



แบบจำลอง CFD-DEM สำหรับพลศาสตร์ของก๊าซ-ของแข็งในระบบฟลูอิดิซ์เบดแบบต่อเนื่อง
CFD-DEM SIMULATION OF THE GAS-SOLID FLOW DYNAMICS IN A CONTINUOUS
FLUIDIZED BED

ปรีดา ปราภุมาก

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

E-mail: fengpdpr@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งและก๊าซเป็นปรากฏการณ์หลักในระบบฟลูอิดิซ์เบดแบบสองเฟส บทความนี้นำเสนอแนวทางการคำนวณของพลศาสตร์ของไหลควบคู่ไปกับวิธีการคำนวณอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (CFD-DEM) เพื่อจำลองพฤติกรรมและอันตรกิริยาระหว่างของไหลกับอนุภาคของแข็งในเครื่องอบแห้งฟลูอิดิซ์เบดแบบต่อเนื่อง แบบจำลอง DEM ถูกใช้เพื่อจำลองระบบอนุภาคแบบเม็ด ในขณะที่ CFD ใช้ในการจำลองการไหลของของไหล โดยการแก้สมการ Navier-Stokes อิทธิพลของความเร็วก๊าซ อัตราการไหลเชิงมวล อุณหภูมิของอนุภาคและระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในห้องอบแห้ง (Residence time) ที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งได้ถูกรายงานในงานวิจัยนี้ การทำนายระยะเวลาของอนุภาคที่อยู่ในห้องอบแห้งสามารถช่วยในการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการฟลูอิดิซ์เบดชนิดทำงานแบบต่อเนื่อง

คำสำคัญ: การไหลหลายสถานะ, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, ฟลูอิดิซ์เบด, 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

งานวิจัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคร่วมกับเทคนิคฟลูอิดิซ์เบดชนิดฉีดพ่นสารเคลือบจากด้านบน [1, 2] ยังมีข้อจำกัดในด้านการผลิตโดยเครื่องที่ออกแบบสามารถทำงานในลักษณะเป็นงวด (Batch) ครั้งละ 4 kg ต้องอาศัยแรงงานในการนำเมล็ดข้าวเข้า-ออก

ห้องอบแห้ง ทำให้เกิดความล่าช้าในการผลิตและอาจได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพลดลง เนื่องจากในระหว่างกระบวนการผลิตจำเป็นต้องเปิด-ปิดเครื่อง เพื่อตั้งค่าอุปกรณ์พ่นเคลือบสารละลายและต้องรอให้อุณหภูมิของระบบคงที่ก่อนการนำเมล็ดข้าวเข้าห้องอบในงวดถัดไป การปรับปรุงเครื่องให้สามารถทำงานแบบต่อเนื่องจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตและช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงขึ้น เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องต้นแบบ การศึกษาแบบจำลองฟลูอิดไดซ์เบดชนิดทำงานแบบต่อเนื่องจึงมีความจำเป็นสำหรับการพัฒนาเครื่องอบแห้งชนิดนี้ต่อไป

ในอดีตที่ผ่านมาการศึกษาพลศาสตร์ของอนุภาคและของไหลเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมเคลื่อนที่ด้วยการทดลองต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายมาก นอกจากนี้การวัดค่าต่าง ๆ ในระหว่างการทดลองเป็นการรบกวนระบบทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องน้อยลง สำหรับกระบวนการฟลูอิดไดซ์สองสถานะ (Two-phase Fluidization) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการที่เม็ดของแข็งหรืออนุภาคสัมผัสกับของไหลแล้วทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปตามกระแสการไหลและประพุดตัวคล้ายกับของไหล จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแบบจำลองที่สามารถอธิบายปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและอนุภาคคือแบบจำลอง CFD-DEM [3, 4] 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 เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคภายในฟลูอิดไดซ์เบดและให้รายละเอียดมากกว่าการทดลองจริง สามารถเก็บรายละเอียดข้อมูลของการไหลที่ซับซ้อนได้โดยไม่รบกวนลักษณะทางกายภาพของการไหล และสามารถทดสอบเกินขอบเขตช่วงการทำงานจริงได้ ซึ่งการทดลองจริงนั้นทำได้ยากหรืออาจต้องใช้งบประมาณสูง ในปัจจุบันนักวิจัยได้ใช้แบบจำลอง CFD-DEM ศึกษาพฤติกรรมของการไหลแบบหลายสถานะ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากต่อวงการอุตสาหกรรม เช่น การอบแห้ง (Drying) [5] การผสมวัสดุ (Mixing) [6] ระบบลำเลียงวัสดุด้วยลม (Pneumatic conveyor) [7] และการศึกษาการยึดเกาะกันของอนุภาคเปียก (Wet particle agglomerates) [8] เป็นต้น นอกจากนี้แบบจำลอง CFD-DEM ยังช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนและการกระจายตัวของอนุภาคภายในระบบ ยกตัวอย่างเช่นระบบอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ทำให้ทราบข้อจำกัดของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งเพื่อป้องกันการเสียหาย ตลอดจนศึกษาพฤติกรรมผสมกันของอนุภาคในระหว่างการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดเพื่อเลือกใช้ความเร็วอากาศที่เหมาะสม ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถนำไปใช้ในการออกแบบห้องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ทำให้ทราบตำแหน่งจุดอับ (Dead zone) ที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบดไม่ทั่วถึง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการนำเอาเทคนิคอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่องมาใช้ร่วมกับการอบแห้งหรือการพ่นเคลือบผลิตภัณฑ์ (Coating) สามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ [9] แต่ระบบนี้ยังไม่แพร่หลายมากนัก นักวิจัยได้พยายามปรับปรุงให้ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่องทำงานอย่างมีประสิทธิภาพดีขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งส่วนใหญ่ยังอยู่ในห้องปฏิบัติการ [10, 11] การสร้างแบบจำลอง CFD-DEM ของระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่องจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบระบบ ช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการทดลองผิดลองถูกในการสร้างเครื่องต้นแบบ เพื่อลดความซับซ้อนและลดระยะเวลาในการจำลองปัญหาในแบบจำลอง CFD-DEM งานวิจัยนี้จะไม่คำนึงถึงการถ่ายเทมวลของอนุภาค พิจารณาเฉพาะพลศาสตร์ของก๊าซ-ของแข็งและการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่องเท่านั้น บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลอง CFD-DEM ของระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบสองคอลัมน์ เพื่อทำนายพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ทำนายอุณหภูมิของอนุภาค ทำนาย

ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Residence time) และหาอัตราการป้อนที่เหมาะสม เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างเครื่องชนิดนี้ต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลของวัสดุ และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง CFD-DEM แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติวัสดุและพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง CFD-DEM [12, 13]

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

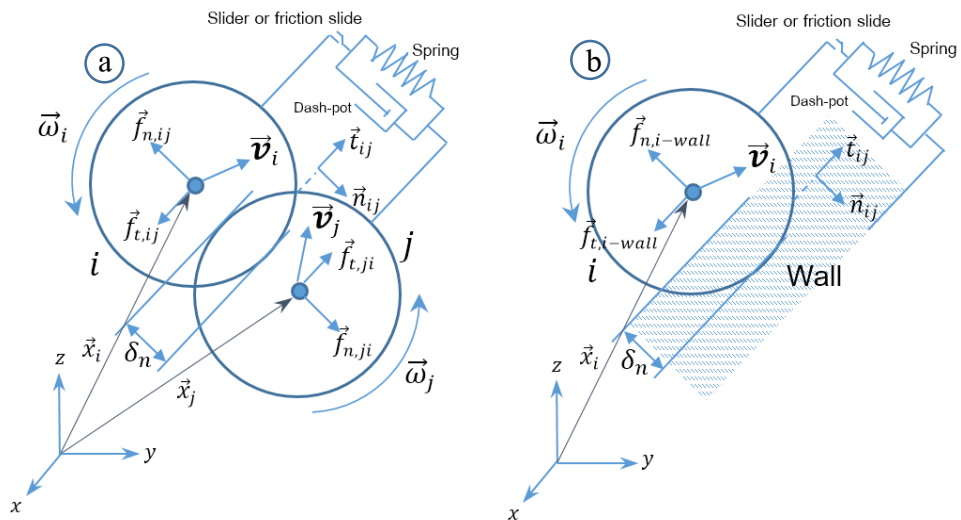
ข้าวสารที่นำมาพิจารณา คือสายพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ทำการวัดขนาด ความยาว(L) กว้าง(W) และหนา(T) ด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์ คาลิเปอร์จำนวน 50 ซ้ำแล้วหาค่าเฉลี่ย งานวิจัยนี้จะจำลองเมล็ดข้าวจากรูปทรงรีให้เป็นทรงกลมเพื่อลดความซับซ้อนและระยะเวลาการจำลองปัญหา โดยคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (Effective diameter, D_e) [14] จากสมการ

