346-354.
- [7] Schmidt, M., Bück, A. and Tsotsas, E. *Experimental investigation of the influence of drying conditions on process stability of*

*continuous spray fluidized bed layering granulation with external product separation*. Powder Technology, 2017, Vol. 320, pp. 474-482.

[8] Adebowale, A.R.A. *Effect of variety and moisture content on some engineering properties of paddy rice*. Journal of Food Science and Technology, 2011, Vol. 48(5), pp. 551-559.

[9] Prakotmak, P. and Wangchai, S. *Investigation of Particle Dynamics and Heat Transfer in a Fluidized bed Using CFD-DEM Simulation*, in Proceedings The 32<sup>th</sup> Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, Mukdahan, 2018.

[10] Prakotmak, P. *CFD-DEM simulation of minimum fluidization velocity for gas-solid medium*. Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering, 2019, Vol. 25(1), pp. 19-27.

[11] Mindlin R.D. and Deresiewicz, H. *Elastic spheres in contact under varying oblique forces*. Trans, ASME. Ser. E. J. Appl. Mech, 1953, Vol. 20, pp.327-344.

[12] EDEM EDEM 2.6 Theory Reference Guide, 2014, pp. 5

[13] Hobbs, A. *Simulation of an aggregate dryer using coupled CFD and DEM methods*. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009, Vol. 23(2), pp. 199-207.

[14] Müller, C. R., Scott, S. A., Holland, D. J., Clarke, B. C., Sederman, A. J., Dennis, J. S. and Gadden, L. F. *Validation of a discrete element model using magnetic resonance measurements*. Particuology, 2009, Vol.7, pp. 297-306.

[15] Vollmari, K. and Kruggel-Emden, H. *Numerical and experimental analysis of particle residence times in a continuously operated dual-chamber fluidized bed*. Powder Technology, 2018, Vol. 338, pp. 625-637.