



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ดัชนีการผสมของอนุภาคในเครื่องผสมแบบใบกวนโดยใช้วิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง

A computer simulation for mixing index analysis of particles in bladed mixers using discrete element method

ปรีดา ปรากฏมาก^{1*} สถาพร วังฉาย²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

² ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

Preeda Prakotmak^{1*} Sathaphon Wangchai²

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Khamphengsean Campus, Nakhonpathom 73140

² Department of Materials Handling & Logistics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

* Corresponding author.

E-mail: fengpdpr@ku.ac.th

วันที่รับบทความ -15 พฤษภาคม 2564; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 1 1 กรกฎาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ 12 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

การผสมอนุภาคเป็นกระบวนการที่สำคัญในอุตสาหกรรมที่หลากหลายรวมถึงเคมีภัณฑ์ อาหารเครื่องสำอาง เหมืองแร่ เกษตรกรรมและเวชภัณฑ์ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การผสมและรูปแบบการไหลของอนุภาคทรงกลมในเครื่องผสมแบบทรงกระบอกโดยใช้วิธีองค์ประกอบแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) จำนวนใบพัดมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 4 ใบและผลกระทบของจำนวนใบกวนที่มีต่อการไหลของอนุภาคแรงสัมผัสของใบกวนและจลนพลศาสตร์การผสมกันถูกศึกษาด้วยมุมใบ 45° และ 90° คุณภาพการผสมของอนุภาคถูกอธิบายด้วยดัชนีการผสมของ Lacey ผลการจำลองพบว่าการใช้ใบกวนสองหรือสามใบให้ประสิทธิภาพการผสมดีกว่าการใช้ใบกวนหนึ่งหรือสี่ใบ ผลการศึกษาพบว่า 45° เป็นมุมที่แสดงอัตราการผสมสูงสุด นอกจากนี้พบว่าความเร็วของอนุภาคได้รับอิทธิพลจากจำนวนของใบกวนที่ใช้ในระบบผสม การคำนวณแรงกระทำระหว่างอนุภาคกับใบกวนแสดงให้เห็นว่าการใช้จำนวนใบกวนที่แตกต่างกันทำให้เกิดการกระจายแรงอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ

การผสมกันของอนุภาค เครื่องผสมแบบใบกวน ใบกวน วิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง ดีอีเอ็ม

Abstract

Particle mixing is a crucial process in a variety of industries including chemicals, food, cosmetics, mining, agriculture and pharmaceuticals. In this study the mixing kinetics and flow patterns of spherical particles in a cylindrical bladed mixer were investigated using discrete element method (DEM). The number of impeller blade was varied from 1 to 4 blades, and impact of the number of blades on particle flow, blade-particles contact force and mixing kinetics were studied with blade-rake angles of 45° and 90°. The mixing quality of particles was described by Lacey mixing index. The simulation results showed that using two or three impeller blade provided better mixing performance than using one or four blades.

The results demonstrated that 45° as the angle showing the highest mixing rate. Additionally, it was found that particle velocities were influenced by the number of the blades used in the mixing system. Blade-particle force calculations showed that using different number of impeller blade led to significant differences in the force distribution.