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

เนื่องจากสมบัติวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองเป็นชนิดเดียวกันและมาจากงานวิจัยต่อเนื่อง สามารถสืบค้นวิธีการทดลองและที่มาของค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 จากงานวิจัยของ Prakotmak et al. [12, 13]

2.1 แบบจำลอง CFD-DEM

ในงานวิจัยนี้จำลองการชนกันเป็นชนิดทรงกลมอ่อน (Soft sphere model) พิจารณาจากการเปลี่ยนรูปร่างจริงของการชนกันระหว่างอนุภาคสองอนุภาค โดยสมมติให้เกิดการกระจัดเหลื่อม δ แทนการเกิดการเปลี่ยนรูปร่างจริง ดังรูปที่ 1 แรงที่เกิดขึ้นระหว่างการชนกันเป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic contact force model) ทำให้อนุภาคมีการเสียพลังงานจลน์ พิจารณาจาก สปริง ตัวหน่วง และสไลเดอร์ เมื่อเกิดการชนกันระหว่างอนุภาค (รูปที่ 1a) หรืออนุภาคกับผนัง (รูปที่ 1b) จะพิจารณาว่าอนุภาคเกิดการเหลื่อมกัน (Overlapping distance, δ) ทำให้เกิดการกระจัดและแรงสัมผัส (Contact force) โดยแรงสัมผัสและการกระจัดหาได้จากการคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละอนุภาค วิธี DEM จะประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's second law) และใช้กฎของฮุก (Hooke's law) มาพิจารณาขณะที่เกิดแรงสัมผัสระหว่างอนุภาคหรืออนุภาคกับผนัง โดยขนาดการเหลื่อมกันที่จุดสัมผัสจะสัมพันธ์กับแรงสัมผัสโดยตรงและขนาดของการเหลื่อมนี้จะน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาค สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองของ Hertz-Mindlin [15] ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 1 แรงสัมผัสที่เกิดขึ้น a) การชนกันระหว่างอนุภาคกับอนุภาค b) การชนกันระหว่างอนุภาคกับผนัง

ตารางที่ 2 สมการที่ใช้ในแบบจำลอง Hertz-Mindlin [15]

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 $\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$
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	$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^{eq} V_t^{rel}}$, โดย $\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$
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 μ_r คือ Equivalent Young's modulus, Equivalent radius, Equivalent mass, ระยะเหลื่อม (Particle overlap), Normal spring stiffness, Tangential spring stiffness, Coefficient of sliding friction, Coefficient of rolling friction ตามลำดับ β คือ Damping factor โดยเป็นฟังก์ชันของ Restitution coefficient (e) ซึ่งค่า e กำหนดมาจากการทดลอง [12, 13, 16] สำหรับรายละเอียดที่มาของสูตรในตารางที่ 2 สามารถสืบค้นได้จาก [17]

แบบจำลองที่สร้างในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะพลศาสตร์ของก๊าซ-ของแข็งและการถ่ายเทความร้อนในระบบฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่องเท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลหรือความชื้นระหว่างอนุภาคกับอนุภาค และอนุภาคกับอากาศร้อนภายในฟลูอิดซ์เบดมีอนุภาคของแข็งและก๊าซซึ่งมีอันตรกิริยาระหว่างกัน ในงานวิจัยนี้ทำการจำลองการไหลของอากาศ (CFD) ด้วยวิธี Eulerian-Lagrangian ร่วมกับการวิเคราะห์อนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DEM) การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค (index i) มวล m_i และปริมาตร V_i ในระบบจะคำนวณโดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) ดังนี้

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

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 β^i จะพิจารณาจากความพรุน ϵ ของอนุภาคสามารถสืบค้นจาก Prakotmak et al. [12, 13] ในระหว่างการเคลื่อนที่อนุภาคอาจเกิดการหมุนอธิบายจากสมการโมเมนต์เชิงมุมดังนี้

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

เมื่อ T_i คือทอร์ก I_i คือโมเมนต์ความเฉื่อยของอนุภาค i สำหรับของไหลจะพิจารณาให้อยู่ในรูปการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuum) ห้องอบแห้งจะถูกแบ่งในรูปแบบตารางโครงข่าย (Mesh) การเคลื่อนที่ของของไหลจะถูกคำนวณโดยการเฉลี่ยปริมาตร (Volume-averaged) จากสมการ Navier-Stokes ในรูปสมการสมมูลโมเมนต์ดังนี้

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

เมื่อ ρ_g คือความหนาแน่นของก๊าซ สามารถเขียนสมการความปั่นป่วน (Turbulence) ของของไหล เป็นแบบ Standard $k - \epsilon$ [18] ได้ดังนี้

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g \epsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\epsilon 3} G_b) - C_{\epsilon 2} \rho_g \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

เมื่อ $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ คือค่า Turbulent eddy viscosity, σ_k และ σ_ϵ คือค่า Turbulent Prandtl number มีค่าเท่ากับ 1 และ 1.3 ตามลำดับ ค่าคงที่ $C_{\epsilon 1}=1.44$, $C_{\epsilon 2}=1.92$, $C_{\epsilon 3}=1$, $C_\mu=0.09$ ค่า G_k , G_b สืบค้นสมการจาก [18] ส่วนค่าความเค้นในของไหล (τ_g) สำหรับแทนค่าในสมการที่ (4) เขียนอยู่ในรูปของเทนเซอร์ได้ดังนี้

$$\tau_g = - \left(\lambda_g - \frac{2}{3} \mu \right) (\nabla \cdot \mathbf{u}_g) \mathbf{I} - \mu \left((\nabla \cdot \mathbf{u}_g) + (\nabla \cdot \mathbf{u}_g)^T \right) \quad (7)$$

เมื่อ μ คือ Dynamic viscosity สำหรับของไหลค่า Bulk viscosity (λ_g) กำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ อนุภาคในห้องอบแห้งเปรียบเสมือนสิ่งกีดขวางการไหลซึ่งมีอิทธิพลต่อความเร็วของของไหลที่วิ่งผ่าน อนุภาคจะถูกเป่าให้ลอยขึ้นและตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ขณะเดียวกันทิศทางและความเร็วของอนุภาคเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเนื่องจากการชนกันกับอนุภาคอื่น ๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ \mathbf{S}_p (Momentum exchange) เพื่อใช้แทนค่าลงในสมการที่ (4)

$$\mathbf{S}_p = \frac{1}{V_{cell}} \int_{V_{cell}} \sum_{i=0}^{N_p} \frac{V_i \beta^i}{1-\epsilon} (\mathbf{u}_g - \mathbf{v}_i) D(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) dV \quad (8)$$

เมื่อ V_{cell} คือปริมาตรของ Mesh cell และ N_p คือจำนวนอนุภาคทั้งหมดภายใน Mesh โดยคำนวณฟังก์ชันการกระจายตัวของแรงที่กระทำบนของไหล (D) ด้วย Eulerian grid [13] การถ่ายเทความร้อนในงานวิจัยนี้พิจารณาจากสมการที่ (9) โดยมีสมมติฐานที่ว่า อัตราการเพิ่มของพลังงานในอนุภาคแต่ละตัว (เทอมซ้ายมือ) จะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนรวมกับการนำความร้อนระหว่างอนุภาค (เทอมขวามือ)

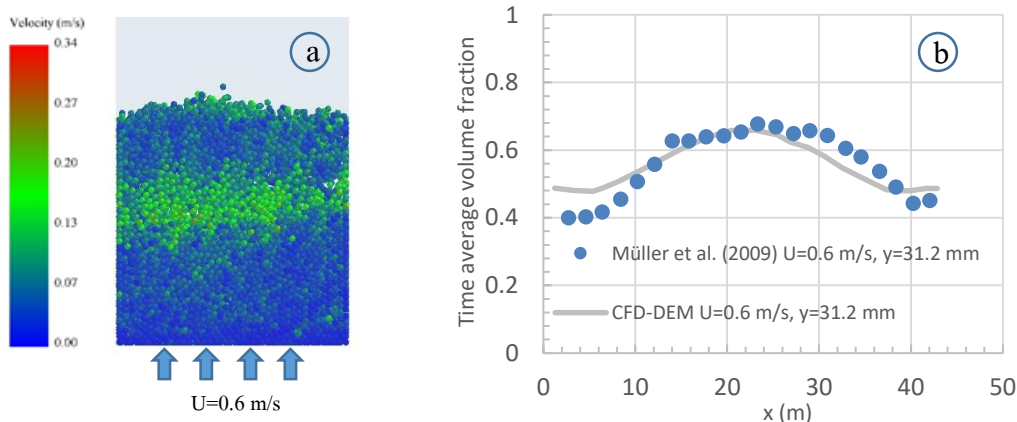
$$m_p C_p \frac{dT}{dt} = h_{PF} A_p \Delta T_{PF} + h_c \Delta T_{P_1 P_2} \quad (9)$$

เมื่อ m_p, C_p, T คือมวล ความร้อนจำเพาะ และอุณหภูมิของอนุภาคตามลำดับ h_{pF} คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน A_p คือพื้นที่ผิวของอนุภาค ΔT_{pF} คือผลต่างอุณหภูมิระหว่างอนุภาคกับอากาศร้อน h_c คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และ $\Delta T_{p_1 p_2}$ คือผลต่างอุณหภูมิระหว่างอนุภาค ที่มาของค่า h_{pF} และ h_c สามารถสืบค้นจากงานวิจัยของ Hobbs [19]

หลักการคำนวณของวิธี CFD-DEM และความสัมพันธ์ของสมการที่เกี่ยวข้องทั้งหมดสามารถสืบค้นจากงานวิจัยของ Prakotmak [13] สำหรับงานวิจัยนี้จำลอง CFD-DEM ด้วย ANSYS Fluent โดยคำนวณแลกเปลี่ยนข้อมูล (Coupling) กับ EDEM บนเครื่อง PC ซีพียู AMD Ryzen7 2700x จำนวน 8 Cores 16 Threads ประมวลผลร่วมกับ GPU GTX 1080Ti การจำลอง 15 s ในแต่ละเงื่อนไขดังตารางที่ 3 จะใช้ CPU Time ประมาณ 156-158 h

2.2 การตรวจสอบแบบจำลอง (Model validation) และกำหนดเงื่อนไขการจำลอง

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลอง CFD-DEM เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Müller et al. [20] จากการทดสอบปรากฏการณ์ฟลูอิดไลเซชันของอนุภาคทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm ความหนาแน่นของอนุภาคเท่ากับ 1000 kg/m^3 จำนวนตัวอย่าง 9240 อนุภาค ในเบดขนาด $44 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$ (กว้าง×ยาว×สูง) ที่เงื่อนไขความเร็วอากาศ 0.6 m/s โดยการวัดสัดส่วนช่องว่าง (Void fraction) ด้วยเรโซแนนซ์แม่เหล็ก (Magnetic resonance, MR) ตามความกว้างของเบด ที่ระดับความสูงจากฐานเบดเท่ากับ 31.2 mm งานวิจัยนี้ได้สร้างโดเมนที่มีขนาดเท่ากัน และกำหนดวัสดุที่มีสมบัติเหมือนกันกับงานวิจัยดังกล่าว (รูปที่ 2a) จากการจำลองปัญหาในระยะเวลา 23 s และเก็บข้อมูลค่าสัดส่วนช่องว่างที่ระดับความสูงเบดเท่ากับ 31.2 mm ทุก ๆ 0.01 s ดังนั้นจะมีจำนวนข้อมูล 2300 ชุดซึ่งถูกแปลงเป็นไฟล์ Excel จากนั้นทำการเขียนโปรแกรม MATLAB® เพื่ออ่านไฟล์เหล่านี้แล้วคำนวณค่าเฉลี่ยของสัดส่วนช่องว่างอากาศตามระยะความกว้างของเบด ดังแสดงในรูปที่ 2b

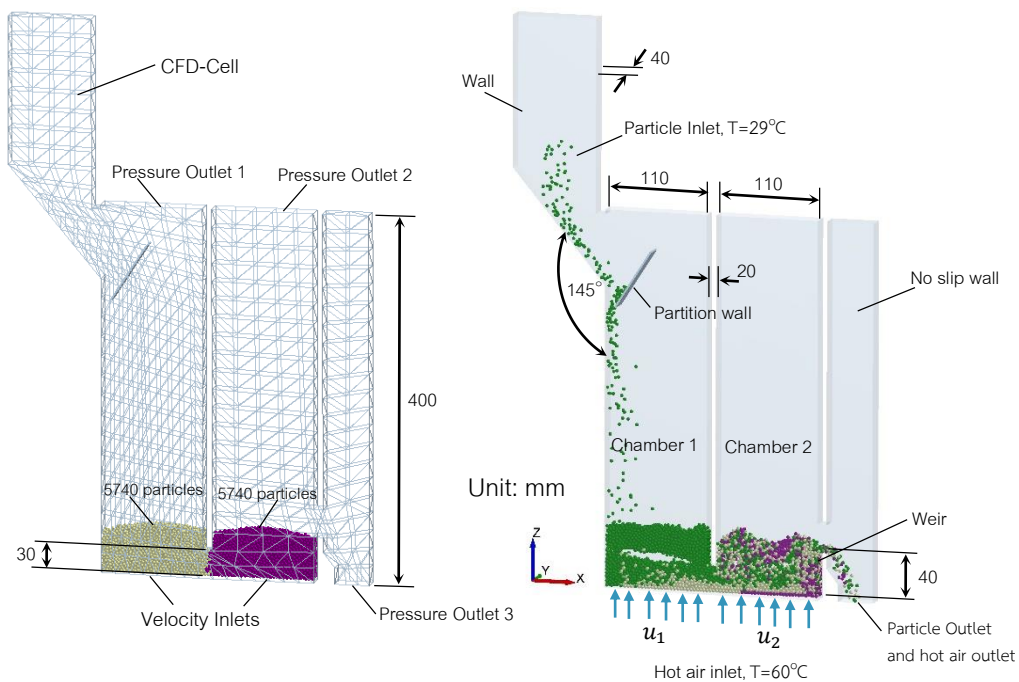


รูปที่ 2 a) ความเร็วของอนุภาคระหว่างการเกิดฟลูอิดไลเซชันในแบบจำลอง CFD-DEM b) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสัดส่วนช่องว่างอากาศจากเทคนิค MR [20] กับผลที่ได้จากแบบจำลอง CFD-DEM ที่ความสูงเบด 31.2 mm

จากรูปที่ 2b พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายโปรไฟล์สัดส่วนช่องว่างอากาศที่มาจากผลการทดลองของ Müller et al. [20] ได้สอดคล้องกัน โดยเฉพาะในช่วงกึ่งกลางเบดจะมีสัดส่วนช่องว่างสูงกว่าด้านข้างซึ่งมีแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคกับผนังเบด เนื่องจากเป็นแบบไม่ลื่นไถล (No slip wall) อนุภาคบริเวณกึ่งกลางเบดจะมีความเร็วสูงสุดและมีโอกาสเกิดฟองอากาศ

(Bubble) ทำให้มีช่องว่างอากาศมากกว่าตำแหน่งอื่น ๆ จากผลการจำลองด้วย CFD-DEM สามารถทำนายสัดส่วนช่องว่างอากาศและความเร็วอนุภาคได้สอดคล้องกับการทดลองของ Müller et al. [20] ดังนั้นแบบจำลองฟลูอิดซ์เบดชนิดต่อเนื่องที่จะสร้างขึ้นด้วยวิธี CFD-DEM น่าจะสามารถทำนายปรากฏการณ์ฟลูอิดซ์เบดที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและระหว่างอนุภาคกับของไหลได้เช่นเดียวกัน

งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงห้องอบแห้งจากงานวิจัยของ Vollmari and Kruggel-Emden [21] เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบห้องอบแห้งแบบสองคอดัมน์ (Dual-chamber) รูปที่ 3 แสดงโดเมน CFD-DEM ของระบบ Dual-chamber fluidized bed ได้ทดลองหาจำนวน Grid ที่เหมาะสม (Grid independent) โดยกำหนดให้ Grid หยาบขึ้นเพื่อให้มีจุดคำนวณน้อยลงแต่ต้องไม่ส่งผลกระทบต่อคำตอบที่ได้ จะช่วยให้การคำนวณทำได้เร็วยิ่งขึ้น



รูปที่ 3 ขนาดโดเมนที่พิจารณาในแบบจำลองฟลูอิดซ์เบด ในช่วงเริ่มต้น ($t=0$)
ภายในเบดบรรจุอนุภาคจำนวน 11480 อนุภาค

การทดสอบ Grid independent ทำโดยการบรรจุอนุภาคจำนวน 11480 อนุภาคแล้วกำหนดฟังก์ชันความเร็วอากาศเข้าเบดทางด้านล่างให้เพิ่มขึ้นตามเวลาในโปรแกรม ANSYS Fluent ซึ่งสามารถรายละเอียดวิธีนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [12, 13] แล้วคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์เบด (u_{mf}) โดยทดสอบที่จำนวน Grid เท่ากับ 1380, 1736, 1946, 2719, และ 3323 ตามลำดับจากการจำลองพบว่าค่า u_{mf} มีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อมีจำนวน Grid มากกว่าหรือเท่ากับ 1736 งานวิจัยนี้จึงเลือกจำนวน Grid นี้ทุกเงื่อนไขการจำลอง

จากรูปที่ 3 ในตอนเริ่มต้นอนุภาคจะถูกป้อนลงใน Chamber 1 และ Chamber 2 จำนวน Chamber ละ 5740 อนุภาค โดยจำนวนอนุภาคคำนวณนี้มาจากการปล่อยให้ตกอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วงจนมีความสูงเท่ากับความสูงผนังกั้น (Weir) ห้องอบทั้งสองจะ

ถูกเชื่อมต่อกันด้วยช่องว่างความสูง 30 mm จากฐานเบด เมื่อเริ่มอบแห้งจะปล่อยอนุภาคเข้าสู่ Chamber 1 (อนุภาคกลุ่มสีเขียว) กำหนดให้เป็นอัตราการไหลเชิงมวลต่อเวลาโดยจำลองการป้อนแบบ Rotary feeder ดังรูปที่ 3 เมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชัน การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องจาก 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 เพื่อใช้เป็นข้อมูลศึกษา ระยะเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ภายในห้องอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองนี้

การกำหนดความเร็วอากาศเข้าห้องอบแห้ง (Drying chamber) ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (u_{mf}) จากงานวิจัยที่ผ่านมา [12, 13] มีค่า $u_{mf} = 1.5$ m/s ซึ่งคำนวณมาจากสมบัติวัสดุเดียวกัน โดยทั่วไปเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนอนุภาคได้อย่างทั่วถึงความเร็วในการเกิดฟลูอิดเซชันจะมีค่าสูงกว่า u_{mf} ประมาณ 1.1-1.5 เท่า ถ้าใช้ความเร็วอากาศสูงจะทำให้ อัตราการอบแห้งสูง แต่เมล็ดข้าวอาจเกิดการแตกร้าวหรือลอยออกจากห้องอบแห้งและยังเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน งานวิจัยนี้จะกำหนดความเร็วอากาศเข้าใน Chamber 1 และ Chamber 2 จากสมมติฐาน ในช่วงเริ่มต้นวัสดุที่มีความชื้นสูงจะอยู่ใน Chamber 1 ซึ่งเกิดการถ่ายเทมวลและความร้อนสูงกว่า Chamber 2 ดังนั้นในแบบจำลอง Case 1 (ตารางที่ 3) จึงกำหนดให้อากาศเข้า Chamber 1 (u_1) มากกว่า Chamber 2 (u_2) ส่วนในกรณีการจำลองเงื่อนไขอื่น ๆ กำหนดค่าให้มีความแตกต่างกันเพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคที่เปลี่ยนไปตามเวลา ดังแสดงในตารางที่ 3

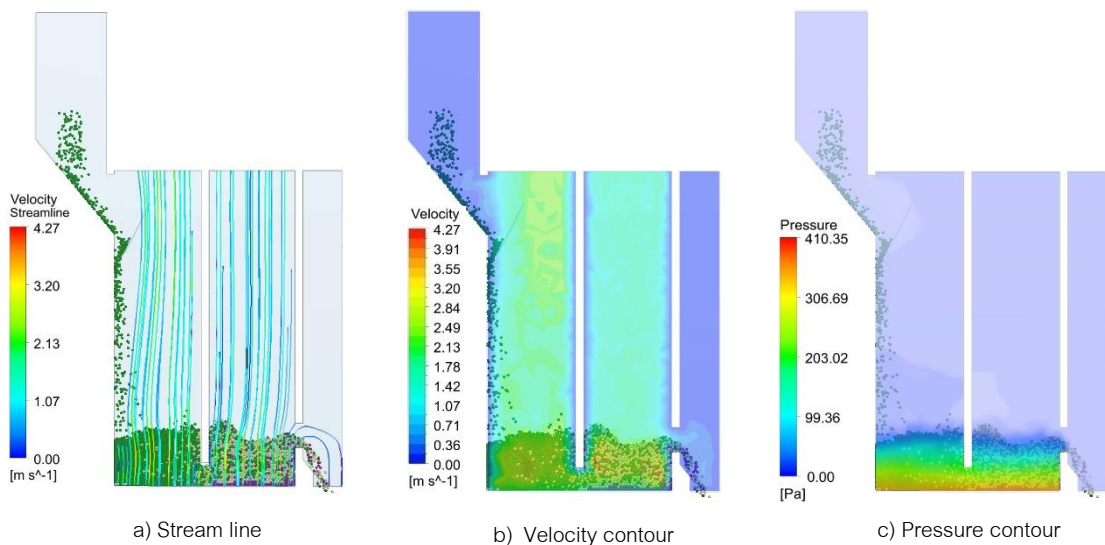
จากการจำลองเพื่อหาอัตราการไหลเชิงมวลในระยะเวลา 15 s กำหนดค่า $u_1 = 2.0$ m/s ($1.33u_{mf}$) และ $u_2 = 1.6$ m/s ($1.06u_{mf}$) พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลที่ทางออกมีค่า \dot{m}_{sim} ประมาณ 2400-2480 g/min ซึ่งต้องใช้อัตราการป้อน (\dot{m}_{input}) เพื่อกำหนดอนุภาคเข้าระบบด้วยอัตราการไหลเชิงมวลในช่วงดังกล่าว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

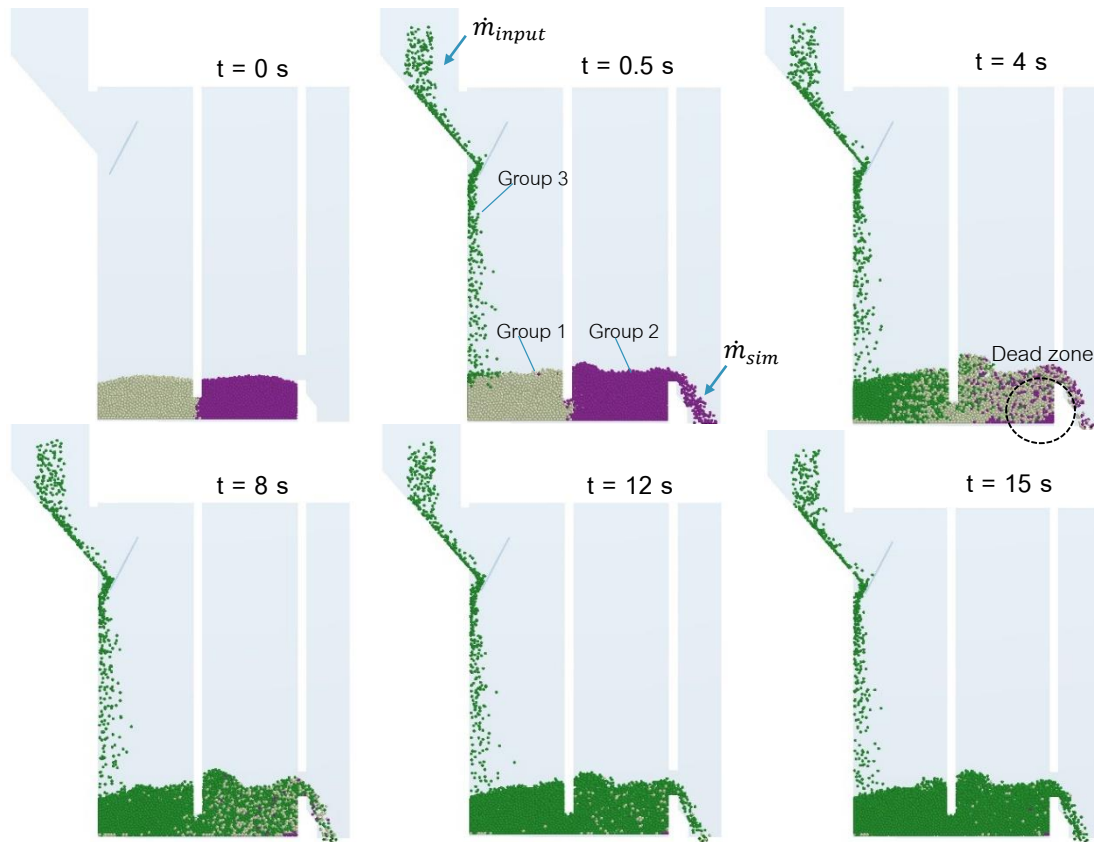
3. ผลการจำลองและวิจารณ์

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 สอดคล้องกับความเร็วกาศที่กำหนดไว้ในแบบจำลอง บริเวณผนังห้องอบมีความเร็วของอากาศเท่ากับศูนย์ตรงตามเงื่อนไขในแบบจำลองที่กำหนดให้ผนังเป็นแบบไม่ลื่นไถล (No slip) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างผนังกับอากาศ ส่วนรูปที่ 4c พบว่าความดันสูงจะเกิดที่ด้านล่างเนื่องจากอากาศพยายามเคลื่อนที่ผ่านกองวัสดุจากด้านล่างของห้องอบแห้ง ทำให้เกิดความดันสูงสุดประมาณ 410 Pa (Gauge) ความดันจะลดลงเรื่อยๆ ตามการทะลุผ่านชั้นวัสดุ เนื่องจากวัสดุเกิดการลอยตัวความพรุนของวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้อากาศไหลผ่านได้ง่ายกว่าชั้นล่างซึ่งวัสดุกองทับกันอย่างหนาแน่น



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

รูปที่ 5 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเวลาต่าง ๆ ที่เงื่อนไขของ Case 1 เพื่อความง่ายต่อการสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแบบจำลองได้กำหนดสีของอนุภาคเป็น 3 กลุ่ม ที่เวลาเริ่มต้น $t = 0$ s อนุภาค Group 1 (สีเทา) และ Group 2 (สีม่วง) เป็นอนุภาคที่บรรจุอยู่ใน Chamber 1 และ 2 ตามลำดับ โดยมีความสูงเบดเริ่มต้นเท่ากับ ความสูงของผนังกั้น (Weir) ส่วน Group 3 (สีเขียว) จะเริ่มปล่อยอนุภาคเมื่อเวลา $t > 0$ ด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ ($\dot{m}_{input} = 2400$ g/min) อนุภาคจะเคลื่อนที่จาก Chamber 1 เข้าสู่ Chamber 2 แล้วยกตัวข้ามผนังกั้นและออกจากระบบ ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงมวล (\dot{m}_{sim}) ในแบบจำลองได้จากการนับมวลที่วิ่งผ่าน Sensor ต่อหน่วยเวลาหาค่าเฉลี่ยตลอด 15 s จากการคำนวณพบว่า มีค่า $\dot{m}_{sim} = 2298$ g/min ซึ่งมีค่าต่ำกว่า \dot{m}_{input} เมื่อเวลาผ่านไปอาจทำให้อนุภาคสะสมในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

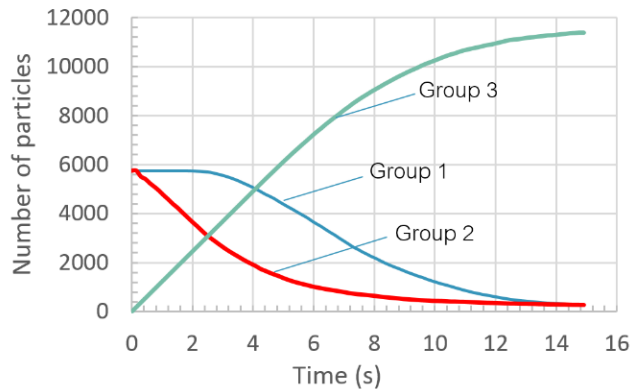


รูปที่ 5 การเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเวลาที่เงื่อนไข $u_1 = 2.0$ m/s, $u_2 = 1.6$ m/s และ $\dot{m}_{input} = 2400$ g/min (ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในห้องอบแห้งของงานวิจัยนี้ในสื่อ YouTube [22])

