บทที่ 4
ผลการวิจัย และการวิเคราะห์

ในบทนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของแรงแอดเฮซีฟระหว่างอนุภาคและการกระจายขนาดรัศมีอนุภาคที่มีต่อพฤติกรรมของวัสดุเม็ด ตัวแปรที่ใช้ในการบ่งชี้พฤติกรรมระดับมหภาคทางกลศาสตร์ของวัสดุเม็ดได้แก่ ลักษณะวัตถุ (Texture) ซึ่งเป็นตัวแปรทั้งทางด้านเรขาคณิต (Geometry) และแรง (Force) โดยตัวแปรทางด้านเรขาคณิตที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุเม็ดในช่วงสถานะคงที่ (Static State) ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุเม็ดจัดเรียงตัวเองจนอยู่ในสภาวะสมดุลทางสถิตยศาสตร์ที่ปราศจากแรงกระทำภายนอกคือ จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาค (Coordination Number), ทิศทางการสัมผัส (Contact Direction) และการเกิดกลุ่มอนุภาค ส่วนตัวแปรทางด้านแรงที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์คือโครงข่ายของแรงระหว่างอนุภาค

ในกรณีของการทดสอบวัสดุเม็ดโดยการกระทบพื้นเรียบซึ่งอยู่ในช่วงขั้นตอนการทดสอบ (Testing Phase) ใช้ศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายการแตกร้าวของวัสดุเม็ด อิทธิพลที่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุเม็ดคือ ค่าแอดเฮชัน, การกระจายขนาดรัศมีอนุภาค และความเร็วสัมพัทธ์ของวัสดุเม็ดในการกระทบพื้นเรียบ ตัวแปรที่นำมาใช้วิเคราะห์ในขั้นตอนนี้คือ ความเร็วในการกระทบพื้นเรียบ และทิศทางการสัมผัส โดยรายละเอียดและผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ จะกล่าวในลำดับถัดไปนี้

4.1 ผลการทดสอบวัสดุเม็ดในสภาวะที่สมดุลทางสถิตยศาสตร์ก่อนกระแทกกับพื้นเรียบ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลจากการทดสอบวัสดุเม็ดในสภาวะที่สมดุลทางสถิตยศาสตร์ก่อนกระแทกกับพื้นเรียบและการวิจารณ์ผลการทดสอบวัสดุเม็ด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาค

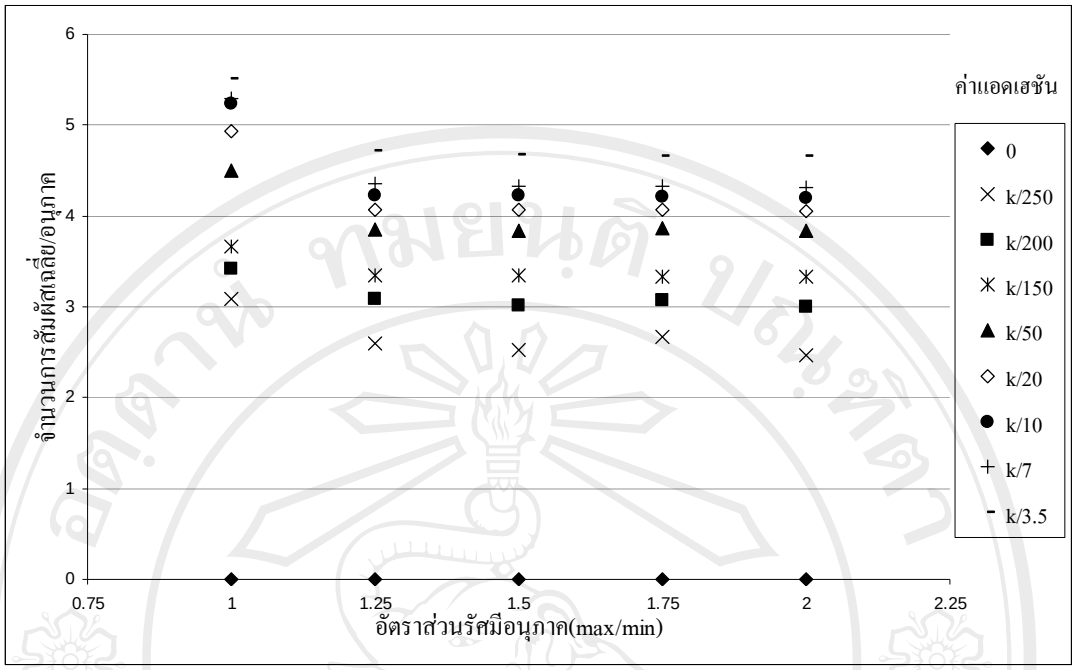
ปัจจัยที่ทำให้จำนวนการสัมผัสของอนุภาคของวัสดุเม็ดเปลี่ยนไปประกอบด้วยค่าแอดเฮชันและการกระจายรัศมีอนุภาค รูป 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าแอดเฮชันต่ำที่สุด γ เท่ากับ 0 วัสดุเม็ดจะไม่เกิดการสัมผัสกันทำให้จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคเท่ากับ 0 โดยจำนวนการสัมผัสเฉลี่ยจะสูงขึ้นเมื่อค่าแอดเฮชันสูงขึ้นตามลำดับ และสังเกตได้ว่าจำนวนการสัมผัสเฉลี่ยระหว่างอนุภาคสามารถแบ่งได้อย่างชัดเจน 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่วัสดุเม็ดมีค่าแอดเฮชันต่ำ $(\gamma = 0 \rightarrow k/150)$ และกลุ่มที่วัสดุเม็ดมีค่าแอดเฮชันสูง $(\gamma = k/50 \rightarrow k/3.5)$ สอดคล้องกับตาราง 4.1 กรณีของกลุ่มที่วัสดุเม็ดมีค่าแอดเฮชันต่ำ จำนวนสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาค $Z < 4$ สำหรับการจำลองแบบ 2 มิติ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