Keywords

particle mixing; bladed mixer; blade; discrete element method; DEM

1. คำนำ

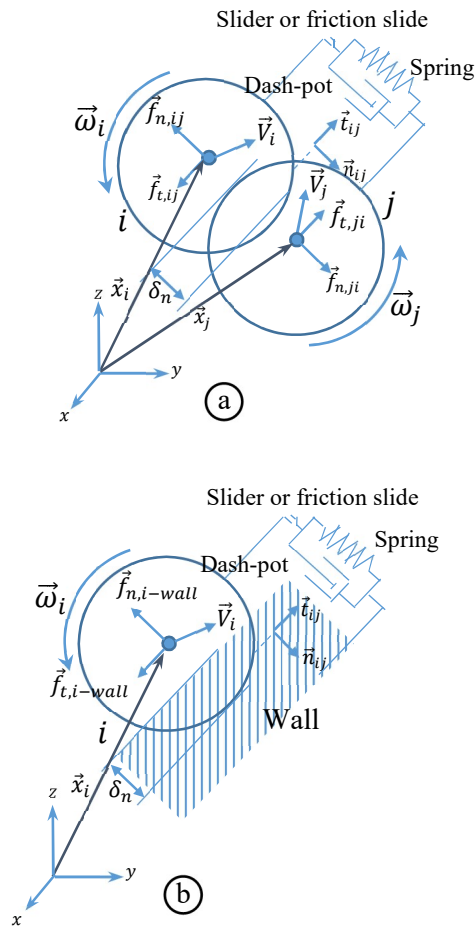
การผสมอนุภาคของแข็งเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเม็ดพลาสติก เคมี เครื่องสำอางและยา อุตสาหกรรมจำนวนมากเกี่ยวข้องกับการผสมวัสดุผงหรือวัสดุเม็ด ซึ่งนิยมใช้เครื่องผสม (Mixing machine) ช่วยลดปัญหาความผิดพลาดจากข้อจำกัดของการใช้แรงงานคนโดยแบ่งเป็น 3 ประเภทคือ 1) แบบหมุนเหวี่ยง ตัวถังผสมจะหมุนจากบนลงล่างด้วยความเร็วตามกำหนดวัสดุที่ถูกผสมจะเคลื่อนตัวเปลี่ยนตำแหน่งสูงขึ้นและหมุนตกลงมาผสมคลุกเคล้ากันอย่างทั่วถึง เครื่องผสมยาแบบหมุนเหวี่ยงเหมาะกับวัสดุชนิดผง (Powder) หรือแกรนูล (Granules) 2) เครื่องผสมวัสดุแบบปั่นเหวี่ยงหรือกวนจะมีใบพัดสำหรับกวนวัสดุให้เข้ากัน ใช้ได้ทั้งสารแบบเปียกและแห้ง 3) เครื่องผสมแบบสุญญากาศ เป็นถังผสมที่มีใบพัดกวนในระบบสุญญากาศเหมาะสำหรับการผสมครีมเพื่อป้องกันการเกิดฟองในผลิตภัณฑ์ ในอุตสาหกรรมเม็ดพลาสติกส่วนใหญ่จะนิยมใช้เครื่องผสมแบบใบกวนผสม ซึ่งต้องใช้พลังงานมาขับให้ใบกวนผสมหมุนเพื่อคลุกเคล้าให้เม็ดพลาสติกกับสารที่ต้องการผสมเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ หากไม่สามารถผสมจนเป็นเนื้อเดียวจะก่อปัญหาเนื้อพลาสติกเหลว เกิดรอยต่างของสีบนผิวชิ้นงาน การบิดเบี้ยวของชิ้นงานและน้ำหนักของชิ้นงานที่แตกต่างกันมาก ในปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับการไหลแบบเม็ดในเครื่องแบบใบกวนผสม แต่ความเข้าใจเกี่ยวกับการทำงานของเครื่องผสมชนิดนี้ยังมีข้อมูลน้อย เช่น จุดอับ (Dead zone) ที่เกิดการผสมไม่ทั่วถึงและจำนวนใบกวนที่เหมาะสม จากงานวิจัยที่ผ่านมาปัจจัยที่มีผลต่อการผสมกันของวัสดุที่เป็นเม็ดขึ้นอยู่กับความลาดเอียงของใบกวนและระยะห่างระหว่างใบกวนกับพื้นถังกวน [1] ขนาดของเม็ดวัสดุ [2] ความเร็วรอบในการหมุนของใบกวน [3] นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนใบกวนสามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผสมอย่างมีนัยสำคัญ [4] ซึ่งผลกระทบของจำนวนใบกวนและ

มุมเอียงของใบกวนที่มีผลต่อการผสมกันของวัสดุในเครื่องผสมแบบใบกวนยังไม่ได้ได้รับการศึกษามากนัก

ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความก้าวหน้ามากและมีราคาถูกลง การนำคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ที่มีประสิทธิภาพมาประยุกต์ใช้ในการจำลองการผสมกันของวัสดุเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้ได้คำตอบในการแก้ปัญหาได้เร็วขึ้น วิธีที่นิยมใช้จำลองปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคกับอนุภาคและอนุภาคกับภาชนะในระหว่างการผสมกัน คือวิธีดิสครีตเอลิเมนต์ (Discrete Element Method, DEM) [5] วิธีการนี้จะนำแรงที่กระทำกันระหว่างอนุภาคซึ่งประกอบด้วยแรงเนื่องจากสปริง (Spring) แรงเนื่องจากความหน่วง (Dash-pot) และแรงเสียดทาน (Friction) มาพิจารณาร่วมกัน โดยใช้กฎของนิวตัน (Newton's Laws of Motion) เพื่อคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาค จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า DEM สามารถทำนายพฤติกรรมของอนุภาคได้แม่นยำ และยังสามารถใช้อธิบายแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการชนกันของอนุภาคได้เป็นอย่างดี วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบกวนที่มีต่อจลนพลศาสตร์การผสมกันในเครื่องผสมแบบทรงกระบอกโดยใช้วิธีวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบคุณภาพการผสมกันของระบบที่มีใบกวนมุมเอียงแตกต่างกัน 2 ค่า คือ 45° และ 90° โดยประสิทธิภาพการผสมกันอธิบายด้วยดัชนีการผสมกัน (Mixing index)

2. แบบจำลองคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้จำลองการชนกันเป็นชนิดทรงกลมอ่อน (Soft sphere model) แบบ 3 มิติ พิจารณาจากการเปลี่ยนรูปร่างจริงของการชนกันระหว่างอนุภาคสองอนุภาค โดยสมมติให้เกิดการกระจัดเหลือม (δ) แทนการเกิดการเปลี่ยนรูปร่างจริง ดังรูปที่ 1 แรงที่เกิดขึ้นระหว่างการชนกันเป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic contact force model) ทำให้อนุภาคมีการเสียพลังงานจลน์ พิจารณาจาก สปริง ตัวหน่วง และสไลเดอร์



รูปที่ 1 แรงสัมผัสในระหว่าง (a) การชนกันระหว่างอนุภาค-อนุภาค (b) การชนกันระหว่างอนุภาค-ผนัง

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 [6] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมการแรงและทอร์กที่ใช้ในแบบจำลอง

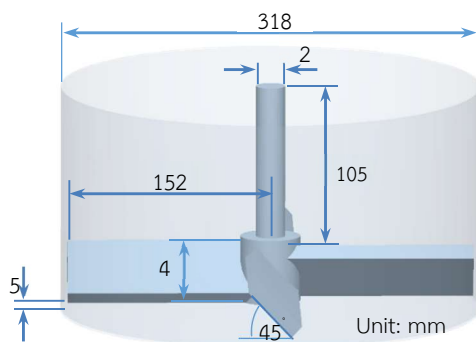
ตัวแปร	สมการ
Normal spring force	$F_n^s = -k_n \delta_n^{3/2}$, $k_n = \frac{4}{3} Y^{eq} \sqrt{R^{eq}}$
Normal damping force	$F_n^d = -2\beta \sqrt{\frac{5}{4} k_n m^{eq} \delta_n^4 V_n^{rel}}$, โดย $\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$
Tangential forces	$F_t = \begin{cases} F_t^s + F_t^d,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

โดยค่า Y^{eq} คือค่าเทียบเท่ามอดูลัสของยัง (Equivalent Young's modulus) R^{eq} คือรัศมีเทียบเท่า (Equivalent radius) m^{eq} คือมวลเทียบเท่า (Equivalent mass) $\square$ คือระยะเหลื่อม (Particle overlap) k_n คือค่าคงที่สปริงในแนวตั้งฉาก (Normal spring stiffness), S_t คือค่าคงที่สปริงในแนวสัมผัส (Tangential spring stiffness) μ_s คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of sliding friction) และ μ_r คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการกลิ้ง (Coefficient of rolling friction) β คือค่าความหน่วง (Damping factor) โดยเป็นฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การคืนตัว (Restitution coefficient, e) ซึ่งค่า e คำนวณมาจาก [7] สำหรับรายละเอียดที่มาของสูตรในตารางที่ 1 สามารถสืบค้นได้จาก [8] สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลของวัสดุและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง DEM แสดงในตารางที่ 2

ขนาดและรูปร่างของถังและใบกวนแสดงดังรูปที่ 2 คล้ายกับงานวิจัยของ Boonkanokwong [4] ซึ่งเป็นเครื่องผสมแบบแท่งที่มีใบกวนเอียง 45° เพียงแบบเดียว แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้ใบกวนสองแบบ คือใบกวนที่มีมุมเอียง 45° (รูปที่ 2 และ 4) และใบกวนมุมเอียง 90° (รูปที่ 4) เนื่องจากใบกวนทั้งสองแบบนี้เป็นรูปทรงอย่างง่ายและนิยมใช้ในถังผสมแบบแกนวางตัวในแนวตั้งจึงนำมาทำการศึกษาความสามารถในการผสมวัสดุ โดยขนาดของถังและใบกวนมีค่าเท่ากัน ทิศทางการหมุนของใบกวนเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกา ความเร็วรอบในการหมุน 20 rpm อนุภาคในถังมีจำนวนทั้งหมด 36,000 ชิ้น โดยมีสมบัติของอนุภาคแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง [4, 9]

พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
Particle number	N_p	36,000 [-]
Particle diameter	D_p	5 [mm]
Particle density	ρ_p	2,200 [kg.m ⁻³]
Young's modulus	Y	2.6×10^6 [Pa]
Poisson's ratio	ν	0.25 [-]
Coefficient of restitution	e	0.6 [-]
Sliding friction coefficient	μ_s	0.5 [-]
Rolling friction coefficient	μ_r	0.005 [-]
Time step	$\Delta \tau$	7.8×10^{-5} [s]



รูปที่ 2 ขนาดของถังผสมและใบกวนที่มีมุมเอียง 45°

สำหรับค่าช่วงเวลา (Time step) ที่ใช้ในแบบจำลองควรมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤติที่ทำให้การคำนวณมีเสถียรภาพ ในปัญหาการสัมผัสกันของอนุภาคต้องคำนึงถึงระยะเวลาวิกฤติ ($T_{R,crit}$) ที่เพียงพอให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าชนกันจนเปลี่ยนรูปร่างเล็กน้อยและเกิดการหลอ่วมกัน (รูปที่ 1) โดยคิดจากระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของอนุภาค ค่าช่วงเวลา

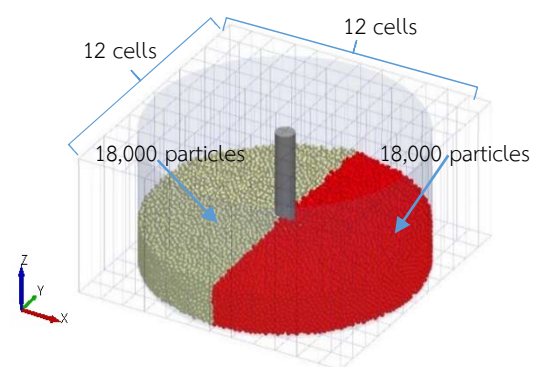
เหมาะสมสำหรับการจำลอง DEM สามารถคำนวณจากสูตรค่าช่วงเวลาของ Rayleigh [10]:

$$T_{R,crit} = \frac{\pi R \left(\frac{\rho}{G} \right)^{0.5}}{(0.1631\nu + 0.8766)} \quad (1)$$

เมื่อ R คือรัศมีของอนุภาค ρ คือความหนาแน่น G คือค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (Shear modulus) และ ν คือค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ค่าช่วงเวลาร้อยละ 40 ของค่า $T_{R,crit}$ ในงานวิจัยนี้จำลองปัญหาด้วยโปรแกรม EDEM บนเครื่อง HP Z240 Workstation, 8 processor cores

3. ดัชนีการผสมกัน

Lacey mixing index (MI) [11] คือดัชนีการวัดทางสถิติของการผสมกันระหว่างตัวอย่างแต่ละกลุ่ม ด้วยการสมมติเซลล์ (Cell) ที่มีปริมาตรเท่ากันให้ครอบคลุมทุกตำแหน่งที่อนุภาคกระจายตัวภายในถังผสม และนับจำนวนอนุภาคแต่ละกลุ่มที่เคลื่อนที่ผ่านเซลล์เหล่านี้ จากนั้นคำนวณสัดส่วนของกลุ่มอนุภาคในแต่ละเซลล์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ในงานวิจัยนี้แบ่งเซลล์ขนาดเท่ากันจำนวน 144 เซลล์ ($12 \times 12 \times 1$) ดังแสดงในรูปที่ 3 การเลือกจำนวน 144 เซลล์ เป็นค่าที่ทำการจำลองแล้วค่าดัชนีการผสมกันมีค่าคงที่แม้ว่าจะทดลองซ้ำหลายรอบ



รูปที่ 3 จำนวนอนุภาคและการแบ่งช่องเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณดัชนีการผสมกัน

ในการจำลองอิทธิพลของจำนวนใบกวนที่มีต่อดัชนีการผสมกันจะใช้ใบกวนที่มีมุมเอียง 45° และ 90° โดยเปลี่ยนแปลงจำนวน 1-4 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 4 ทิศทางการหมุนของใบกวนเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกา ความเร็วรอบในการหมุนคงที่เท่ากับ 20 rpm

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_m)^2 \quad (2)$$

โดย S^2 คือสัดส่วนค่าความแปรปรวนของอนุภาคกลุ่มสีแดงในแต่ละเซลล์, N คือจำนวนของเซลล์ ที่บรรจุอนุภาค, ϕ_i คือสัดส่วนของอนุภาคกลุ่มสีแดงภายในเซลล์ i และ ϕ_m คือค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของอนุภาคสีแดงภายในเซลล์ สามารถใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นคำนวณหาความก้าวหน้าของการผสม คือ 1. ในสถานะเริ่มต้นที่ยังไม่เกิดผสมกัน S_0^2 และ 2. เมื่อสุ่มกลุ่มตัวอย่างที่ผสมกันแล้ว S_R^2 ได้ดังนี้

$$S_0^2 = \phi_m (1 - \phi_m) \quad (3)$$

$$S_R^2 = \phi_m (1 - \phi_m) / n \quad (4)$$

เมื่อ n คือค่าเฉลี่ยของจำนวนอนุภาคต่อเซลล์เมื่อคำนวณตามสมการที่ (2)-(4) จะสามารถหาค่าดัชนีการผสม (Mixing index, MI) จากสมการ

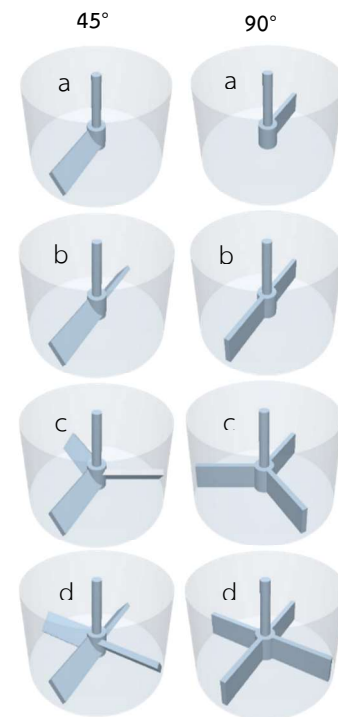
$$MI = \frac{S^2 - S_0^2}{S_R^2 - S_0^2} \quad (5)$$

โดยค่า MI จะมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 ถ้าอนุภาคแต่ละกลุ่มผสมกันอย่างทั่วถึงจะมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งหมายถึงการเข้าสู่สภาพการผสมกันอย่างสมบูรณ์ โดยตัวอย่างทั้งหมดที่สุ่มออกมามีองค์ประกอบในสัดส่วนเดียวกับองค์ประกอบของส่วนผสมทั้งหมด

4. ผลการการจำลองและวิจารณ์

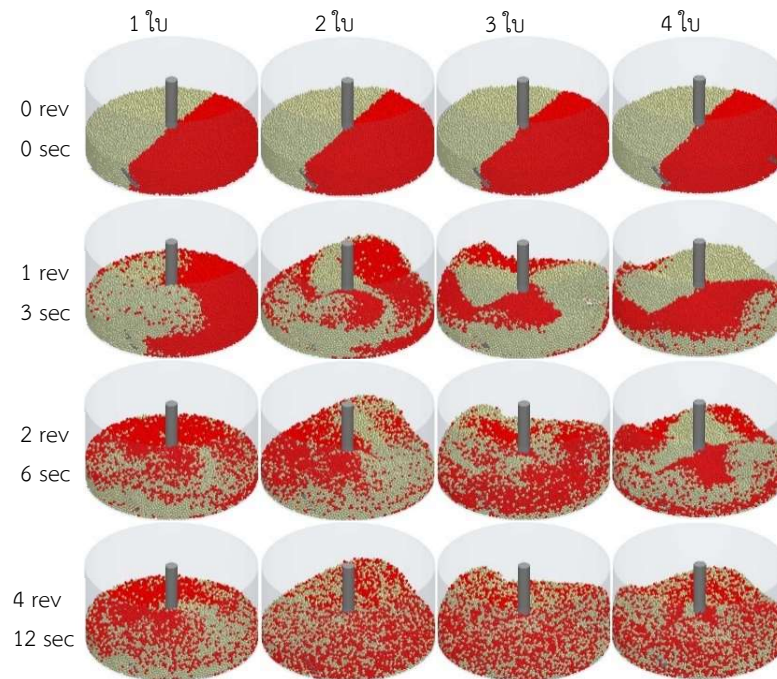
4.1 อิทธิพลของจำนวนใบกวนที่มีต่อดัชนีการผสมกัน

ในการจำลองอิทธิพลของจำนวนใบกวนที่มีต่อดัชนีการผสมกันจะใช้ใบกวนที่มีมุมเอียง 45° และ 90° โดยเปลี่ยนแปลงจำนวน 1-4 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 4 ทิศทางการหมุนของใบกวนเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกา ความเร็วรอบในการหมุนคงที่เท่ากับ 20 rpm

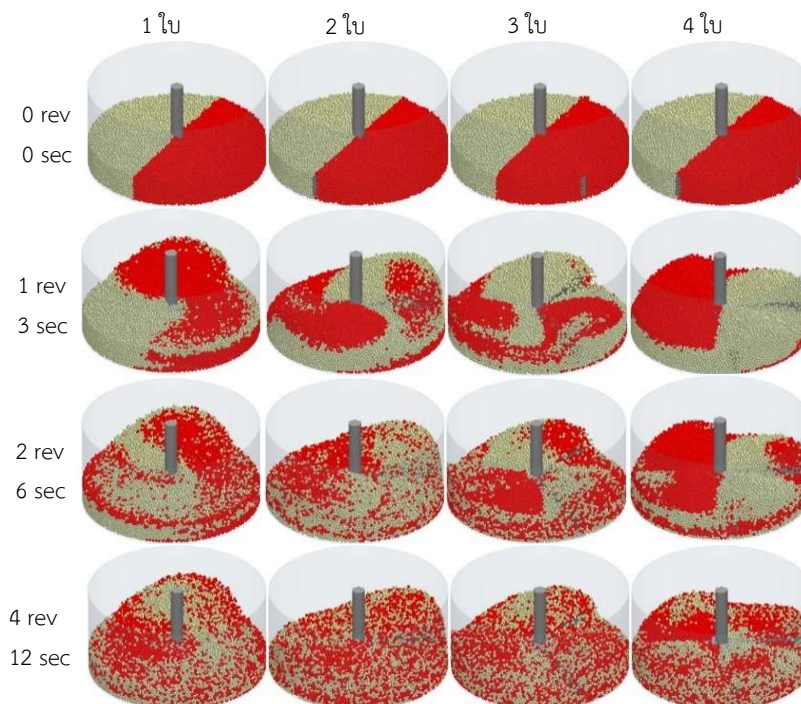


รูปที่ 4 ชุดใบกวนที่มีจำนวนแตกต่างกันโดยมีมุมเอียง 45° และ 90° โดย (a) 1 ใบ (b) 2 ใบ (c) 3 ใบ และ (d) 4 ใบ

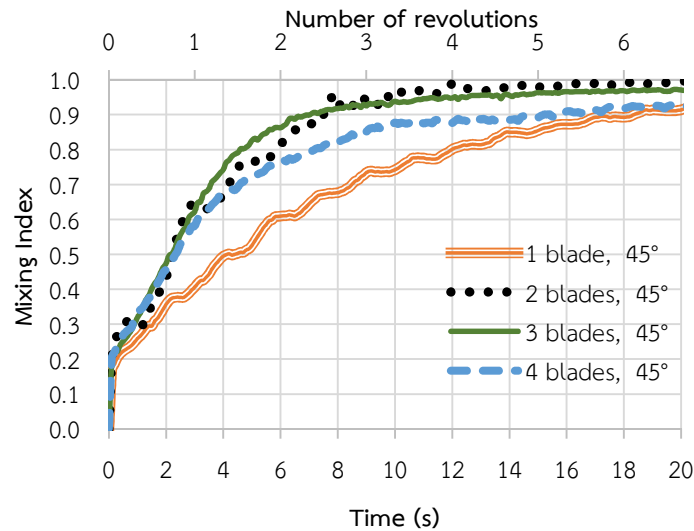
รูปที่ 5 และ 6 แสดงการผสมกันของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงตามรอบการหมุนของใบกวนที่ความเร็ว 20 rpm สำหรับใบกวนที่มีมุมเอียง 45° และ 90° ตามลำดับ จากรูปที่ 5 และ 6 พบว่าจำนวนใบกวน 2 และ 3 ใบ สามารถผสมอนุภาคได้ดีเมื่อใบกวนหมุน 4 รอบขึ้นไป สังเกตจากอนุภาคที่มีสีแตกต่างกันกระจายกันอย่างทั่วถึงมากกว่าดังที่ใบกวน 1 และ 4 ใบ โดยพื้นที่ที่มีการผสมกันต่ำจะอยู่บริเวณโคนใบกวน สอดคล้องกับรูปที่ 7 และ 8 แสดงค่า Mixing index ในระหว่างการผสมกันของอนุภาคทั้งสองกลุ่มที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของใบกวนที่มีมุมเอียง 45° และ 90° ตามลำดับ



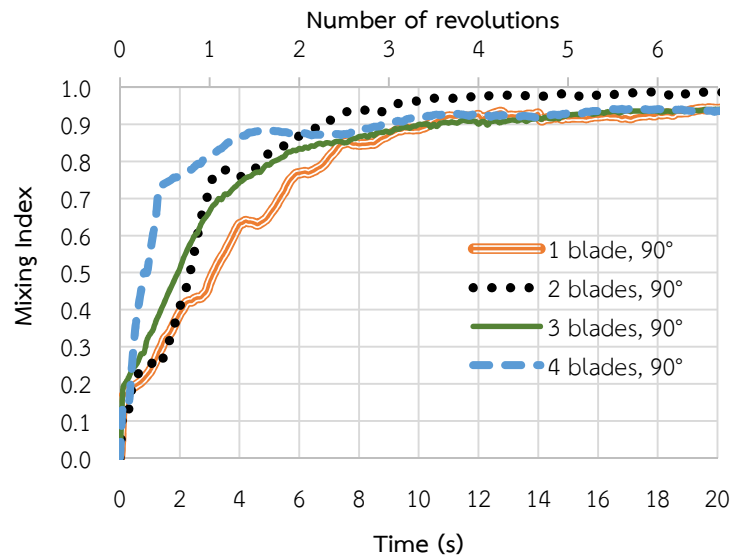
รูปที่ 5 การผสมกันของอนุภาคของใบกวนที่มีมุมเอียง 45° โดยมีจำนวนใบกวน 1-4 ใบ



รูปที่ 6 การผสมกันของอนุภาคของใบกวนที่มีมุม 90° โดยมีจำนวนใบกวน 1-4 ใบ



รูปที่ 7 อิทธิพลของจำนวนใบกวนที่มีต่อดัชนีการผสมกันสำหรับใบกวนที่มีมุม 45° ที่ความเร็วรอบ 20 rpm



รูปที่ 8 อิทธิพลของจำนวนใบกวนที่มีต่อดัชนีการผสมกันสำหรับใบกวนที่มีมุม 90° ที่ความเร็วรอบ 20 rpm

จากรูปที่ 7 และ 8 พบว่าค่า Mixing index ของใบกวนแบบ 4 ใบ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 4 วินาทีแรก หลังจากนั้น ใบกวนชนิด 2 และ 3 ใบ จะมีค่าสูงกว่าใบกวน 1 และ 4 ใบ โดยใบกวน 1 ใบ จะมีค่า Mixing index ต่ำกว่าใบกวนชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบกับจำนวนใบกวน 1 ใบ เท่ากัน ใบกวนมุม 90° สามารถผสมวัสดุได้เร็วกว่าใบกวนมุม 45° สำหรับใบกวนชนิด 2 ใบ จะผสมอนุภาคได้เร็วที่สุดเมื่อการผสมกันดำเนินต่อไปได้ 18 วินาที (ใบกวนหมุน 6 รอบ) อนุภาคทั้งสองกลุ่มผสมกันอย่างทั่วถึงโดยมีค่า Mixing index เท่ากับ 1 ซึ่งหมายถึงเข้าสู่สภาพการผสมกันอย่าง

สมบูรณ์ หากสุ่มหยิบกลุ่มอนุภาคที่ส่วนใด ๆ ภายในถังผสมจะพบว่าอนุภาคทั้งสองกลุ่มมีจำนวนเท่ากันหรือใกล้เคียงกันเสมอ

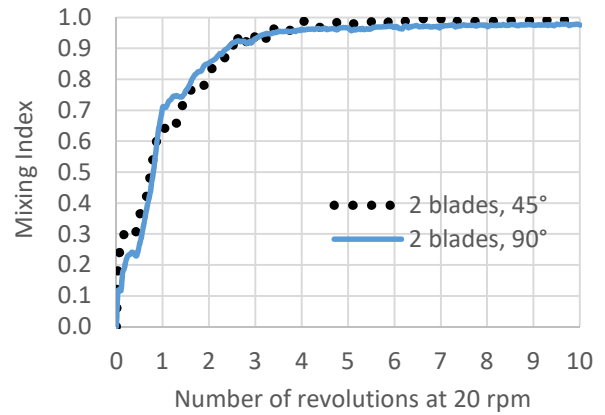
รูปที่ 5 และ 6 แสดงให้เห็นว่าจำนวนใบกวน 2 ใบ สามารถผสมอนุภาคได้รวดเร็วกว่าจำนวนใบกวน 1, 3 และ 4 ใบ ผลการจำลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Boonkanokwong [4] ซึ่งได้ศึกษาการผสมกันของวัสดุทรงกลมภายในถังผสมที่มีใบกวนเอียงทำมุม 45° จำนวน 1 ถึง 4 ใบ โดยพบว่าจำนวนใบกวนมีอิทธิพลต่อการผสมกันของวัสดุในรอบการหมุนที่เท่ากันใบกวนจำนวน 2 ใบ จะมีค่า Mixing

index สูงกว่าจำนวนใบกวนแบบอื่นๆ เนื่องจากใบกวนสองใบที่ทำมุมกัน 180° สามารถกระจายอนุภาคให้กระจายตัวได้ดีกว่าถึงที่มีใบกวน 4 ใบ โดยเฉพาะบริเวณโคนใบกวนใกล้แกนหมุนสังเกตเห็นว่าจำนวน 1 และ 4 ใบ จะมีกลุ่มอนุภาคที่ไม่ผสมกันมากกว่ากรณี จำนวน 2 และ 3 ใบ

จากรูปที่ 7 และ 8 เครื่องผสมที่มีใบกวน 1 ใบ มีความสามารถในการผสมวัสดุให้คลุกเคล้ากันต่ำที่สุดในแต่ละรอบการหมุนของใบกวน เนื่องจากอนุภาคมีช่องว่างระหว่างกันและกันต่ำที่สุด ส่วนใบกวน 4 ใบ มีจำนวนใบเยอะที่สุดเมื่อเกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของใบกวนและวัสดุจะทำให้เกิดการพากลุ่มวัสดุเคลื่อนที่ไปพร้อมกันไม่เกิดกระจายตัว โดยสังเกตจากรูปที่ 6 เมื่อใบกวนหมุน 1 และ 2 รอบ วัสดุส่วนใหญ่จับกันเป็นกลุ่มและถูกใบกวนดันให้เคลื่อนที่แบบติดกันเป็นกลุ่มตามกันไป โดยแยกตัวน้อยทำให้เกิดการผสมกันระหว่างอนุภาคสองกลุ่มไม่ทั่วถึงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใบกวน 1 ถึง 3 ใบ

4.2 อิทธิพลมุมเอียงของใบกวนที่มีต่อดัชนีการผสมกัน

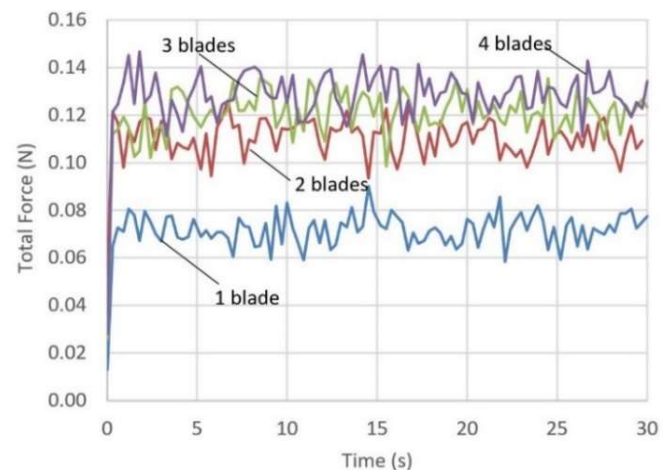
จากผลการจำลองหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าใบกวน 2 ใบ มีค่าดัชนีการผสมกันสูงกว่ากรณีอื่นๆ (รูปที่ 7 และ 8) ในการศึกษาอิทธิพลมุมเอียงของใบกวนที่มีต่อดัชนีการผสมกันจึงเลือกเปรียบเทียบเฉพาะใบกวนชนิด 2 ใบ โดยรูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าดัชนีการผสมกันจากการใช้ใบกวน 2 ใบ ที่มีมุมเอียง 45° และ 90° ตามลำดับ พบว่าในช่วง 1 วินาทีแรกใบกวนมุมเอียง 45° มีค่า Mixing index สูงกว่าใบกวนมุมเอียง 90° แต่ในช่วง 1-3 วินาที ใบกวนมุมเอียง 90° มีค่า Mixing index สูงกว่า หลังจาก 3 วินาทีเป็นต้นไป ค่า Mixing index ของใบกวนมุมเอียง 45° มีค่าสูงกว่าใบกวนมุมเอียง 90° เล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์แรงกระทำระหว่างอนุภาคกับใบกวน พบว่าใบกวนมุมเอียง 45° มีแรงกระทำที่ต่ำกว่า (รูปที่ 10) เนื่องจากมีความลาดเอียงทำให้แรงที่กระทำระหว่างหมุนใบกวนมีค่าต่ำกว่าอนุภาคไหลผ่านได้ง่ายกว่าใบกวนแบบ 90° ดังนั้นแรงบิดของใบกวนมุมเอียง 45° เพื่อใช้ผสมวัสดุจะมีค่าต่ำกว่า



รูปที่ 9 อิทธิพลของมุมเอียงใบกวนที่มีต่อดัชนีการผสมกันสำหรับใบกวนชนิด 2 ใบ

4.3 แรงสัมผัสระหว่างอนุภาคและใบกวน

รูปที่ 10 แสดงแรงรวม (Total force) ที่เกิดจากแรงกระทำระหว่างอนุภาคกับใบกวน 45° พบว่าจำนวนใบกวนมากจะมีพื้นที่สัมผัสกับอนุภาคมาก ทำให้เกิดแรงกระทำกับใบกวนขณะที่หมุนสูงที่สุดในถึงที่มีใบกวน 1 ใบ จะมีแรงกระทำของอนุภาคต่อใบกวนต่ำที่สุด สำหรับใบกวน 90° ผลการจำลองที่ได้เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับใบกวน 45°



รูปที่ 10 อิทธิพลของจำนวนใบกวนที่มีต่อแรงกระทำระหว่างอนุภาคกับใบกวน (ใบกวนมุม 45° ความเร็วรอบ 20 rpm)

5. สรุปผล

แบบจำลอง DEM สามารถจำลองการผสมกันของอนุภาคภายในเครื่องผสมแบบใบผสมได้ดี ประสิทธิภาพในการผสมขึ้นอยู่กับลักษณะของใบผสม จำนวนใบผสมและเวลาที่ใช้ในการผสมวัสดุจากการจำลองพบว่า จำนวนรอบการกวนตั้งแต่ 2 รอบขึ้นไป ใบกวนชนิด 2 ใบ จะมีค่าดัชนีการผสมกันสูงกว่าใบกวนแบบอื่นๆ นอกจากนี้พบว่าการใช้ใบกวน 2 หรือ 3 ใบ มีประสิทธิภาพการผสมดีกว่าการใช้ใบกวน 1 หรือ 4 ใบ ผลการศึกษาพบว่ามุมเอียงของใบกวนเท่ากับ 45° เป็นมุมที่แสดงดัชนีการผสมกันสูงกว่าใบกวนที่มีมุมเอียง 90° แรงกระทำระหว่างใบกวนกับอนุภาคได้รับอิทธิพลจากจำนวนของใบกวนที่ใช้ในระบบ โดยระบบที่มีจำนวนใบกวนมากจะมีแรงรวมกระทำกับใบกวนเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยและอุปกรณ์การทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chandratilleke GR, Yu AB, Stewart RL, Bridgwater J. Effects of blade rake angle and gap on particle mixing in a cylindrical mixer. *Power Technology*. 2009; 193: 303-311
- [2] Siraj MS, Radl S, Glasser BJ, Khinast JG. Effect of blade angle and particle size on powder mixing performance in a rectangular box. *Powder Technology*. 2011; 211: 100-113
- [3] Havlica J, Jirounkova K, Travnickova T, Kohout M. The effect of rotational speed on granular flow in a vertical bladed mixer. *Powder Technology*. 2015; 280: 180-190
- [4] Boonkanokwong V, Remy B, Khinast JG, Glasser BJ. The effect of the number of impeller blade on granular flow in a bladed mixer. *Power Technology*. 2016; 302: 333-349.
- [5] Cundal P, Strack O. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*. 1979; 29(2): 47-65.
- [6] Mindlin RD, Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*. 1953; 20: 327-344.
- [7] Prakotmak P. CFD-DEM simulation of minimum fluidization velocity for gas-solid medium. *Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering*. 2019; 25(1): 19-27.
- [8] EDEM. *EDEM 2.6 Theory Reference Guide*, 2014; 5.
- [9] ไม่หอม วิลาศ. การผสมอนุภาคในเครื่องผสมคกที่โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง [วิทยานิพนธ์]. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. 2562.
- [10] Li Y, Xu Y, Thornton C. A comparison of discrete element simulations and experiments for “sandpiles” composed of spherical particles. *Powder Technology*. 2005; 160(3): 219-228.
- [11] Lacey P. Developments in theory of particulate mixing. *Journal of Applied Chemistry*. 1954; 4: 257.