



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การจำลองการผสมเม็ดพลาสติกของเครื่องผสมแบบโรตารีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง

Plastics mixer simulation of rotary machine using discrete element method technique

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

Werayoot Lahamornchaiyakul*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok
Campus Phitsanulok 65000

* Corresponding author.

E-mail: werayootmutl@gmail.com; Telephone: 0620621219

วันที่รับบทความ 29 มกราคม 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 25 มีนาคม 2564; ครั้งที่ 2 3 พฤษภาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ 9 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

เครื่องผสมแบบโรตารี ถูกนำมาใช้สำหรับกระบวนการผสมวัสดุเม็ดจำนวนมากในทิศทางการหมุนแบบวนรอบของเครื่องผสมแบบโรตารี และถูกพบมากในงานด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมฉีดพลาสติกและงานด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผสม ขั้นตอนและระเบียบวิธีการวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method (DEM)) ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบการผสมของอนุภาคของแข็งในเครื่องผสมแบบโรตารี ซึ่งเทคโนโลยีปัจจุบันของ DEM ถูกนำไปใช้สำหรับกระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องผสมแบบโรตารี เพื่อให้บรรลุเป้าหมายในบทความนี้ จึงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการแสดงรูปแบบของวิธีการวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) โดยเทคนิคของ DEM ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้เพื่อทำนายวัสดุจำนวนมากที่เคลื่อนไหวในการผสมพลาสติกแบบต่าง ๆ และทำการตรวจสอบความเร็ว อัตราการไหลของมวล และพฤติกรรมของการเคลื่อนไหวของวัสดุพลาสติกสำหรับการหมุนในเครื่องผสมแบบโรตารี ตลอดจนแสดงค่าความต้านทานวัสดุพลาสติกในระหว่างกระบวนการผสมตามแนววนรอบของเครื่องผสมแบบโรตารี ในการศึกษาพบว่าชุดของโดเมนผสมถูกแยกออกโดยใช้ระบบกริดจำลองขนาดเซลล์เท่ากับ 2.5R ที่ใช้เป็นเป็นตัวอย่างสำหรับงานวิจัยนี้ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำมาตรวจสอบกับข้อมูลการทดลองจริงเพื่อให้มั่นใจในความถูกต้อง

คำสำคัญ

เครื่องผสมแบบโรตารี เทคนิคการวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง เม็ดวัสดุ

Abstract

Rotary mixer is used for mixing bulk materials in the direction of rotation about a horizontal axis, and found in agriculture and other industries related to mixing processes. Discrete Element Method (DEM) technique was employed to investigate the mixing of solid particles in a plastic mixer of rotary machine. The present technologies of DEM were applied for mathematical modeling process for analysis and design of rotary mixer. In order to achieve this goal, this study analyzed the efficiency of DEM technique and illustrated the particle model by using DEM for predicting the bulk materials moving in the plastic mixing. DEM technique was used for check-up process of velocity, mass flow rate and the behavior of plastics material movement for rotation in plastics mixer and plastics materials resistance during the operation along the horizontal length of the rotary mixer. It is found that the mixing domain was discretized using the simulation grid system

with the minimum cell size of 2.5R as the samples. The data from simulation were validated with the experimental data for ensuring the accuracy of the results.

Keywords

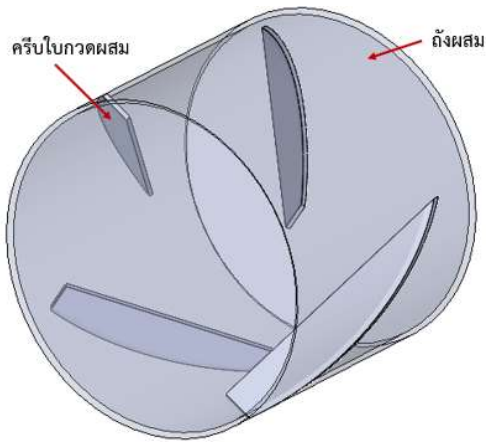
rotary mixer machine; discrete element method technique; granular materials

1. บทนำ

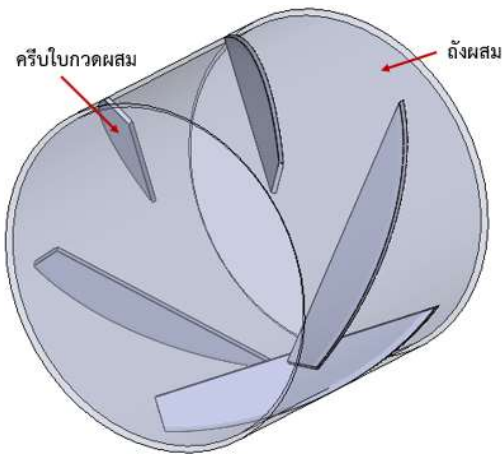
ในเม็ดวัสดุหรือกลุ่มของวัสดุที่เป็นเม็ดผงจำนวนมากถูกนำมาใช้กับอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ ที่หลากหลายภายในประเทศไทย และถูกนำมาผสมให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมตามสูตรที่ต้องการ อุตสาหกรรมประเภทนี้ที่พบมากคือ การผสมแม่ปฏิกเคมีในแต่ละสูตร การผสมเม็ดพลาสติกสำหรับการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานตามสูตรต่าง ๆ ที่ต้องการ เป็นต้น ในปัจจุบันงานที่เกี่ยวข้องกับชิ้นงานพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลากหลายรูปแบบ ทั้งที่อยู่ในรูปแบบอุตสาหกรรมครัวเรือน งานด้านอุตสาหกรรมยานยนต์หรืองานทางด้านคอมพิวเตอร์ทางด้านอุตสาหกรรมไฟฟ้า [1] จึงทำให้อุตสาหกรรมการฉีดขึ้นรูปพลาสติกมีจำเป็นต้องอาศัยการผสมเม็ดพลาสติกที่เหมาะสมกับชิ้นงานที่ทำการฉีดขึ้นรูปเนื่องจากจะส่งผลโดยตรงต่อชิ้นงานพลาสติกที่ทำการฉีดขึ้นรูปทั้งในเรื่องของสีที่สวยงาม ตลอดจนความมันวาวของชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูป เป็นต้น [2] ด้วยเหตุนี้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ต้องการสีที่สวยให้มีความสวยงามนั้น จำเป็นจะต้องทำการผสมสีลงไปกับวัตถุดิบที่เป็นวัสดุจำพวกเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากวัสดุจำพวกเทอร์โมพลาสติกจะไม่มีโครงสร้างแบบผลึกและเม็ดจะใสไม่มีสี [3] การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกในกลุ่มบริษัทใหญ่ที่มีต้นทุนในการบริหารจัดการในเรื่องวัตถุดิบที่มาก อาจจะซื้อเม็ดพลาสติกสำเร็จรูปที่พร้อมทำการฉีดขึ้นรูปได้เลยจากผู้ผลิตมาใช้งาน แต่ในธุรกิจหรือกลุ่มบริษัทขนาดเล็กที่ยังไม่มีต้นทุนที่มากเพียงพอ อาจจำเป็นต้องอาศัยการผสมเม็ดพลาสติกในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานใช้เองตามสูตรที่ต้องการ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตลง ดังนั้นการออกแบบเครื่องมือในการผสมเม็ดพลาสติกจึงมีความสำคัญกับกลุ่มธุรกิจขนาดเล็ก ในการออกแบบเครื่องมือเครื่องใช้สำหรับการผสมเม็ดพลาสติกในปัจจุบัน มีผู้ประกอบการหลากหลายบริษัทได้ทำการออกแบบและมาวางขายในท้องตลาดเป็นจำนวนมาก มีทั้งที่ราคาสูงไปจนถึงราคาขนาดกลาง และราคาขนาดต่ำที่ผู้ประกอบการหรือกลุ่มบริษัทขนาดเล็กสามารถเลือกซื้อใช้งานได้ตามต้องการ แต่