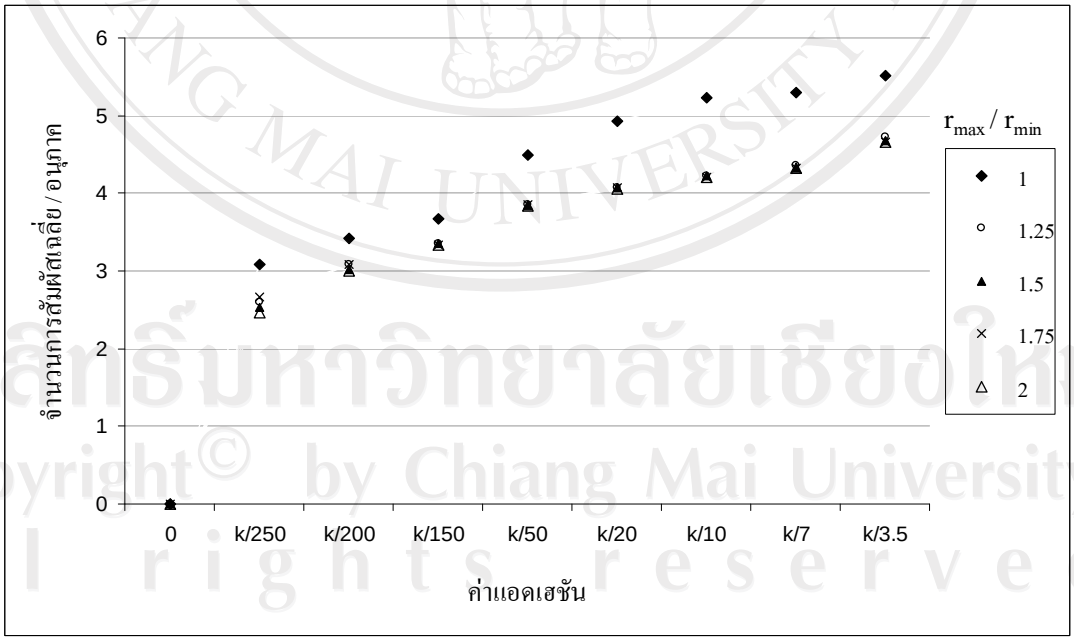
นั้นจะมีลักษณะเหมือนกับวัสดุเม็ดแบบแห้ง (I, Preechawuttipong, 2005) จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยระหว่างอนุภาคจะมีค่าน้อยกว่า 3.7 สำหรับอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากัน $(r_{max}/r_{min}=1)$ และมีค่าน้อยกว่า 3.4 สำหรับอัตราส่วนรัศมีอนุภาคแตกต่างกัน $(r_{max}/r_{min}=1.25\rightarrow 2)$ ในกรณีของกลุ่มที่วัสดุเม็ดมีค่าแอดเฮชันสูง จำนวนสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคมีค่ามากกว่า 4 และมากกว่า 3.8 สำหรับอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากันและอัตราส่วนรัศมีอนุภาคแตกต่างกันตามลำดับ ค่าแอดเฮชันระหว่างอนุภาคที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าจำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคเพิ่มขึ้น วัสดุเม็ดจึงมีการยึดเกาะกันของอนุภาคที่หนาแน่นมากขึ้น

