# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุเม็ดคือวัสดุที่ประกอบด้วยอนุภาคเล็ก ๆ ที่พฤติกรรมทางกลศาสตร์ระดับมหภาคขึ้นอยู่กับแรงสัมผัสระหว่างอนุภาค ปัจจุบันในอุตสาหกรรมต่างๆนั้นวัสดุเม็ดได้เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมอาหาร และเภสัชกรรม เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการผลิตหรือการลำเลียงแทบเป็นไปไม่ได้ที่วัสดุเม็ดจะไม่เกิดการกระทบกัน ไม่ว่าจะกระทบกับตัววัสดุเม็ดด้วยกันเองหรือกระทบกับที่ลำเลียงวัสดุเม็ด ดังนั้นการศึกษาและทำความเข้าใจคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเม็ดจึงเป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมทางกายภาพที่มีอิทธิพลต่อการเกิดและการแตกร้าวของวัสดุเม็ด และปัจจัยโดยตรงที่มีผลต่อความแข็งแรงในวัสดุเม็ด

พฤติกรรมของวัสดุเม็ดได้มีการทำการศึกษาอย่างแพร่หลายทั้งทางการทดสอบ (Experiment) และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) ในการศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคด้วยวิธีการทดสอบเป็นวิธีการที่ควบคุมได้ยาก ทำให้เกิดความยุ่งยากในการศึกษาวัสดุเม็ดเป็นอย่างมาก ดังนั้นการคำนวณเชิงตัวเลขจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ทำให้ลดความยุ่งยากในการศึกษาวัสดุเม็ด ซึ่งในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้เป็นเครื่องมือช่วยในการอำนวยความสะดวกและใช้ควบคุมเงื่อนไขและตัวแปรในการทำงาน ดังนั้นคอมพิวเตอร์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่นำมาใช้ในการทดสอบหรือทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเม็ด

การจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาวัสดุเม็ดนั้นในปัจจุบันนิยมใช้กันอยู่ 2 วิธีคือ วิธีพลศาสตร์ของการสัมผัส (Contact Dynamics) และวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุล (Molecular Dynamics) สำหรับวิธีการพลศาสตร์ของการสัมผัสนั้นจะใช้ความรู้ ความเข้าใจและประสบการณ์ในการทำงานด้านนี้มาเป็นอย่างมาก ส่วนวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุลเหมาะสำหรับผู้ที่เริ่มต้นที่จะทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เนื่องจากง่ายต่อการทำความเข้าใจในการวิเคราะห์ (Analytic) และง่ายต่อการพัฒนาแบบจำลอง ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีพลศาสตร์ของโมเลกุลมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมและการแพร่กระจายการแตกร้าวในวัสดุเม็ดแบบโคเฮซีฟภายใต้แรงกระแทกในงานวิจัยนี้

ในการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของวัสดุทางคอมพิวเตอร์นั้นได้ถูกนำมาใช้มากกว่า 40 ปี การศึกษาวัสดุเม็ดที่สำคัญแรกสุดโดย Alder and Wimwright (1959)ได้ศึกษาการยืดหยุ่นแบบสมบูรณ์ (Perfectly Elastic) ในช่วงการกระทบกันของอนุภาคโดย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

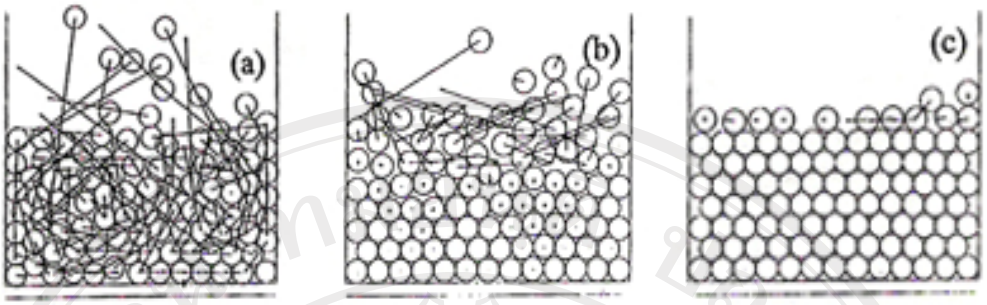
กำหนดให้อนุภาคเคลื่อนที่ความเร็วคงที่ ต่อมาได้มีการศึกษาใช้โดยวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุลอีกมากมาย อาทิเช่น Thornton, C., Ciomocos, M.T., Adams (1999) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวของวัสดุเม็ด โดยกำหนดให้วัสดุเม็ดตกลงมาในแนวดิ่งกระทบกับพื้นราบนิ่งในความเร็วที่แตกต่างกันและคิดผลของแรงแอดเฮซีฟระหว่างอนุภาคเพียงค่าเดียว แต่ในงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับวัสดุเม็ดที่คิดผลของแรงแอดเฮชันที่ผิวสัมผัสยังไม่เคยมีการทำการศึกษาอย่างเป็นระบบ (Systematic) ดังนั้นการศึกษาวัสดุเม็ดที่มีค่าแอดเฮชันและขนาดรัศมีอนุภาคที่หลากหลายทำให้ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้ที่มีผลต่อพฤติกรรมของวัสดุเม็ดได้ชัดเจนและลึกซึ้งยิ่งขึ้น สิ่งที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะนำมาเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาโครงสร้างของวัสดุเม็ดที่มีค่าพลังงานแอดเฮชัน ($\gamma$) แตกต่างกัน โดยอยู่ในรูปของพลังงานแอดเฮชันต่อความแข็งผิวของอนุภาค $(\gamma/k)$ และกำหนดรัศมีของอนุภาคที่แตกต่างกันโดยวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุล วัสดุเม็ดกระทบกับพื้นราบนิ่งในทิศทางตั้งฉากที่ความเร็วสัมพัทธ์แตกต่างกัน ค่าแอดเฮชันและขนาดรัศมีอนุภาคที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อการเกิดกลุ่มอนุภาค ส่วนความเร็วก่อนการกระทบจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่สนับสนุนการเกิดและการแพร่กระจายรอยแตกของวัสดุเม็ด

**1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง**

S. Luding et al. (1994) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดกลมแบบ 2 มิติโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของโมเลกุล กำหนดให้มีวัสดุเม็ดกลมประกอบด้วยอนุภาคกลมจำนวน 100 เม็ด ที่มีค่าสัมประสิทธิ์เรสติติวชัน (Coefficient of Restitution, $\varepsilon_n$) = 0.9 อนุภาคกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $(d_o)$= 2 mm บรรจุอยู่ในกล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความยาว $L = 13d_o$ ที่มีความสูงไม่จำกัดมีลักษณะดังรูป 1.1 และคิดผลของความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง(Gravitational Acceleration, g) การสั่นสะเทือนเกิดในแนวตั้งฉากกับพื้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

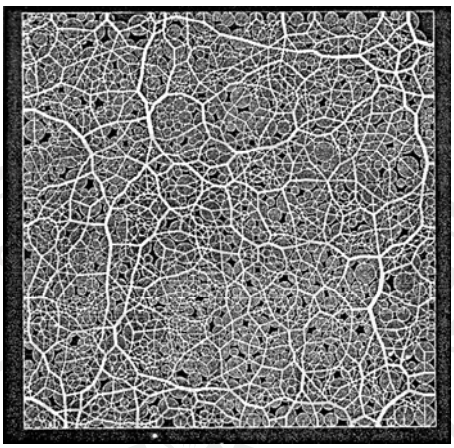



รูป 1.1 การเคลื่อนที่ของอนุภาคกลมในกล่องสี่เหลี่ยม โดยที่ (a) ที่ $t_c$ = 0.222 cs., (b) $t_c$ = 0.1 cs. และ (c) $t_c$ = 0.01 cs. (S. Luding et al, 1994)

ในการทดสอบนี้จะทำการศึกษาการพาของอนุภาคกลมที่มีผลต่อเวลาของการสัมผัสและความถี่ของการสั่นต่อความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง ลักษณะเวลาของการเกิดการสัมผัส(Time of Contact, $t_c$ ) ตั้งแต่ 0.00316 cs. ถึง 0.316 cs. (0.01 Sec = 1 cs.) โดยจะมีการเคลื่อนที่ของอนุภาคกลมที่มีลักษณะต่างกันออกไป จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ค่าความแรงของการพา (Convection Strength, $J$ ) จะขึ้นอยู่กับเวลาของการเกิดการสัมผัส โดยเวลาของการเกิดการสัมผัสที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแรงของการพามีค่าเพิ่มขึ้น อนุภาคกลมจะเคลื่อนที่แบบฉับพลันและรุนแรงมากขึ้น

F.Rajai et al. (1996) ศึกษาวิธีการกระจายตัวทางสถิติของแรงในวัสดุเม็ดแบบ 2 มิติโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของการสัมผัส กำหนดให้อนุภาคกลมขนาดต่างกันมีจำนวนที่แตกต่างกัน 4 ค่า อนุภาคเหล่านี้ถูกบรรจุอยู่ในกล่องสี่เหลี่ยมที่มีผนังแบบแข็งเกร็งทั้งสี่ด้าน ทำการบีบอัดอนุภาคกลมจากผนังกล่องด้านบนในแนวดิ่ง และเส้นโครงข่ายของแรงสัมผัสตั้งฉากจะมีความหนามากขึ้นเมื่อแรงกระทำระหว่างอนุภาคมากขึ้นตามลำดับ จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า พฤติกรรมของแรงสัมผัสตั้งฉากระหว่างอนุภาคสามารถศึกษาโครงข่ายของแรงสัมผัสตั้งฉาก ได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ โครงข่ายหลักของวัสดุเม็ดจะเป็นโครงข่ายที่รับแรงกดจากภายนอกซึ่งเป็นแรงจากกล่องที่บีบอัดอนุภาค สังเกตได้จากเส้นของโครงข่ายที่มีขนาดหนา และมีจำนวนน้อยกว่า 40 % ของโครงข่ายทั้งหมด ส่วนโครงข่ายย่อยแสดงถึงอนุภาคที่เกาะตัวกันอยู่ในสภาวะสมดุลทางสถิตยศาสตร์เพื่อให้สามารถยึดเกาะตัวเองได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับแรงกระทำจากภายนอก เส้นโครงข่ายนี้จะมีลักษณะเล็กกว่าโครงข่ายหลักอย่างเห็นได้ชัด และมีจำนวนมากกว่า 60 % ของโครงข่ายทั้งหมด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

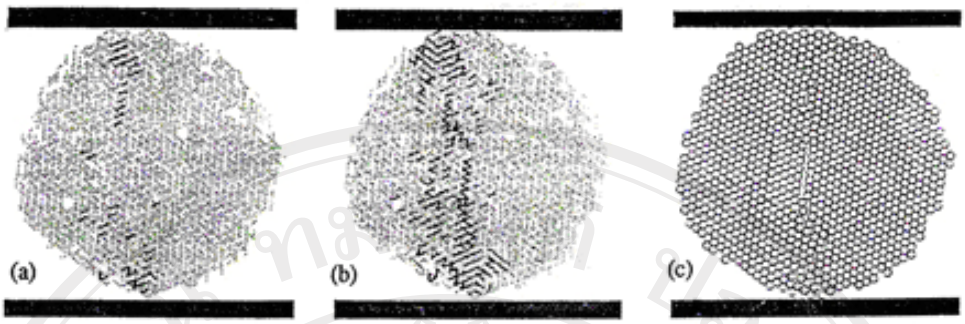


รูป 1.2 โครงข่ายของแรงสัมผัสตั้งฉาก โดยที่เส้นการสัมผัสของแรงจะถูกลากผ่านระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (F.Rajai et al. 1996)

J. Schafer et al. (1996) ได้อธิบายถึงการจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิธีพลศาสตร์ของโมเลกุล ซึ่งวัตถุประสงค์ที่สำคัญคือ สรุปทฤษฎีต่างๆที่ใช้ในการพิจารณาและผลการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับการกระทบกันอย่างอิสระของอนุภาคกลม, เปรียบเทียบกฎของแรงต่างๆรวมถึงข้อเสนอแนะในการเลือกใช้กฎของแรงที่เหมาะสมกับการทดสอบนั้นๆ และอธิบายถึงปัญหาทั่วไปที่เกิดขึ้นในการจำลองวัตถุทรงกลมที่ใช้กฎของแรงต่าง ๆ จากข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการเลือกทฤษฎีที่เหมาะสมมาใช้ในการจำลองนั้นขึ้นอยู่กับรูปร่าง, ความหนาแน่น, ความเร็วในการสัมผัส ฯลฯ โดยแนะนำให้ทดสอบจากหลายรูปแบบ และหลายทฤษฎีถ้าต้องการหาการทดสอบที่เหมาะสมที่สุด

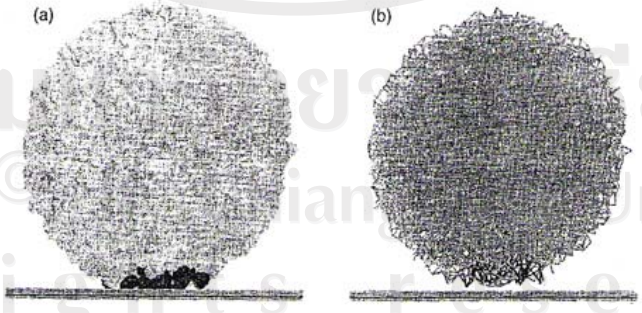
C. Thornton et al. (1997) ได้ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อหาพฤติกรรมการแตกร้าวของวัสดุเม็ด โดยวิธีการกดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diametrical Compression) และกำหนดให้วัสดุเม็ดกลมถูกแผ่นเรียบ (Platen) ขนานกันบีบอัดทั้ง 2 ด้านทั้งด้านบนและด้านล่างตามแนวดิ่ง ดังรูป 1.3 ในส่วนของการจำลอง 2 มิติจะทดสอบวัสดุเม็ดที่มีขนาดอนุภาคเดียว (Monodisperse) และการจำลองแบบ 3 มิติจะทดสอบวัสดุเม็ดที่มีขนาดรัศมีอนุภาคแตกต่างกัน (Polydisperse) โดยทำการบีบอัดด้วยแผ่นเรียบทั้ง 2 ด้าน การจำลองทางคอมพิวเตอร์ทั้ง 2 แบบนั้นสามารถทราบถึงแรงกระทำบนแผ่นราบที่เพิ่มขึ้น, ลักษณะและพฤติกรรมการแพร่กระจายการแตกร้าวของอนุภาคได้ แต่การจำลองแบบ 3 มิตินั้นจะแสดงพฤติกรรมได้ซับซ้อนกว่า จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการแตกร้าวของวัสดุเม็ดจากการบีบอัดของแผ่นเรียบจะเกิดขึ้นตามแนวตั้งฉากกับพื้นเรียบผ่านแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดเป็นลำดับแรก วัสดุเม็ดจะแตกร้าวมากขึ้นตามความเครียดที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเม็ด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved




รูป 1.3 Diametrical Compression แบบ 2 มิติ โดยที่ (a), (b) แสดงแบบช่องแลตทิซ (Space Lattice) ที่ความเครียด 0.03, 0.045 % ตามลำดับ และ (c) แสดงกลุ่มอนุภาคที่ความเครียด 0.77% (C. Thornton et al., 1997)

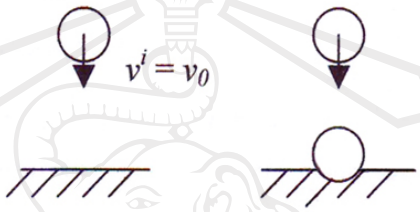
C. Thornton et al (1999) ได้ทำการจำลองความเสียหายของวัสดุเม็ดจากแรงกระแทกด้วยวิธีพลศาสตร์ของวัสดุเม็ด (Granular Dynamics) โดยให้วัสดุเม็ดจำนวนอนุภาคกลม 4,000 อนุภาค ประกอบด้วย 7 ขนาดแตกต่างกันในช่วง 60 ± 3 μm ตกลงมากระทบกับจุดที่ระบุไว้อย่างอิสระดังรูป 1.4 กำหนดความเร็วในการกระแทกแตกต่างกัน 5 ค่าตั้งแต่ 0.1-0.9 m/s โดยใช้คอมพิวเตอร์จำลองการเสียหายของวัสดุเม็ด จากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าความเร็วเป็นปัจจัยที่สำคัญในการแตกร้าวของวัสดุเม็ด ความเร็วในการกระแทกพื้นเรียบที่สูงขึ้นทำให้อนุภาคที่เสียหาย, จำนวนเศษของอนุภาคที่หลุดออกมามีมากขึ้นตามลำดับ และสังเกตได้ว่าลักษณะการแตกร้าวของวัสดุเม็ดนั้นเป็นรอยในแนวตั้งฉากกับพื้นเรียบ




รูป 1.4 การจำลองความเสียหายของวัสดุเม็ดที่ความเร็วในการกระแทก 0.1 m/s โดยที่ (a) แสดงลักษณะของวัสดุเม็ด (สีดำคือกลุ่มอนุภาคที่เสียหาย) และ (b) แสดงภาพ แบบ Space Lattice (สีดำคืออนุภาคที่แตกออกจากกัน) (C. Thornton et al., 1999)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อิทธิชัย ปรีชาวุฒิพงศ์ และสายฝน จาค (2003) ได้ศึกษาผลของแรงแอดเฮซีฟระหว่างอนุภาคที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์เรสติติวชันระหว่างวัตถุกลม 2 ลูกที่เกิดการกระทบกันโดยวิธีการจำลองแบบเชิงตัวเลขด้วยวิธีการคำนวณแบบพลศาสตร์ของโมเลกุล และใช้แบบจำลองทางตัวเลขของการสัมผัสอย่างง่ายที่คำนึงถึงแรงแอดเฮชัน พร้อมด้วยแบบแผนการคำนวณแบบคาดการณ์-แก้ไข (Predictor-Corrector Scheme), ใช้ชุดสัมประสิทธิ์ตัวแก้ไขของเกียร์ (Gear) สำหรับการเคลื่อนที่ของนิวตัน ดังรูป 1.5

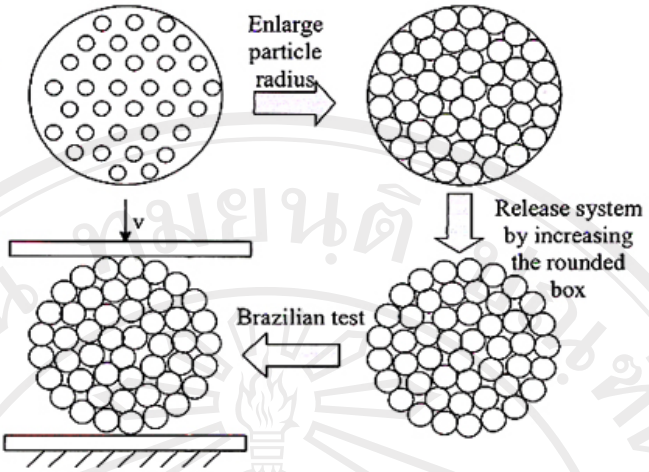



รูป 1.5 ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์เรสติติวชัน
(อิทธิชัย ปรีชาวุฒิพงศ์ และสายฝน จาค, 2003)

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า พลังงานแอดเฮชันที่เปลี่ยนไประหว่างการสัมผัสนั้น มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์เรสติติวชันและเวลาของการสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปจากวัสดุเม็ดที่ไม่คิดผลของแรงแอดเฮชัน พลังงานแอดเฮชันที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์เรสติติวชันมีค่าลดลง ความเร็วสัมพัทธ์ก่อนการกระทบที่เปลี่ยนไปมีผลให้ค่าสัมประสิทธิเรสติติวชันเปลี่ยนไปเช่นกัน

I. Preechawuttipong et al. (2005) ได้ทำการศึกษาการแพร่กระจายการแตกร้าวของวัสดุเม็ดที่มีอนุภาคลักษณะกลมแบบโคเฮซีฟ โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์แบบ 2 มิติด้วยวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุล ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบที่มีชื่อว่า Brazilian Test กำหนดให้มีอนุภาคจำนวน 8,000 อนุภาค, มีขนาดเริ่มต้นที่รัศมี 1.5 mm , สุ่มกระจายอนุภาคโครงข่ายแบบ 3 เหลี่ยม (Triangular Network) ที่ไม่เชื่อมต่อกันและไม่คิดผลของแรงโน้มถ่วงของโลก ขนาดสุดท้ายของอนุภาคมีค่าเท่ากับ 3 mm แผ่นเรียบทำการบีบอัดวัสดุเม็ดทั้ง 2 ด้านขนานกันทั้งด้านบนและด้านล่าง ออกแรงกดจากแผ่นราบด้านบนตามแนวดิ่งด้วยความเร็วคงที่จนกระทั่งมีความเครียดตามแกน y = 5 % ดังรูป 1.6 ซึ่งผลจากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าค่าพลังงานแอดเฮซีฟระหว่างอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลทำให้พฤติกรรมการเกิดของกลุ่มอนุภาค (Agglomerate) ในวัสดุเม็ดและลักษณะการแพร่กระจายการแตกร้าวของอนุภาคเปลี่ยนไป และวัสดุเม็ดจะมีพฤติกรรมที่เปราะยิ่งขึ้นเมื่อค่าแอดเฮชันเพิ่มขึ้น

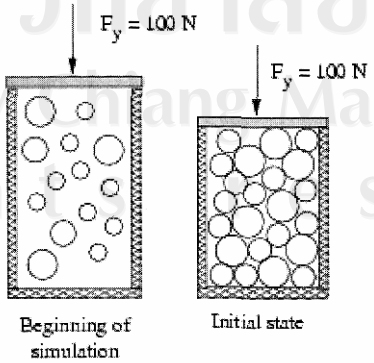
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved




รูป 1.6 ขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธี Brazilian Test (I. Preechawuttipong et al., 2005)

I. Preechawuttipong et al. (2007) ได้ศึกษาอิทธิพลของค่าโคเฮชันที่มีผลต่อวัสดุเม็ดแบบ 2 มิติ โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์แบบ 2 มิติด้วยวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุล กำหนดให้มีอนุภาคกลมจำนวน 4,000 อนุภาค อยู่ภายใต้การบีบอัดทุกทิศทางเพื่อแสดงถึงลักษณะพื้นผิวและโครงข่ายของแรงระหว่างอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับของค่าแอดเฮชัน จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า เมื่ออนุภาคมีค่าแอดเฮชันต่ำ จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยของอนุภาคและแรงสัมผัสดึงระหว่างอนุภาคจะมีค่าน้อย และจำนวนการสัมผัสเฉลี่ยของอนุภาคและแรงสัมผัสดึงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าแอดเฮชันที่สูงขึ้น และในกรณีค่าแอดเฮชันสูงจะเกิดแรงสัมผัสดึงระหว่างอนุภาคมากขึ้นเนื่องจากโครงสร้างแบบ Self Stress ซึ่งเป็นการสร้างความสมดุลระหว่างกับแรงกดจากภายนอกและแรงสัมผัสดึงซึ่งเป็นแรงต้านทานแรงกดจากภายนอก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved




รูป 1.7 แบบแผนของการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบเชิงตัวเลข (I. Preechawuttipong et al., 2007)

ในการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเม็ดตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นการศึกษาแบบคงที่ (Static) และแบบกึ่งคงที่ (Quasi Static) และที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาวัสดุเม็ดแบบพลศาสตร์ (Dynamics) และศึกษาผลของอัตราส่วนการกระจายรัศมีของอนุภาค $(r_{max}/r_{min})$ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยจะศึกษาความสัมพันธ์ของค่าแอดเฮชันและอัตราส่วนการกระจายรัศมีของอนุภาคที่มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดกลุ่มอนุภาคและการแตกร้าวของอนุภาค ความเร็วของวัสดุเม็ดในการกระทบกับพื้นเรียบที่มีผลต่อลักษณะและการแพร่กระจายรอยแตกร้าวของอนุภาค

**1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย**

1.3.1 ศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์และการแพร่กระจายการแตกร้าวในวัสดุเม็ดที่คิดผลของแรงแอดเฮชันภายใต้การกระแทกโดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุล

1.3.2 ศึกษาอัตราส่วนการกระจายรัศมีของอนุภาคที่มีผลต่อการเกิดกลุ่มอนุภาคและการแพร่กระจายการแตกร้าวในวัสดุเม็ด

1.3.3 ศึกษาความเร็วของวัสดุเม็ดในการกระทบพื้นเรียบที่มีผลต่อการเกิดและการแพร่กระจายการแตกร้าวในวัสดุเม็ด

**1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย**

1.4.1 สามารถเข้าใจในลักษณะการแตกร้าวและการแพร่กระจายของรอยแตกในวัสดุเม็ดได้มากขึ้น

1.4.2 สามารถเข้าใจถึงอิทธิพลของแรงแอดเฮชัน และการกระจายรัศมีของอนุภาคที่มีผลต่อการเกิดกลุ่มอนุภาคและลักษณะการแตกร้าวในวัสดุเม็ด

1.4.3 สามารถนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในงานเกี่ยวกับการไหลของวัสดุเม็ดในงานการผลิตและในงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องได้

**1.5 ขอบเขตของการวิจัย**

1.5.1 ใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการศึกษาด้วยวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุล

1.5.2 การจำลองทางคอมพิวเตอร์เป็นแบบ 2 มิติ และไม่คำนึงถึงผลของแรงโน้มถ่วงของโลก

1.5.3 กำหนดให้วัสดุเม็ดประกอบด้วยอนุภาคกลมจำนวน 8,000 อนุภาค

1.5.4 วัสดุเม็ดเคลื่อนที่เข้าหาพื้นเรียบในทิศทางตั้งฉากกัน โดยใช้ความเร็วก่อนการกระทบพื้นเรียบแตกต่างกัน 9 ค่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

1.5.5 ค่าแอดเฮชันที่ผิวสัมผัสแตกต่างกัน 9 ค่า โดยที่ค่าแอดเฮชันเหล่านั้นทำให้เกิดระยะเหลื่อมสูงสุด $(\delta_{\max})$ ไม่เกิน 5 %

1.5.6 การกระจายขนาดรัศมีของอนุภาคเป็นแบบการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) โดยกำหนดอัตราส่วนของรัศมีอยู่ในช่วง $\frac{r_{\max}}{r_{\min}} = 1$ ถึง $\frac{r_{\max}}{r_{\min}} = 2$ อัตราส่วนรัศมีรวม 5 ค่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved