



แบบจำลอง CFD-DEM ของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชันสำหรับตัวกลางก๊าซ-ของแข็ง CFD-DEM simulation of minimum fluidization velocity for gas-solid medium

ปรีดา ปรากฏมวก

Preeda Prakotmak

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Khamphengsean Campus, Nakhonpathom 73140

Corresponding author: E-mail: fengpdpr@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาการใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ร่วมกับวิธีวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) เพื่อจำลองการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไคซ์เซชันของอนุภาคในกระบวนการฟลูอิดไคซ์เบด เทคนิคนี้ใช้ระเบียบวิธีของ Eulerian และ Lagrangian เพื่อแก้ปัญหาในเฟสของไหลและอนุภาคของแข็งตามลำดับ การเคลื่อนที่ของอนุภาคคำนวณด้วยวิธีปริมาตรเฉลี่ยแบบคาบเกี่ยวกันของสมการอนุรักษ์พลังงาน มวล และโมเมนตัมบนโดเมนที่ถูกแบ่งเป็นช่วงระยะเล็กๆ ส่วนอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาค และอนุภาคกับผนังห้องฟลูอิดไคซ์เบดถูกจำลองโดยประยุกต์สมการการสัมผัสกันของ Hertz-Mindlin ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชัน (U_{mf}) และความดันคร่อมเบดสูงสุด (ΔP_{max}) โดยใช้อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน 5 ค่า คือ 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 mm ผลการจำลองพบว่าค่า U_{mf} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมีค่าสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มจำนวนอนุภาค ค่า U_{mf} และ ΔP_{max} จะมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการจำลองนี้มีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงทฤษฎีของงานวิจัยอื่นๆ

คำสำคัญ: ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชัน, ความดันคร่อมเบดสูงสุด, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, การวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง

Abstract

This article investigates the use of coupled computational fluid dynamics (CFD) and discrete element methods (DEM) to simulate fluidization behavior of particle in the fluidized bed. This technique uses the Eulerian and the Lagrangian methods to solve fluid and particles, respectively. The particle motion is coupled with the volume averaged conservation of mass, momentum and energy equations over discretized domain. The particle-particle and particle-wall interaction is modeled using the contact mechanics, which applied equations of Hertz-Mindlin no-slip contact. In this study, phenomenon of minimum fluidization velocity (U_{mf}) and maximum bed pressure drops (ΔP_{max}) were studied with 5 different sizes of particles 0.5, 1, 1.5, 2 and 2.5 mm diameters. The simulation results showed that the U_{mf} increased with increasing the particle diameters. As the number of particle increased, the U_{mf} and ΔP_{max} increased. The results were found in good agreement with theoretical data available in the literature.

Keywords: Minimum fluidization velocity, Maximum pressure drop, CFD, DEM

1 บทนำ

ในการกระบวนการอบแห้ง การผสมวัสดุ และการเคลือบผิววัสดุด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดนั้น การทราบค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชันสำหรับวัสดุชนิดต่างๆ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบระบบและการทำงานของระบบฟลูอิดไคซ์ให้

ประสิทธิภาพ กระบวนการฟลูอิดไคซ์ต้องการอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้วัสดุในเบดมีสถานะหยุดนิ่ง หรือหลุดลอยออกไปจากเบด ปรากฏการณ์ฟลูอิดไคซ์เซชันทดลองโดยใส่วัสดุในหอตลอด แล้วปล่อยอากาศให้เข้าทางด้านล่างของเบดทดลอง ขณะที่อากาศมีความเร็วต่ำ อนุภาคของแข็งจะไม่ยับตัว

Received: June 5, 2018

Revised: August 6, 2018

Accepted: August 21, 2018

Available online: October 11, 2018

(Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศให้มากขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มขยับตัวและลอยตัวเล็กน้อย เรียกค่าความเร็วอากาศนี้ว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf}) หากเพิ่มความเร็วของอากาศขึ้นไปอีกจะทำให้เบดขยายตัวขึ้นตามความเร็วของอากาศ (Surbkar et al., 2012) การทดลองหาค่า U_{mf} ของอนุภาคทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆ ที่เงื่อนไขความดันและอุณหภูมิในเบดต่างกันได้ถูกรายงานไว้ในงานวิจัยของ Zhu et al. (2007) ซึ่งมีข้อจำกัดในการทดลองเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กหรือโตเกินไป ตลอดจนขนาดอนุภาคที่ในการทดลองต้องสม่ำเสมอและจำเป็นในการทดลองหลายซ้ำเพื่อความน่าเชื่อถือ เป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและใช้ระยะเวลาการทดลอง การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปรากฏการณ์นี้มีความซับซ้อน ซึ่งวิธี CFD-DEM เป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถจำลองได้แม่นยำ (Yupeng et al., 2017; Zhou et al., 2017; Khawaja, 2011)

แบบจำลองลักษณะการไหลแบบสองสถานะที่มีอนุภาคของแข็งร่วมอยู่ด้วย (CFD-DEM) เป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการทำนายการเกิดฟลูอิดเซชันเนื่องจากเป็นการรวมปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริง โดยวิธีการนี้จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) จากกฎข้อที่สองของนิวตันและพิจารณาปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างอนุภาคกับอนุภาค และอนุภาคกับของไหล ส่วนการเคลื่อนที่ของของไหลจะใช้วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) ร่วมกับอนุภาค วิธี CFD-DEM จึงมีความเหมาะสมอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัสดุรวมกับการไหลของอากาศที่ไม่สามารถหาได้ในห้องปฏิบัติการและลดค่าใช้จ่ายในการทดลอง นอกจากนี้จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าแบบจำลอง CFD-DEM สำหรับทำนายความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชันยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้แบบจำลอง CFD-DEM ทำนายความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน ค่าความดันตกคร่อมเบดของอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน 5 ค่า และเทียบผลการจำลองกับสมการแบบกึ่งเอมพิริคัลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การหาสมบัติวัสดุเพื่อใช้ในแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองจำเป็นต้องทราบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุ ข้าวสารที่นำมาพิจารณาคือสายพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ทำการวัดขนาด ความยาว(L) กว้าง(W) และหนา(T) ด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์คาลิเปอร์จำนวน 50 ซ้ำแล้วหาค่าเฉลี่ย งานวิจัยนี้จะจำลองเมล็ดข้าวจากรูปทรงรีให้เป็นทรงกลมโดยคำนวณรัศมีเทียบเท่า (Effective diameter, D_e) (Adebowale et al., 2011) จากสมการ

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

คำนวณค่ารัศมีเทียบเท่าที่มีค่าเท่ากับ 3.52 mm เพื่อเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลอง CFD-DEM กับงานวิจัยอื่นที่มีผลการคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคทรงกลมในช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเดียวกัน ผู้วิจัยจะสร้างวัสดุเป็นทรงกลมที่มีขนาดเล็กกว่าค่า D_e และเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ค่า ตั้งแต่ 0.5-2.5 mm ถ้าแบบจำลอง CFD-DEM สามารถทำนายผลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดี อาจนำแบบจำลองนี้ไปทำนายอนุภาคที่ขนาดโตหรือเล็กกว่า D_e ได้เช่นกัน พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองแสดงใน Table 1 โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

ความหนาแน่นจริง (Solid density, ρ_s) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักวัสดุต่อปริมาตรของเมล็ดข้าว ทดลองโดยการนำเมล็ดข้าวที่ทราบน้ำหนักแทนที่ในน้ำที่ทราบปริมาตรแล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร สำหรับความหนาแน่นรวม (Bulk density, ρ_b) พิจารณาช่องว่างระหว่างชิ้นวัสดุ โดยการนำวัสดุเทลงในปิกลอร์ให้เต็มและเกลี่ยเอาส่วนเกินออกดัง Figure 1(a) และนำเมล็ดข้าวไปชั่งน้ำหนักบนที่ก้นและคำนวณได้จากอัตราส่วนของน้ำหนักเมล็ดข้าวต่อปริมาตรที่เกิดขึ้น (Wangchai, 2017) ทำการทดลองจำนวน 5 ครั้งแล้วพิจารณาจากค่าเฉลี่ย สำหรับค่าความพรุน (Porosity, ϵ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุจริงและความหนาแน่นรวมของเมล็ดข้าว พิจารณาได้จากความสัมพันธ์

$$\epsilon = (1 - \rho_b)/\rho_s \quad (2)$$

มุมกองวัสดุ (Angle of repose) พิจารณาโดยการนำเมล็ดข้าวเทในแนวตั้งโดยให้เมล็ดข้าวเคลื่อนที่ตามธรรมชาติและกองบนพื้นระนาบที่กำหนดดังแสดงใน Figure 1(b) มุมกองวัสดุได้จากการวัดความกว้างของฐานกองวัสดุและความสูงของกองวัสดุและคำนวณได้จากความสัมพันธ์ (Li et al., 2017)

$$\text{มุมกองวัสดุ} = \tan^{-1}(\text{ความกว้างฐาน}/\text{ความสูงกองวัสดุ}) \quad (3)$$

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (Coefficient of Static Friction, μ_s) พิจารณาจากการนำวัสดุวางบนพื้นผิวระนาบของแผ่นที่ใช้ทำห้องอบแห้งดัง Figure 1(c) และปรับมุมเอียง (α) ของแผ่นระนาบเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนกระทั่งวัสดุเริ่มการเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างทำการจดบันทึกค่ามุมที่อ่านได้จากสเกลและคำนวณโดยใช้สมการ (Wangchai, 2017; Teffo et al., 2013)

$$\mu_s = \tan^{-1}(\alpha) \quad (4)$$

Table 1 Material properties and system parameters for CFD-DEM simulations.

ชนิด	พารามิเตอร์	ค่าใน แบบจำลอง
อนุภาค	Density (kg/m ³)	1450
	Poisson ratio	0.25
	Shear modulus, G_p (Pa)	3.75×10^8
	Effective diameter, D_e (mm)	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5
ห้องอบแห้ง	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)	1970
	CFD time step (s)	4.5×10^{-5}
	DEM time step (s)	4.5×10^{-7}
	Weight of particles (kg)	0.05
	Simulation duration (s)	2.5

สัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of restitution, e) (Teffo et al., 2013) คืออัตราส่วนรากที่สองของความสูงระหว่างความสูงของวัสดุหลังจากตกกระทบพื้นและกระดอนขึ้นในแนวตั้ง (h_r) และความสูงเริ่มต้นของวัสดุก่อนตกกระทบพื้น (h_i) พิจารณาได้จาก

$$e = (h_r/h_i)^{0.5} \quad (5)$$

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการกลิ้งตัว (Coefficient of rolling friction, μ_r) คือความสัมพันธ์การกลิ้งของวัสดุเกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับวัสดุหรือเกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับผนัง ในที่นี้ได้จากการประมาณค่าจากการจำลองด้วย DEM และเปรียบเทียบกับผลมุมกองวัสดุที่สอดคล้องกับการทดลอง (Trial and error) (Tsuji et al. 1998) พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองแสดงใน Table

1 สามารถสืบค้นที่มาของค่าเหล่านี้จากงานวิจัยของ Prakotmak et al. (2018a)

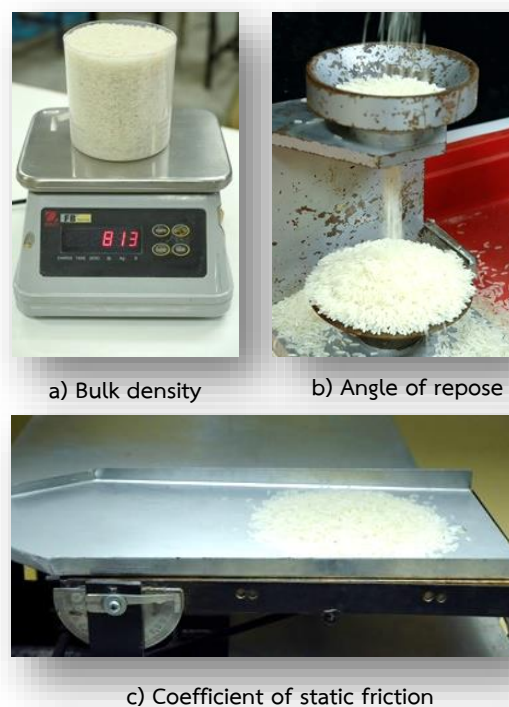


Figure 1 Experiment setup for material properties.

Figure 2 แสดงขนาดโดเมนที่พิจารณาในแบบจำลองฟลูอิดิซ์เบต จากการทดลองรูปร่างเบตทรงกระบอกพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับเบตทรงสี่เหลี่ยมในบริเวณกึ่งกลางเบต (Mingming et al., 2013)

เพื่อลดเวลาการคำนวณงานวิจัยนี้จึงสร้างเบตขนาด $0.5 \times 0.15 \times 0.015$ m รูปร่างคล้ายแผ่นบาง (Flat plate) แสดงใน Figure 2 และยกตัวอย่างอนุภาคเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5 mm บรรจุภายในเบต ซึ่งในแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้กำหนดน้ำหนักรวมของอนุภาคทั้งหมดเท่ากับ 0.05 kg เท่ากันทุกเงื่อนไขการจำลอง ในการสร้างแบบจำลองได้ใส่ค่า Density และ Volume ทำให้ทราบน้ำหนักอนุภาคแต่ละชิ้น ถ้าน้ำหนักอนุภาคทั้งหมดในเบตเท่ากับ 0.05 kg ภายในเบตจะบรรจุอนุภาคจำนวน 19513 อนุภาค ในการจำลองเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขนาดอื่นๆ เช่น กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคโตกว่า 1.5 mm น้ำหนักอนุภาคขึ้นนั้นก็จะมากขึ้นด้วย เพื่อให้ได้น้ำหนักรวมทั้งเบตเท่ากับ 0.05 kg จำนวนอนุภาคในเบตจึงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลาง

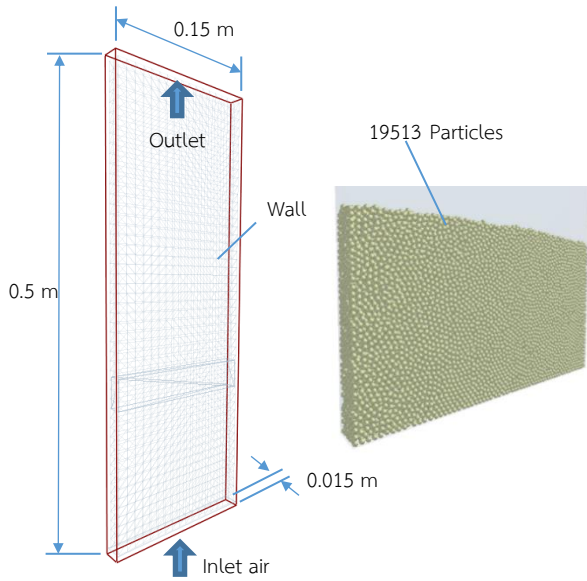


Figure 2 CFD-DEM domain.

2.2 แบบจำลอง CFD-DEM

แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ภายในฟลูอิดเบดมีอนุภาคของแข็งและของไหลซึ่งมีอันตรกิริยาระหว่างกัน โดยอนุภาคของแข็งจะมีพฤติกรรมเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล ในงานวิจัยนี้ทำการจำลองการไหลของอากาศ (CFD) ด้วยวิธี Eulerian-Eulerian ร่วมกับการวิเคราะห์อนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DEM) การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค (index i) มวล m_i และปริมาตร V_i ในระบบจะคำนวณโดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) ดังนี้

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{d^2 r_i}{dt^2} = -V_i \nabla p + \frac{V_i \beta}{1-\varepsilon} (\mathbf{u}_g - \mathbf{v}_i) + m_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_{c,i} + \mathbf{F}_{A,i} \quad (6)$$

เมื่อ V_i คือความเร็ว และ $\mathbf{r}_i$ คือเวกเตอร์แสดงตำแหน่งของอนุภาค i ส่วนแรงที่แสดงด้านขวาของสมการที่ (6) คือ ความแตกต่างของความดัน (Pressure gradient) แรงต้านอากาศ (Drag) แรงโน้มถ่วง (Gravity) แรงสัมผัส (Contact force) และแรงดึงดูดระหว่างมวล (Van der Waals) ซึ่งแรงนี้จะไม่คิดในแบบจำลอง ในระหว่างการเคลื่อนที่อนุภาคอาจเกิดการหมุนอธิบายจากสมการโมเมนตัมเชิงมุมดังนี้

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \mathbf{T}_i \quad (7)$$

เมื่อ $\mathbf{T}_i$ คือทอร์ก I_i คือโมเมนต์ความเฉื่อยของอนุภาค i ส่วนค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม β คำนวณจากสมการ (8) และ (9) โดยพิจารณาจากความพรุน ε ของอนุภาคในเบดดังนี้

$$\beta_{Ergun} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon} \frac{\eta_g}{d_p^2} + 1.75(1-\varepsilon) Re_p, \varepsilon \geq 0.8 \quad (8)$$

$$\beta_{Wen\&Yu} = \frac{3}{4} C_D Re_p \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^{2.65}} \frac{\eta_g}{d_p^2}, \varepsilon \geq 0.8 \quad (9)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านคำนวณตามช่วงของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re_p)

$$C_D = \begin{cases} 24 \left(\frac{1+0.15 Re_p^{0.687}}{Re_p} \right) & \text{ถ้า } Re_p < 1000, \\ 0.44 & \text{ถ้า } Re_p \geq 1000, \end{cases} \quad (10)$$

โดย $Re_p = \varepsilon \rho_g |\mathbf{u}_g - \mathbf{v}_i| d_p / \eta_g$ ซึ่งค่า ε คือ สัดส่วนเชิงปริมาตรของของไหล

สำหรับอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคจะอธิบายด้วยแบบจำลอง Hertz-Mindlin (Mindlin and Deresiewicz, 1953) แรงและทิศทางการชนกันของอนุภาคแต่ละตัวจะถูกเก็บไว้ในตัวแปรต่างกัน เพื่อแยกความแตกต่างระหว่างการเกิดการชนของอนุภาคกับอนุภาค และอนุภาคกับผนังห้องอบแห้ง

สำหรับของไหลจะพิจารณาให้อยู่ในรูปการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuum) ห้องอบแห้งจะถูกแบ่งในรูปแบบตารางโครงข่าย (Mesh) การเคลื่อนที่ของของไหลจะถูกคำนวณโดยการเฉลี่ยปริมาตร (Volume-averaged) จากสมการ Navier-Stokes และสมการ continuity ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_g) + \nabla \cdot (\rho_g \varepsilon \mathbf{u}_g) = 0 \quad (11)$$

หรือเขียนในรูปสมการสมดุลโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_g \mathbf{u}_g) + \nabla \cdot (\rho_g \varepsilon \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\varepsilon \nabla p_g - \nabla \cdot (\varepsilon \tau_g) + \rho_g \varepsilon \mathbf{g} - \mathbf{S}_p \quad (12)$$

สมการความปั่นป่วนของของไหล (Turbulence) เป็นแบบ $k-\varepsilon$ และความเค้นในของไหลเขียนอยู่ในรูปของเทนเซอร์ได้ดังนี้

$$\tau_g = -\left(\lambda_g - \frac{2}{3} \eta_g \right) (\nabla \cdot \mathbf{u}_g) \mathbf{I} - \eta_g \left((\nabla \cdot \mathbf{u}_g) + (\nabla \cdot \mathbf{u}_g)^T \right) \quad (13)$$

สำหรับของไหลค่า Bulk viscosity (λ_g) กำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์

Figure 3 แสดงหลักการคำนวณของวิธี CFD-DEM ด้วยโครงข่ายสี่เหลี่ยมซึ่งแทน mesh สำหรับโดเมนของไหลและต้องมีขนาดโตกว่าอนุภาค 3 เท่าขึ้นไป อนุภาคไม่ต่อเนื่องจะเคลื่อนที่ภายในโดเมนนี้และเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน ในขณะที่วัสดุลอยไปตามกระแสของไหลจะเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคหรือความ

พรม การคำนวณค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาค (Particle volume fraction, ε_p) ทำได้โดยการรวมจำนวน N_s ในแต่ละตำแหน่งของ mesh นั้นๆ ดังสมการ

$$\varepsilon_p = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} V_i}{V_{cell}} \quad (14)$$

เมื่อ V_{cell} คือปริมาตรของ mesh และ N_p คือจำนวนอนุภาคทั้งหมดภายใน mesh อนุภาคในห้องอบแห้งเป็นเสมือนสิ่งกีดขวางการไหลซึ่งมีอิทธิพลต่อความเร็วของของไหลที่วิ่งผ่าน อนุภาคจะถูกเป่าให้ลอยขึ้นและตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ขณะเดียวกันทิศทางและความเร็วของอนุภาคเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเนื่องจากการชนกันกับอนุภาคอื่นๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ S_p (Momentum exchange) เพื่อใช้แทนค่าลงในสมการที่ (12)

$$S_p = \frac{1}{V_{cell}} \int_{V_{cell}} \sum_{i=0}^{N_p} \frac{V_i \beta}{1-\varepsilon} (\mathbf{u}_g - \mathbf{v}_i) D(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) dV \quad (15)$$

โดยคำนวณฟังก์ชันการกระจายตัวของแรงที่กระทำบนของไหล (D) ด้วย Eulerian grid ในงานวิจัยนี้จำลอง CFD-DEM ด้วยโปรแกรม Ansys Fluent โดย Coupling กับโปรแกรม EDEM ทำงานแบบ Shared memory parallel (SMP) บนเครื่อง Workstation Xeon E5-2665 จำนวน 16 cores 32 Thread แรม 32 GB

สำหรับแบบจำลอง DEM ที่พิจารณาแรงกระทำระหว่างอนุภาคสามารถสืบค้นได้จาก Hobbs (2009), Wahyudi et.al. (2016) และ Prakotmak et al. (2018b)

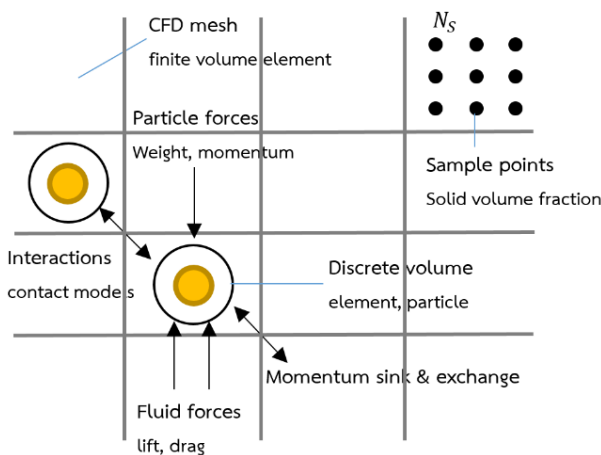


Figure 3 Simplified principle of CFD-DEM simulations.

2.3 การใช้สมการความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน (U_{mf})

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดเบดฟลูอิดไอเซชันเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการออกแบบระบบและการเลือกขนาดแหล่งกำเนิดลม

(Blower) เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้วัสดุภายในเบดมีสถานะเบดนิ่งหรือหลุดลอดออกไปจากเบด การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันโดยการจำลองสถานะการทำงานทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากความพรุนของวัสดุในเบดฟลูอิดไอเซชันมีค่าไม่คงที่และไม่แน่นอน สมการ Ergun (Ergun et al., 1952) เป็นสมการกึ่งเอมพิริคัล (Semi-empirical) เป็นสมการที่นิยมใช้ในการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน สมการนี้ประกอบไปด้วยเทอมการสูญเสียความดันอันเนื่องมาจากความเสียดทานกับของไหล (Viscous drag) และเนื่องมาจากการสูญเสียพลังงานจลน์ (Kinetic losses) ดังนี้

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \right) - \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu^2} = 0 \quad (16)$$

ε_{mf} คือช่องว่างภายในเบด (dimensionless) ρ_s คือความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m^3) ρ_f คือความหนาแน่นของไหล (kg/m^3) d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m) ϕ_s คือแฟกเตอร์รูปร่างของอนุภาค μ คือความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล (Pa·s) ถ้าทราบค่า ε_{mf} จากการทดลอง สามารถคำนวณหา U_{mf} ได้ โดยการแทนค่า Reynolds number และ Archimedes number ดังสมการ (17) และ (18) ตามลำดับแทนค่าลงในสมการที่ (16) จะได้ สมการที่ (19)

$$Re_s = \frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \quad (17)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu^2} \quad (18)$$

$$C_1 Re_s^2 + C_2 Re_s - Ar = 0 \quad (19)$$

โดยที่ $C_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s}$ และ $C_2 = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}$ จากบทความของ Wen และ Yu (1966) พบว่า C_1 และ C_2 มีค่าคงที่ในช่วง $0.001 < Re_{p,mf} < 4000$ โดยทำนายค่า U_{mf} ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 34% ค่า C_1 และ C_2 สำหรับอนุภาคขนาดเล็กละเอียด (Fine) และขนาดใหญ่ (Coarse) แสดงใน Table 2

Table 2 Values of coefficients of modified Ergun's equation (eq. 19).

	Particle size	
	Fine Wen & Yu (1966)	Coarse Chitester et al. (1984)
$\frac{C_2}{2C_1}$	33.7	28.7
$\frac{1}{C_1}$	0.0408	0.0494

แทนค่าคงที่จาก Table 2 แล้วคำนวณหาค่า U_{mf} ด้วยการแก้สมการ (19) โดยใช้คำสั่ง fzero ในโปรแกรม Matlab™ จะได้ข้อมูลแสดงใน Figure 8

3 ผลและวิจารณ์

Figure 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับความดันคร่อมเบต (Pressure drop) เมื่อค่อยๆเพิ่มความเร็วอากาศเข้าทางด้านล่างของเบตเพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เงื่อนไข $d_p = 2$ mm จำนวนอนุภาคในเบต 8232 อนุภาค ผลการจำลองพบว่าขณะที่อากาศยังมีความเร็วต่ำอนุภาคจะไม่ขยับตัวดัง Figure 4(A) ลักษณะของเบตเช่นนี้เรียกว่าเบตนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศ ความดันคร่อมเบตยังมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สถานะนี้ความเร็วในการไหลตามผิว (Superficial velocity) จะมีค่าน้อยกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ถ้าเพิ่มความเร็วของอากาศจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง วัสดุจะเริ่มขยับตัวและจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เรียกว่าฟลูอิดเซชันต่ำสุด (Minimum fluidizing velocity, U_{mf}) ดัง Figure 4(B) ที่จุดนี้ความดันจะมีค่าสูงสุดเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศต่อไปจนมีค่าสูงกว่า U_{mf} ความดันคร่อมเบตจะลดลงดัง Figure 4(C) น้ำหนักของวัสดุถูกรองรับโดยกระแสของไหล วัสดุจะเปลี่ยนพฤติกรรมจากการเคลื่อนที่จนมีลักษณะคล้ายกับของไหล โดยพฤติกรรมนี้เกิดจากดุลของแรงจากอากาศที่กระทำต่อวัสดุ

ในงานวิจัยนี้จำลองการเกิดฟลูอิดเซชันที่มีน้ำหนักของอนุภาค 0.05 kg เท่ากันทุกกรณี เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมีขนาดต่างกันได้แก่ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5 mm จึงมีจำนวนอนุภาคในเบตเท่ากับ 526857, 65857, 19513, 8232 และ 3824 ตามลำดับ การจำลองเริ่มจากการบรรจุวัสดุลงในเบต แล้วปล่อยอากาศให้ไหลเข้าทางด้านล่างของเบต โดยเพิ่มความเร็วอากาศจาก 0 – 1.4 m s⁻¹ ภายในระยะเวลา 2 s โดยกำหนดความเร็วอากาศเข้าเบตด้วยคำสั่ง User defined function (UDF) แล้ววัดความดันแบบเฉลี่ยพื้นที่ตลอดหน้าตัดขวางในบริเวณเหนือแผ่นกระจายอากาศเล็กน้อย (P1) กับบริเวณใกล้ทางออกเบต (P2) จากนั้นคำนวณค่าความดันตกคร่อม (Pressure drop) ด้วยการหาผลต่าง P1-P2 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วอากาศ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมและความเร็วของอากาศที่เข้าสู่เบตดัง Figure 4

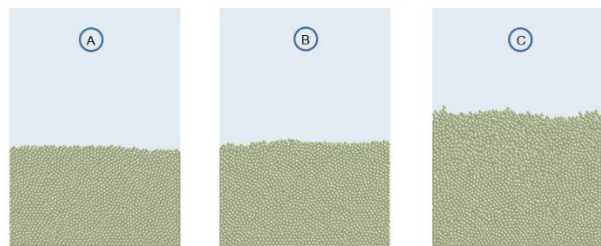
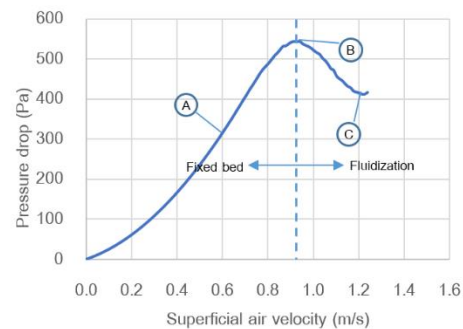


Figure 4 Effect of superficial air velocity on pressure drop and snapshots of solid flow ($d_p = 2$ m).

เพื่อแสดงความเร็วและความดันของอากาศที่พยายามเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคภายในเบต Figure 5 แสดงการลักษณะการไหลของอากาศผ่านอนุภาคที่เวลา 1 s ของการจำลอง พบว่าอนุภาคกลุ่มที่อยู่ด้านบนของเบตขยับตัวลอยขึ้นตามกระแสการไหลของอากาศ ส่วนอนุภาคที่อยู่ด้านล่างของเบตยังเรียงตัวชิดกันอย่างหนาแน่น

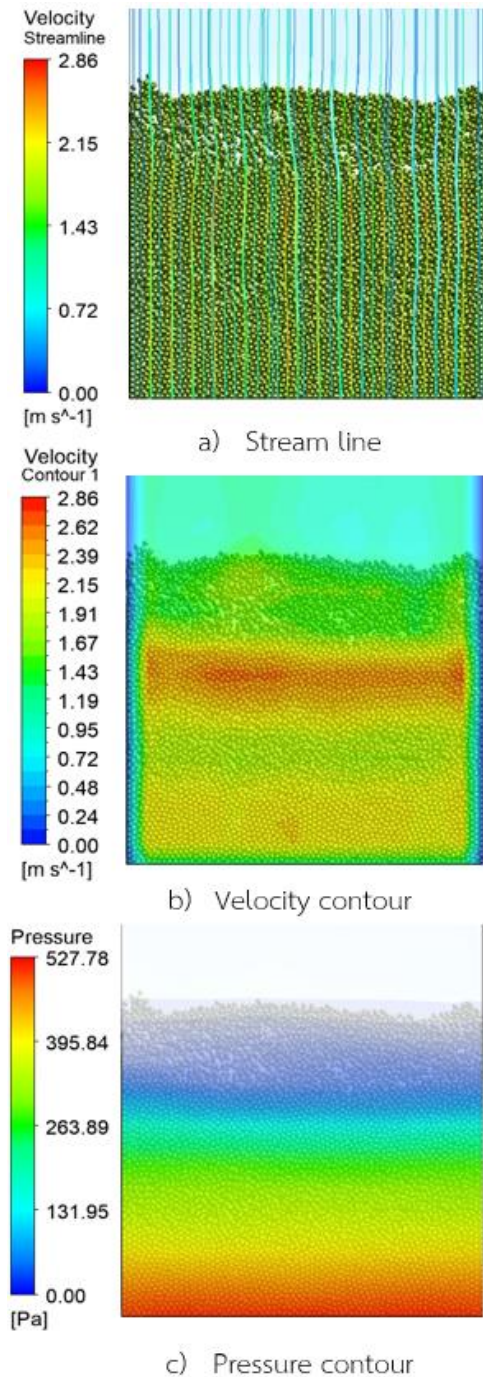


Figure 5 Stream line, velocity and pressure contour of airflow and particle flow fields for $d_p=1.5$ mm at 1 s of simulation.

Figure 5(a) แสดงเส้น Stream line ของอากาศในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านกลุ่มอนุภาค พบว่าอากาศมีความเร็วตลอดพื้นที่หน้าตัดในแต่ละระดับความสูงใกล้เคียงกัน ส่วน Figure 5(b) แสดง Contour ของความเร็วอากาศพบว่าเกิดความเร็วสูงสุด (สเกลสีแดง) ที่บริเวณช่วงบนของเบตโดยมีความเร็วในช่วง 2.6-2.8 m/s ส่วนผนังห้องอบแห้งอากาศมีความเร็วเกือบเป็นศูนย์

จาก Figure 5(b) อนุภาคกลุ่มที่อยู่ด้านบนสุดของเบตเกิดการแยกตัวและถูกยกให้ลอยด้วยกระแสอากาศ โดยอากาศที่วิ่งผ่านอนุภาคกลุ่มนี้มีความเร็วอยู่ในช่วง 1.1-1.6 m/s (สเกลสีเขียว) การลอยตัวที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการถ่ายเทพลังงานจลน์และโมเมนตัมจากการชนกันของอนุภาคที่อยู่ในชั้นภายในซึ่งมีความเร็วและความดันของอากาศสูง สอดคล้องกับ Figure 5(c) แสดงความดันสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณด้านล่างสุดของเบตซึ่งมีความดันประมาณ 500 Pa และความดันจะค่อยๆ ลดลงจนถึงผิวด้านบน หลังจากอนุภาคกลุ่มด้านล่างลอยตัว ความพรุนของอนุภาคภายในเบตมากขึ้น อากาศสามารถแทรกตัวและเกิดฟองอากาศไปทั่วทั้งเบต อนุภาคกลุ่มล่างจึงมีช่องว่างให้สามารถเคลื่อนที่จนเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไลเซชันในเวลาต่อมา

Figure 6 พบว่าอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจะมีค่าความดันตกคร่อมเบตสูงกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ เมื่อ $d_p=0.5$ mm มีความดันคร่อมเบตสูงกว่า $d_p=2.5$ mm ประมาณ 65.6 Pa เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคขนาดเล็กมีช่องว่างในเบตน้อยกว่าการเรียงตัวของอนุภาคขนาดใหญ่ อากาศไหลจึงผ่านได้ยากกว่าความดันจึงมีค่าสูง

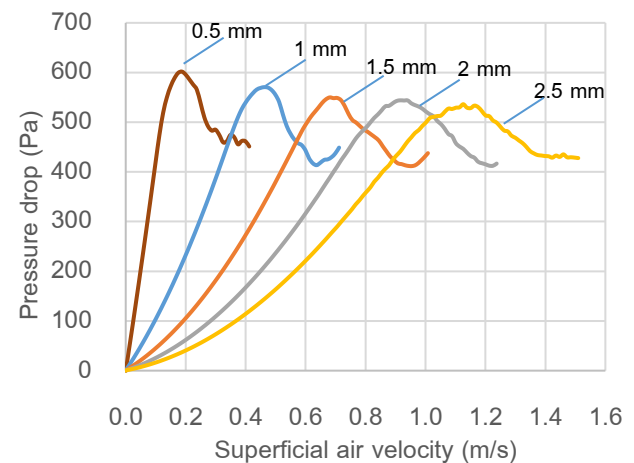


Figure 6 Effect of superficial air velocity on pressure drop with 5 different sizes of particle diameters.

จาก Figure 6 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดอนุภาคที่มีต่อความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไลเซชัน (U_{mf}) พบว่าค่า U_{mf} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่มีน้ำหนักต่ออนุภาคสูงกว่า ทำ

ให้ต้องใช้แรงยกจากกระแสการไหลของอากาศมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก

Figure 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับความดันลด เมื่อบรรจุอนุภาคน้ำหนักรวมต่างกันสองค่าคือ 0.07 และ 0.1 kg โดย $d_p=1.5$ mm เท่ากัน ซึ่งมีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 22762 และ 31404 ตามลำดับ พบว่าเมื่อน้ำหนักรวมของอนุภาคภายในเบตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันคร่อมเบตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องใช้แรงดันอากาศสูงเพื่อรองรับน้ำหนักอนุภาคที่มีมวลรวมในเบตมากกว่าจนทำให้เกิดการลอยตัว

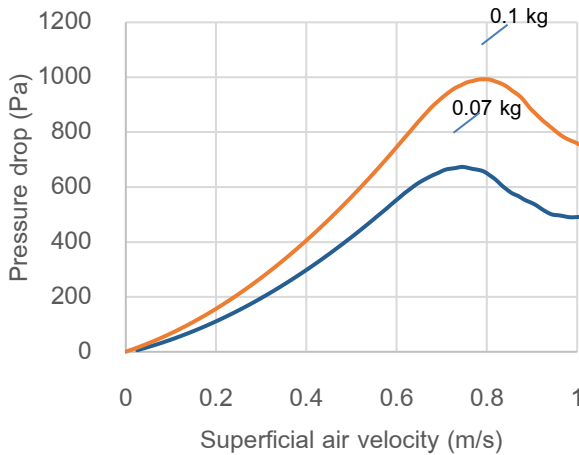


Figure 7 Effect of superficial air velocity on pressure drop with 2 different total mass in fluidized bed ($d_p=1.5$ mm)

Figure 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคกับค่า U_{mf} พบว่าแบบจำลอง CFD-DEM ทำนายค่า U_{mf} ได้ใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ของ Chitester et al. (1984) ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่มาจากวัสดุเป็นชิ้นขนาดใหญ่ (วัสดุที่มี $d_p \geq 0.1$ mm) ซึ่งสอดคล้องกับวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองที่มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.5-2.5 mm ส่วนสมการ Ergun และค่าคงที่ของ Wen & Yu (1966) ทำนายค่า U_{mf} ได้ต่ำกว่าค่าที่ทำนายจากแบบจำลอง CFD-DEM เนื่องจากสมการและค่าคงที่จากการพิตสมการเข้ากับวัสดุที่มี $d_p < 0.1$ mm

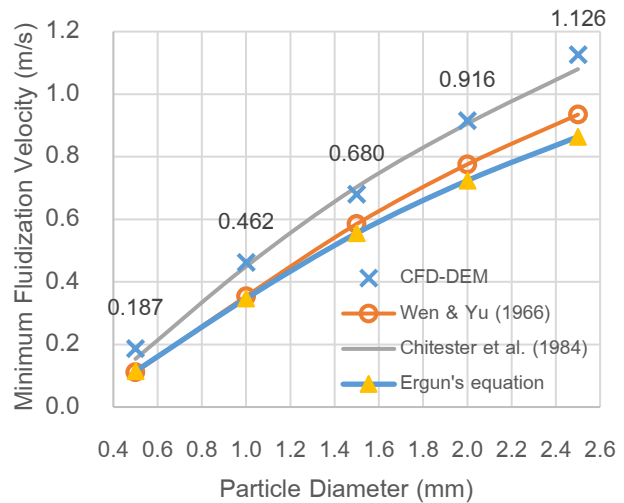


Figure 8 U_{mf} Versus particle diameters.

เมื่อเปรียบเทียบผลจาก Figure 8 กับงานวิจัยของ Khawaja (2011) ซึ่งใช้แบบจำลอง CFD-DEM คำนวณค่า U_{mf} ของวัสดุทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15, 0.3, 0.6 และ 1.2 mm พบว่าแบบจำลองทำนายค่า U_{mf} ได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Wen & Yu (1966) เนื่องจากในแบบจำลองของ Khawaja (2011) กำหนดจำนวนอนุภาคในเบตเท่ากัน (9240 อนุภาค) ทุกเงื่อนไข ภายใต้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่ต่างกัน ความสูงเบตและน้ำหนักรวมในการจำลองแต่ละครั้งจึงไม่เท่ากัน ทำให้ผลการจำลองที่ได้มีค่าต่างจากงานวิจัยนี้เล็กน้อย

4 สรุป

แบบจำลอง CFD-DEM สามารถทำนายค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf}) ได้ใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ของ Chitester et al. (1984) จากผลการจำลองพบว่าอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจะมีค่าความดันคร่อมเบตสูงกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ นอกจากนี้พบว่า U_{mf} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มจำนวนอนุภาคในเบต ค่า U_{mf} และ ΔP_{max} จะมีค่าเพิ่มขึ้น ข้อมูลเหล่านี้ช่วยในการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันสำหรับวัสดุการเกษตรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างเป็นเม็ดสม่ำเสมอในเครื่องฟลูอิดไรซ์เบตชนิดคอล์มน์ และแบบจำลองนี้สามารถใช้กับวัสดุที่มีขนาดเล็กมากถึงขนาดใหญ่ซึ่งอาจช่วยประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการทดลอง

5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และ อ.ดร.สถาพร วังฉาย ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

6 เอกสารอ้างอิง

- Adebowale, A.R.A. 2011. Effect of variety and moisture content on some engineering properties of paddy rice. *Journal of Food Science and Technology* 48(5), 551-559.
- Chitester, D.C., Kornosky M.R., Fan L.S., Danko J.P. 1984. Characteristics of fluidization at high pressure. *Chemical Engineering Science* 39, 253-261.
- Ergun, S. 1952. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress* 48(2), 89-94.
- Hobbs, A. 2009. Simulation of an aggregate dryer using coupled CFD and DEM methods. *International Journal of Computational Fluid Dynamics* 23(2), 199-207.
- Khawaja, H.A. 2011. CFD-DEM simulation of minimum fluidization velocity in two phase medium. *The International Journal of Multiphysics* 5(2), 89-99.
- Li, C., Honeyands, T., O'Dea, D. and Moreno-Atanasio, R. 2017. The angle of repose and size segregation of iron ore granules DEM analysis and experimental investigation. *Powder Technology* 320, 257-272.
- Mindlin, R.D., Deresiewicz, H. 1953. Elastic Spheres in Contact under Varying Oblique Force. *Trans. ASME, Journal of Applied Mathematics and Physics* 20, 327-344.
- Mingming F., Kun L., Shiliang Y., Ke Z., Jianren F. 2013. Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method Investigation of Solid Mixing Characteristics in an Internally Circulating Fluidized Bed. *Industrial&Engineering Chemistry Research* 52, 7556-7568.
- Prakotmak, P., Wangchai, S., Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S. 2018a. Simulation of a fluidized bed characteristics using DEM-CFD coupling. *Proceedings of the 19th TSAE National Conference*. Prachuap Khiri Khan, Thailand (In Thai).
- Prakotmak, P., Wangchai, S. 2018b. Investigation of Particle Dynamics and Heat Transfer in a Fluidized bed Using CFD-DEM Simulation. *Proceedings of the 32th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand*. Mukdahan, Thailand (In Thai).
- Surbkar, R., Wongsiriamnuay, T., Surbkar, S. 2012. Foundation of the Ergun equation for the calculation of minimum fluidizing velocity of solid particles. *Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering* 18(1), 24-33 (In Thai).
- Teffo, V.B., Naudé, N. 2013. Determination of the coefficients of restitution, static and rolling friction of Eskom-grade coal for discrete element modelling. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 113, 351-356.
- Tsuji, Y., Tanaka, T., Kawaguchi, T. 1998. Numerical simulation of two dimensional fluidized beds using the discrete element method (Comparison between the two and three dimensional models). *Powder Technology* 96, 129-138.
- Wahyudi, H., Chu, Kaiwei, Yu, A. 2016. 3D particle-scale modeling of gas-solids flow and heat transfer in fluidized beds with an immersed tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 97, 521-537.
- Wen, C.Y., Yu, Y.H. 1966. *Mechanics of fluidization*. Chemical Engineering Progress Symposium Series 62, 100-111.
- Yupeng X., Tingwen L., Jordan M., Xiaoxing L., Guangwen X., William A.R. 2017. CFD-DEM modeling the effect of column size and bed height on minimum fluidization velocity in micro fluidized beds with Geldart B particles. *Powder Technology* 318, 321-328.
- Wangchai, S. 2017. Performance analysis of bulk material handling by belt conveyor using DEM. *Proceeding of the 31th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand*. Nakhon Nayok, Thailand (In Thai).
- Zhou, L., Zhang, L., Bai, L., Shi, W., Li, W. Wang, C., Agarwal, R. 2017. Experimental study and transient CFD/DEM simulation in fluidized bed based on different drag models. *RSC Advances* 7, 12764-12774.
- Zhu, Z., Na Y., Lu Q. 2007. Effect of pressure on minimum fluidization velocity. *Journal of Thermal Science* 6(3), 264-269.