ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ก

ศัพท์บัญญัติ อังกฤษ – ไทย ที่ใช้ในงานวิจัย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ก

คำเทียบคำอังกฤษ – คำไทย และอ้างอิง

คำอังกฤษ	คำไทย	อ้างอิงจาก
Adhesion	ค่าแอดเฮชัน	-
Adhesive Force	แรงแอดเฮซีฟ	-
Agglomerate	กลุ่มอนุภาค	-
Agglomerate Joint	รอยต่อของกลุ่มอนุภาค	-
Analytic	วิเคราะห์	ศัพท์วิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Brittle	แข็งเปราะ	-
Centroid	เซนทรอยด์	ศัพท์วิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Coefficient of Restitution	ค่าสัมประสิทธิ์เรสติติวชัน	-
Cohesion	วัสดุเม็ดแบบโคเฮชัน	-
Compression	การอัด	ศัพท์วิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Compressive Force	แรงอัด	-
Contact Direction	ทิศทางการสัมผัส	-
Contact Dynamic	พลศาสตร์ของการสัมผัส	-
Contact Force	แรงสัมผัส	-
Convection Strength	ค่าความแรงของการพา	-
Coordination Number	จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาค	-
Couple	คู่ควบ	ศัพท์วิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Crystallization	ผลึก	-
Direction of Contacts	ทิศทางเชิงมุมของการสัมผัส	-
Distribution	การแจกแจง	ศัพท์บัญญัติ อังกฤษ-ไทย ไทย-อังกฤษ
Ductility	ความเหนียว	ศัพท์วิทยาการวิศวกรรมโยธา
Dynamics Effect	ผลของแรงทางพลศาสตร์	-
Experiment	การทดลอง	ศัพท์วิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

คำเทียบคำอังกฤษ – คำไทย และอ้างอิง (ต่อ)

คำอังกฤษ	คำไทย	อ้างอิงจาก
Finite Difference	วิธีผลต่างอันตะ	ศัพท์คณิตศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Force	แรง	ศัพท์คณิตศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Force Organization	การจัดเรียงของแรง	-
Frictional Contacts	การสัมผัสเชิงเสียดทาน	-
Geometrical Adhesion	แอดเฮชันสัณฐาน	-
Geometry	เรขาคณิต	ศัพท์คณิตศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Granular Dynamics	พลศาสตร์ของวัสดุเม็ด	-
Gravitational Acceleration	ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง	-
Impulsive Force	แรงดล	ศัพท์วิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Linear Spring–Dashpot	สปริง-แดชพอตเชิงเส้น	-
Linear Tangential Spring	สปริงแทนเจนต์เชิงเส้น	-
Maximum Overlap	ระยะเหลื่อมสูงสุด	-
Molecular Dynamic	พลศาสตร์ของโมเลกุล	-
Monodisperse	ขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน	-
Non-Cohesion	วัสดุเม็ดแบบแห้ง	-
Normal Impact	การกระแทกแนวตั้งฉาก	-
Numerical Analysis	การวิเคราะห์เชิงตัวเลข	ศัพท์วิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Numerical Sample Preparation	การเตรียมตัวอย่างวัสดุเชิงตัวเลข	-
Oblique	เอียง	ศัพท์วิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Overlap	การเหลื่อม	-
Perfectly Elastic	การยืดหยุ่นแบบสมบูรณ์	-
Platen	แผ่นเรียบ	-
Polydisperse	ขนาดรัศมีอนุภาคแตกต่างกัน	-

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

คำเทียบคำอังกฤษ – คำไทย และอ้างอิง (ต่อ)

คำอังกฤษ	คำไทย	อ้างอิงจาก
Quasi Static	กึ่งคงที่	-
Reduced Mass	มวลลดส่วน	-
Repulsive Force	แรงผลัก	ศัพท์วิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Rolling Friction Force	แรงต้านทานการหมุน	-
Self Stress	ความเค้นภายในวัสดุ	-
Separation	การแยกกัน	ศัพท์บัญญัติ อังกฤษ-ไทย ไทย-อังกฤษ
Space Lattice	ช่องแลตทิซ	-
Static	คงที่	ศัพท์บัญญัติ อังกฤษ-ไทย ไทย-อังกฤษ
Static State	สถานะคงที่	-
Strain	ความเครียด	ศัพท์วิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Systematic	ทำการศึกษาอย่างเป็นระบบ	ศัพทานุกรมไทย
Tangential Force	แรงเสียดทาน	-
Tensile	ดึง	ศัพท์วิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Tension	แรงดึง	ศัพท์วิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
Testing Phase	ขั้นตอนการทดสอบ	-
Texture	ลักษณะวัตถุ	ศัพท์วิทยาการวิศวกรรมโยธา
Time of Contact	เวลาของการสัมผัส	-
Time Step	ช่วงเวลาของการคำนวณ	-
Triangular Network	โครงข่ายแบบ 3 เหลี่ยม	-
Underdamping	อันเดอร์แดมปิง	-
Viscous Force	แรงหนืด	-
Rolling Friction Force	แรงต้านทานการหมุน	-

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงภาพรูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน

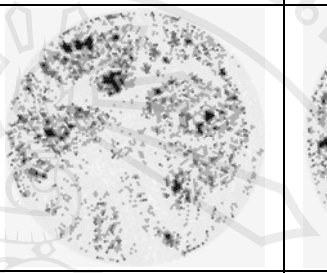
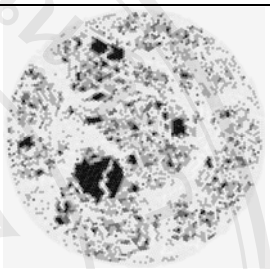
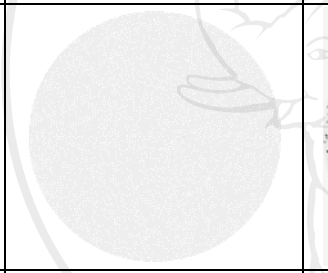
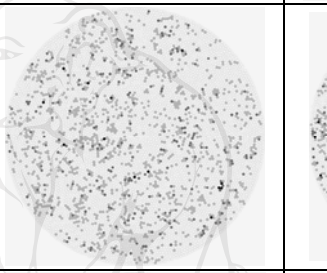
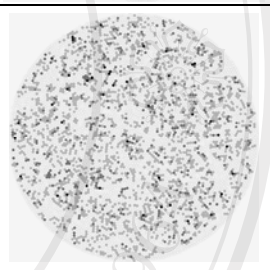
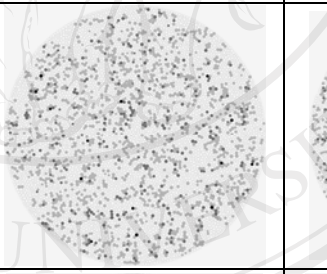
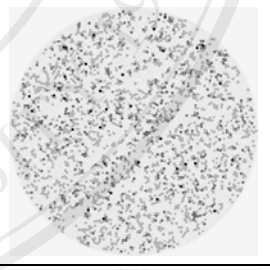
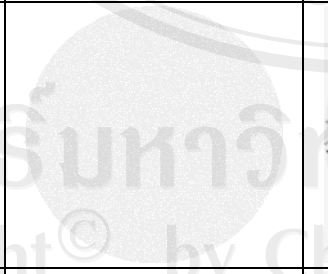
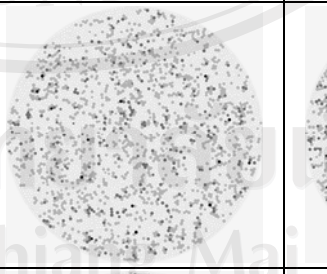
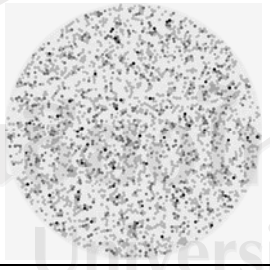
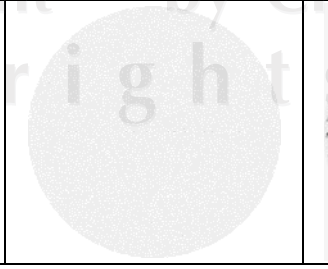
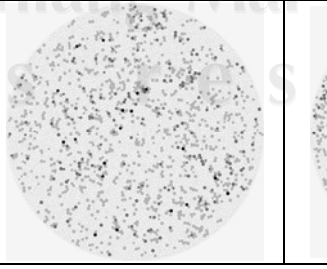
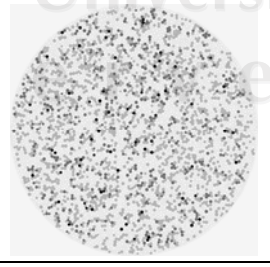
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข นี้จะแสดงถึงตารางภาพแสดงรูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน และแสดงรหัสความเข้มสีตามการสัมผัสต่ออนุภาค ประกอบด้วยค่าแอดเฮชันจำนวน 9 ค่าคือ $\gamma = 0, k/250, k/200, k/150, k/50, k/20, k/10, k/7$ และ $k/3.5$ การกระจายรัศมีอนุภาคจำนวน 5 ค่าคือ r_{max}/r_{min} = 1, 1.25, 1.5, 1.75 และ 2 รวมทั้งหมดมี 45 รูป กำหนดให้แสดงรหัสความเข้มสีตามการสัมผัสต่ออนุภาค สีดำ = 6, สีเทาเข้ม= 5, สีเทาอ่อน= 4 และ สีขาว < 4

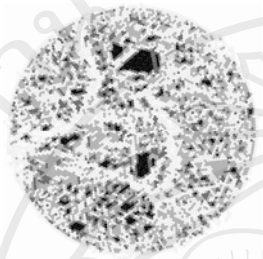
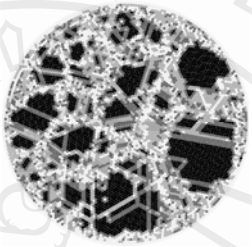
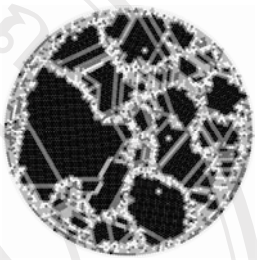
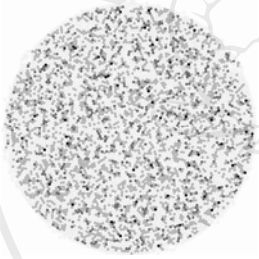
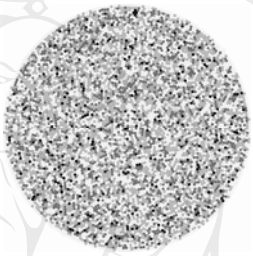
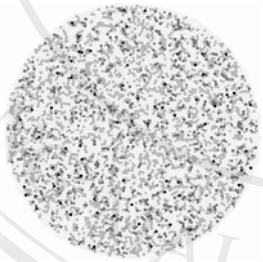
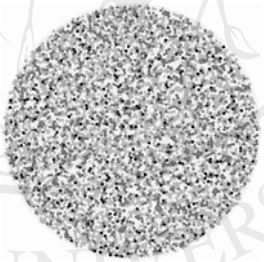
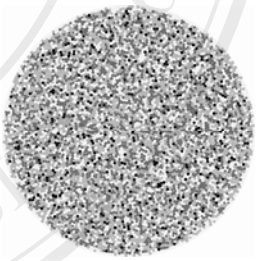
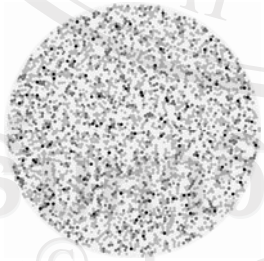
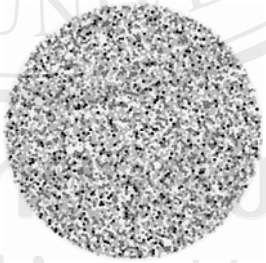
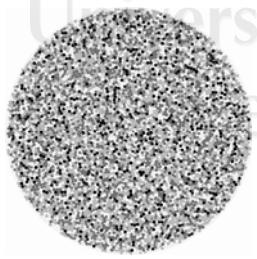
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง ข.1 แสดงภาพรูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน แสดงรหัสความเข้มสีตามการสัมผัสต่ออนุภาค โดยกำหนดให้ สีดำ = 6, สีเทาเข้ม= 5, สีเทาอ่อน= 4 และ สีขาว < 4

ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})	γ		
	0	k/250	k/200
1			
1.25			
1.5			
1.75			
2			

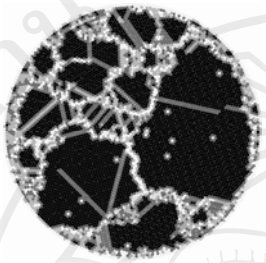
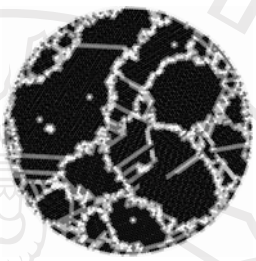
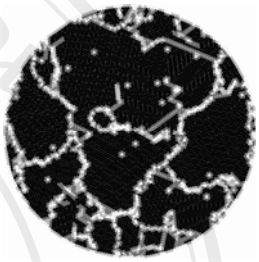
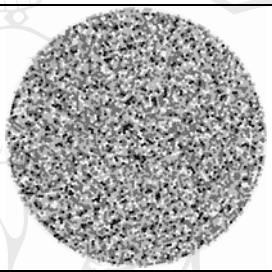
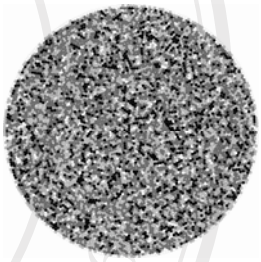
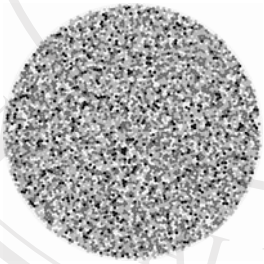
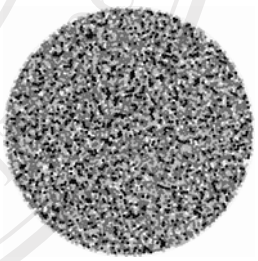
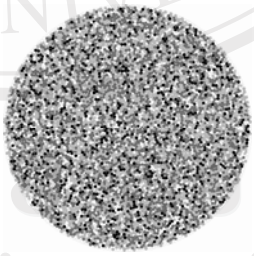
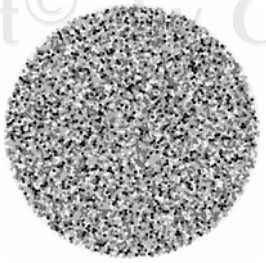
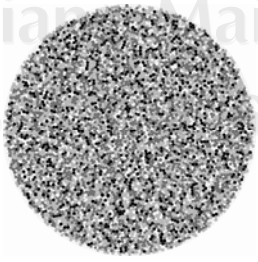
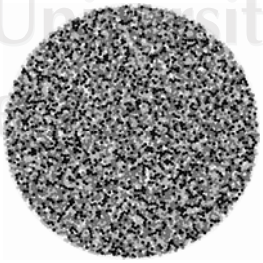
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง ข.1 แสดงภาพรูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน (ต่อ)

ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})	γ		
	k/150	k/50	k/20
1			
1.25			
1.5			
1.75			
2			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง ข.1 แสดงภาพรูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน(ต่อ)

ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})	γ		
	k/10	k/7	k/3.5
1			
1.25			
1.5			
1.75			
2			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงภาพโครงข่ายของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ค

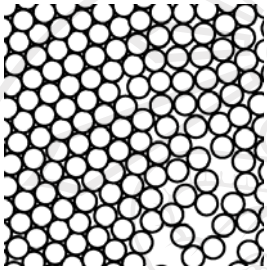
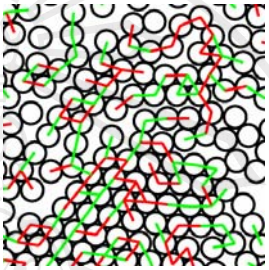
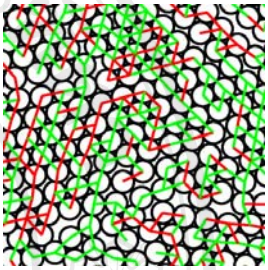
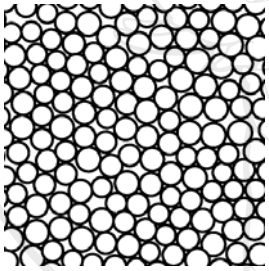
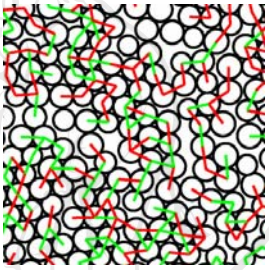
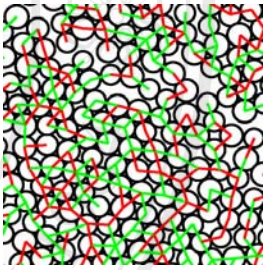
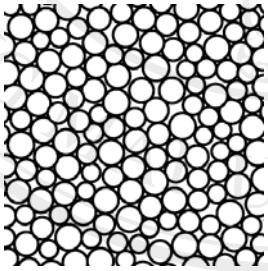
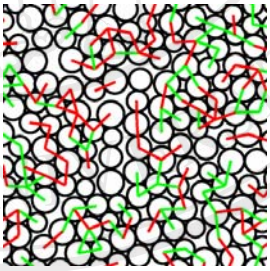
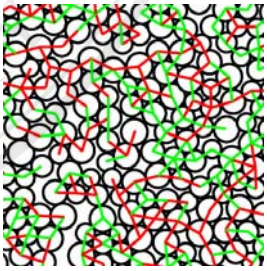
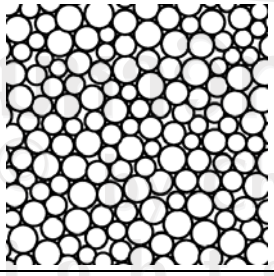
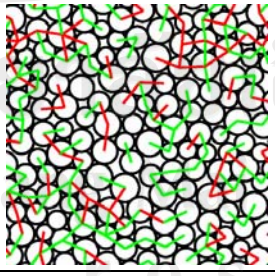
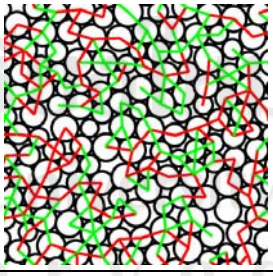
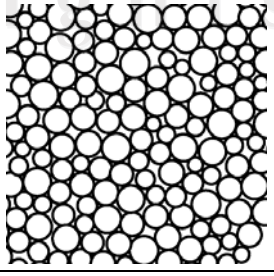
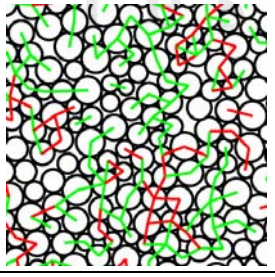
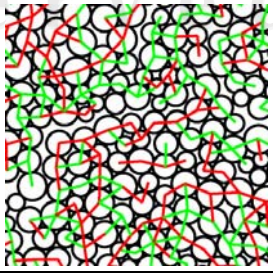
ภาคผนวก ค นี้จะแสดงถึงตารางภาพแสดงโครงข่ายของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน ประกอบด้วยค่าแอดเฮชันจำนวน 9 ค่าคือ $\gamma = 0, k/250, k/200, k/150, k/50, k/20, k/10, k/7$ และ $k/3.5$ การกระจายรัศมีอนุภาคจำนวน 5 ค่าคือ r_{max}/r_{min} = 1, 1.25, 1.5, 1.75 และ 2 รวมทั้งหมดมี 45 รูป กำหนดให้ สีเขียวคือ แรงสัมผัสดึงระหว่างอนุภาคและสีแดงคือ เส้นสัมผัสกระหว่างอนุภาค

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ค

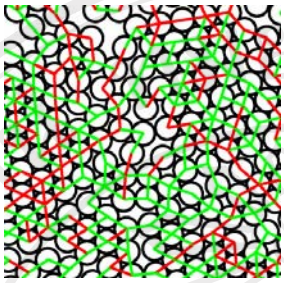
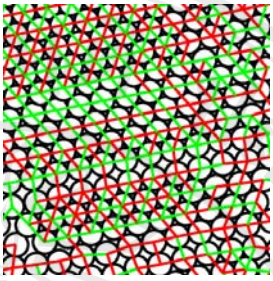
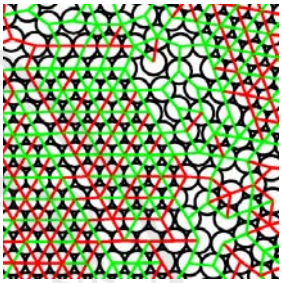
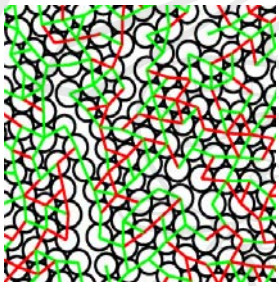
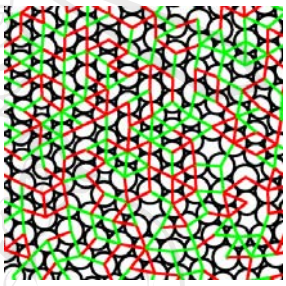
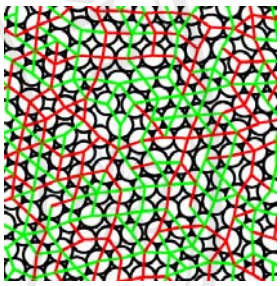
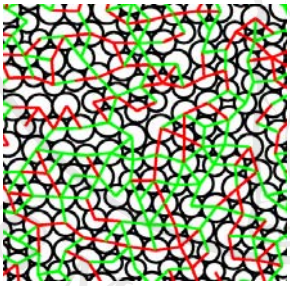
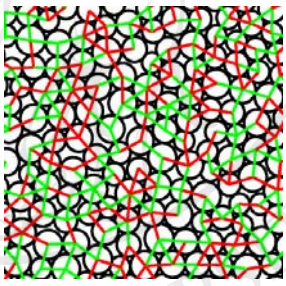
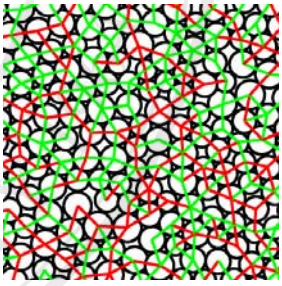
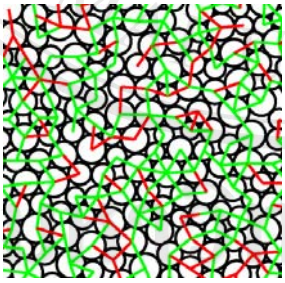
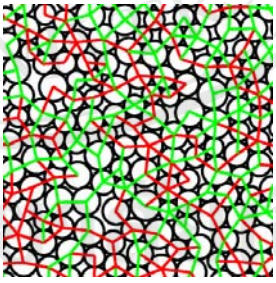
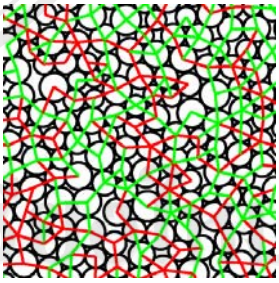
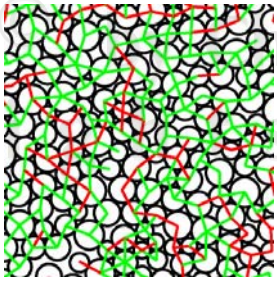
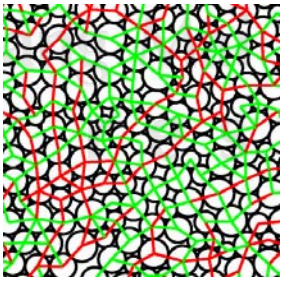
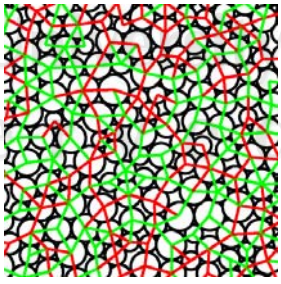
ตาราง ค.1 แสดงภาพโครงข่ายของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน

กำหนดให้ สีเขียว คือ แรงสัมผัสดึงระหว่างอนุภาคและสีแดงคือเส้นสัมผัสกดระหว่างอนุภาค

ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})	γ		
	0	k/250	k/200
1			
1.25			
1.5			
1.75			
2			

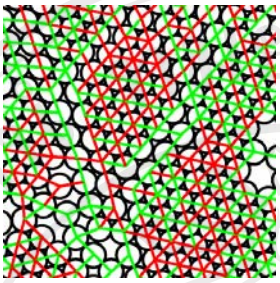
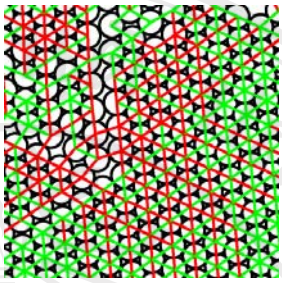
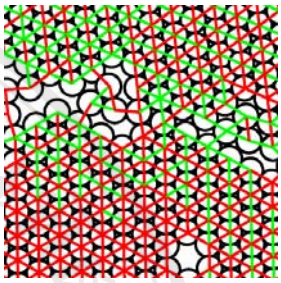
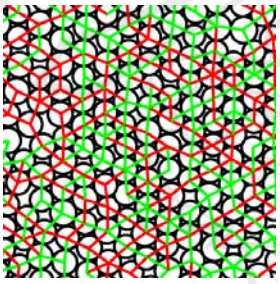
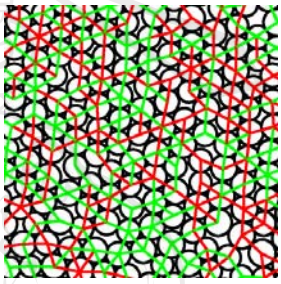
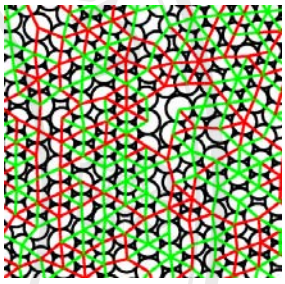
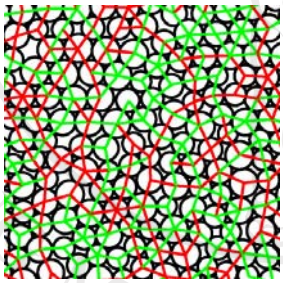
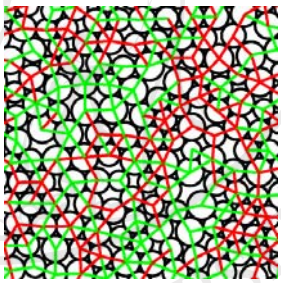
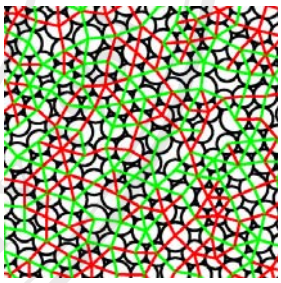
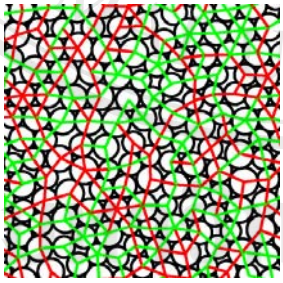
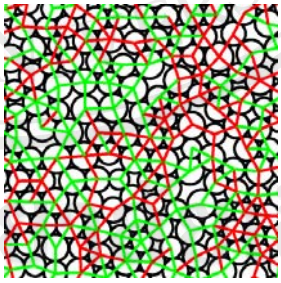
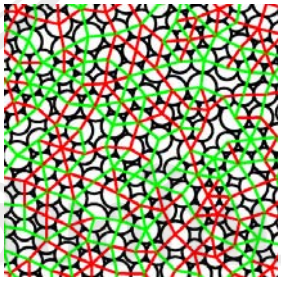
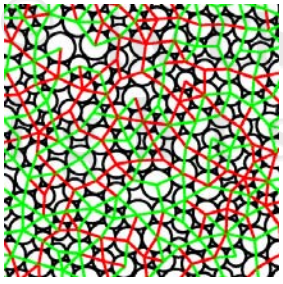
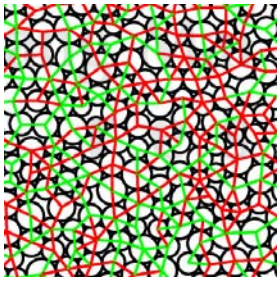
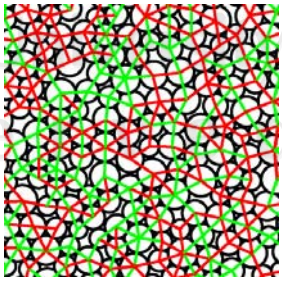
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง ค.1 แสดงภาพโครงข่ายของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน (ต่อ)

ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})	γ		
	k/150	k/50	k/20
1			
1.25			
1.5			
1.75			
2			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง ค.1 แสดงภาพโครงข่ายของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน (ต่อ)

ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})	γ		
	k/10	k/7	k/3.5
1			
1.25			
1.5			
1.75			
2			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ง

บทความงานวิจัยที่ได้นำเสนอ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ง

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21
17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี

การเกิดและการแพร่กระจายรอยแตกของวัสดุเม็ดกลมภายใต้การกระแทก

Crack nucleation and propagation in rounded granular media under collision

เชษฐพนธ์ ขวัญกลัด [1*] อิทธิชัย ปรีชาวุฒิพงศ์ [1]
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง เชียงใหม่ 50200
โทร 0-5394-4146 ต่อ 416 โทรสาร 0-5394-4145 อีเมล์: ittichai@dome.eng.cmu.ac.th

Chetthaphon Kwanglad [1*], Itthichai Preechawuttipong [1]
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
239 Huaykaew Rd. Suthap, Muang, Chiang Mai 50200, Thailand
Tel: 0-5394-4146 ext 416, Fax: 0-5394-4145, E-mail: ittichai@dome.eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของแรงแอดเฮซีฟระหว่างอนุภาคและผลการกระจายตัวของรัศมีอนุภาคที่มีต่อการเกิดกลุ่มอนุภาค และการเกิดและการแพร่กระจายรอยแตกของวัสดุเม็ดโดยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งการจำลองทางคอมพิวเตอร์นี้ใช้วิธีการคำนวณแบบพลศาสตร์ของโมเลกุล และใช้แบบจำลองทางตัวเลขในการสัมผัสระหว่างอนุภาคอย่างง่ายที่คำนึงถึงแรงแอดเฮชั่น โดยกำหนดให้วัสดุเม็ดรูปร่างวงกลมซึ่งเป็นแบบ 2 มิติ ประกอบไปด้วยอนุภาคกลมจำนวน 8000 อนุภาคที่ตกกระทบกับพื้นเรียบ และไม่คำนึงถึงแรงโน้มถ่วงของโลก ผลการคำนวณเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าการเกิดกลุ่มของอนุภาคจะเกิดขึ้นเฉพาะในวัสดุเม็ดที่มีค่าแอดเฮชั่นระหว่างอนุภาคสูง (ขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อค่าแอดเฮชั่นเพิ่มขึ้น) และเฉพาะความแตกต่างรัศมีของอนุภาคไม่เกินร้อยละ 10 เท่านั้น ในขั้นตอนการกระแทกกับพื้นเรียบที่ค่าแอดเฮชั่นสูง รอยแตกจะเกิดขึ้นที่ตรงกลางของวัสดุเม็ดและแพร่กระจายตามแนวของแรงที่กระทบ โดยจะแตกตามแนวรอยต่อระหว่างกลุ่มอนุภาค ความเร็วที่สูงขึ้นมีผลทำให้วัสดุเม็ดแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ มากขึ้น

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

วัสดุเม็ดได้ถูกนิยามว่าเป็นกลุ่มของอนุภาคที่พฤติกรรมมหภาคทางกลศาสตร์บ่งชี้ด้วยแรงสัมผัสระหว่างอนุภาค วัสดุเม็ดได้ถูกนำมาใช้โดยมนุษย์เป็นจำนวนมากในชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นทางตรงและทางอ้อม ทั้งในอุตสาหกรรมอาหาร, เภสัชกรรม และเซรามิค เป็นต้น สิ่งที่ได้กล่าวมาข้างต้นล้วนมีความเกี่ยวข้องกับวัสดุเม็ดทั้งสิ้น ดังนั้นการศึกษาและทำความเข้าใจคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเม็ดจึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมทางกายภาพ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดและการแตกร้าวของวัสดุเม็ด และทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงในวัสดุเม็ด

กว่า 40 ปีที่ผ่านมา การศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาโดยการคำนวณทางตัวเลขและจากการทดสอบได้ถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ และใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุเม็ด ในการศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวของวัสดุเม็ดที่ตกกระทบกับพื้นเรียบในแนวตั้งฉากกัน [8] ได้มีการศึกษาผลของแรงแอดเฮซีฟ (Adhesive) ระหว่างอนุภาคเพียงค่าเดียว และยังไม่มี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การศึกษาอย่างเป็นระบบ ทำให้ไม่สามารถทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของวัสดุเม็ดได้อย่างครอบคลุม

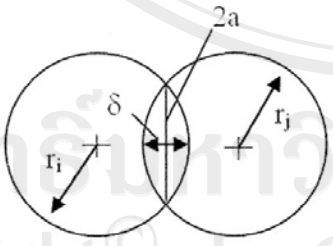
โดยงานวิจัยนี้เราจะศึกษาถึงผลของแรงแอดเฮซีฟระหว่างอนุภาคและผลการกระจายตัวของรัศมีอนุภาค (Distribution of particle radii) ที่มีต่อการเกิดกลุ่มอนุภาค (Agglomerate) การเกิดและการแพร่กระจายรอยแตกของวัสดุเม็ดที่เกิดจากการตกกระทบกับพื้นเรียบในทิศทางตั้งฉาก โดยการเปลี่ยนแปลงค่าแอดเฮชั่น (Adhesion) ทีละค่าจากอนุภาคกลมแห้ง (ไม่คิดค่าแรงแอดเฮชั่น)

2. แบบจำลองและทฤษฎี

การคำนวณทางตัวเลขในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีพลศาสตร์ของโมเลกุล (Molecular Dynamics, MD) ที่ประยุกต์แบบแผนการคำนวณแบบ "คาดการณ์ - แก้ไข" (Predictor - corrector scheme) พร้อมทั้งใช้ชุดสัมประสิทธิ์ของตัวแก้ไขของเกียร์สำหรับกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน [2] เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่มากระทบกันจะเกิดแรงสัมผัส (Contact force) ที่ทำให้เคลื่อนที่เปลี่ยนไปตามกฎของนิวตัน ซึ่งแบบจำลองของแรงสัมผัสที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายดังเช่น สปริง-แดชพอตเชิงเส้น (Linear spring-dashpot) [7] และแรงสัมผัสที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีของเฮิรตซ์ (Hertz) [7] ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองของแรงสัมผัสแบบสปริง-แดชพอตเชิงเส้น เป็นพื้นฐานของแบบจำลองแรงที่คำนึงถึงแรงแอดเฮชั่น

2.1 แรงสัมผัสแบบคิดแรงโคเฮชั่น

ในวิธีการการคำนวณแบบพลศาสตร์ของโมเลกุลนี้ อนุภาคจะถูกพิจารณาว่าเป็นวัตถุคืนรูปแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ พิจารณาอนุภาคกลม 2 อนุภาค โดยหลักการแล้วแรงสัมผัสระหว่างอนุภาค 2 อนุภาคจะเป็นฟังก์ชั่นของการขจัดสัมพัทธ์ของอนุภาคทั้งสอง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งแรงสัมผัสแปรผันกับระยะเหลื่อมกัน (Overlap, δ) (รูปที่ 1) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในที่นี้ก็คือ ระยะเหลื่อมกัน, พื้นที่ของการเหลื่อมกัน *(2a)* และอนุพันธ์อันดับหนึ่งของระยะเหลื่อมกันเทียบกับเวลาคือ $\dot{\delta}$ ตัวแปรข้างต้นนี้สามารถนำไปเขียนสมการของแรงที่เกี่ยวข้องกับการสัมผัสของอนุภาคทั้งสอง ดังเช่น แรงผลักอีลาสติก, แรงหนืดและแรงแอดเฮชั่น [1,6]



รูปที่ 1 เรขาคณิตของการสัมผัสระหว่างอนุภาคกลม 2 อนุภาค

ข้อตกลงสำหรับวัสดุเม็ดนั้น แรงกดหรือแรงผลัก (Repulsion) ที่กระทำต่ออนุภาคเม็ดพิจารณาเป็นบวก ส่วนแรงดึงจะมีค่าเป็นลบ ในแบบจำลองของแรงสัมผัสที่ได้สร้างขึ้น แรงสัมผัสจะเป็นผลรวมระหว่างแรงกดหรือแรงผลักและแรงโคเฮชั่น ส่วนผลทางด้านพลศาสตร์ระหว่างการสัมผัสจะถูกนำมาคิดรวมอยู่ในรูปของแรงหนืด ในส่วนของแรงกดและผลทางด้านพลศาสตร์เราได้เลือกแบบจำลองแรงสัมผัสแบบสปริง-แดชพอตเชิงเส้น ซึ่งแปรผันโดยตรงกับความเหลื่อม และอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ δ เทียบกับเวลา $\dot{\delta}$ ตามลำดับ แรงดึงจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ของการสัมผัสด้วยแนวคิดเดียวกันกับ JKR [4] และเราสามารถแสดงได้ว่า พื้นที่ของการเหลื่อมกันนั้นแปรผันโดยตรงกับ $\sqrt{r\delta}$ โดย r คือรัศมีเอฟเฟคทีฟ (Effective radius) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{r_i r_j}{r_i + r_j}$ ดังนั้นแรงโคเฮชั่นจะมีความสัมพันธ์เป็น $\gamma\sqrt{r\delta}$ ซึ่ง γ คือพลังงานโคเฮชั่นระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาแรงระหว่างผิวสัมผัสในแนวตั้งฉาก (f_n) ในความสัมพันธ์กับระยะเหลื่อมจะได้ดังนี้ [1,6]

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

โดยที่ k คือค่าความแข็งของผิวอนุภาคซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติกของอนุภาคและ α คือค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืด แรงสัมผัสดั้งฉากในสมการ (1) จะถูกอ้างอิงในชื่อแบบจำลองแรงแอดเฮชั่นเรขาคณิต (Geometric adhesion, AG)

ในส่วนของแรงเสียดทาน (f_t) นั้น กฎแรงเสียดทานของคูลอมบ์ (Coulomb law of dynamic friction) ยากต่อการประยุกต์ใช้โดยตรงกับวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุล เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของกฎนี้ ดังนั้นจึงได้นำกฎของคูลอมบ์มาประยุกต์กับแรงเสียดทานที่ แปรผันกับความเร็วสัมพัทธ์ของการลื่นไถล (Sliding Relative Velocity) จะได้สมการของแรงเสียดทานที่มีชื่อเรียกว่า Regularized Friction Law with adhesion ดังนี้ [6,7]

$$f_t = \min\{|\gamma_s v_s|, T_c\}.sign(v_s) \qquad (2)$$

โดยที่ γ_s คือ ค่าคงที่ของความหนืดในแนวสัมผัส, v_s คือ ความเร็วสัมพัทธ์ของการลื่นไถล และ T_c คือ แรงดึงวิกฤต

3. การเตรียมและทดสอบแบบจำลองเชิงตัวเลข

ในขั้นตอนของการเตรียมและทดสอบวัสดุเม็ดในการจำลองทางคอมพิวเตอร์นั้น ขั้นตอนการคำนวณทั้งหมดจะไม่คำนึงถึงแรงโน้มถ่วงของโลก สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน (รูปที่ 2) ดังนี้

3.1 การจัดวางและการบีบอัดอนุภาค

ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุเม็ดนี้ เป็นขั้นตอนแรกในการเตรียมวัสดุเม็ด อนุภาคกลมจำนวน 8000 อนุภาคถูกจัดวางเรียงกันโดยไม่เกิดการสัมผัสกัน และอยู่ในภาชนะกลมแบบปิดขนาดใหญ่ (รูปที่ 2(ก)) จากนั้นทำการลดขนาดภาชนะกลมนี้อย่างช้าๆ ทำให้อนุภาคกลมถูกบีบอัด จนกระทั่งพื้นที่ของภาชนะน้อยกว่าหรือเท่ากับพื้นที่ของอนุภาคกลม (รูปที่ 2(ข))

3.2 การคลายการบีบอัดอนุภาค

หลังจากอนุภาคถูกบีบอัดจนกระทั่งได้ระบบวัสดุเม็ดที่สมดุลภายใต้แรงกดทุกทิศทาง เพื่อให้ได้วัสดุเม็ดในสภาวะสมดุลทางสถิตยศาสตร์ที่ปราศจากแรงกระทำจากภายนอก ภาชนะกลมที่บีบ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

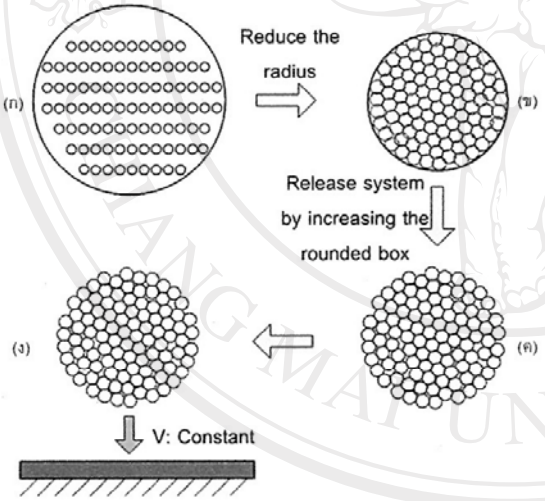
อัตอนุภาคจะถูกขยายตัวออกอย่างช้าๆ จนกระทั่งวัสดุเม็ดไม่ได้สัมผัสกับภาชนะกลม (รูปที่ 2(ค))

3.3 วัสดุเม็ดเข้าสู่สภาวะสมดุล

ขั้นตอนหลังจากในการคลายภาชนะกลม เป็นการคำนวณเพื่อรอวัสดุเม็ดจัดเรียงตัวเองจนอยู่ในสภาวะสมดุลทางสถิตยศาสตร์ที่ปราศจากแรงกระทำภายนอก โดยในช่วงนี้สามารถทราบได้ถึงการเกิดลักษณะของกลุ่มอนุภาคที่แตกต่างกัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงแอดเฮซีฟระหว่างอนุภาคและผลการกระจายตัวของรัศมีอนุภาค จากสภาวะดังกล่าวนี้จะถูกใช้อ้างอิงว่าเป็นสภาวะเริ่มต้นของขั้นตอนการทดสอบและใช้ในการวิเคราะห์การเกิดกลุ่มอนุภาค และเตรียมเข้าสู่ขั้นตอนของการทดสอบวัสดุเม็ดโดยการตกกระทบกับพื้นราบต่อไป

3.4 การทดสอบวัสดุเม็ด

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของความเร็วและการกระจายรัศมีอนุภาคของวัสดุเม็ด ที่มีต่อการเกิดและการแพร่กระจายรอยแตกของวัสดุเม็ด โดยกำหนดให้วัสดุเม็ดตกกระทบกับพื้นเรียบในทิศทางตั้งฉากในความเร็วที่แตกต่างกัน โดยไม่คิดผลแรงโน้มถ่วงของโลก และความแตกต่างรัศมีของอนุภาคไม่เกิน2เท่า (รูปที่ 2(ง))



รูปที่ 2 แผนผังการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบหาพฤติกรรมการแตกร้าวของวัสดุเม็ดภายใต้แรงกระแทก

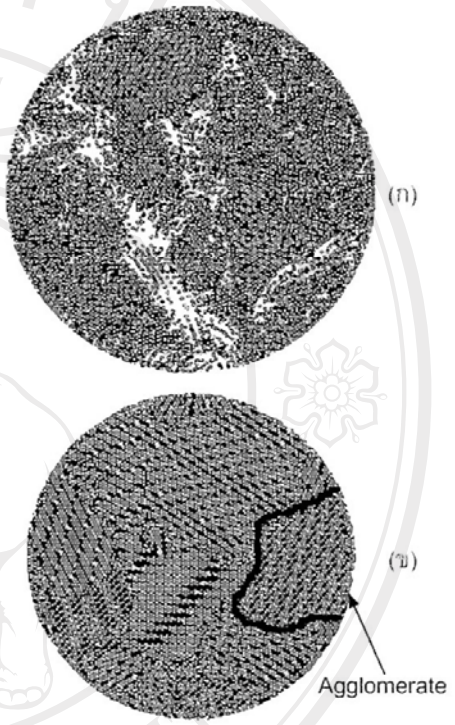
4. ผลการศึกษา

4.1 การเกิดของกลุ่มอนุภาค

หลังจากวัสดุเม็ดอยู่ในสภาวะที่สมดุลแล้ว ในช่วงสภาวะนี้สามารถศึกษาการเกิดกลุ่มอนุภาคได้ โดยอิทธิพลที่มีผลให้การเกิดกลุ่มอนุภาคแตกต่างกัน สามารถแบ่งออกได้แบ่ง 2 ปัจจัยด้วยกันคือ

4.1.1 พลังงานแอดเฮชั่น

พลังงานแอดเฮชั่นเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การก่อตัวของอนุภาคในวัสดุเม็ดแตกต่างกัน โดยเฉพาะวัสดุเม็ดที่มีขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน $\left(\frac{r_{max}}{r_{min}}=1\right)$ จากผลการคำนวณทางตัวเลขพบว่าขนาดของกลุ่มอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อพลังงานแอดเฮชั่นระหว่างอนุภาคเพิ่มมากขึ้น $\left(\gamma \geq \frac{k}{50}\right)$ และกลุ่มอนุภาคจะไม่เกิดหรือไม่เกาะตัวกันเมื่อค่าแอดเฮชั่นน้อย $\left(\gamma \leq \frac{k}{50}\right)$ (รูปที่ 3)

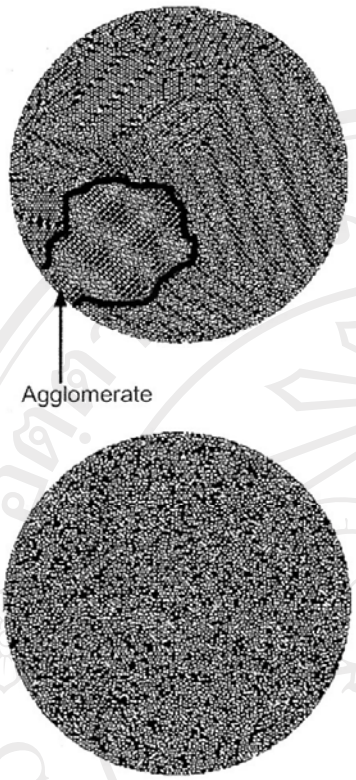


รูปที่ 3 ขนาดรัศมีอนุภาค $\frac{r_{max}}{r_{min}}=1$, (ก) $\gamma=\frac{k}{200}$, (ข) $\gamma=\frac{k}{3.5}$

4.1.2 การกระจายรัศมีของอนุภาค

ขนาดรัศมีอนุภาคเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การก่อตัวของอนุภาคในวัสดุเม็ดแตกต่างกัน โดยเฉพาะวัสดุเม็ดมีค่าแอดเฮชั่นเท่ากัน จากการคำนวณทางตัวเลขพบว่าการกระจายรัศมีของอนุภาคในวัสดุเม็ดมาก $\left(\frac{r_{max}}{r_{min}} \geq 1.1\right)$ ทำให้เกิดแนวโน้มที่เป็นอุปสรรคต่อการเกิดกลุ่มอนุภาค กล่าวคือ ที่การกระจายของรัศมีอนุภาคน้อยกว่า 10% $\left(\frac{r_{max}}{r_{min}} \leq 1.1\right)$ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับวัสดุเม็ดที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเดียว (Monodispherse) จะเห็นขนาดของกลุ่มอนุภาคอย่างชัดเจน ตรงข้ามกับวัสดุเม็ดที่ประกอบด้วยอนุภาคหลายขนาด $\left(\frac{r_{max}}{r_{min}} \geq 1.1\right)$ การเกิดกลุ่มอนุภาคจะไม่เด่นชัด (รูปที่ 4(ข))

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



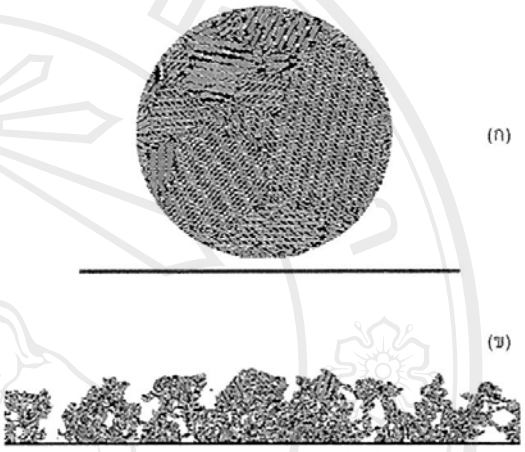
รูปที่ 4 วัสดุเม็ดที่สภาวะสมดุลมีค่า $\gamma = \frac{k}{10}$ (ก) ขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน (ข) ขนาดรัศมีอนุภาค $\frac{r_{max}}{r_{min}} = 1.5$

4.2 การทดสอบวัสดุเม็ดตกระทบกับพื้นเรียบ

ในขั้นตอนการทดสอบวัสดุเม็ดตกกระทบกับพื้นเรียบในทิศทางตั้งฉาก วัสดุเม็ดที่มีค่า $\gamma \le \frac{k}{50}$ เป็นระบบที่มีค่าพลังงานแอดเฮชั่นน้อย ซึ่งเกิดความยุ่งยากในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ เนื่องจากวัสดุเม็ดในสภาวะสมดุลทางสถิตยศาสตร์แทบจะไม่สัมผัสกันเลย โครงสร้างของอนุภาคค่อนข้างกระจัดกระจาย ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงสนใจวัสดุเม็ดที่มีค่า $\gamma \ge \frac{k}{50}$

4.2.1 ผลของความเร็วของวัสดุเม็ดที่ตกกระทบกับพื้นเรียบ

ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า ผลของความเร็วที่มีต่อการแตกร้าวของวัสดุเม็ดที่ค่าแอดเฮชั่นและขนาดรัศมีอนุภาคแตกต่างกันมีแนวโน้มไปในลักษณะเดียวกัน จึงได้ยกตัวอย่างค่าแอดเฮชั่นเพียงค่าเดียวที่ $\gamma = \frac{k}{10}$ และขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน $\left(\frac{r_{max}}{r_{min}} = 1\right)$ ความเร็วที่แตกต่างกันมีผลทำให้ลักษณะและพฤติกรรมการแตกร้าวแตกต่างกันออกไป ความเร็วในการกระแทกกับพื้นเรียบมีค่าน้อยกว่าความเร็ววิกฤตที่สามารถทำให้วัสดุเม็ดเกิดการแตกหักได้ วัสดุเม็ดจะเกิดการเสียรูปเล็กน้อยไปจนถึงการแตกร้าวระหว่างรอยต่อของกลุ่มอนุภาค (Agglomerate Joint) (รูปที่ 5(ก)) และที่ความเร็วในการกระแทกกับพื้นเรียบมีค่ามากกว่าความเร็ววิกฤตที่วัสดุเม็ดสามารถรับแรงได้ วัสดุเม็ดจะแตกออกจากกัน และจะแตกกระจายเป็นชิ้นเล็กๆเมื่อความเร็วของวัสดุเม็ดก่อนการกระทบสูงมากขึ้น (รูปที่ 5(ข))

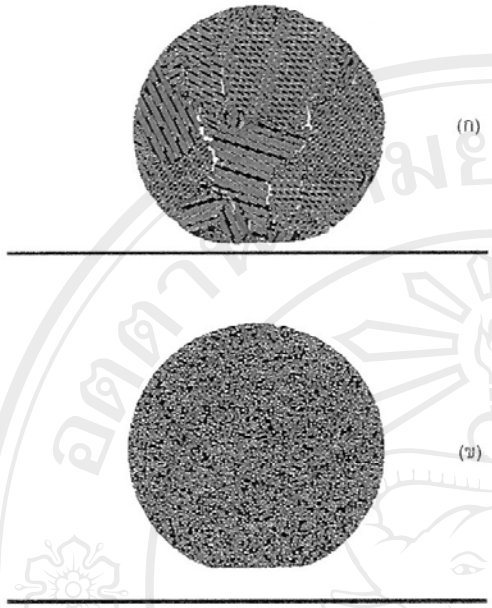


รูปที่ 5 วัสดุเม็ดหลังการกระแทกกับพื้นเรียบมีค่า $\gamma = \frac{k}{10}$, $\frac{r_{max}}{r_{min}} = 1$ ที่ความเร็วในการกระแทก (ก) 0.1 m/s (ข) 5 m/s

4.2.2 ขนาดของอนุภาค

ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า ผลของขนาดรัศมีอนุภาคที่มีต่อการแตกร้าวของวัสดุเม็ดที่ความเร็วในการกระทบและค่าแอดเฮชั่นแตกต่างกันมีแนวโน้มไปในลักษณะเดียวกัน จึงได้ยกตัวอย่างความเร็วของวัสดุเม็ดที่กระทบกับพื้นเรียบที่ 1m/s และค่าแอดเฮชั่นเพียงค่าเดียวที่ $\gamma = \frac{k}{3.5}$ ผลที่ได้คือ เมื่อขนาดรัศมีอนุภาคแตกต่างไม่เกิน10% $\left(\frac{r_{max}}{r_{min}} \le 1.1\right)$ วัสดุเม็ดจะมีลักษณะแข็งเปราะ (Brittle) กล่าวคือ เมื่อวัสดุเม็ดกระทบกับพื้นเรียบ การแตกร้าวของอนุภาคส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างกลุ่มอนุภาค และถ้าความเร็วในการกระแทกของวัสดุเม็ดมีค่ามากกว่าความเร็ววิกฤต วัสดุเม็ดจะแตกออกจากกันเป็นชิ้นเล็กๆ (รูปที่ 6(ก)) ซึ่งลักษณะการแตกร้าวจะแตกต่างจากขนาดรัศมีอนุภาคแตกต่างกันเกิน 10% $\left(\frac{r_{max}}{r_{min}} \ge 1.1\right)$ วัสดุเม็ดจะมีลักษณะเหนียว (Ductility) วัสดุเม็ดในลักษณะนี้จะเกิดการเสียรูปแต่จะไม่เกิดการแตกร้าวระหว่างกลุ่มอนุภาค แต่ถ้าความเร็วในการกระแทกของวัสดุเม็ดมีค่ามากกว่าความเร็ววิกฤต วัสดุเม็ดจะแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆเช่นกัน (รูปที่ 6(ข))

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 6 วัสดุเม็ดหลังการกระทบกับพื้นเรียบที่ความเร็ว1m/s, $\gamma = \frac{k}{3.5}$

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

5. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาผลของแรงแอดเฮซีฟระหว่างอนุภาคและการกระจายตัวของรัศมีอนุภาคที่มีต่อการเกิดกลุ่มอนุภาค ผลของความเร็วและการกระจายตัวของรัศมีอนุภาคที่มีต่อการเกิดและการแพร่กระจายรอยแตกของวัสดุเม็ดโดยวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุลนั้น ตามการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เบื้องต้น พลังงานแอดเฮชั่นที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดกลุ่มอนุภาคในวัสดุเม็ดและจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อค่าแอดเฮซีฟระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะขนาดรัศมีของอนุภาคแตกต่างไม่เกิน 10% ทำให้การเกิดกลุ่มของอนุภาคเกิดขึ้นชัดเจน แต่ถ้าขนาดรัศมีของอนุภาคแตกต่างกันเกิน 10% การเกิดกลุ่มอนุภาคจะไม่เด่นชัด อีกทั้งความเร็วในการกระทบกับพื้นเรียบที่น้อยกว่าความเร็ววิกฤตวัสดุเม็ดจะเสียรูปเล็กน้อย โดยเฉพาะกรณีที่ขนาดรัศมีของอนุภาคแตกต่างไม่เกิน 10% วัสดุเม็ดจะแตกร้าวตามรอยต่อของอนุภาค และในกรณีที่ขนาดรัศมีอนุภาคแตกต่างกันเกิน 10% การเสียรูปของวัสดุเม็ดจะมีมากกว่า ที่ความเร็วก่อนการกระทบของวัสดุเม็ดเท่ากัน ถ้าความเร็วในการกระแทกของวัสดุเม็ดมากกว่าความเร็ววิกฤต วัสดุเม็ดจะแตกกระจายออกเป็นชิ้นเล็กๆ งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาหาความเร็ววิกฤตของวัสดุเม็ดที่เป็นฟังก์ชั่นกับค่าแอดเฮชั่นได้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

รายการสัญลักษณ์ (พื้นฐานสำหรับแบบจำลอง)

- δ ระยะเหลื่อมของสองอนุภาคที่กระทบกัน
- $\dot{\delta}$ อนุพันธ์อันดับหนึ่งของ δ เมื่อเทียบกับเวลา
- r_i รัศมีของอนุภาค
- $2a$ พื้นที่ของการสัมผัส
- r รัศมีเอฟเฟคทีฟ
- γ พลังงานโคเฮชั่นหรือพลังงานผิวสัมผัส
- k ค่าความแข็งของผิวอนุภาค
- α ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืด
- f_n แรงระหว่างผิวสัมผัสในทิศทางตั้งฉาก
- f_t แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส
- γ_s ค่าคงที่ของความหนืดในแนวสัมผัส
- v_s ความเร็วสัมพัทธ์ของการลื่นไถล
- m มวลเอฟเฟคทีฟของอนุภาคที่กระทบกัน
- t เวลา (วินาที)
- t_c เวลาของการเกิดการสัมผัสหรือการกระทบ

เอกสารอ้างอิง

[1] อิทธิชัย ปรีชาวุฒิพงศ์, สายฝน จาค (2003). ค่าสัมประสิทธิ์เรสติติวชั่นในการกระทบวัตถุกลม 2 ลูกโดยคิดอิทธิพลของแรงแอดเฮซีฟระหว่างผิวสัมผัส. 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., Kendell, 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.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	เชษฐพนธ์ ขวัญกลัด
วัน เดือน ปี เกิด	16 มกราคม 2524
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพขั้นสูง วิทยาลัยเทคนิคลำปาง ปีการศึกษา 2542 สำเร็จการศึกษาปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาออกแบบเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2545

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved