

การเกิดและการแพร่กระจายของวัสดุเม็ดกลมภายใต้การกระแทก Crack nucleation and propagation in rounded granular media under collision

เชษฐพันธ์ ขวัญกลัด^{1*} อธิชัย ปรีชาวุฒิปงศ์²
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง เชียงใหม่ 50200
โทร 0-5394-4146 ต่อ 416 โทรสาร 0-5394-4145 E-mail: ittichai@dome.eng.cmu.ac.th

Chetthaphon Kwanglad^{1*}, Ittichai Preechawuttipong²
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
239 Huaykaew Rd. Sutthap, Muang, Chiang Mai 50200, Thailand
Tel: 0-5394-4146 Call 416, Fax: 0-5394-4145, E-mail: ittichai@dome.eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของแรงแอดฮีชันระหว่างอนุภาคและผลการกระจายตัวของรัศมีอนุภาคที่มีต่อการเกิดกลุ่มอนุภาค การเกิดและการแพร่กระจายรอยแตกของวัสดุเม็ดโดยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งการจำลองทางคอมพิวเตอร์นี้ใช้วิธีการคำนวณแบบพลศาสตร์ของโมเลกุล และใช้แบบจำลองทางตัวเลขในการสัมผัสระหว่างอนุภาคอย่างง่ายที่คำนึงถึงแรงแอดฮีชัน โดยกำหนดให้วัสดุเม็ดรูปร่างกลมซึ่งเป็นแบบ 2 มิติ ประกอบไปด้วยอนุภาคกลมจำนวน 8000 อนุภาคที่กระแทกกับพื้นราบหนึ่ง และไม่นำคำนึงถึงแรงโน้มถ่วงของโลก ผลการคำนวณเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าการเกิดกลุ่มของอนุภาคเกิดเฉพาะในวัสดุเม็ดที่มีค่าแอดฮีชันระหว่างอนุภาคสูง (ขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อค่าแอดฮีชันเพิ่มขึ้น) และเฉพาะความแตกต่างรัศมีของอนุภาคไม่เกินร้อยละ 10 เท่านั้น ในขณะที่ตอนการกระแทกกับพื้นราบหนึ่งโดยค่าแอดฮีชันสูง รอยแตกจะเกิดขึ้นที่ตรงกลางของวัสดุเม็ดและแพร่กระจายตามแนวของแรงที่กระทบ โดยจะแตกตามแนวระหว่างกลุ่มอนุภาค โดยที่ความเร็วสูงขึ้นทำให้วัสดุเม็ดแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆมากขึ้น

Abstract

This research investigate the influence of adhesive force between particles and distribution of particle radii to agglomerate nucleation and crack mode under collision. The crack mode and propagation in rounded granular media were carried out on numerical simulation using Molecular Dynamics Method involving a simple contact law with adhesion. The numerical samples were composed of 8000 disks which subjected to impact load by

against a fixed plate, here no gravitation effort. The numerical result suggest that the formation of crystallized agglomerates occurred only for high value adhesion and for particle radii distribution less than 10 %. The agglomerate size increased when the cohesion energy is increased. In testing state, the fissure appeared at the center of the medium and propagated through the periphery for strong cohesion system. The system tends to break into a crumble-like structure for high impact velocity.

1. บทนำ

วัสดุเม็ดได้ถูกนิยามว่าเป็นกลุ่มของอนุภาคที่พฤติกรรมมหภาคทางกลศาสตร์บังคับด้วยแรงสัมผัสระหว่างอนุภาค ซึ่งวัสดุเม็ดได้ถูกนำมาใช้โดยมนุษย์เป็นจำนวนมากในชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นทางตรงและทางอ้อม ทั้งในอุตสาหกรรมอาหาร, เกษษกรรม, เซรามิก เป็นต้น ล้วนมีความเกี่ยวข้องกับวัสดุเม็ดทั้งสิ้น ดังนั้น การศึกษาและทำความเข้าใจคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเม็ดจึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมทางกายภาพที่มีอิทธิพลต่อการเกิดและการแตกตัวของวัสดุเม็ด และทำให้ทราบถึงปัจจัยมีผลต่อความแข็งแรงในวัสดุเม็ด

กว่า 40 ปีที่ผ่านมา การศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาโดยการคำนวณทางตัวเลขและจากการทดสอบได้ถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ และใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุเม็ด และได้มีการศึกษาพฤติกรรมวัสดุเม็ดในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป ดังที่ผ่านมาในการศึกษาพฤติกรรมการแตกตัวของวัสดุเม็ดที่ตกกระทบกับพื้นราบหนึ่งในแนวตั้งฉากกัน [8] ได้มี

การศึกษาผลของแรงแอดฮีชัน (Adhesive) ระหว่างอนุภาคเพียงค่าเดียว และยังไม่มีการศึกษาแบบเป็นระบบ ทำให้ไม่สามารถทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของวัสดุเม็ดได้อย่างครอบคลุม

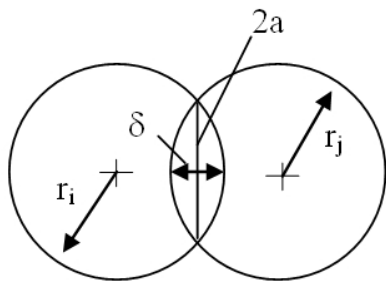
โดยงานวิจัยนี้เราจะศึกษาถึงผลของแรงแอดฮีชันระหว่างอนุภาคและผลการกระจายตัวของรัศมีอนุภาค (Distribution of particle radii) ที่มีต่อการเกิดกลุ่มอนุภาค (Agglomerate) การเกิดและการแพร่กระจายรอยแตกของวัสดุเม็ดที่เกิดจากการตกกระทบกับพื้นราบหนึ่งในทิศทางตั้งฉาก โดยการเปลี่ยนแปลงค่าแอดฮีชัน (Adhesion) ที่ละค่าจากอนุภาคกลมแห้ง (ไม่คิดค่าแรงแอดฮีชัน)

2. แบบจำลองและทฤษฎี

การคำนวณทางตัวเลขได้ประยุกต์ใช้ด้วยวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุล (Molecular Dynamics, MD) ที่รวมแบบแผนการคำนวณแบบ "คาดการณ์ - แก้ไข" (Predictor - corrector scheme) พร้อมทั้งใช้ชุดสัมประสิทธิ์ของตัวแก้ไขของเกียร์สำหรับกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน [2] เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่มากระทบกันจะเกิดแรงสัมผัส (Contact force) ที่ทำให้เคลื่อนที่เปลี่ยนไปตามกฎของนิวตัน ซึ่งแบบจำลองของแรงสัมผัสที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่เพียงไม่กี่แบบ คือ สปริง-แดชพอต เชิงเส้น (Linear spring-dashpot) [7] และแรงสัมผัสที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีของเฮิร์ตซ์ (Hertz) [7] ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองของแรงสัมผัสแบบสปริง-แดชพอตเชิงเส้นเป็นพื้นฐานของแบบจำลองแรงที่คำนึงถึงแรงแอดฮีชัน

2.1 แรงสัมผัสแบบคิดแรงโคเฮชัน

ในวิธีการการคำนวณแบบพลศาสตร์ของโมเลกุลนี้ อนุภาคจะถูกพิจารณาว่าเป็นวัตถุคิณรูปแบบสมมาตร พิจารณาอนุภาคกลม 2 อนุภาค โดยหลักการแล้วแรงสัมผัสระหว่างอนุภาค 2 อนุภาคเป็นฟังก์ชันของการจัดสัมผัสของอนุภาคทั้งสอง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งแรงสัมผัสแปรผันกับระยะเหลื่อมกัน (Overlap, δ) (รูปที่ 1) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในที่นี้ก็คือ ระยะเหลื่อมกัน, พื้นที่ของการเหลื่อมกัน (2a) และอนุพันธ์อันดับหนึ่งของระยะเหลื่อมกันเทียบกับเวลาคือ $\dot{\delta}$ ตัวแปรข้างต้นนี้สามารถนำไปเขียนสมการของแรงที่เกี่ยวข้องกับการสัมผัสของอนุภาคทั้งสอง ดังเช่น แรงผลักลึกลับ, ผลของแรงเหน็ดและแรงแอดฮีชัน [1,6]



รูปที่ 1 เรขาคณิตของการสัมผัสระหว่างอนุภาคกลม 2 อนุภาค

โดยข้อตกลงสำหรับวัสดุเม็ด แรงกดหรือแรงผลักร (Repulsion) ที่กระทำต่ออนุภาคเม็ดถือว่าเป็นบวก ส่วนแรงดึงจะถือว่าเป็นลบ ซึ่งในแบบจำลองของแรงสัมผัสที่ได้สร้างขึ้นก็เกิดจากผลรวมระหว่างแรง

กดหรือแรงผลักรและแรงโคเฮชัน ส่วนผลทางด้านพลศาสตร์ของไหลระหว่างการสัมผัสก็นำมาคิดรวมด้วยในรูปของแรงเหน็ด ในส่วนของแรงกดและผลทางด้านพลศาสตร์เราได้เลือกแบบจำลองแรงสัมผัสแบบสปริง-แดชพอตเชิงเส้น ซึ่งแปรผันโดยตรงกับความเหลื่อม และอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ δ เทียบกับเวลา $\dot{\delta}$ ตามลำดับ ในส่วนของแรงดึงที่เพิ่มขึ้นมาจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ของการสัมผัส เป็นแนวคิดเดียวกันกับ JKR [4] และเราสามารถแสดงได้ว่าพื้นที่ของการเหลื่อมกันนั้นแปรผันโดยตรงกับ $\sqrt{r\delta}$ โดย r คือรัศมีเอฟเฟกทีฟ (Effective radius) มีค่าเท่ากับ $\frac{r_i r_j}{r_i + r_j}$

ความสัมพันธ์เป็น $\gamma\sqrt{r\delta}$ ซึ่ง γ คือพลังงานโคเฮชันระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาแรงระหว่างผิวสัมผัสในแนวตั้งฉาก (f_n) จะได้ดังนี้ [1,6]

$$f_n = -k\delta - \alpha\dot{\delta} + \gamma\sqrt{r\delta} \quad (1)$$

โดยที่ k คือค่าความแข็งของผิวอนุภาคซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติกของอนุภาคและ α คือค่าสัมประสิทธิ์ของความเหน็ด ซึ่งแรงสัมผัสตั้งฉากในสมการ (1) จะถูกอ้างอิงในชื่อแบบจำลองแรงแอดฮีชันเรขาคณิต (Geometric adhesion, AG)

ในส่วนของแรงเสียดทาน (f_t) นั้น ได้นำกฎของคูลอมบ์ (Coulomb) มาใช้ แต่แรงเสียดทานเป็นฟังก์ชันกับความเร็วสัมพัทธ์ของการเลื่อนไถล (Sliding Relative Velocity) จึงได้นำสมการที่กล่าวข้างต้นมาประยุกต์ขึ้นใหม่ มีชื่อเรียกว่า Regularized Friction Law with adhesion ดังนี้ [6,7]

$$f_t = \min\{\gamma_s v_s, T_c\} \cdot \text{sign}(v_s) \quad (2)$$

โดยที่ γ_s คือ ค่าคงที่ของความเหน็ดในแนวสัมผัส, v_s คือ ความเร็วสัมพัทธ์ของการเลื่อนไถล และ T_c คือ แรงดิ่งวิกฤต

3. การเตรียมและทดสอบแบบจำลองเชิงตัวเลข

ในขั้นตอนของการเตรียมและทดสอบวัสดุเม็ดในการจำลองทางคอมพิวเตอร์นั้น ขั้นตอนการคำนวณทั้งหมดจะไม่คำนึงถึงแรงโน้มถ่วงของโลก สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน (รูปที่ 2) ดังนี้

3.1 การจัดวางและการบีบอัดอนุภาค

ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุเม็ดนี้ เป็นขั้นตอนแรกในการเตรียมวัสดุเม็ด อนุภาคกลมจำนวน 8000 อนุภาคถูกจัดวางเรียงกันโดยไม่เกิดการสัมผัสกัน อยู่ในภาชนะกลมแบบปิดขนาดใหญ่ (รูปที่ 2(ก)) จากนั้นทำการลดขนาดภาชนะกลมนี้เรื่อยๆ ทำให้อนุภาคกลมถูกบีบอัด จนกระทั่งพื้นที่ของภาชนะน้อยกว่าหรือเท่ากับพื้นที่ของอนุภาคกลม (รูปที่ 2(ข))

3.2 การคลายการบีบอัดอนุภาค

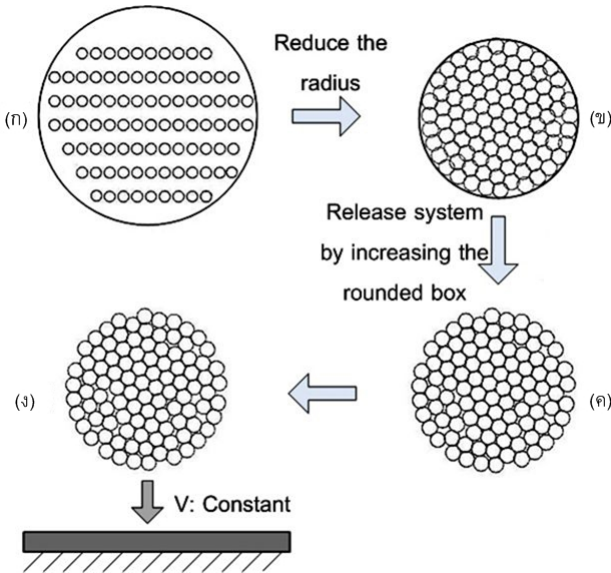
หลังจากอนุภาคถูกบีบอัดจนกระทั่งได้ระบบวัสดุเม็ดที่สมดุลภายใต้แรงกดทุกทิศทาง เพื่อให้ได้วัสดุเม็ดในสภาวะสมดุลทางสถิติศาสตร์ที่ปราศจากแรงกระทำจากภายนอก ภาชนะกลมที่บีบอัดอนุภาคจะถูกขยายตัวออกอย่างช้าๆ จนกระทั่งวัสดุเม็ดไม่ได้สัมผัสกับภาชนะกลม (รูปที่ 2(ค))

3.3 วัสดุเม็ดเข้าสู่สภาวะสมดุล

ขั้นตอนหลังจากในการคลายสถานะกวม เป็นการคำนวณเพื่อรววัสดุเม็ดจัดเรียงตัวเองจนอยู่ในสภาวะสมดุลทางสถิติศาสตร์ที่ปราศจากแรงกระทำภายนอก โดยในช่วงนี้สามารถทราบได้ถึงกาเกิดลักษณะของกลุ่มอนุภาคที่แตกต่างกัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงแอดเฮชันระหว่างอนุภาคและผลการกระจายตัวของรัศมีอนุภาคและเตรียมเข้าสู่ขั้นตอนของการทดสอบวัสดุเม็ดโดยการตกกระทบกับพื้นราบต่อไป

3.4 การทดสอบวัสดุเม็ด

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของความเร็วและการกระจายรัศมีอนุภาคของวัสดุเม็ด ที่มีต่อการเกิดและการแพร่กระจายรอยแตกของวัสดุเม็ด โดยกำหนดให้วัสดุเม็ดตกกระทบกับพื้นราบหนึ่งในทิศทางตั้งฉากในความเร็วที่แตกต่างกัน โดยไม่คิดผลแรงโน้มถ่วงของโลก และความแตกต่างรัศมีของอนุภาคไม่เกิน 2 เท่า (รูปที่ 2(ง))



รูปที่ 2 ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบหาพฤติกรรมการแตกตัวของวัสดุเม็ดภายใต้แรงกระทำ

4. ผลการศึกษา

4.1 การเกิดของกลุ่มอนุภาค

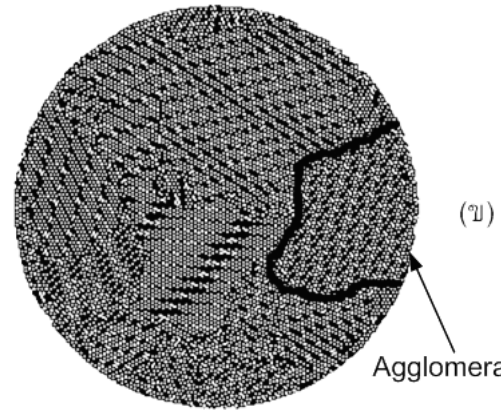
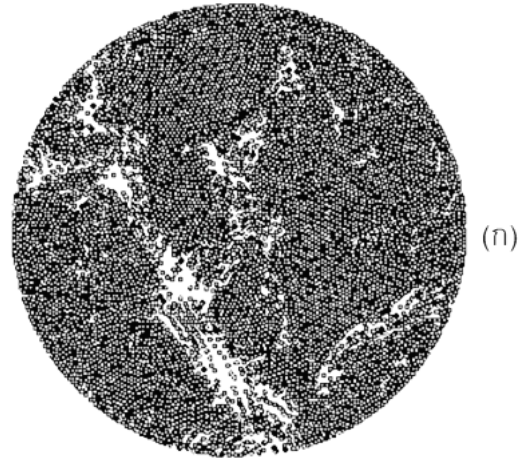
อิทธิพลที่ทำให้การเกิดกลุ่มอนุภาคแตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งออกได้แบ่ง 2 ปัจจัยด้วยกันคือ

4.1.1 พลังงานแอดเฮชัน

พลังงานแอดเฮชันเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การก่อตัวของอนุภาคในวัสดุเม็ดแตกต่างกัน โดยเฉพาะวัสดุเม็ดที่มีขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน ($\frac{r_{max}}{r_{min}} = 1$) จากผลการคำนวณทางตัวเลขพบว่าขนาดของกลุ่มอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อพลังงานแอดเฮชันระหว่างอนุภาคเพิ่ม

มากขึ้น ($\gamma \geq \frac{k}{50}$) และกลุ่มอนุภาคจะไม่เกิดหรือไม่เกาะตัวกันเมื่อค่า

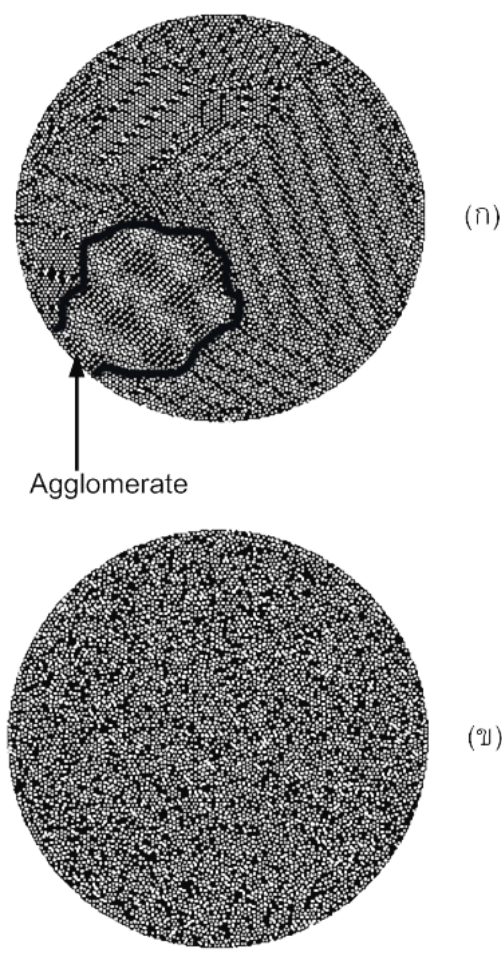
แอดเฮชันน้อย ($\gamma \leq \frac{k}{50}$) (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 ขนาดรัศมีอนุภาค $\frac{r_{max}}{r_{min}} = 1$, (a) $\gamma = \frac{k}{200}$, (b) $\gamma = \frac{k}{3.5}$

4.1.2 การกระจายรัศมีของอนุภาค

ขนาดรัศมีอนุภาคเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การก่อตัวของอนุภาคในวัสดุเม็ดแตกต่างกัน โดยเฉพาะวัสดุเม็ดมีค่าแอดเฮชันเท่ากันจากการคำนวณทางตัวเลขพบว่า การกระจายรัศมีของอนุภาคในวัสดุเม็ดมาก ($\frac{r_{max}}{r_{min}} \geq 1.1$) ทำให้เกิดแนวโน้มที่เป็นอุปสรรคต่อการเกิดกลุ่มอนุภาค กล่าวคือ ที่การกระจายของรัศมีอนุภาคน้อยกว่า 10% ($\frac{r_{max}}{r_{min}} \leq 1.1$) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับวัสดุเม็ดที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเดียว (Monodisperse) จะเห็นขนาดของกลุ่มอนุภาคอย่างชัดเจน ตรงข้ามกับวัสดุเม็ดที่ประกอบด้วยอนุภาคหลายขนาด ($\frac{r_{max}}{r_{min}} \geq 1.1$) การเกิดกลุ่มอนุภาคจะไม่เด่นชัด (รูปที่ 4(ข))



รูปที่ 4 วัสดุเม็ดมีค่า $\gamma = \frac{k}{10}$ (ก) ขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน
 (ข) ขนาดรัศมีอนุภาค $\frac{r_{max}}{r_{min}} = 1.5$

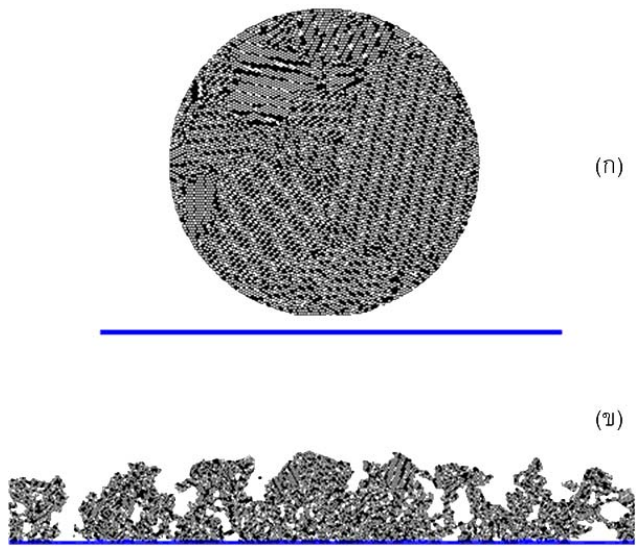
4.2 การทดสอบวัสดุเม็ดที่กระทบกับพื้นราบหนึ่ง

ในขั้นตอนการทดสอบวัสดุเม็ดตกกระทบกับพื้นราบหนึ่งในทิศทางตั้งฉาก โดยวัสดุเม็ดที่มีค่า $\gamma \leq \frac{k}{50}$ เป็นระบบที่มีค่าพลังงานแอตเซชันน้อย ซึ่งเกิดความยุ่งยากในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ เนื่องจากวัสดุเม็ดในสภาวะสมดุลทางสถิติศาสตร์แทบจะไม่สัมผัสกันเลย โครงสร้างของอนุภาคค่อนข้างกระจัดกระจาย ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงสนใจวัสดุเม็ดที่มีค่า $\gamma \geq \frac{k}{50}$

4.2.1 ผลของความเร็วของวัสดุเม็ดที่ตกกระทบกับพื้นราบหนึ่ง

วัสดุเม็ดกระทบกับพื้นราบหนึ่งที่มีค่าแอตเซชันเพียงค่าเดียว และขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน $\left(\frac{r_{max}}{r_{min}} = 1\right)$ นั้น ความเร็วที่แตกต่างกันมีผลทำให้ลักษณะและพฤติกรรมการแตกร้าวแตกต่างกันออกไป โดยที่ความเร็วในการกระทบกับพื้นราบมีค่าน้อยกว่าความเร็ววิกฤตที่สามารถทำให้วัสดุเม็ดเกิดการแตกหักได้ วัสดุเม็ดจะเกิดการเสียรูป

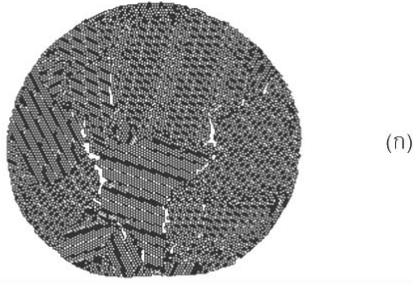
เล็กน้อยไปจนถึงการแตกร้าวระหว่างรอยต่อของกลุ่มอนุภาค (Agglomerate Joint) (รูปที่ 5(ก)) และที่ความเร็วในการกระทบกับพื้นราบมีค่ามากกว่าความเร็ววิกฤตที่วัสดุเม็ดสามารถรับแรงได้ วัสดุเม็ดจะแตกออกจากกัน และจะแตกกระจายเป็นชิ้นเล็กๆเมื่อความเร็วของวัสดุเม็ดก่อนการกระทบสูงมากขึ้น (รูปที่ 5(ข))



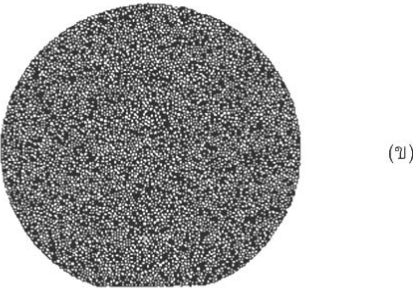
รูปที่ 5 วัสดุเม็ดหลังการกระทบกับพื้นราบมีค่า $\gamma = \frac{k}{10}$,
 $\frac{r_{max}}{r_{min}} = 1$ ที่ความเร็วในการกระทบ (ก) 0.1 m/s (ข) 5 m/s

4.2.2 ขนาดของอนุภาค

กำหนดให้ความเร็วของวัสดุเม็ดก่อนการกระทบกับพื้นราบหนึ่งเท่ากันและคิดค่าแอตเซชันเพียงค่าเดียว เมื่อขนาดรัศมีอนุภาคแตกต่างกันไม่เกิน 10% $\left(\frac{r_{max}}{r_{min}} \leq 1.1\right)$ วัสดุเม็ดจะมีลักษณะแข็งเปราะ (Brittle) กล่าวคือ เมื่อวัสดุเม็ดกระทบกับพื้นราบ การแตกร้าวของอนุภาคส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างกลุ่มอนุภาค และถ้าความเร็วในการกระทบของวัสดุเม็ดมีค่ามากกว่าความเร็ววิกฤต วัสดุเม็ดจะแตกออกจากกันเป็นชิ้นเล็กๆ (รูปที่ 6(ก)) ซึ่งลักษณะการแตกร้าวจะแตกต่างจากขนาดรัศมีอนุภาคแตกต่างกันเกิน 10% $\left(\frac{r_{max}}{r_{min}} \geq 1.1\right)$ วัสดุเม็ดจะมีลักษณะอ่อน (Ductility) โดยวัสดุเม็ดจะเกิดการเสียรูปแต่จะไม่เกิดการแตกร้าวระหว่างกลุ่มอนุภาค แต่ถ้าความเร็วในการกระทบของวัสดุเม็ดมีค่ามากกว่าความเร็ววิกฤต วัสดุเม็ดจะแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆเช่นกัน (รูปที่ 6(ข))



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 วัสดุเม็ดหลังการกระทบกับพื้นราบที่ความเร็ว 1m/s, $\gamma = \frac{k}{3.5}$

(ก) ขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน (ข) ขนาดรัศมีอนุภาค $\frac{r_{\max}}{r_{\min}} = 2$

5. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาผลของแรงแอตเทคชั่นระหว่างอนุภาคและการกระจายตัวของรัศมีอนุภาคที่มีต่อการเกิดกลุ่มอนุภาค ผลของความเร็วและการกระจายตัวของรัศมีอนุภาคที่มีต่อการเกิดและการแพร่กระจายรอยแตกของวัสดุเม็ดโดยวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุลนั้น ผลที่ได้รับเป็นไปตามการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์พลังงานแอตเทคชั่นที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดกลุ่มอนุภาคในวัสดุเม็ดและจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อค่าแอตเทคชั่นระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะขนาดรัศมีของอนุภาคแตกต่างกันไม่เกิน 10% ทำให้การเกิดกลุ่มของอนุภาคเกิดขึ้นชัดเจน แต่ถ้าขนาดรัศมีของอนุภาคแตกต่างกันเกิน 10% การเกิดกลุ่มอนุภาคจะไม่เด่นชัด อีกทั้งความเร็วในการกระทบกับพื้นราบหนึ่งที่น้อยกว่าความเร็ววิกฤต วัสดุเม็ดจะเสียรูปเล็กน้อย โดยเฉพาะกรณีที่ขนาดรัศมีของอนุภาคแตกต่างกันไม่เกิน 10% วัสดุเม็ดจะแตกกระจายตามรอยต่อของอนุภาค และในกรณีที่ขนาดรัศมีอนุภาคแตกต่างกันเกิน 10% การเสียรูปของวัสดุเม็ดจะมีมากกว่า ที่ความเร็วก่อนการกระทบของวัสดุเม็ดเท่ากัน ถ้าความเร็วในการกระทบของวัสดุเม็ดมากกว่าความเร็ววิกฤต วัสดุเม็ดจะแตกกระจายออกเป็นชิ้นเล็กๆ และในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาหาความเร็ววิกฤตของวัสดุเม็ดที่เป็นฟังก์ชันกับค่าแอตเทคชั่นได้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

รายการสัญลักษณ์ (พื้นฐานสำหรับแบบจำลอง)

- δ ระยะเหลื่อมของสองอนุภาคที่กระทบกัน (Overlap)
- $\dot{\delta}$ อนุพันธ์อันดับหนึ่งของ δ เมื่อเทียบกับเวลา
- r_i รัศมีของอนุภาค
- $2a$ พื้นที่ของการสัมผัส
- r รัศมีเอฟเฟกทีฟ (Effective radius)
- γ พลังงานโคเฮชันหรือพลังงานผิวสัมผัส
- k ค่าความแข็งของผิวอนุภาค
- α ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืด
- f_n แรงระหว่างผิวสัมผัสในทิศทางตั้งฉาก
- f_t แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส
- γ_s ค่าคงที่ของความหนืดในแนวสัมผัส
- V_s ความเร็วสัมพัทธ์ของการเคลื่อนที่
- m มวลเอฟเฟกทีฟของอนุภาคที่กระทบกัน
- t เวลา (วินาที)
- t_c เวลาของการเกิดการสัมผัสหรือการกระทบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] อิทธิชัย ปรีชาวุฒิปงศ์, สายฝน จาก (2003). ค่าสัมประสิทธิ์เรสตีติวชันในการกระทบวัตถุกลม 2 ลูกโดยคิดอิทธิพลของแรงแอตเทคชั่นระหว่างผิวสัมผัส. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [2] Allen, M.P., Tildesley, D.J., (1989). Computer Simulation of Liquids. Oxford University Press.
- [3] Johnson, K.L., (1999). Contact Mechanics. Emeritus Professor of Engineering University of Cambridge.
- [4] Johnson, K.L., Kendall, K., Robert, A.D., (1971). Surface energy and the contact of elastic solids. Proc. Royal Soc., 324, 301-313.
- [5] Luding, S. Clement, E., Blumen, A., Rajchenbach, J. and Duran, J., (1994). Onset of convection in Molecular dynamics simulation of grains. The American Physical Society, 50 (3), 1762-1765.
- [6] Preechawuttipong, I., Ingsuwan, P., Peyroux, R., (2006). Crack nucleation and propagation in rounded cohesive granular media. Strength, Fracture and Complexity 00, 1-8.
- [7] Schafer, J., Dippel, S. and Wolf, D.E., (1996). Force Scheme in Simulation of Granular Materials, Journal of Physical 1, 5-20.
- [8] Thornton, C., Ciomocos, M.T., Adams, (1999). Numerical simulation of agglomerate impact breakage. Powder Technology, 105, 74-82.
- [9] Thornton, C., Ciomocos, M.T. & K.K. Yin, (1997). Fracture of particulate solids. Powders & Grain 97, 131-134.