

การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในเครื่องผสมคอนกรีตแบบแพลเนตารีโดยใช้วิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง

Parameters Optimization in the Planetary Concrete Mixers using Discrete Element Method

ปริดา ปรากฏงาม* และ รัชมา โพธิ์ทอง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม
*E-mail address: fengpdpr@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบการหมุนของระบบเกียร์ในเครื่องผสมแบบแพลเนตารีอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผสม บทความนี้ใช้การออกแบบแฟกทอเรียล 3 ระดับเพื่อทดลองกับพารามิเตอร์การผสมคอนกรีตด้วยเครื่องผสมแบบแพลเนตารีด้วยการจำลองความเร็วรอบการหมุนของแขนกวาดและความเร็วรอบการหมุนแบบโคจรที่แตกต่างกัน 9 รูปแบบ โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method, RSM) มาทำนายความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการผสมและความเร็วในการหมุนเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของความเร็วรอบการหมุนค่าต่างๆ ที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ดัชนีการผสมสูงสุด บทความนี้เลือกซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์ส LIGGGHTS®-PUBLIC ในการจำลองกระบวนการผสมวัสดุและวิเคราะห์ดัชนีการผสม โดยใช้แบบจำลอง Hertz-Mindlin และ Johnson-Kendall-Robert (JKR) ควบคุมการสัมผัสระหว่างส่วนผสมคอนกรีตด้วยวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method, DEM) จากผลการจำลองพบว่าความเร็วในการหมุนที่เหมาะสมของแขนกวาดมีค่าเท่ากับ 15 รอบต่อนาทีและความเร็วรอบการหมุนของใบกวาดแบบโคจรเท่ากับ 40 รอบต่อนาที จะทำให้ได้ค่าดัชนีการผสมสูงสุดที่ค่า 0.81 ผลการจำลองของวิธีอนุภาคไม่ต่อเนื่องสามารถเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์จริง

คำสำคัญ: คอนกรีต, ดีอีเอ็ม, เครื่องผสม, การหาสภาวะเหมาะสม, แพลเนตารี

Abstract

Variations in the planetary mixer factor's gearbox rotation speed could impact the mixing efficiency. This article uses a three-level factorial design to experiment with planetary concrete mixing parameters. Nine simulations of different arm rotation speeds and orbital rotation speeds were conducted. The relation between the mixing index and the rotation speeds was predicted using the Response Surface Method (RSM) to find optimum values of various rotation speeds to maximize a mixing index output. This article chose the open-source software LIGGGHTS®-PUBLIC to simulate the material mixing process and analyze the mixing index using the Hertz-Mindlin and Johnson-Kendall-Robert (JKR) models to control the contact between concrete mixtures by the Discrete Element Method (DEM). According to the simulation results, an optimization rotation speed of arm 15 rpm and orbital 40 rpm demonstrated the best overall mixing index of 0.81. The simulation results of the

discrete element method can provide a reference for actual product design.

Keywords: Concrete, DEM, Mixer, Optimization, Planetary

1. คำนำ

การผสมคอนกรีต (Mixing) คือการนำส่วนผสมคอนกรีต ได้แก่ ปูนซีเมนต์ หิน กรวด หินทราย น้ำและสารผสมเพิ่มอื่นๆ ที่ได้ตรงตามส่วนผสมมาคลุกเคล้าเข้าด้วยกัน เพื่อให้คอนกรีตสดมีเนื้อสม่ำเสมอทุกส่วนและผิวมวลรวมถูกเคลือบด้วยซีเมนต์เพสต์ ถ้าหากทำการผสมคอนกรีตได้ไม่ดีจะทำให้คอนกรีตได้ที่มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอมีความสามารถในการรับกำลังและความคงทนต่ำ การผสมคอนกรีตด้วยเครื่องจักรสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ การผสมกับที่ (Central mixing) การผสม 2 ช่วง (Shrink mixing) การผสมโดยรถ (Truck mixing) ส่วนเครื่องผสมคอนกรีตสามารถจำแนกตามลักษณะการผสมได้ 2 ประเภท ได้แก่ เครื่องผสมเป็นครั้งตามความจุ (Batch mixer) และ เครื่องผสมอย่างต่อเนื่อง (Continuous mixer) งานวิจัยนี้สนใจการสร้างแบบจำลองของการผสมแบบ Batch mixer ชนิดการหมุนแบบวงโคจร (Planetary) โดยตัวถังกวนไม่เคลื่อนที่ มีเพียงใบกวาดด้านในเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน คือ 1.ใบกวาดหมุนรอบแกนกลางถึงจะกวาดบริเวณขอบถึงด้านนอก และ 2.ใบกวาดที่หมุนรอบตัวเองพร้อมกับหมุนรอบแกนกลางลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายกับโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ เครื่องผสมชนิดนี้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพกับคอนกรีตที่แห้งและส่วนผสมที่มีการยึดเกาะอย่างมาก นิยมใช้สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงในโรงงานคอนกรีตสำเร็จรูปและใช้ผสมคอนกรีตจำนวนน้อยหรือผสมมอร์ตาร์ในห้องปฏิบัติการ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการผสมคอนกรีตในเครื่องผสมแบบแพลเนตารีด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์มีอยู่อย่างจำกัด การผสมคอนกรีตสามารถวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมโดยไม่ต้องเสียเวลาหรือค่าใช้จ่ายในการทดลอง สามารถใช้ข้อมูลจากการจำลองในการออกแบบเครื่องจักรผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตใช้มวลรวมและซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นเม็ด สามารถใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method, DEM) ซึ่งเป็นเทคนิคเชิงตัวเลขในการคำนวณการเคลื่อนที่และอันตรกิริยาระหว่างวัสดุเป็นเม็ด เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางเนื่องจากแบบจำลอง DEM สามารถติดตามการเคลื่อนที่ของวัสดุแต่ละชิ้นเพื่อประเมินตำแหน่ง ความเร็ว แรงกระทำ การหมุน การชนกัน และการยึดเกาะของวัสดุที่มีจำนวนหลายล้านเม็ดภายในระบบที่ศึกษา จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง DEM นักวิจัยนิยมใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์อย่างหลากหลาย เช่น Altair EDEM [1], Rocky DEM [2], PFC3D [3] และอื่นๆ ส่วนซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์ส ยกตัวอย่างเช่น LIGGGHTS [4], YADE [5], Woo [6], Mercury DPM [7], GranOO [8] และ MeshSys [9]

ซอฟต์แวร์เหล่านี้จะเปรียบวิธีเชิงตัวเลขมาประยุกต์วิธี DEM เพื่อคำนวณแรงที่กระทำกันระหว่างอนุภาคซึ่งประกอบด้วยแรงเนื่องจากสปริง (Spring) แรงเนื่องจากความหน่วง (Dash-pot) แรงเสียดทาน (Friction) โดยใช้กฎของนิวตัน (Newton's Laws of Motion) คำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคและทำนายการยึดเกาะ (Cohesion) ด้วยทฤษฎีของ JKR (Johnson-Kendall-Roberts)

งานวิจัยนี้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ LIGGGHTS (LAMMPS Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์แบบโอเพ่นซอร์สสำหรับระบบปฏิบัติการ Linux ที่ใช้ไฟล์อินพุตในรูปแบบไฟล์สคริปต์ ซอฟต์แวร์ LIGGGHTS มีความน่าเชื่อถือในความแม่นยำเป็นที่นิยมของนักวิจัยที่ต้องการสร้างแบบจำลองด้วยการเขียนโค้ดเองและปรับโค้ดให้เข้าปัญหาที่มีลักษณะเฉพาะ ผู้เขียนจึงนำเสนอขั้นตอนการใช้งานซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์สที่ไม่เสียค่าใช้จ่ายเข้าซื้อลิขสิทธิ์ โดยนำมาใช้ในการจำลองปัญหาการผสมคอนกรีตด้วยเครื่องผสมแบบแพลนเน็ตารี่ด้วยวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง เพื่อหาเงื่อนไขค่าความเร็วในการหมุนของใบกวนที่ทำให้การผสมคอนกรีตสม่ำเสมอที่สุดในระยะเวลาการผสมเท่ากัน

2. แบบจำลองวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง

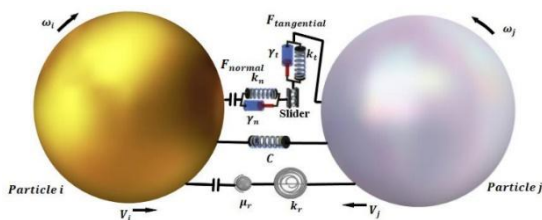
2.1 สมการการเคลื่อนที่และสัมผัสกันของอนุภาค

งานวิจัยนี้ใช้วิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องโดยอาศัยกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law of motion) ในการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคหรือวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต แบบจำลองการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคจะมีการคำนึงถึงระบบที่มีแรงกดสปริง ตัวหน่วงและความเสียดทานดังแสดงในรูปที่ 1 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่และการหมุนของอนุภาค i ที่มีรัศมี R_i ณ เวลา t ได้ดังนี้

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^{K_i} (F_{c,ij}^n + F_{d,ij}^n + F_{t,ij}^t + F_{d,ij}^t) + \sum_{j=1}^{N_i} (F_{v,ij} + m_i g) \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{K_i} (T_{ij}^t + T_{ij}^r) \quad (2)$$

เมื่อ m_i , I_i , K_i , V_i และ ω_i คือ มวลของอนุภาค, โมเมนต์ความเฉื่อย, จำนวนอนุภาคที่สัมผัสกัน, ความเร็วในการเคลื่อนที่และความเร็วเชิงมุมของอนุภาค ตามลำดับ $F_{c,ij}^n$ และ $F_{d,ij}^n$ คือแรงกดและแรงหน่วงในแนวตั้งฉาก $F_{t,ij}^t$ และ $F_{d,ij}^t$ คือแรงสัมผัสและแรงหน่วงในแนวสัมผัส ตามลำดับ $F_{v,ij}$ คือแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาค i และ j นอกจากนี้ N_i คือจำนวนอนุภาคที่อยู่ใกล้ (Neighborhood) อนุภาค i แรงบิด (Torque) จากแรงสัมผัสและแรงเสียดทานการกลิ้งคือ T_{ij}^t และ T_{ij}^r ตามลำดับ โดยแรงและทอร์กคำนวณจากปฏิสัมพันธ์และสมบัติทางกายภาพของอนุภาค



รูปที่ 1 ปฏิสัมพันธ์ของแรงและแรงบิดระหว่างสองอนุภาคที่สัมผัสกัน

2.2 แบบจำลองการสัมผัสระหว่างอนุภาคของ Hertz-mindlin

แรงจากการชนกันระหว่างสองอนุภาคสามารถคำนวณจากการยุบตัวที่ทำให้เกิดระยะเหลื่อม (Overlaps) ในแนวตั้งฉาก (δ_n) และในแนวสัมผัส (δ_t) โดยกฎการสัมผัสกันของ Hertz-mindlin ดังสมการ

$$F = (k_n \delta_{n,ij} - \gamma_n v_{n,ij}) + (k_t \delta_{t,ij} - \gamma_t v_{t,ij}) \quad (3)$$

สมการที่ (3) แสดงแรงเสียดทานของอนุภาคสองอันที่มีรัศมี R_i และ R_j โดยเกิดการสัมผัสกันเมื่อมีระยะห่างระหว่างอนุภาค l_{ij} มีค่าต่ำกว่า $d = R_i + R_j$ ดังนั้นจะไม่เกิดแรงระหว่างอนุภาคเมื่อ $l_{ij} > d$ ดังแสดงในสมการที่ (3) เทอมแรกคือแรงในแนวตั้งฉากและเทอมที่สองคือแรงในแนวสัมผัสตามลำดับ โดยเทอมแรก k_n คือค่าคงที่ยืดหยุ่น (Elastic) สำหรับแนวตั้งฉาก $\delta_{n,ij}$ คือระยะเหลื่อม γ_n และ $v_{n,ij}$ คือตัวหน่วงวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic damping) ในแนวตั้งฉากและความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาคทั้งสอง ตามลำดับ ในเทอมที่สอง k_t คือค่าคงที่ยืดหยุ่นสำหรับแนวสัมผัส $\delta_{t,ij}$ คือระยะเหลื่อมในแนวสัมผัส γ_t และ $v_{t,ij}$ คือตัวหน่วงวิสโคอีลาสติกและความเร็วสัมพัทธ์ในแนวสัมผัสของอนุภาคทั้งสอง ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้คำนวณได้จากสมการในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์และรูปแบบสมการ

สัมประสิทธิ์	สมการที่
$k_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \delta_n}$	(4)
$\gamma_n = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{s_n m^*} \geq 0$	(5)
$k_t = 8 G^* \sqrt{R^* \delta_n}$	(6)
$\gamma_t = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{s_t m^*} \geq 0$	(7)
$s_n = 2 E^* \sqrt{R^* \delta_n}$	(8)
$s_t = 8 G^* \sqrt{R^* \delta_n}$	(9)
$\beta = \frac{\ln(e)}{\sqrt{\ln^2(e) + \pi^2}}$	(10)
$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-v_i^2)}{E_i} + \frac{(1-v_j^2)}{E_j}$	(11)
$\frac{1}{G^*} = \frac{2(2+v_i)(1-v_i)}{E_i} + \frac{2(2+v_j)(1-v_j)}{E_j}$	(12)
$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}$	(13)
$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j}$	(14)

เมื่อ E^* , G , v , e , m และ R คือค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) ค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (Shear modulus) อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) สัมประสิทธิ์การกระดอน (Coefficient of restitution) มวลอนุภาค และ รัศมีของอนุภาคตามลำดับ

2.3 แบบจำลองการสัมผัสและเกาะยึดของ JKR

แบบจำลองของ Hertz-mindlin ในหัวข้อ 2.2 ไม่ได้รวมแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคที่สัมผัสกัน ดังนั้น Johnson et al. [10] ได้นำแบบจำลอง

JKR มาปรับปรุงใหม่โดยพิจารณาพลังงานการยึดเกาะจากอิทธิพลของพลังงานบนผิวอนุภาค ในทฤษฎีของ Johnson-Kendall-Roberts (JKR) กล่าวถึงแรงดึงดูดและระยะเหลื่อมกันจากการสัมผัสระหว่างอนุภาคคำนวณได้จากสมการ

$$F_n = \frac{4E^*a^3}{3R^*} - (8\pi\xi E^*a^3)^{0.5} \quad (15)$$

$$\delta_n = \frac{a^2}{R^*} - \left(\frac{2\pi\xi a}{E^*}\right)^{0.5} \quad (16)$$

เมื่อ ξ , a , E^* , และ R^* คือ พลังงานบนผิวอนุภาค, รัศมีจุดสัมผัสของอนุภาค, ค่า Young's Modulus และรัศมีประสิทธิผลการสัมผัสของอนุภาคตามลำดับ เพื่อรักษาพื้นที่การสัมผัสกันการเพิ่มแรงในแนวตั้งฉากเข้าไปในกฎการสัมผัสกันของ Hertz ดังสมการ

$$F_{Coh} = CA \quad (17)$$

เมื่อ C คือพลังงานการเกาะยึด (Cohesion energy) และ A คือพื้นที่การเกาะยึด สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (18)

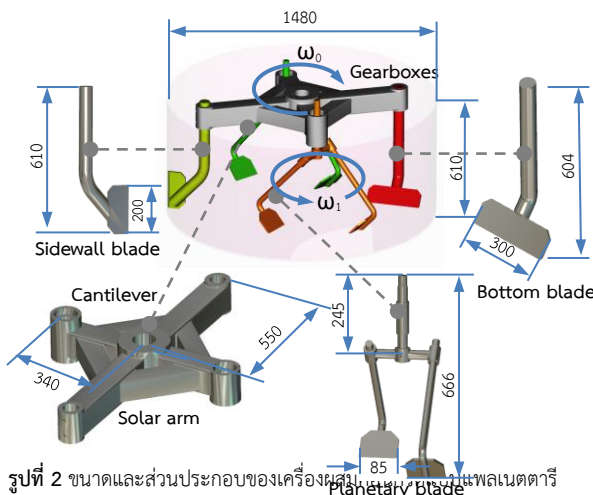
$$A = \frac{\pi}{4} \frac{(l_{ij}-R_i-R_j)(l_{ij}+R_i-R_j)(l_{ij}-R_i+R_j)(l_{ij}+R_i+R_j)}{l_{ij} \times l_{ij}} \quad (18)$$

โดย R_i และ R_j คือรัศมีของอนุภาค i และ j และ l_{ij} คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของอนุภาค สมการที่ (15)-(18) จะนำไปใช้ในแบบจำลองเพื่อทำให้วัสดุแห้งกลายเป็นวัสดุเปียกทดแทนการเติมน้ำในส่วนผสมคอนกรีต

3. การสร้างแบบจำลองและเงื่อนไขการจำลอง

3.1 เครื่องผสมคอนกรีตแบบแพลนเนตารี

รูปที่ 2 แสดงขนาดและรูปร่างของเครื่องผสมคอนกรีตแบบแพลนเนตารี (หน่วยมิลลิเมตร) โดยการเคลื่อนที่ที่กำหนดให้ Solar arm หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา (ω_0) ส่วน Planetary blade ทั้งสองข้างจะหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา (ω_1) สำหรับ Sidewall blade และ Bottom blade จะยึดติดกับ Solar arm แล้วเคลื่อนที่ไปพร้อมกันโดยระยะแขนการหมุนของ Planetary blade มีค่าเท่ากับ 340 mm ส่วน Sidewall blade และ Bottom blade มีระยะแขนเท่ากันคือ 550 mm



รูปที่ 2 ขนาดและส่วนประกอบของเครื่องผสมคอนกรีตแบบแพลนเนตารี

3.2 การสร้างแบบจำลอง

แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ผู้วิจัยได้ตั้งเป้าหมายในการใช้ฟรีแวร์และซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์สที่สามารถค้นหาในอินเทอร์เน็ตและดาวน์โหลดมาติดตั้งในพีซีได้โดยง่ายเพื่อการเข้าซื้อสิทธิ์ที่มีราคาสูง งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ในการสร้างแบบจำลองรวม 4 ชนิดซึ่งมีลำดับการทำงานแสดงดังรูปที่ 3 เหมือนกับงานวิจัยที่เคยทำมาก่อนหน้า [11,12]



รูปที่ 3 ขั้นตอนการทำงาน (Workflow)

จากรูปที่ 3 การสร้างแบบจำลองมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ออกแบบและวาดเครื่องผสมคอนกรีตแบบแพลนเนตารีด้วยซอฟต์แวร์ FreeCAD ดังรูปที่ 2 แล้วบันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .stl (Standard triangle language) ชนิดไฟล์เป็นแบบ ASCII
2. นำไฟล์ CAD มาสร้างโดเมนพื้นผิวการจำลองด้วยการเขียนโปรแกรมภาษาสคริปต์ (Script) ด้วย Notepad++ โดยกำหนดชนิดของแบบจำลอง ขนาดโดเมน ระยะเวลาการจำลอง เงื่อนไขขอบเขต ชนิดของอนุภาค สมบัติของอนุภาค ทิศทางแรงโน้มถ่วงของโลก พื้นที่จุดปล่อยอนุภาคและอัตราการปล่อยอนุภาค หลังจากนั้นสร้างอัลกอริทึมในการวัดค่าดัชนีการผสม (Mixing index) ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.5
3. จำลองปัญหาจากภาษาสคริปต์ที่สร้างขึ้น โดยเรียกใช้ชุดคำสั่ง (Source code) ของ C++ ด้วยการถอดรหัสของภาษา (Interpreted) ที่ละบรรทัดผ่านซอฟต์แวร์ LIGGGHTS ผลลัพธ์ที่ได้จะบันทึกเป็นไฟล์ VTK (Visualization toolkit) โดยเก็บค่าต่างๆ เช่น พิกัดตำแหน่งของอนุภาค ความเร็ว ความเร่ง องศาการหมุนตัว แรงจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาค อนุภาคกับเครื่องผสมคอนกรีต และคำนวณค่าดัชนีการผสม (Mixing index)
4. โปสต์โปรเซสไฟล์ VTK ที่ได้ผ่านซอฟต์แวร์ ParaView เพื่อแสดงผลพลศาสตร์ของอนุภาคแต่ละอันที่เปลี่ยนตำแหน่งไปตามเวลาในรูปแบบของภาพกราฟิก

ในการจำลองการผสมคอนกรีตด้วย LIGGGHTS แต่ละกรณีจะใช้เวลาประมาณ 4-5 ชั่วโมง จำลองด้วยพีซีสเปคซีฟิ AMD Ryzen 9 5950x ความถี่ของโปรเซสเซอร์ 3.4-4.9 GHz จำนวน 16 Cores 32 Threads แรม 16 GB และใช้คำสั่ง MPI (Message Passing Interface) เพื่อให้สามารถใช้จำนวน Threads ในการประมวลผลได้เต็มที่

3.3 สมบัติวัสดุและสมมติฐานที่ใช้ในแบบจำลอง

สำหรับพารามิเตอร์และสมบัติของอนุภาคแสดงในตารางที่ 2 พารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกแทนค่าในสมการที่ (1) – (18)

ตารางที่ 2 สมบัติวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง [13]

Material properties	Aggregate	Cement	Wall
Density (kg/m ³)	1400	800	7800
Radius (mm)	15	4	-
Young's Modulus (N/m ²)	5×10 ⁷	5×10 ⁷	219×10 ⁹
Poisson Ratio	0.30	0.30	0.32
Contact Properties	Aggregate-Aggregate	Cement-Cement	Aggregate-Wall, Cement-Wall

Sliding Friction Coefficient	0.52	0.40	0.46	0.50	0.30
Rolling Friction Coefficient	0.30	0.20	0.25	0.02	0.10
Coefficient of Restitution	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Cohesion (J/m ³)	250000	250000	250000	250000	250000

สำหรับเวอร์ชันฟรีของซอฟต์แวร์ LIGGGHTS สามารถจำลองวัสดุเป็นรูปร่างทรงกลมเท่านั้น ในงานวิจัยนี้วัสดุที่ใช้ในการผสมเป็นคอนกรีตประกอบด้วยมวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) และซีเมนต์ (Cement) ในอัตราส่วน Cement : Aggregate เท่ากับ 1 : 3 ในการจำลองจะกำหนดค่าคงที่ Cohesion เท่ากับ 250,000 J/m³ ทดแทนการใช้น้ำที่ทำหน้าที่ให้วัสดุมวลรวมเปียกช่วยหล่อลื่นวัสดุมวลรวมทำให้เกิดความเหลวเพื่อให้ปูนซีเมนต์เข้าเกาะได้โดยรอบและยึดจับตัวกันได้ ซึ่งค่า Cohesion ที่เลือกใช้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Salamat และ Genç [13]

เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองการผสมคอนกรีต งานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ไม่คำนึงถึงการเกิดฟองอากาศ
2. ไม่คำนึงถึงอุณหภูมิของส่วนผสม
3. ผสมมวลรวมหยาบและปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก
4. ไม่มีน้ำยาผสมคอนกรีตและส่วนผสมอื่นๆ
5. ไม่คำนึงถึงปฏิกิริยาไฮเดรชัน
6. มวลรวมหยาบและปูนซีเมนต์มีรูปร่างทรงกลม
7. ใช้ค่าคงที่การเกาะยึด (Cohesion) ทดแทนน้ำผสมคอนกรีต
8. ใช้วิธี CGM (Coarse grain model) เพื่อกำหนดให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กเป็นวงให้เป็นกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

3.4 ระยะขั้นของตัวแปรเวลา (Time step)

ระยะเวลาในการคำนวณแต่ละขั้น ในแบบจำลองควรมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤติที่ทำให้การคำนวณมีเสถียรภาพ ในปัญหาการสัมผัสกันของอนุภาคต้องคำนึงถึงระยะเวลาริกติ ($T_{R,crit}$) ที่เพียงพอให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าชนกันจนเปลี่ยนรูปร่างเล็กน้อยและเกิดการซ้อนทับกัน (Overlap) ค่า Time step ที่เหมาะสมสำหรับการจำลอง DEM สามารถคำนวณจากสูตรของ Rayleigh time step [14]:

$$T_{R,crit} = \frac{\pi R \left(\frac{\rho}{G}\right)^{0.5}}{(0.1631\nu + 0.8766)} \quad (19)$$

เมื่อ R คือรัศมีของอนุภาค ρ คือความหนาแน่น G คือ Elastic modulus และ ν คือ Poisson's ratio สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ค่า Time step ไม่เกินร้อยละ 20 ของค่า $T_{R,crit}$

3.5 ดัชนีการผสม (Mixing index, MI)

การวิเคราะห์ค่า MI ส่วนใหญ่นิยมใช้วิธี Lacey mixing index [14] ด้วยการคำนวณสัดส่วนของมวลที่สนใจภายในขอบเขตของปริมาตรสมมติจำนวนช่องที่มากเกินไปอาจทำให้แต่ละช่องมีอนุภาคไม่เพียงพอ ทำให้ค่าสถิติไม่น่าเชื่อถือ จำนวนช่องที่น้อยเกินไปอาจไม่สะท้อนความแตกต่างของการผสมได้ดี ในงานวิจัยนี้แบ่งขอบเขตเป็น 36 ช่องให้ครอบคลุมถึงผสมดังแสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากหากเพิ่มจำนวนมากกว่า 36 ช่อง ค่า MI มีค่าเกือบคงที่ ดังนั้นการแบ่งขอบเขตเป็น 36 ช่องจึงเพียงพอต่อการคำนวณค่า MI การคำนวณจะเลือกสังเกตมวลของ Cement ภายในขอบเขตเหล่านี้ดังสมการ

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_m)^2 \quad (20)$$

โดย s^2 คือสัดส่วนค่าเบี่ยงเบนของมวล Cement ในแต่ละขอบเขต N คือจำนวนขอบเขต ϕ_i คือ สัดส่วนของมวล Cement ที่อยู่ภายในขอบเขต i และ ϕ_m คือค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของมวล Cement ภายในขอบเขตทั้งหมด สามารถคำนวณหาความก้าวหน้าหน้าของการผสม คือ 1. ในสถานะเริ่มต้นที่ยังไม่เกิดผสมกัน s_0^2 และ 2. เมื่อสุ่มกลุ่มตัวอย่างที่ผสมกันแล้ว s_R^2 ได้ดังนี้

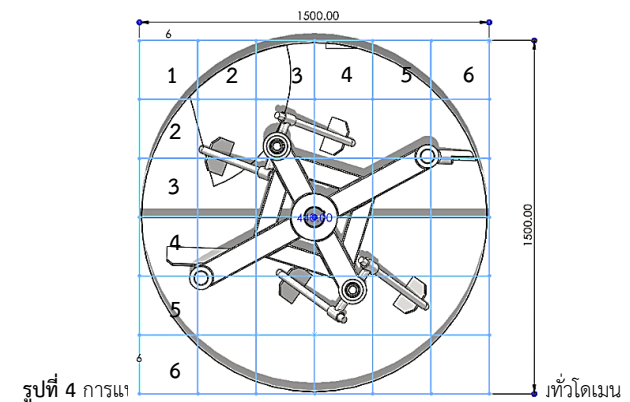
$$s_0^2 = \phi_m(1 - \phi_m) \quad (21)$$

$$s_R^2 = \phi_m(1 - \phi_m)/n \quad (22)$$

เมื่อ n ค่าเฉลี่ยของจำนวนอนุภาคต่อขอบเขตเมื่อคำนวณตามสมการที่ (20)-(22) สามารถคำนวณค่า MI จากสมการที่ (23)

$$MI = \frac{s^2 - s_0^2}{s_R^2 - s_0^2} \quad (23)$$

โดยค่า MI จะมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 ถ้า Cement และ Aggregate ผสมกันอย่างทั่วถึงจะมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งหมายถึงการเข้าสู่สภาพการผสมกันอย่างสมบูรณ์ โดยตัวอย่างทั้งหมดที่สุ่มออกมาจึงประกอบประกอบในสัดส่วนเดียวกับองค์ประกอบของส่วนผสมทั้งหมด



รูปที่ 4 การแบ่ง

3.6 การออกแบบการทดลอง (Experimental design)

เพื่อหาความเร็วรอบการหมุนของใบกวนที่เหมาะสมที่ให้ค่าดัชนีการผสมสูงสุดในระยะเวลาการผสม 25 sec จากข้อมูลการใช้ความเร็วรอบการหมุนของเครื่องผสมคอนกรีตที่มีขนาดใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ [15] ผู้วิจัยได้ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) แสดงผลตอบสนองจากปัจจัย (Factor) ที่ศึกษา คือ 1) ความเร็วรอบการหมุนของ Solar arm อยู่ในช่วง 7-15 rpm 2) ความเร็วรอบการหมุนของ Planetary arm อยู่ในช่วง 20-40 rpm ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปัจจัยของความเร็วรอบการหมุนที่ออกแบบการทดลอง

Runs	Revolution	
	Solar arm (rpm)	Planetary arm (rpm)
1	15	40
2	7	30

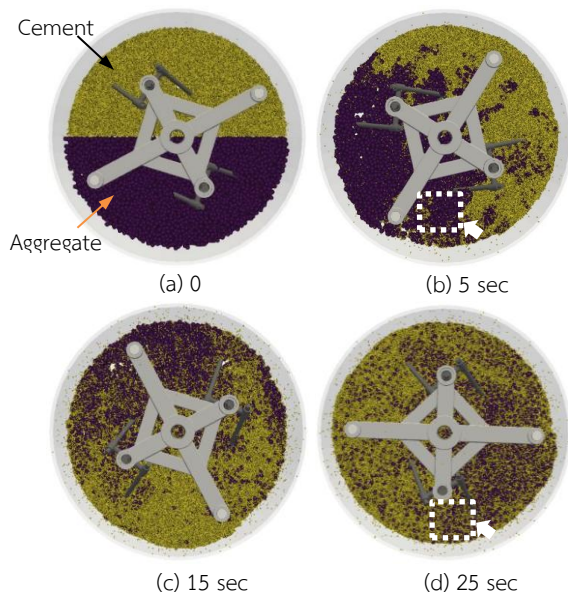
3	7	20
4	15	30
5	15	20
6	11	40
7	7	40
8	11	20
9	11	30

โดยหาการตอบสนอง (Response) เป็นค่าดัชนีการผสมของมวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) และซีเมนต์ (Cement) เลือกการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3 ระดับชนิด Central composite ทำให้ได้จำนวนการทดลอง เท่ากับ 9 runs เพื่อฟิตสมการแบบ Quadratic สร้างความสัมพันธ์ของกราฟ RSM

4. ผลการจำลอง

4.1 จลนพลศาสตร์การผสมคอนกรีตด้วยเครื่องผสมแบบแพลเนตารี

ในการจำลองผสมคอนกรีตงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วน 1 : 3 โดยเป็นมวล Cement เท่ากับ 45 kg และมวล Aggregate เท่ากับ 135 kg อนุภาคในถังมีจำนวนทั้งหมด 210,894 อนุภาค มีจำนวนของ Cement และ Aggregate เท่ากับ 6820 และ 204,074 อนุภาค ตามลำดับ ในการคำนวณค่า MI ขณะผสมคอนกรีตจะแบ่งเป็นขอบเขตการเก็บข้อมูล 36 ช่องตามรูปที่ 4 ในตอนเริ่มต้นทำการป้อนอนุภาคเข้าถังผสมสองด้านตรงข้ามกัน ดังแสดงรูปที่ 5(a) เพื่อให้มั่นใจว่าวัสดุไม่ได้ผสมกันก่อนที่จะคำนวณค่า MI หากทำการวางวัสดุเป็นสองชั้นซ้อนทับกันจะทำให้ค่าดัชนีการผสมมีค่าสูงก่อนเริ่มการจำลอง

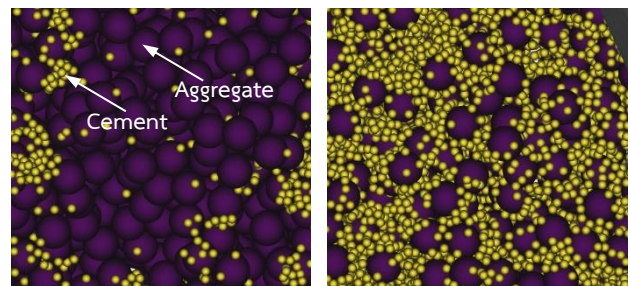


รูปที่ 5 มุมมองด้านบนของการผสมคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Run 9)

เพื่อความสะดวกต่อการสังเกตการผสมกันของวัสดุจะกำหนดอนุภาค Cement แทนด้วยสีเหลืองและอนุภาค Aggregate แทนด้วยสีน้ำเงิน ยกตัวอย่างผลการจำลองของ Run 9 แสดงดังรูปที่ 5 การจำลองเริ่มจากปล่อยอนุภาคเข้าถังผสมตามแรงโน้มถ่วงของโลกโดยแบ่งเป็นสองส่วนดังรูป

5(a) เมื่ออนุภาควางตัวนิ่งในถังแล้วจะตั้งเป็นสภาวะเวลาเริ่มต้น (0 sec) หลังจากนั้นใบกวนจะเริ่มหมุนตามความเร็วรอบที่กำหนด เมื่อเวลาผ่านไป 5 sec ดังรูป 5(b) อนุภาคทั้งสองชนิดยังผสมกันได้ไม่ทั่วถึงและแยกกลุ่มกัน หลังจากผ่านไป 15 s (รูปที่ 5c) ใบกวนได้ผลักดันให้ Cement เข้าแทรกใน Aggregate มากขึ้น โดยอนุภาคทั้งสองเกิดการผสมกันและกระจายตัวค่อนข้างมากในเวลา 25 sec ดังรูป 5(d)

รูปที่ 6 แสดงการขยายขนาดรูปที่ 5 ในบริเวณขอบเขตใกล้เคียงกันแต่ระยะเวลาการผสมต่างกันพบว่า Cement และ Aggregate เกิดการผสมกันอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 5 sec ไปถึง 25 sec ผิวอนุภาค Aggregate ถูกยึดเกาะและเคลือบด้วย Cement อย่างชัดเจน เป็นผลมาจากการกำหนดแรงยึดเกาะตามสมการของ JKR ในหัวข้อที่ 2.3 ซึ่งทำให้วัสดุเปียกคล้ายคลึงกับการผสมคอนกรีตในการดำเนินงานจริง



รูปที่ 6 ขยายรูปที่ 5(b) และ 5(d) ในบริเวณขอบเขตเส้นประ

4.2 การจำลองที่ให้ค่าดัชนีการผสมสูงสุด

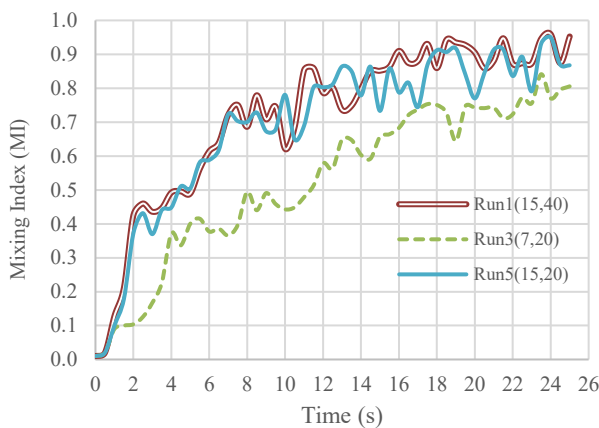
คอนกรีตที่ผสมด้วยเครื่องจักรโดยทั่วไป ควรใช้เวลาผสมคอนกรีตไม่น้อยกว่า 60 sec สำหรับการผสมครั้งละไม่เกิน 1 m³ แต่อาจเพิ่มขึ้นถึง 3 min หรือมากกว่านี้เมื่อผสมคอนกรีตที่ค่อนข้างแห้งมาก อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้จำลองการผสมคอนกรีตที่มีมวล 180 kg หากเพิ่มระยะเวลาการผสมยาวนานขึ้นหรือผสมไปเรื่อยๆ ค่า MI จะเข้าใกล้ 1 ในการจำลองได้กำหนดเวลาการจำลองเพียง 25 sec เพื่อลดเวลาการจำลอง ซึ่งเวลาการจำลอง 25 sec ที่กำหนดนี้เพียงพอต่อการเปรียบเทียบค่า MI ผู้วิจัยได้ทำการจำลองตามเงื่อนไขในตารางที่ 3 ผลการจำลองทั้ง 9 กรณี ที่เวลา 25 sec ของการจำลองผสมคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ภาพผสมคอนกรีตเวลา 25 sec ของแต่ละกรณี

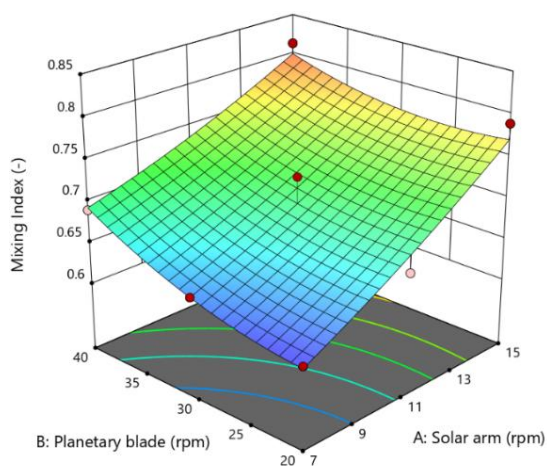
จากรูปที่ 7 ตัวเลขในวงเล็บคือค่าความเร็วรอบการหมุนของ Solar arm และ Planetary blade ตามลำดับ พบว่าการผสมคอนกรีตในแต่ละกรณีมีความแตกต่างกันทางกายภาพ โดยเฉพาะ Run 2, 3, 4, 7 และ 8 อนุภาค Cement ไม่ค่อยกระจายตัวแต่มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ เข้ายึดเกาะ Aggregate ไม่ทั่วถึง ตรงข้ามกับ Run 1 และ 5 การผสมของอนุภาคทั้งสองชนิดจะค่อนข้างสม่ำเสมอมากกว่าทุกกรณี จากการสังเกตรูปที่ 7 พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบการหมุนของ Solar arm ที่สูงจะช่วยให้อนุภาค Cement กระจายตัวเข้ายึดเกาะ Aggregate ได้ดี

รูปที่ 8 ยกตัวอย่างค่า MI ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกรณี Run 1, 3 และ 5 พบว่า Run 1 และ 5 มีค่า MI สูงใกล้เคียงกันสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการผสมกันดังแสดงในรูปที่ 7 ลักษณะของกราฟในรูปที่ 8 ค่า MI จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันและมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.96 การเพิ่มและลดลงของกราฟเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคมีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีความแตกต่างของมวลวัสดุในขอบเขต 36 ช่อง (รูปที่ 4) ทำให้ค่า MI มีการปรับตัวขึ้น-ลงตามระยะเวลาการผสม จากรูปที่ 8 ค่า MI ของ Run 3 มีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากมีค่าความเร็วรอบการหมุนต่ำและของกรณี Run อื่นๆ มีค่า MI ต่ำกว่า Run 1 และ 5 เช่นกัน ส่วนค่าเฉลี่ยของ MI ทั้ง 9 กรณีถูกนำไปสร้างความสัมพันธ์รูปแบบกราฟพื้นผิวตอบสนอง



รูปที่ 8 ค่า MI ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการผสมคอนกรีต

เมื่อนำความเร็วรอบการหมุนของ Solar arm และ Planetary blade กับค่าเฉลี่ยของ MI ทั้ง 9 กรณีไปสร้างความสัมพันธ์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบการหมุนและค่า MI

จากรูปที่ 9 เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของ Solar arm และ Planetary blade จะส่งผลให้ค่า MI เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์นี้เป็นไปตามที่ผู้วิจัยคาดการณ์ไว้ เมื่อนำค่าเฉลี่ยของ MI ในทุกกรณีที่ทำการศึกษาไปหาสมการที่เหมาะสมของความเร็วรอบการหมุนของ Solar arm และ Planetary blade ที่ทำให้ค่า MI สูงสุดในระยะเวลาการผสม 25 sec พบว่าความเร็วรอบการหมุนของ Solar arm และ Planetary blade ที่เหมาะสมคือ 15 และ 40 rpm ตามลำดับ ค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับค่าที่ใช้จริงในเครื่องผสมคอนกรีตแบบแพลนเนตารี [15]

รูปที่ 9 สร้างจากการฟิตสมการกำลังสอง (Quadratic) ได้ค่า R² เท่ากับ 0.91 สามารถแสดงสมการ Actual variable ได้ดังนี้

$$MI = 0.524658 + 0.016256x_{rpm_{solararm}} - 0.003374x_{rpm_{planetary}} - 0.000316x_{rpm_{solararm}}x_{rpm_{planetary}} + 0.000445x_{(rpm_{solararm})^2} + 0.00016x_{(rpm_{planetary})^2} \quad (24)$$

หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยโดยกำหนดความเชื่อมั่นที่ 95% ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 เพื่อตรวจสอบปัจจัยความเร็วรอบการหมุนที่มีอิทธิพลต่อค่า MI พบว่าความเร็วรอบในการหมุนของ Solar arm มีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ส่วนอันตรกิริยาอื่นๆ มีค่า P-value มากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 แสดงให้ทราบว่าความเร็วรอบการหมุนของ Solar arm มีอิทธิพลต่อค่า MI อย่างมีนัยสำคัญ

5. บทสรุป

ฟรีแวร์และซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์ส LIGGGHTS ที่ใช้สร้างแบบจำลองการผสมคอนกรีตด้วยวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องได้แก่ FreeCad, Notepad++, LIGGGHTS และ ParaView สามารถทำงานร่วมกันได้ดีภายใต้สมมติฐานการสร้างแบบจำลองเครื่องผสมคอนกรีตแบบแพลนเนตารี แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายการเกิดปฏิกิริยสัมพันธ์ของการผสมกันระหว่าง Cement และ Aggregate ผลการจำลองแสดงให้เห็นการยึดเกาะกันและผสมกันอย่างทั่วถึงโดยมีค่าเฉลี่ยของ MI สูงสุดเท่ากับ 0.81 ภายใต้ระยะเวลาการผสม 25 sec ที่เงื่อนไขความเร็วรอบในการหมุนของ Solar arm เท่ากับ 15 rpm และความเร็วรอบการหมุนของ Planetary blade เท่ากับ 40 rpm

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความเร็วรอบการหมุนของ Solar arm มีอิทธิพลต่อค่า MI อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามปัจจัยแรงบิดที่เกิดจากการหมุนของใบกวนไม่ได้คำนึงถึงในแบบจำลองนี้ ผู้วิจัยจะทำเพิ่มเติมในงานวิจัยต่อไปเพื่อให้ได้ค่าความเร็วรอบการหมุนที่สอดคล้องกับการใช้พลังงานไฟฟ้า

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Altair EDEM – The leading Discrete Element Method (DEM) software. <https://www.altair.com/edem-applications>.
- [2] Rocky DEM – The Most Powerful Particle Simulation Software. rocky.esss.co. [Accessed March 2025].
- [3] PFC – General Purpose Distinct-Element Modeling Framework. www.itasca.de/software/PFC. [Accessed March 2025].
- [4] LIGGGHTS - Open source discrete element method particle simulation code – CFDEM project. <https://www.cfdem.com/liggghts-open-source-discrete-element-method-particle-simulation-code>. [Accessed March 2025].
- [5] Yade – Open Source Discrete Element Method. yade-dem.org. [Accessed March 2025].
- [6] Woo - extensible DEM simulations. woodem.org. [Accessed March 2025].
- [7] MercuryDPM: Fast, flexible particle simulations. www.mercurydpm.org. [Accessed March 2025].
- [8] GranOO: A free C++/Python discrete Element workbench. www.granoo.org. [Accessed March 2025].
- [9] MechSys-Multi-Physics simulation library. mechsyst.nongnu.org. [Accessed March 2025].
- [10] Kenneth Langstreth, J., Kendall, K. and A.D., R. (1971). Surface energy and the contact of elastic solids. Proceedings of the Royal Society of London. A. *Mathematical and Physical Sciences*, 1558, pp.301–313.
- [11] ปรีดา ปรากฏมาก, ธนา ชีพสมทรง, คณิต มานะธนะ, กันต์ธกรณ์ เขาทอง, วิจิตรา ภูมิสวัสดิ์ และ จิรัชย์ สุภาสุทธากุล (2566). การจำลองดีอีเอ็มของอนุภาคทรงกลมที่ผสมในเบลตมิกเซอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์ส. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 37*, สงขลา, 25-28 กรกฎาคม 2655, หน้า 506-515.
- [12] ปรีดา ปรากฏมาก, เบญญา กสานติกุล, ชนมน จันทนา, หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ และ สวัสดิ์ ภูมิสวัสดิ์ (2566). การจำลองวิธีอนุภาคไม่ต่อเนื่องด้วยซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์ส LIGGGHTS. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 37*, สงขลา, 25-28 กรกฎาคม 2655, หน้า 759-770.
- [13] Salamat, J. and Genç, B. (2023). Numerical Simulation of Granular Flow in Concrete Batching Plant via Discrete Element Method. *The European Journal of Research and Development*, 3(2), pp.11-28.
- [14] Li, Y., Xu, Y. and Thornton, C. (2005). A comparison of discrete element simulations and experiments for “sandpiles” composed of spherical particles. *Powder Technology*, 160(3), pp. 219–228. Lacey, P. (1954). Developments in theory of particulate mixing. *J. Appl. Chem.* 4, pp. 257.
- [15] MEKA Crushing and Screening and Concrete Batching Technologies. (2025). Planetary mixers technical specifications. <https://www.mekaglobal.com/en/products/concrete-mixers/planetary-concrete-mixers> [Accessed March 2025].