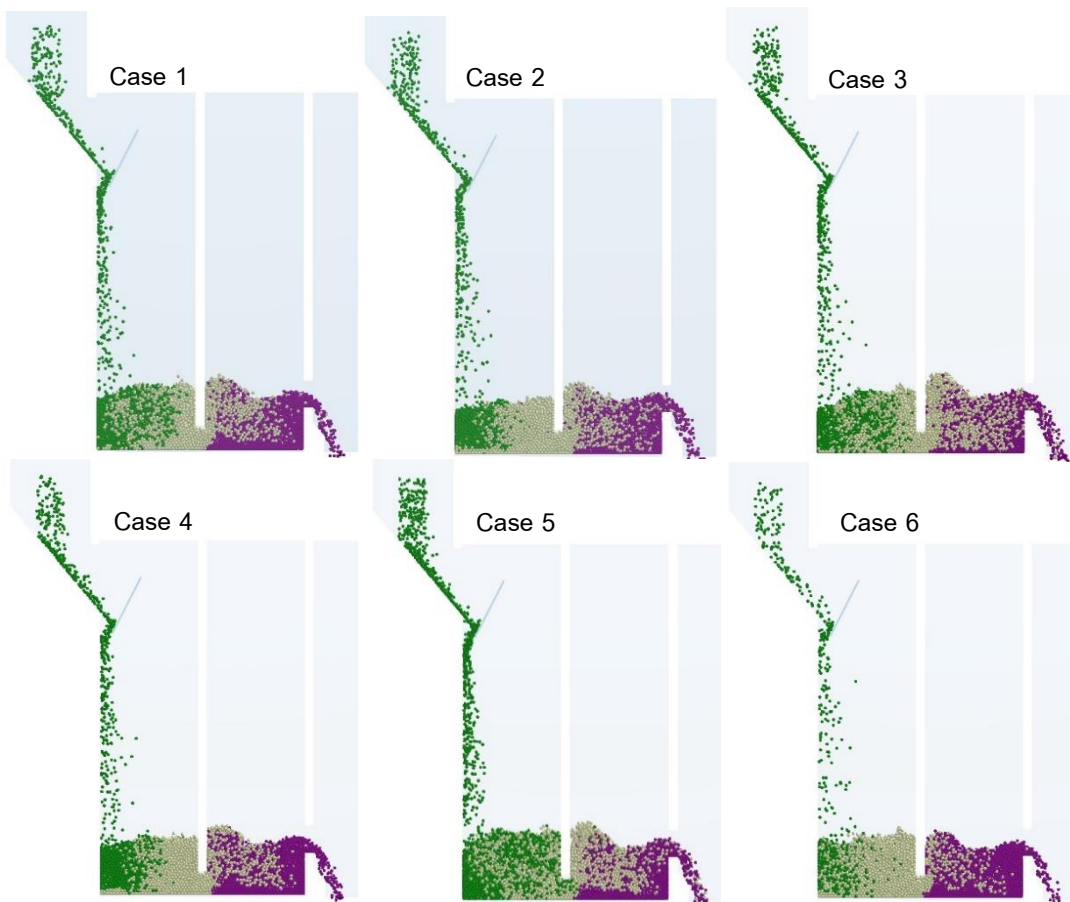
จากรูปที่ 5 พบว่าที่เวลา 4 s อนุภาค Group 1 เคลื่อนที่เข้าผสมกับ Group 2 และผลัดกันให้อนุภาค Group 2 ออกจากระบบ เมื่อเวลาผ่านไป 12 s อนุภาค Group 3 มีปริมาณมากในระบบ และที่เวลา 15 s อนุภาค Group 1 และ 2 หลงเหลืออยู่ในระบบเพียงเล็กน้อย สอดคล้องกับรูปที่ 6 แสดงจำนวนของอนุภาคกลุ่มต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา จากรูปที่ 6 พบว่า ในระยะเวลา 12 s อนุภาค Group 2 ลดลงจากจำนวนเริ่มต้น 5470 อนุภาคเหลือเพียง 352 อนุภาค ที่เวลา 14 s อนุภาค Group 1 มีจำนวนการลดลงใกล้เคียงกับ Group 2 ตรงข้ามกับอนุภาค Group 3 ที่เพิ่มจำนวนในระบบมากขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลา นอกจากนี้ผลการจำลองในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นจุด Dead zone ที่บริเวณผนังกั้นก่อนที่อนุภาคจะออกจากระบบ มีอนุภาคตกค้างในระบบเพราะไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามผนังกั้นได้ ซึ่งอาจแก้ปัญหาด้วยการออกแบบผนังกั้นให้ลาดเอียง จากระบบในรูปที่ 5 หากใช้ความเร็วอากาศสูงกว่าค่า u_{mf} หลายเท่า จะทำให้อนุภาคหลุดลอยออกจากห้องอบแห้ง ลักษณะการทำงานจะคล้ายคลึงกับระบบลำเลียงวัสดุโดยลม (Pneumatic conveyor) ซึ่งใช้สำหรับลำเลียงวัสดุเม็ดแห้งในพื้นที่ที่ค่อนข้างจำกัด ถ้าใช้ความเร็วที่เหมาะสมต่อการลอยตัวของอนุภาคสามารถเรียกระบบนี้ว่า การทำแห้งด้วยลม (Pneumatic drier) ได้เช่นกัน

รูปที่ 7 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเงื่อนไขการจำลองในตารางที่ 3 ที่เวลา 2 s หลังจากเกิดฟลูอิดไอเซชัน พบว่า Case 5 อนุภาคทั้ง 3 กลุ่ม มีการผสมกันมากที่สุด และผสมกันน้อยที่สุดใน Case 6 แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคใน Case

5 สามารถผลักดันให้อนุภาคออกจากระบบได้มากที่สุด สอดคล้องกับรูปที่ 8 ซึ่งแสดงจำนวนอนุภาคที่ตกค้างในระบบในระยะเวลา 15 s พบว่า Case 5 มีจำนวนอนุภาคที่ตกค้างในระบบน้อยที่สุด แม้ว่าจะมีค่า $\dot{m}_{input} = 3600 \text{ g/min}$ ที่ป้อนเข้าระบบสูงที่สุด ซึ่งอนุภาคในระบบของ Case 5 มีความเร็วเฉลี่ยการเคลื่อนที่ของอนุภาคสูงที่สุดเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 9 และข้อมูลในตารางที่ 3

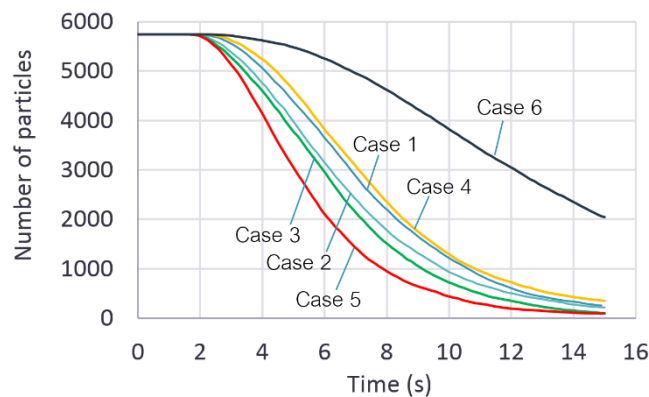


รูปที่ 6 จำนวนของอนุภาคแต่ละกลุ่มที่อยู่ในระบบ เงื่อนไข $u_1 = 2.0 \text{ m/s}$, $u_2 = 1.6 \text{ m/s}$ และ $\dot{m}_{input} = 2400 \text{ g/min}$

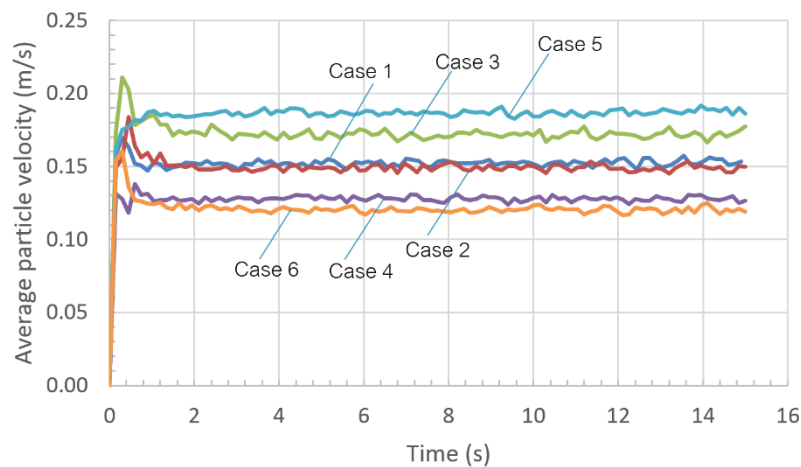


รูปที่ 7 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอนุภาคในเงื่อนไข Case 1-6 (ตารางที่ 3) ที่เวลา 2 s

จากตารางที่ 3 พบว่าค่า \dot{m}_{sim} มีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่ม \dot{m}_{input} เนื่องจากจำนวนของอนุภาคในระบบที่เพิ่มขึ้นทำให้การเกิดฟลูอิดไอเซชันมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (ความพรุนลดลง) อนุภาคจะเคลื่อนที่ข้ามผนังกันออกจาก Chamber 2 ในปริมาณที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้า u_2 มีค่าสูงกว่า u_1 จะทำให้ \dot{m}_{sim} มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จากตารางที่ 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 ($\dot{m}_{input}= 3600$ g/min) มีความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคสูงที่สุด เนื่องจากมีจำนวนอนุภาคมากเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ความดันตกคร่อมเบดจะมีค่าสูงสุดส่งผลให้อนุภาคเกิดฟลูอิดไอเซชันที่ความเร็วสูง ตรงข้ามกับกรณีที่ 6 ($\dot{m}_{input}= 1200$ g/min) มีจำนวนอนุภาคในระบบต่ำที่สุด ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคจึงต่ำกว่ากรณีที่ 5

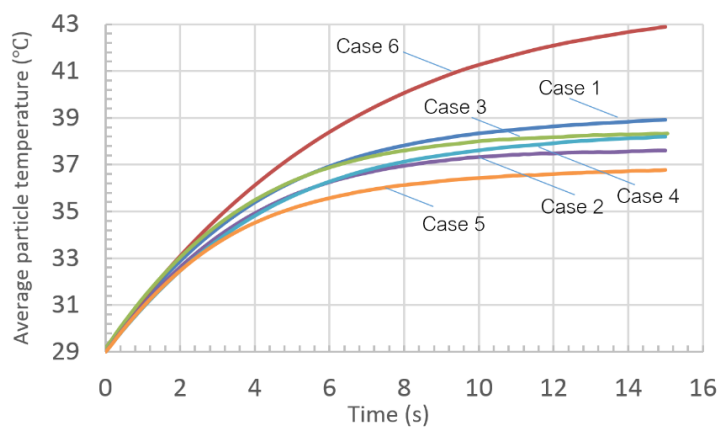


รูปที่ 8 เปรียบเทียบจำนวนอนุภาค Group 1 ที่อยู่ในระบบ ที่เงื่อนไข Case 1-6 (ดังตารางที่ 3)



รูปที่ 9 ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคทั้งหมดภายในระบบ ที่เงื่อนไข Case 1-6

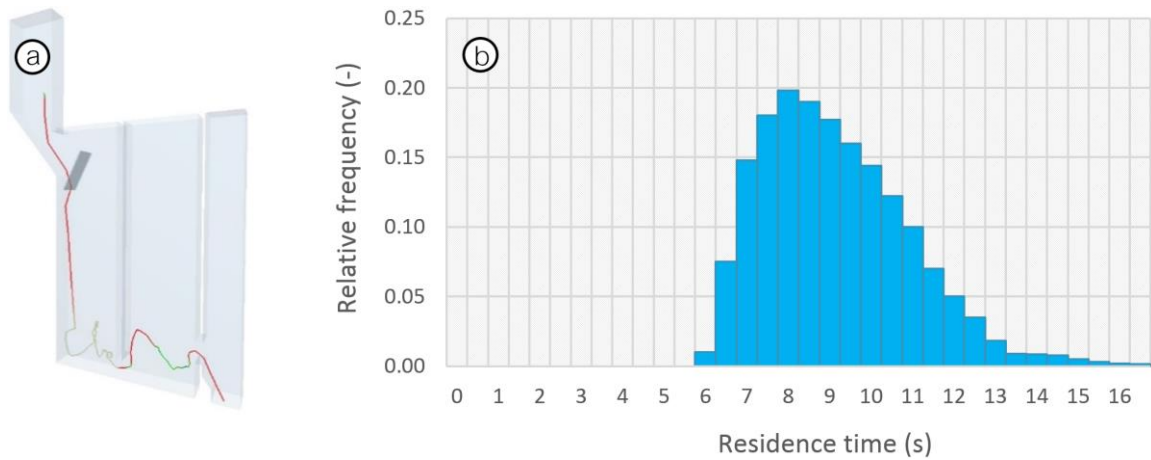
รูปที่ 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของอนุภาคจากการจำลองตามเงื่อนไขในตารางที่ 3 ในระยะเวลา 15 s โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของอนุภาคเท่ากับ 29°C และกำหนดอุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 60°C จากผลการจำลองพบว่า Case 6 มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุด โดยมีค่าประมาณ 43°C ส่วนใน Case 1-5 มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงสุดประมาณ $37-39^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า Case 6 ประมาณ $4-6^{\circ}\text{C}$ จากรูปที่ 10 อุณหภูมิของ Case 6 มีค่าเฉลี่ยสูงสุด เนื่องจากมีอัตราการป้อนอนุภาค $\dot{m}_{input} = 1200 \text{ g/min}$ ซึ่งมีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ เมื่อจำนวนอนุภาคในระบบน้อยที่สุดทำให้สามารถรับความร้อนจากอากาศร้อนได้ดี ตรงข้ามกับ Case 5 ที่มีค่า $\dot{m}_{input} = 3600 \text{ g/min}$ ปริมาณอนุภาคป้อนเข้าระบบสูงจึงทำให้อนุภาคมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำที่สุด สอดคล้องกับรูปที่ 9 ซึ่งพบว่าใน Case 5 อนุภาคมีความเร็วเฉลี่ยสูงที่สุดมีโอกาสมิ่ระยะเวลาในการอยู่ในห้องอบแห้งต่ำ จึงมีระยะเวลารับพลังงานความร้อนต่ำตามไปด้วย ส่วนในกรณี Case 6 มีความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่น้อยที่สุดทำให้มีระยะเวลาในการรับความร้อนยาวนานกว่ากรณีอื่นๆ นอกจากนี้ Case 1-4 มีค่า $\dot{m}_{input} = 2400 \text{ g/min}$ เท่ากันจะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยใกล้เคียงกันซึ่งแตกต่างกันไม่ประมาณ 2°C ความแตกต่างของอุณหภูมินี้เป็นผลมาจากการใช้ความเร็วขาเข้า u_1 และ u_2 ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 10 อุณหภูมิเฉลี่ยของอนุภาคในระหว่างการอบแห้งตามเงื่อนไขในตารางที่ 3 ระยะเวลาอบแห้ง 15 s

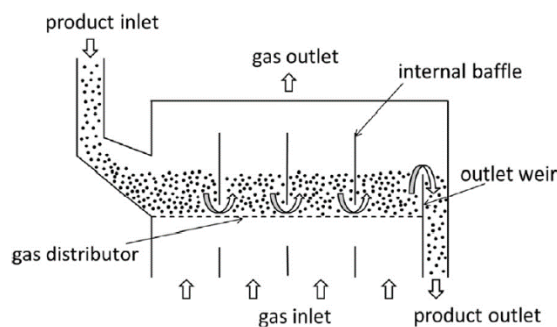
รูปที่ 11a แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค Group 3 โดยทำการสุ่มเลือก 1 อนุภาคเพื่อติดตามการเคลื่อนที่ ยกตัวอย่างเงื่อนไขการจำลองปัญหาแบบ Case 1 พบว่าอนุภาคมีเส้นทางการเคลื่อนที่ในห้องอบแห้งตามการเกิดฟลูอิดเซชันและใช้ระยะเวลาอยู่ในระบบ 8.2 s ส่วนรูปที่ 11b แสดงความถี่ (Frequency) ของ Residence time ของอนุภาคทั้งหมดที่เคลื่อนที่ภายในระบบ พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่มี Residence time ประมาณ 8 s สอดคล้องกับการทดลองของ Vollmari and Kruggel-Emden [21] ซึ่งมีขนาดห้องอบใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ Vollmari and Kruggel-Emden ทำการทดลองโดยใช้ RFID-tag ไว้ในอนุภาคทรงกลมรัศมี 3.6 mm แล้วปล่อยอนุภาคเคลื่อนที่ในห้องอบแห้งแบบฟลูอิดเซชัน เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน RFID reader ซึ่งใช้คลื่นวิทยุความถี่สูง (UHF) ตรวจจับอนุภาคและทำการบันทึกเวลาไว้ ผลการทดลองพบว่ามีความถี่ของ Residence time ของอนุภาคสูงสุดในช่วง 8-10 s

จากรูปที่ 11b พบว่าอนุภาคบางส่วนที่มี Residence time มากกว่า 16 s ซึ่งเป็นส่วนน้อย อนุภาคกลุ่มนี้อาจเคลื่อนที่ใน Chamber 2 และไม่สามารถข้ามผนังกันเพื่อออกจากระบบ ซึ่งอาจต้องใช้ระยะเวลาในการอยู่ในห้องอบแห้งมากกว่าอนุภาคอื่น ถ้าได้รับความร้อนเป็นเวลานานอนุภาคมีโอกาสเสียหายจาก Thermal stress



รูปที่ 11 a) เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค Group 3 โดยมี Residence time = 8.2 s และ b) ความถี่ของ Residence time ของอนุภาค Group 3 ในระบบ ที่เงื่อนไข $u_1 = 2.0$ m/s, $u_2 = 1.6$ m/s และ $\dot{m}_{input} = 2400$ g/min

Chen et al. [11] ได้ทดลองหา Residence time ของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์แบบต่อเนื่องขนาด $1 \times 0.2 \times 0.4$ m³ (Procell 20; Glatt Ingenieurtechnik GmbH, Weimar, Germany) ดังแสดงในรูปที่ 12 ทดสอบกับอนุภาคทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 mm ความเร็วอากาศเท่ากับ 1.95 m/s เมื่อแบ่งออกเป็น 4 Chambers ความสูง Weir ที่ทางออก = 35 mm พบว่ามีค่า Mean residence time = 291.1 s แต่ถ้าทดลองโดย Chamber เดียวไม่แบ่งห้องย่อย และใช้ความสูง Weir ที่ทางออก = 175 mm พบว่ามีค่า Mean residence time = 627.6 s จากงานวิจัยที่ผ่านมา [1, 2] สำหรับการเคลื่อนย้ายสารด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์แบบชนิดทำที่ละงวด งวดละ 4 kg ต้องใช้ระยะเวลาการปั่นเคลือบพร้อมกับการอบแห้งประมาณ 8 นาที ถ้าต้องการนำระบบฟลูอิดไคซ์แบบต่อเนื่องไปใช้กับการเคลือบข้าวสารต้องเพิ่ม Residence time ให้สูงขึ้น ซึ่งจากผลการจำลองของงานวิจัยนี้ขอเสนอแนวทางดังนี้ 1. เพิ่มจำนวนห้องอบแห้ง 2. ลดขนาดช่องทางผ่านระหว่างห้องอบแห้ง 3. เพิ่มความสูง Weir และ 4. ใช้กระพ้อถ้ำเสียง (Bucket elevator) ป้อนวัสดุหมุนเวียนกลับเข้าห้องอบแห้งอีกครั้ง อาจใช้ทั้ง 4 แนวทางเพื่อช่วยทำให้ Residence time มีค่าตามที่ต้องการสำหรับการปั่นเคลือบวัสดุแต่ละชนิด



รูปที่ 12 ห้องอบแห้งฟลูอิดไคซ์แบบต่อเนื่องในงานวิจัยของ Chen et al. [11]

การจำลองโดยใช้แบบจำลอง CFD-DEM ในงานวิจัยนี้ทำให้ทราบเพียงพฤติกรรมการไหลของของไหล (Gas) และการเคลื่อนที่ของของแข็ง (Solid) ในระบบฟลูอิดไรซ์แบบต่อเนื่อง ซึ่งระบบบอบแห้งพร้อมกับพ่นเคลือบวัสดุชนิดฟลูอิดไรซ์แบบต่อเนื่อง ที่ผู้วิจัยจะสร้างแบบจำลองต่อไปจะมีกระบวนการฉีดพ่นสารเคลือบซึ่งทำให้อนุภาคมีความชื้นเพิ่มขึ้นสลับกับการอบแห้งในระหว่างที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านโซนการเคลือบ และหากประยุกต์ใช้สำหรับการเคลือบเมล็ดข้าวสารนั้นความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ควรจะใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าเริ่มต้นเพื่อไม่ให้เมล็ดข้าวเสียหายระหว่างการเก็บรักษา [2] แต่ในระบบบอบแห้งนั้นความชื้นของผลิตภัณฑ์จะลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้น้ำหนักและความหนาแน่นของอนุภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะมีผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของของแข็ง นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ระบบเคลือบแบบฟลูอิดไรซ์แบบต่อเนื่องสำหรับการเคลือบเมล็ดข้าวสารควรคำนึงถึงการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomeration) ในระหว่างการเคลือบ ประสิทธิภาพการเคลือบ (Coating efficiency) รวมทั้งความสม่ำเสมอของการเคลือบของระบบด้วยเช่นกัน เนื่องจาก Particle residence time ถูกกำหนดด้วยลักษณะการทำงานของระบบที่สร้างขึ้น

4. สรุปผลและเสนอแนะ

แบบจำลอง CFD-DEM สามารถทำนายการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบในระบบฟลูอิดไรซ์แบบต่อเนื่องได้ การเกิดฟลูอิดไรซ์ชันของระบบสามารถถ่ายเทอนุภาคด้วยอัตราการไหลเชิงมวลเข้า-ออกระบบที่มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลป้อนเข้าระบบจะทำให้อนุภาคเกิดฟลูอิดไรซ์ชันที่ความเร็วสูงขึ้นและมีอัตราการถ่ายเทอนุภาคออกจากระบบเพิ่มขึ้น 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 มีค่าความถี่ของความน่าจะเป็นของ Residence time สูงสุดที่ 8 s

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และ ศษ.ดร.สถาพร วัจฉาย ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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] Prakotmak, P. *Development of rice kernel coater with fluidized bed process*. The Journal of KMUTNB, 2016, Vol. 26(3), pp. 385-394.
- [3] 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.
- [4] Lee, J.L., Wee, E. and Lim, C. *Comparisons of Eulerian-Eulerian and CFD-DEM simulations of mixing behaviors in bubbling fluidized beds*. Powder Technology, 2017, Vol. 318, pp. 193-205.
- [5] Scherer, V., Mönigmann, 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.

-
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Glatt Technology, *Fluid Bed Coating*, 2018, Available from: <http://www.cjtech.co.kr/Technical%20Process%20Fluid%20Bed%20Coating.htm>
- [10] 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.
- [11] Chen, K., Bachmann, P., Bück, A., Jacob, M. and Tsotsas, E. *Experimental study and modeling of particle drying in a continuously-operated horizontal fluidized bed*. Particuology, 2017, Vol. 34, pp. 134-146.
- [12] Prakotmak, P. and Wangchai, S. *Investigation of Particle Dynamics and Heat Transfer in a Fluidized bed Using CFD-DEM Simulation*, in Proceedings The 32th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, Mukdahan, 2018.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Prakotmak, P., Wangchai, S., Prachayawarakorn, S. and Soponronnarit, S. *Simulation of a fluidized bed characteristics using DEM-CFD coupling*, in Proceedings The 19th TSAE National Conference, Prachuap Khiri Khan, 2018.
- [17] EDEM *EDEM 2.6 Theory Reference Guide*, 2014, pp. 5
- [18] ANSYS. *ANSYS Fluent Theory Guide*, 2013; 15317, pp. 47
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Preeda Prakotmak, *Continuous Fluidized Bed Simulation*. YouTube, 2018. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=ws5ACSXgkik>