มักจะได้เครื่องมือที่ยังไม่เป็นไปตามความต้องการ เนื่องจากไม่สามารถทำการผสมสูตรของเม็ดพลาสติกสำหรับการฉีดได้ตรงตามความต้องการของบริษัท ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับภาคอุตสาหกรรม SME ที่มีขนาดเล็กในแต่ละภูมิภาคของประเทศ ได้ทำการวิจัยและประดิษฐ์คิดค้นเครื่องมือผสมที่ราคาถูกแต่สามารถทำงานได้ตรงตามความต้องการใช้ของตนเอง การวิจัยและการออกแบบเพื่อประดิษฐ์คิดค้นเครื่องผสม ได้ผ่านกระบวนการมากมาย ทั้งในส่วนของ การลองผิดลองถูก การสุ่ม ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากในการคิดค้นจนกว่าจะได้เครื่องมือที่เหมาะสมเป็นไปตามสถานประกอบการต้องการ

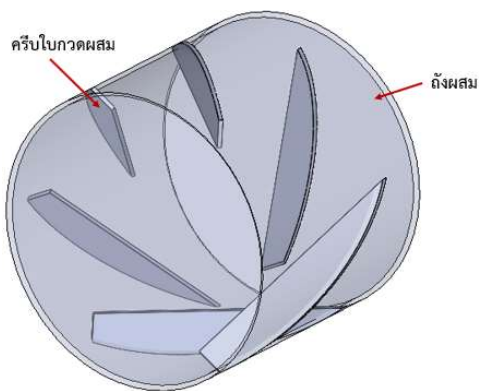
ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแนวทางเพื่อแสดงวิธีการของเทคโนโลยีทางการจำลองผลและการตรวจสอบของอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method (DEM)) มาใช้สำหรับการออกแบบและจำลองขั้นตอนการผสมของเครื่องผสมเม็ดพลาสติกแบบโรตารีซึ่งเป็นการผสมแบบหมุนในทิศทางแกน Z การนำ DEM มาใช้เนื่องจากวัตถุประสงค์คือ เพื่อลดการลองผิดลองถูกในกระบวนการออกแบบและทดสอบจริง ซึ่งเป็นผลต่อค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการทดสอบแต่ละครั้ง โดยระเบียบวิธีการทาง DEM เป็นเทคโนโลยีสำหรับการจำลองเชิงตัวเลขขั้นสูงทางวิศวกรรมเครื่องกลและระบบขนถ่ายวัสดุ เพื่อใช้สำหรับการออกแบบการทำงานของเครื่องจักรผสมอนุภาคเม็ดหรือวัสดุผงแบบต่าง ๆ โดยเข้ามาช่วยในด้านการจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละลักษณะและพฤติกรรมของพวกวัสดุที่เป็นเม็ดหรือกลุ่มวัสดุแบบผง [4] เป็นต้น ขั้นตอนในการวิจัย เริ่มต้นโดยนำเทคโนโลยีและเทคนิคการวิเคราะห์ DEM มาทำการจำลองคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดพลาสติก สำหรับงานตัวอย่างที่ใช้กับเครื่องผสมแบบโรตารีที่ได้ออกแบบให้มีการติดคียบที่ถึงผสม ตั้งแต่ 4-6 คียบ ดังรูปที่ 1



(ก) แบบติดตั้งครีบบวกวดผสมแบบ 4 ใบพัด



(ข) แบบติดตั้งครีบบวกวดผสมแบบ 5 ใบพัด



(ค) แบบติดตั้งครีบบวกวดผสมแบบ 6 ใบพัด

รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองถังผสมเม็ดพลาสติกแบบโรตารีที่ติดตั้งด้วยครีบบวกวดผสม

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างการทำงานของถังผสมขนาดเล็กแบบแกนนอนจำลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 350 มิลลิเมตร และมีความยาว 310 มิลลิเมตร ที่ถูกกำหนดให้มีรูปแบบการหมุนในทิศทางแกน Z และได้ถูกออกแบบให้ภายในถังผสมเม็ดพลาสติกมีการติดตั้งครีบบวกวดผสมที่มีจำนวนที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมเม็ดพลาสติกให้สามารถเคลื่อนตัวเข้ามาผสมกันได้เร็วมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการศึกษารูปแบบของการเคลื่อนตัวของเม็ดพลาสติกที่มีขนาดที่แตกต่างกันจำนวน 3 ชนิดมาทำการผสมกัน เพื่อศึกษาเรื่องของเวลาในการผสม ความเร็วเฉลี่ย และรูปแบบของแรงแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสม

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย DEM สามารถเข้ามาช่วยในการจำลองผลเชิงตัวเลขและอธิบายพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้อย่างชัดเจน โดยสามารถช่วยในการคำนวณค่าของแรงที่สัมผัสเชิงกลระหว่างอนุภาคของวัสดุที่เป็นเม็ด [4] ตลอดจนรูปแบบของการหมุนของอนุภาคแบบต่าง ๆ ของวัสดุ แรงกระทำ ตลอดจนค่าความเร็วที่เกิดขึ้นในระบบการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค รวมไปถึงรูปแบบของการชนกันระหว่างอนุภาคและอนุภาค และระหว่างอนุภาคกับผนังชิ้นงานของถังผสม รูปแบบการหมุนและการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุได้ทำการพิจารณาการวิเคราะห์ในรูปแบบของช่วงเวลาต่าง ๆ ซึ่งอธิบายด้วยกฎข้อที่สองของนิวตัน [4,5] การสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของวัสดุกับอนุภาคของวัสดุที่ชนกัน และการพิจารณาอนุภาคของวัสดุที่ชนกับผนังของเครื่องผสมในงานวิจัยนี้จะขึ้นอยู่กับแบบจำลองของ Spring-dashpot Model และ Hertz-Mindlin no-slip Model [4,6]

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (F_{ij}^n + F_{ij}^s) + m_i g \quad (1)$$

และ

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (R_i \times F_{ij}^s F_{ij}^s - \mu_r R_i |F_{ij}^n| \hat{\omega}_i) \quad (2)$$

เมื่อค่าตัวแปรของสมการ m_i, I_i, v_i และ ω_i คือ มวล, แรงเฉื่อย, ค่าความเร็วเชิงเส้นและค่าความเร็วในการหมุนของอนุภาค i ที่ทำการวิเคราะห์ตามลำดับ ส่วนค่า F_{ij}^n และ F_{ij}^s คือแรงสัมผัสตั้งฉาก (Normal Contact Force) และแรงสัมผัสแบบเฉือน (Tangential Contact Force) กระทำโดยอนุภาค i บนอนุภาค j และ $m_i g$ คือแรงโน้มถ่วงของอนุภาค i ส่วนค่าของ k_i แทนจำนวนของอนุภาคที่มีการสัมผัสกัน และค่า R_i คือ ขนาดของเวกเตอร์จากจุดศูนย์กลางของอนุภาคถึงผิวที่มีการสัมผัสกันระหว่างอนุภาค [4] และค่า μ_r คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกลิ้งของอนุภาค (Rolling friction) และค่า ω_i คือ หน่วยของเวกเตอร์ที่มีค่าเท่ากับ ω_i หารด้วยขนาดของแรงตั้งฉากของผิวสัมผัส (Normal force) ระหว่างอนุภาคของวัสดุ [4,5,6]

$$F_n = -k_n \Delta x + C_n v_n \quad (3)$$

การคำนวณค่าขนาดของแรงในแนวสัมผัสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 [4, 5]

$$F_t = \min \left[\mu F_n, k_t \int v_t dt + C_t v_t \right] \quad (4)$$

เมื่อตัวแปรของ k_n และ k_t คือค่าแสดงผลของ Normal stiffness และค่า Tangential stiffness และค่า Δ_x คือการแสดงผลพฤติกรรมในส่วนของการซ้อนทับกัน (Overlap) ของอนุภาควัสดุในการวิเคราะห์ ส่วนของค่าตัวแปรความเร็ว v_n และ v_t ในสมการ จะใช้แสดงในส่วนของการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับผิวสัมผัส และขนานกับผิวสัมผัส [4, 5]

ส่วนของค่าตัวแปรความเร็ว C_n และ C_t ในสมการ จะเป็นค่าคงที่ ที่ใช้สำหรับการหวนในทิศตั้งฉากกับผิวสัมผัส และค่าความหวนในแนวขนานกับผิวสัมผัส โดยค่า C_n จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of restitution, e) [4] โดยค่า C_n สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$C_n = -2 \ln(e) \frac{\sqrt{m_{ij} k_n}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(e)}} \quad (5)$$

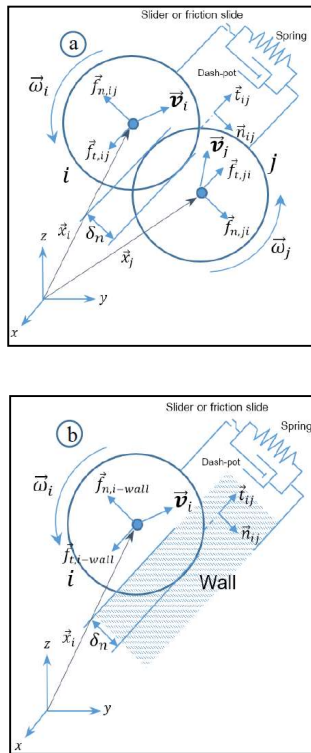
$$\text{โดยที่} \quad m_i = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \quad (6)$$

เมื่อ m_{ij} คือ ค่าของมวลทั้งสองอนุภาคที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นค่า i และ j

การพิจารณารูปทรงของอนุภาคที่มีรูปทรงกลม (Soft sphere model) ในลักษณะของการชนกันของชุดอนุภาค 2 ชุด ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่อาศัยหลักการโดยการตั้งสมมุติฐานของการชนที่มีลักษณะการเหลื่อมกันของอนุภาค (δ) เมื่อทำการพิจารณารูปแบบของตัวแปรแสดงผลของการเคลื่อนที่ ตลอดจนถูกนำมาทำการแทนค่าของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการชน ดังรูปที่ 2 เมื่อทำการพิจารณาแรงที่ปรากฏขึ้นพบว่า หลังจากมีการชนกันของอนุภาคจะเป็นลักษณะของแรงแบบยืดหยุ่นเกิดขึ้น (Elastic contact force model) [7] จากรูปที่ 2 เราสามารถพิจารณาและทำการอธิบายได้ว่า องค์ประกอบของการชนนั้นสามารถแบ่งรูปแบบได้สองลักษณะ กล่าวคือ รูปแบบที่แสดงด้วยลักษณะการชนของอนุภาคระหว่างอนุภาค และรูปแบบของลักษณะการชนของอนุภาคกับผิวผนังโครงสร้าง เช่นผนังภาชนะ ผนังถังกวนผสม เป็นต้น นอกจากนี้ รูปแบบของการชนของอนุภาคยังสามารถทำการพิจารณาการเหลื่อมกันของรูปแบบการชนที่ส่งผลทำให้เกิดแรงแบบสัมผัสที่เกิดขึ้น ในลักษณะของการเชื่อมกันของแรงหรือที่เรียกว่า Contact force ซึ่งรูปแบบของการคำนวณค่าตัวแปรของแรงแบบสัมผัส และแรงที่เกิดจากรูปแบบของการเชื่อมกัน สามารถคำนวณได้จากการจำลองกระบวนการเคลื่อนที่ระหว่างอนุภาคและอนุภาค

จากปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ส่งผลทำให้อนุภาคเกิดการสูญเสียรูปแบบของพลังงานเกิดขึ้นในระบบ โดยหลักการแล้ว จะทำการพิจารณาองค์ประกอบของระบบจากตัวแปรในรูปแบบสมการสปริง ตัวหวน และตัวสไลเดอร์ [7] จากปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่าง ๆ จะใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันในการอธิบายพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ ส่วนแรงที่เกิดจากการสัมผัสกันของอนุภาคจะใช้กฎ

ของสุคมาเป็นทฤษฎีในการอธิบายพฤติกรรมของแรงสัมผัสระหว่างอนุภาคและผนัง รูปแบบพฤติกรรมการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เราสามารถทำแสดงปรากฏการณ์เพิ่มเติมต่าง ๆ ได้จากแบบจำลองของ Hertz-Mindlin ดังตารางที่ 1 [7]



รูปที่ 2 พฤติกรรมของรูปแบบการชนของอนุภาค [7]

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงรูปแบบของค่าตัวแปรเชิงพฤติกรรมในระบบสมการที่แสดงในตารางที่ 1 โดยจะประกอบไปด้วยตัวแปรที่สำคัญที่นำมาใช้ในการอธิบายการชนกันของกลุ่มอนุภาค คือ $Y^{eq}, R^{eq}, m^{eq}, \delta, k_n, S_t, \mu_s$ และ μ_r ซึ่งค่าตัวแปรที่ได้กล่าวถึงจะประกอบไปด้วย Equivalent young's modulus, Equivalent radius, Equivalent mass, Particle overlap, Normal spring stiffness, Tangential spring stiffness, Coefficient of sliding friction และ Coefficient of rolling friction ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าตัวแปรของ β คือ Damping factor ซึ่งค่า β เป็นค่าของฟังก์ชันในส่วนของการสมการ Restitution coefficient (e) โดยค่าตัวแปร e สามารถหาค่าได้จากการทดลอง ข้อมูลในตารางที่ 1 สามารถค้นหาได้จาก [7]

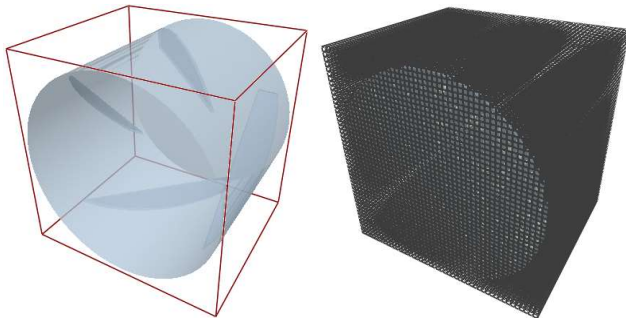
ตารางที่ 1 แสดงรูปแบบพฤติกรรมของสมการในแบบจำลองของ Hertz-Mindlin [5,7]

ตัวแปร	สมการพฤติกรรม
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	$F_n^d = -2\beta \sqrt{\frac{5}{4} k_n m^{eq} \delta_n^{1/4} V_n^{rel}}$ และ $\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$
Tangential Force	$F_t = \begin{cases} F_t^s + F_t^d, & \text{if } F_t \leq \mu_s F_n \\ -\mu_s F_n, & \text{if } F_t > \mu_s F_n \end{cases}$
Tangential Spring Force	$F_t^s = -S_t \delta_t, S_t = 8G^{eq} \sqrt{R^{eq} \delta_n}$
Tangential Damping Force	$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^{eq}} V_t^{rel}, \text{ by } \beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$
Rolling Friction Force	$T_r = -\mu_r F_n R_i \omega_i$

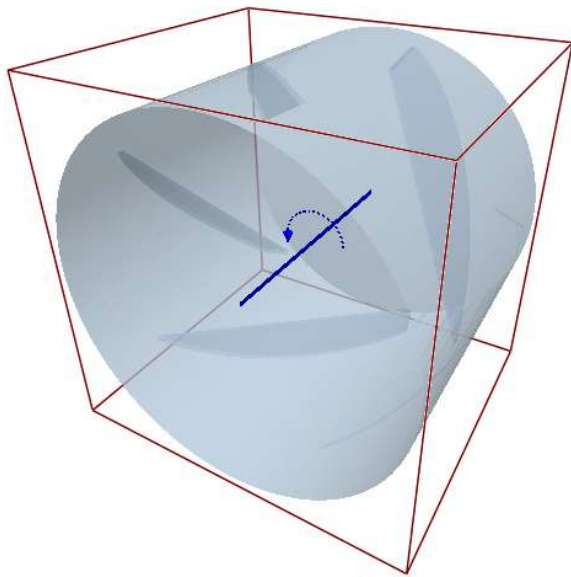
3. ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

3.1 เงื่อนไขการจำลอง

ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบเพื่อคำนวณหาขนาด Grid size ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ [8] จากการคำนวณหาขนาด Grid size (Cell size) ที่เหมาะสมพบว่า ที่ขนาดเท่ากับ 2.5R ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการประมาณและเหมาะสมกับแบบจำลองที่จะทำการวิเคราะห์ในงานวิจัย โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป DEM ซึ่งจำนวน Grid ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 99,072 ดังแสดงในรูปที่ 3 และกำหนดรอบการหมุนในการผสมคอกที่ 1 รอบการหมุน 25 รอบต่อนาที ด้วยการกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบ Linear Kinematic ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 แสดงผลในรูปแบบของ Simulator Grid



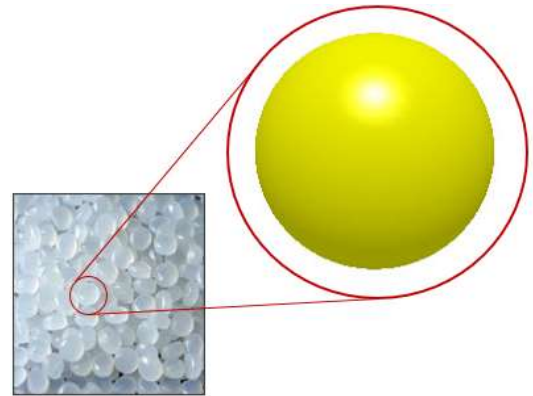
รูปที่ 4 แสดงการกำหนด Linear Kinematic

ทำการกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของอนุภาคตามข้อมูลของวัสดุพลาสติกที่ต้องการจำลองผลเชิงตัวเลข โดยงานวิจัยนี้จะเลือกใช้เม็ดพลาสติกเป็นแบบชนิด Polyethylene ที่มีขนาดรูปทรงแบบ Single Sphere เท่ากับ 3 มิลลิเมตร 3.5 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร โดยสมมุติรูปทรงเม็ดพลาสติกชนิด Polyethylene (PE) สำหรับการจำลองผลแสดงได้ดังรูปที่ 5

ในงานวิจัยนี้รูปแบบของการวิเคราะห์จะเป็นแบบช่วงเวลา (Step time) โดยจะกำหนดค่าที่สำคัญดังนี้

- Time integration กำหนดเป็น Euler
- Fixed time step กำหนดค่าเท่ากับ 20%
- Total time สำหรับการวิเคราะห์ 10 s
- Target save interval เท่ากับ 0.01

นอกจากนี้ยังทำการคำนวณหาขนาด Grid ที่เหมาะสมสำหรับการจำลองผลการผสม โดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นในส่วน of Smallest Radius (R_{min}): เท่ากับ 3 mm เพื่อทำการ Estimate Cell Size จนได้ค่าที่เหมาะสมกับแบบจำลองคือค่า $2.5R_{min}$



รูปที่ 5 รูปทรง Single Sphere ของเม็ดพลาสติก

3.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุสำหรับการวิเคราะห์

สำหรับค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการจำลองผลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ DEM สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเม็ดพลาสติกชนิด Polyethylene (PE) โดยทำการคำนึงถึงค่าของ Interaction ของวัสดุในแต่ละอนุภาคที่เกิดความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ตลอดจนค่าของ Interaction ระหว่างอนุภาคของเม็ดพลาสติกกับชุดของผนังของถังกวนผสมที่ทำจากเหล็กสแตนเลส (Stainless Steel) ดังนั้นค่าคุณสมบัติเชิงกลของเม็ดพลาสติกและเหล็กสำหรับการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของขนาดการกระจายตัวของอนุภาค

Property	(PE) Pellets	Stainless Steel
Particle size Distribution 3 mm	100%	-
Particle size Distribution 3.5 mm	95%	-
Particle size Distribution 4 mm	90%	-

ตารางที่ 3 คุณสมบัติเชิงกลของเม็ดพลาสติกและเหล็ก [9]

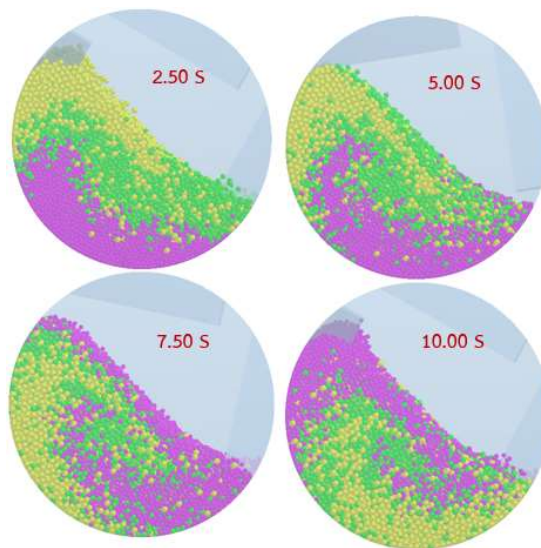
Property	(PE) Pellets	Stainless Steel
Particle density (kg/m^3) (ρ)	908	8,000
Poisson's ratio (ν)	0.45	0.29
Shear Modulus (pa), (G)	1.17×10^8	7.75×10^{10}
Particle coefficient of restitution, (e)	0.654	0.65
Particle coefficient of static friction, (μ_s)	0.2	0.3
Particle coefficient of rolling friction, (μ_r)	0.1	0.1

4. ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

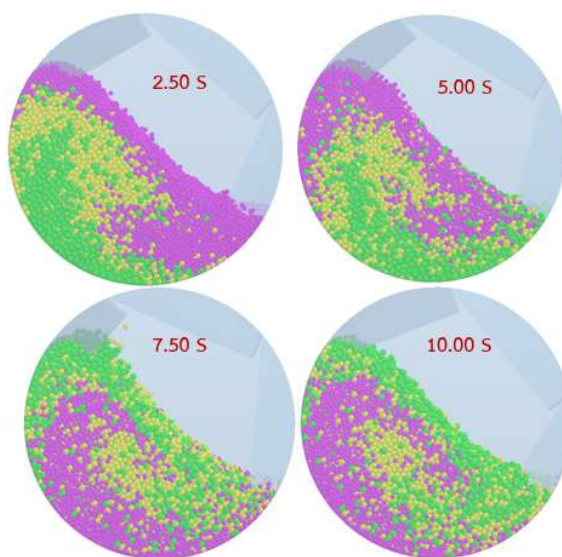
จากการทดสอบจริงในการกวนผสมเม็ดพลาสติกทั้งหมด 3 ชนิด โดยใช้เวลาในการทดสอบผลลัพธ์ที่ 10 วินาที ที่รอบการหมุนครั้งที่ 25 รอบต่อนาที พบว่าจำนวน 6 ใบพัด สามารถสร้างอัตราการผสมได้ดีที่สุดที่เวลา 7.15 วินาที ส่วน 5 และ 4 ใบพัดสามารถสร้างอัตราการผสมได้ดีที่สุดที่เวลา 7.41 และ 8.02 วินาที ตามลำดับ

ส่วนการจำลองผลเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีการวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการกวนผสมอนุภาคเม็ดพลาสติกที่มีขนาดที่แตกต่างกัน คือ ขนาด 3, 3.5 และ 4 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบการหมุนของถังกวนผสม 25 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นค่าความเร็วรอบคงที่ ภายในถังกวนผสมที่มีการติดตั้งครีบบใบพัดแบบ 4, 5 และ 6 ใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 1 การจำลองการกวนผสมในงานวิจัยได้ทำการศึกษากการกวนผสมที่เวลา 0-10 วินาที ผลจากการจำลองเชิงตัวเลขของการกวนผสมเม็ดพลาสติกพบว่า ที่การติดตั้งชุดครีบบใบพัดกวนผสมที่ 6 ใบพัด สามารถให้ผลการกวนผสมเม็ดพลาสติกได้ดีที่สุดที่เวลา 7.65 วินาที ที่สามารถทำให้เม็ดพลาสติกทั้งสามขนาดเคลื่อนที่เข้าหากันได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนแบบ 4 ใบพัดสามารถกวนผสมเม็ดพลาสติกเข้ากันได้ที่เวลา 8.25 วินาที และแบบ 5 ใบพัดสามารถกวนผสมเม็ดพลาสติกเข้ากันได้ที่เวลา 7.95 วินาที ซึ่งผลการจำลองเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีการวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) ที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถแสดงผลในรูปแบบ Uniform ของการกวนผสมเม็ดพลาสติกด้วยถังผสมที่ติดตั้ง

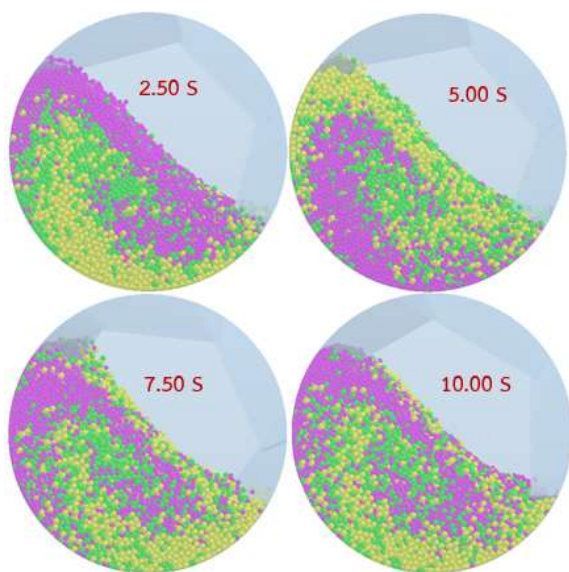
ครีบบใบพัดกวนผสมแบบ 4, 5 และ 6 ใบพัด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 ถึง 8



รูปที่ 6 กวนผสมเม็ดพลาสติกในถังกวนที่ติดตั้งครีบบใบพัด 4 ใบพัด ที่เวลา 0-10 วินาที



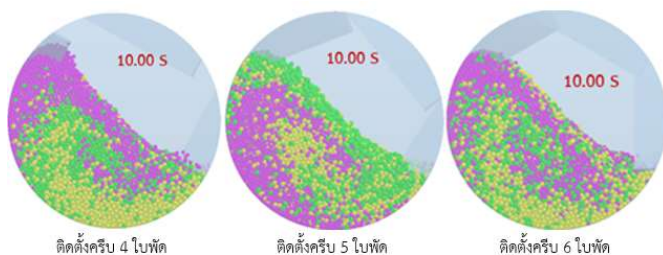
รูปที่ 7 กวนผสมเม็ดพลาสติกในถังกวนที่ติดตั้งครีบบใบพัด 5 ใบพัด ที่เวลา 0-10 วินาที



รูปที่ 8 กวนผสมเม็ดพลาสติกในถังกวนที่ติดตั้งครีบบพัด 6 ใบพัด ที่เวลา 0-10 วินาที

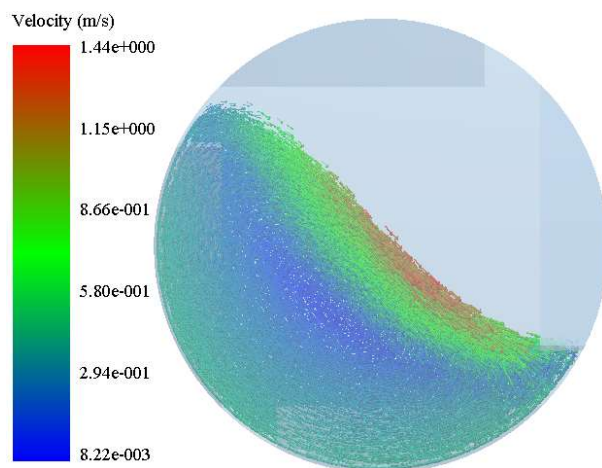
จากรูปที่ 6 ถึง 8 เป็นการแสดงรูปแบบ Uniform การกวนผสมเม็ดพลาสติกในช่วงเวลาการกวนผสมต่าง ๆ ที่เวลา 0-10 วินาที ผลจากการจำลองเชิงตัวเลขที่เกิดขึ้นเมื่อนำผลมาทำการเปรียบเทียบกับทดสอบจริงพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อน คือ 2.78, 6.79 และ 6.54 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการติดตั้งครีบบพัด 4, 5 และ 6 ใบพัด ตามลำดับ

จากรูปที่ 6-8 สามารถอธิบายเพิ่มเติมในส่วนของการกวนผสมเม็ดพลาสติกทั้ง 3 ขนาด คือ 3 มิลลิเมตร 3.5 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร โดยทำการเปรียบเทียบที่เวลา 10 วินาที ดังรูปที่ 9 พบว่า ที่แบบจำลอง ติดตั้งครีบบพัด 6 ใบพัด สามารถกวนผสมให้เม็ดพลาสติกทั้ง 3 ขนาด วิ่งเข้ามาผสมกันได้ดีที่สุด โดยสามารถสังเกตที่เม็ดพลาสติกที่แสดงอยู่ในรูปสีม่วง

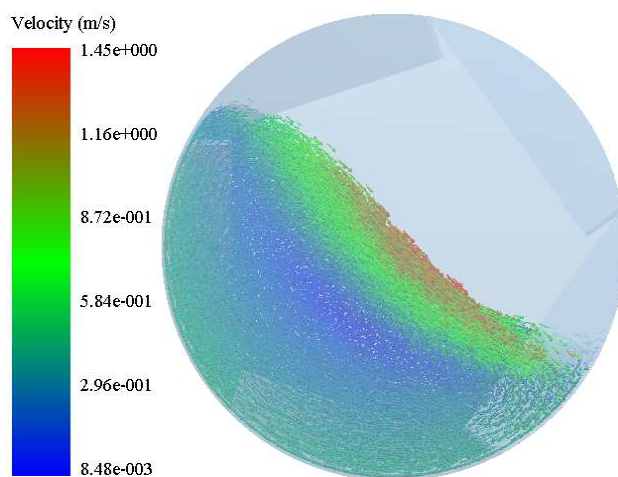


รูปที่ 9 กวนผสมเม็ดพลาสติกในถังกวนที่ติดตั้งครีบบพัด 6 ใบพัด ที่เวลา 0-10 วินาที

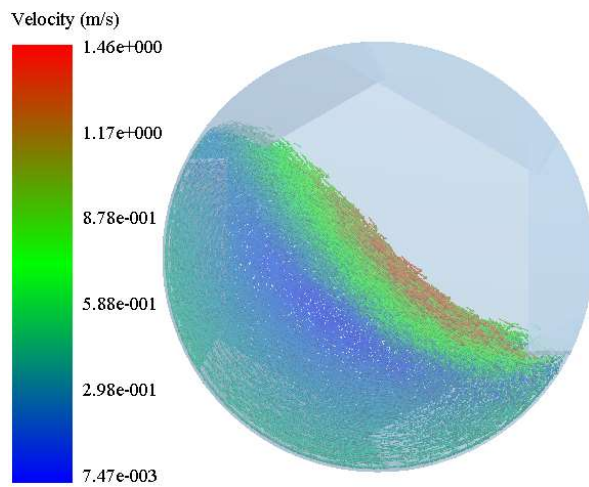
ส่วนการจำลองเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีการวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) สามารถแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของเวกเตอร์ความเร็วการกวนผสมของแบบจำลองถึงกวนผสมแบบต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 10 ถึง 12



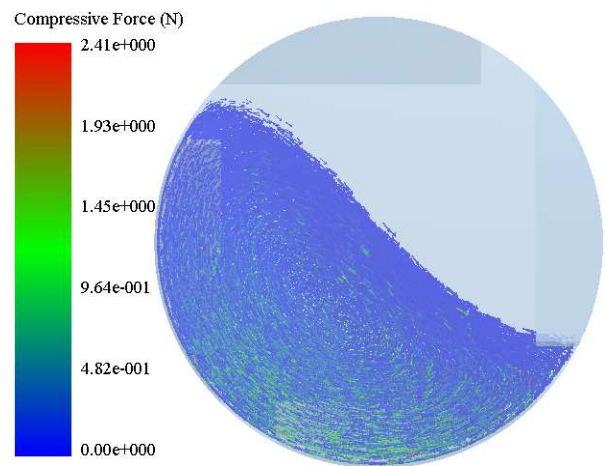
รูปที่ 10 เวกเตอร์การกวนผสมเม็ดพลาสติกในถังกวนที่ติดตั้งครีบบพัด 4 ใบ ที่เวลา 10 วินาที



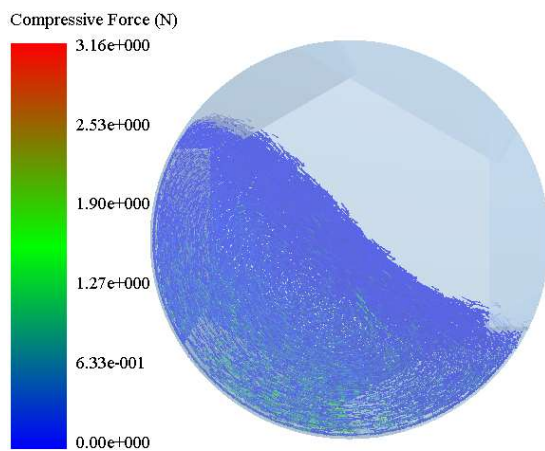
รูปที่ 11 เวกเตอร์การกวนผสมเม็ดพลาสติกในถังกวนที่ติดตั้งครีบบพัด 5 ใบ ที่เวลา 10 วินาที



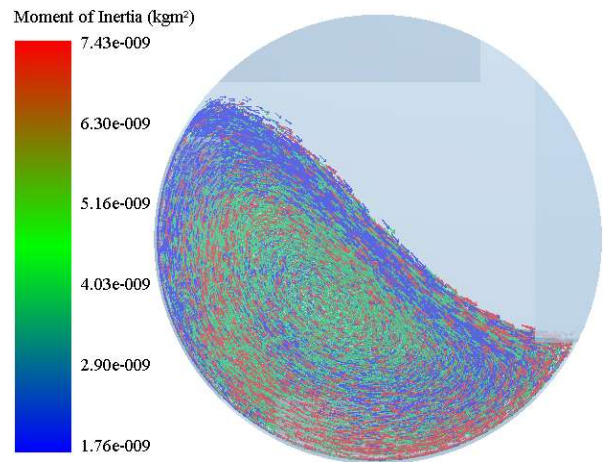
รูปที่ 12 เวกเตอร์การกวนผสมเม็ดพลาสติกในถังกวนที่ติดตั้งครบใบพัด 6 ใบ ที่เวลา 10 วินาที



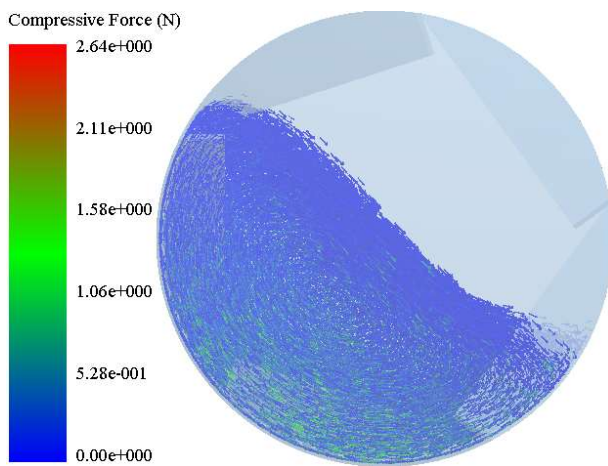
รูปที่ 15 แรงอัดในการกวนผสมเม็ดพลาสติกในถังกวนที่ติดตั้งครบใบพัด 6 ใบ ที่เวลา 10 วินาที



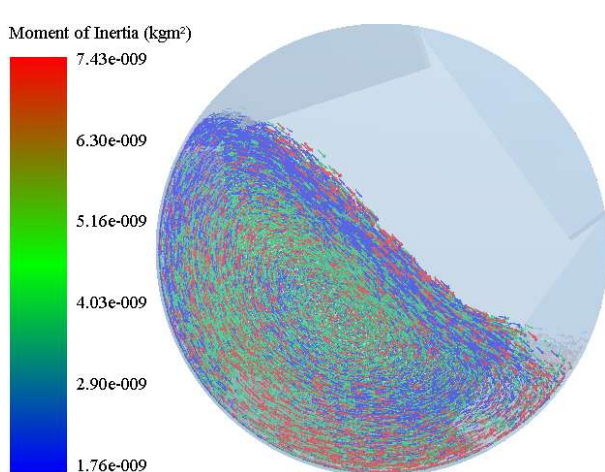
รูปที่ 13 แรงอัดในการกวนผสมเม็ดพลาสติกในถังกวนที่ติดตั้งครบใบพัด 4 ใบ ที่เวลา 10 วินาที



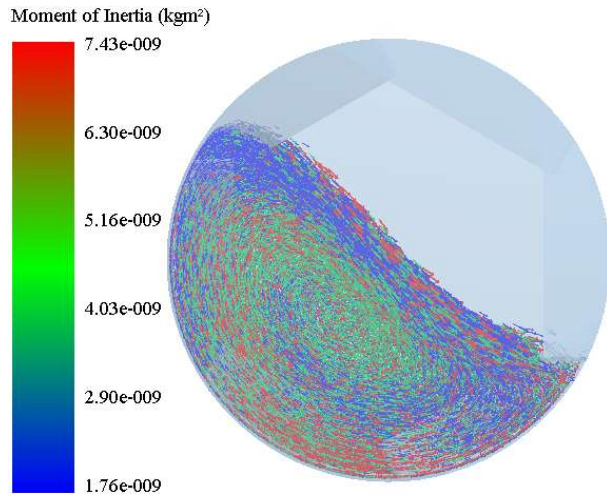
รูปที่ 16 โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงกลในการกวนผสมเม็ดพลาสติกในถังกวนที่ติดตั้งครบใบพัด 4 ใบ ที่เวลา 10 วินาที



รูปที่ 14 แรงอัดในการกวนผสมเม็ดพลาสติกในถังกวนที่ติดตั้งครบใบพัด 5 ใบ ที่เวลา 10 วินาที



รูปที่ 17 โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงกลในการกวนผสมเม็ดพลาสติกในถังกวนที่ติดตั้งครบใบพัด 5 ใบ ที่เวลา 10 วินาที

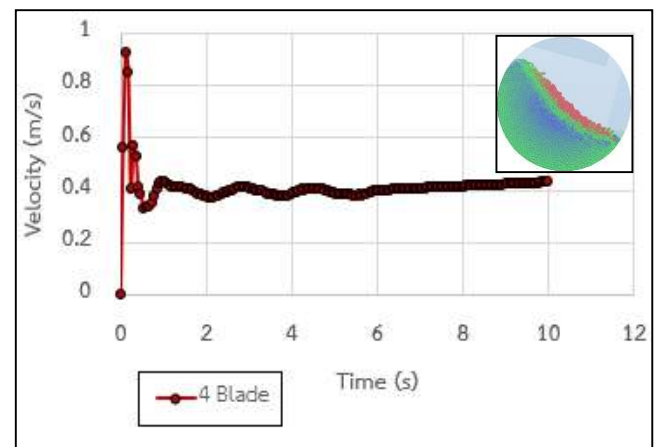


รูปที่ 18 โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงกลในการกวนผสมเม็ดพลาสติกในถังกวนที่ติดตั้งครีบบพัด 6 ใบ ที่เวลา 10 วินาที

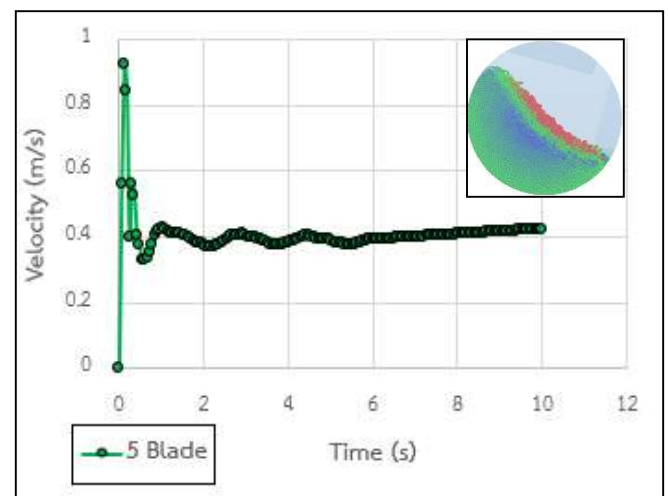
จากรูปที่ 13-15 จะแสดงลักษณะของมวลของวัสดุผสมทั้ง 3 ขนาด ที่ถูกปล่อยลงสู่ถังผสมสำหรับแบบจำลองที่ทำการทดสอบ โดยการทำการกวนผสม ค่ามวลน้ำหนักที่เกิดขึ้นในระบบหลังจากถูกปล่อยวัตถุดิบลงถังผสมแล้ว และจะถูกถ่ายเทและทำให้เกิดการเคลื่อนที่ระหว่างอนุภาคที่มีมวลแตกต่างกัน และถูกส่งให้เกิดการเคลื่อนที่โดยการหมุนของถังผสม จึงส่งผลทำให้เกิดแรงในการเคลื่อนที่และแรงอัดที่เกิดจากน้ำหนักของวัสดุทั้ง 3 ขนาด ในระบบการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยเทคนิคของ DEM

ผลจากการจำลองเชิงตัวเลขพบว่า ค่าความเร็วที่ได้จากครีบบพัดกวนผสม 6 ใบพัด สามารถสร้างค่าความเร็วที่ส่งถ่ายความเร็วไปยังเม็ดพลาสติกให้เกิดการเคลื่อนที่ได้มากที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองถังกวนผสมที่ติดตั้งครีบบพัดกวนผสมแบบ 4 และ 5 ใบพัด ซึ่งค่าความเร็วที่เกิดขึ้นในถังผสมได้ส่งผลโดยตรงที่ทำให้เกิดการกวนผสมเม็ดพลาสติกของถังผสมที่ติดตั้งครีบบพัด 6 ใบพัด ใช้เวลาในการผสมที่น้อยกว่าแบบจำลองอื่น เมื่อทำการพิจารณาแรงในการบีบกดทับของเม็ดพลาสติกภายในถังผสมดังรูปที่ 13 ถึง 15 พบว่าแบบจำลองถังผสมที่มีการติดตั้งครีบบพัดกวนผสมแบบ 6 ใบพัด เกิดแรงในการบีบอัดที่กั้นถังผสมในขณะที่มีการกวนผสมน้อยกว่าแบบจำลองอื่น เนื่องจากผลของจำนวนครีบบพัด

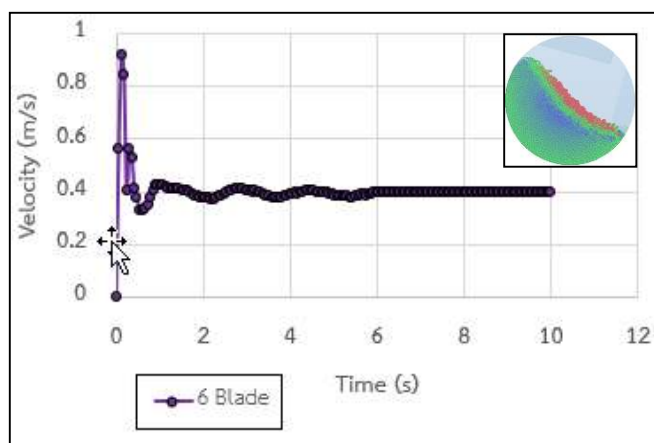
กวนผสมที่มีหลายใบพัด ได้ช่วยในการเพิ่มอัตราการผสมได้ดี จึงทำให้เกิดการถ่ายเทแรงที่เกิดจากการสัมผัสและตกระทบของวัสดุ ตลอดจนค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของเม็ดพลาสติกในการผสม และลดอัตราการสูญเสียที่เกิดจากการกดทับได้ดี เมื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น หลังจากนั้นทำการพิจารณาในส่วนของการจำลองผลเชิงตัวเลขของแรงเฉื่อยเชิงกลในขั้นตอนการผสมเม็ดพลาสติกในแบบจำลองต่าง ๆ พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 16 ถึง 18 ส่วนรูปที่ 19 ถึง 21 เป็นการแสดงกราฟความสัมพันธ์ของช่วงเวลาและค่าความเร็วเฉลี่ยภายในถังผสมเม็ดพลาสติก



รูปที่ 19 กราฟแสดงความเร็วของถังกวนผสมที่ติดตั้งครีบบพัด 4 ใบพัด ที่เวลา 10 วินาที



รูปที่ 20 กราฟแสดงความเร็วของถังกวนผสมที่ติดตั้งครีบบพัด 5 ใบพัด ที่เวลา 10 วินาที



รูปที่ 21 กราฟแสดงความเร็วของถังกวนผสมที่ติดตั้งครีบบพัด 6 ใบพัด ที่เวลา 10 วินาที

6. สรุปผลงานวิจัย

ระเบียบวิธีการวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังแพร่หลายในวงการวิชาการ และภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เพราะสามารถช่วยในเรื่องของการทำนายรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่าง ๆ ตลอดจนช่วยทำการออกแบบเครื่องมือต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผสมได้ดี ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำเทคโนโลยีดังกล่าว เข้ามาช่วยในเรื่องของการออกแบบการกวนผสมสำหรับเม็ดพลาสติกในอุตสาหกรรมพลาสติก ที่กำลังนำเข้ามาในอุตสาหกรรม SME ในแถบจังหวัดพิษณุโลก เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการผสมและทำการเปรียบเทียบความเหมาะสมในการเลือกใช้งานของถังผสมที่ทำการติดตั้งครีบบพัดกวนผสมแบบ 4, 5 และ 6 ใบพัด และทำการเปรียบเทียบผลกับการทดสอบจริง ผลจากการศึกษาพบว่า จำนวนครีบบพัดที่ได้ติดตั้ง 6 ใบพัด สามารถสร้างอัตราการผสมได้ดีกว่าแบบจำลองอื่นเมื่อนำมาทำการพิจารณาเทียบกับเวลาในการจำลองผลที่ 10 วินาที ดังนั้นจากผลการศึกษาทำให้ทราบว่าจำนวนครีบบพัดที่มากขึ้นจะช่วยในเรื่องประสิทธิภาพในการผสมได้ดีขึ้น และเมื่อนำผลการจำลองเชิงตัวเลขด้วยเทคนิค DEM มาทำการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของการทดสอบจริงพบว่า ที่การติดตั้งครีบบพัด 4, 5 และ 6 ใบพัดนั้น จะส่งผลทำให้เกิดผลของค่าความคลาดเคลื่อน อยู่ที่ 2.78, 6.79 และ 6.54 ตามลำดับ ผลจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น สามารถยอมรับได้ในทางวิศวกรรม เนื่องจากเกิดความคลาดเคลื่อนไม่สูงมากนัก ผลที่ได้จึง

สามารถนำไปปรับใช้ในการพัฒนาต้นแบบจริงได้ต่อไป จากงานวิจัยนี้สามารถที่จะนำเทคนิคของระเบียบวิธีการวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่องไปทำการออกแบบถังกวนผสมในการใช้งานในด้านอื่น หรืออาจจะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับงานด้านอื่น ๆ ได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินการวิจัยขอขอบพระคุณ บุคลากร เจ้าหน้าที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานในครั้งนี้ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาในเรื่องการดำเนินการวิจัยและจัดทำเอกสารเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Werayoot L. The design of plastics injection mold using finite element analysis. *Naresuan University Engineering Journal*, 2016; 11(1):101-109.
- [2] Michaeli W, Menges G, Mohren P. *How to Make Injection Molds*. Valley Avenue, Cincinnati, USA: Hanser Gardner Publications Inc; 2001. pp.105-107.
- [3] Wirojt T. *Study and Development of Static Mixer for Granulated Plastics and Masterbatch*. เข้าถึงได้จาก: <http://www.thai.cience.info/journals/Article/TJKM/10469996.pdf>.
- [4] Sathaphon W, Supachai T, Pornchai C. Investigation of agriculture seed flow in screw conveyors using discrete element method. *Journal of Science Technology Mahasarakham*, 2019; 38(5):539-546.
- [5] Preeda P. CFD-DEM simulation of the GAS-SOLID flow dynamics in a continous fluidized bed. *Engineering Journal of Research and Development*, 2019; 30(3): 73-89.
- [6] Sathaporn W, David BH, Peter WW. Numerical simulation of bulk materials in dustiness testers using DEM. *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, 2017; 5(1): 4-19.
- [7] Mindlin RD, Deresiewicz H. Elastic spheres in

contact under varying oblique forces. *Trans, ASME. Series E Journal Applied Mechanics*, 1953; 20: 327-344.

- [8] Preeda P, Sathaporn W. Simulation of fluidized bed characteristics using DEM- CFD coupling. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 2019; 26(2):227-237.
- [9] Sathaporn W, David BH, Peter WW. Particle size segregation of bulk material in dustiness testers via DEM simulation. *Particle Science and technology*, 2016; 36(1).