ความแตกต่างกันของขนาดรัศมีอนุภาคเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้วัสดุเม็ดมีจำนวนการสัมผัสของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป โดยจำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคจะมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากัน ค่าดังกล่าวจะลดลงเมื่อขนาดรัศมีอนุภาคมีขนาดแตกต่างกัน จากรูป 4.2 ที่แสดงกราฟความสัมพันธ์ของการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคกับขนาดรัศมีอนุภาค สังเกตได้ว่าจำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคสามารถแบ่งได้อย่างเด่นชัดเป็น 2 ส่วนคือ อัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากันและอัตราส่วนรัศมีอนุภาคแตกต่างกัน จากตาราง 4.1 ที่อัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากันจะมีจำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคมีค่าสูงสุดเมื่อพิจารณาที่ค่าแอดเฮชันเดียวกันในทุกการกระจายรัศมีอนุภาค และอัตราส่วนรัศมีอนุภาค $r_{max}/r_{min}>1.25$ ที่ค่าแอดเฮชันเดียวกันจำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงตามการกระจายตัวของขนาดรัศมีอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงไป และจะสังเกตได้ว่าจำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคมีค่าไม่เกิน 5 ในทุกค่าแอดเฮชันเมื่ออัตราส่วนรัศมีอนุภาคแตกต่างกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคกับค่าแอดเฮชัน



รูป 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคกับอัตราส่วนรัศมีอนุภาค

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.1 จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคของวัสดุเม็ดในสภาวะสมดุลทางสถิตยศาสตร์

γ	**จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาค (z)**				
	$\frac{r_{\max}}{r_{\min}}=1$	$\frac{r_{\max}}{r_{\min}}=1.25$	$\frac{r_{\max}}{r_{\min}}=1.5$	$\frac{r_{\max}}{r_{\min}}=1.75$	$\frac{r_{\max}}{r_{\min}}=2$
กลุ่มที่มีค่าแอดเฮชันต่ำ $(\gamma = 0 \leftrightarrow k/150)$					
0	0	0	0	0	0
k/250	3.080	2.600	2.524	2.672	2.472
k/200	3.420	3.084	3.016	3.076	3.001
k/150	3.667	3.349	3.346	3.333	3.330
กลุ่มที่มีค่าแอดเฮชันสูง $(\gamma = k/50 \leftrightarrow k/3.5)$					
k/50	4.493	3.850	3.833	3.861	3.832
k/20	4.932	4.074	4.067	4.074	4.058
k/10	5.230	4.230	4.227	4.215	4.200
k/7	5.300	4.358	4.324	4.327	4.316
k/3.5	5.509	4.720	4.678	4.661	4.665

4.1.2 จำนวนการสัมผัสแรงดึงเฉลี่ยต่ออนุภาค

ปัจจัยที่ทำให้จำนวนการสัมผัสแรงดึงเฉลี่ยต่ออนุภาคของวัสดุเม็ดเปลี่ยนไป ประกอบด้วยค่าแอดเฮชันและการกระจายรัศมีอนุภาค จากตาราง 4.1 ถึง 4.3 เมื่อวัสดุเม็ดมีค่าแอดเฮชันต่ำ สำหรับอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากัน $(r_{\max}/r_{\min}=1)$ จำนวนการสัมผัสแรงดึงมีจำนวนน้อยกว่าการสัมผัสกด และเมื่อวัสดุเม็ดมีค่าแอดเฮชันสูงขึ้น ผลรวมของแรงสัมผัสทั้งแรงดึงและแรงกดจะมีค่าประมาณเท่ากับ 0 $(\Sigma F = 0)$ เนื่องจากไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ในที่นี้เรียกว่าความเค้นภายในวัสดุ (Self Stress) เป็นการสร้างความสมดุลของระบบภายในวัสดุเม็ดให้สามารถยึดเกาะกันได้เมื่อไม่มีแรงภายนอกมากระทำ

เมื่อพิจารณากรณีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคแตกต่างกัน $(r_{\max}/r_{\min}=1.25 \rightarrow 2)$ พบว่าพฤติกรรมของจำนวนการสัมผัสแรงดึงเมื่อค่าแอดเฮชันต่ำ อัตราส่วนระหว่างการสัมผัสแรงดึงกับการสัมผัสแรงกดมีค่าไม่แน่นอน แรงสัมผัสดึงจะมีอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับแรงสัมผัสกดมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อค่าแอดเฮชันสูงขึ้นผลรวมของแรงสัมผัสทั้งแรงดึงและแรงกดจะมีค่าประมาณเท่ากับ $0(\Sigma F = 0)$ เช่นเดียวกับกรณีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากัน และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนรัศมีอนุภาค $r_{\max}/r_{\min} > 1.25$ ที่ค่าแอดเฮชันเดียวกัน จำนวนการสัมผัสดึงเฉลี่ยต่ออนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงตามการกระจายตัวของขนาดรัศมีอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงไป ดังตาราง 4.1 และ 4.2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.2 ร้อยละของการสัมผัสแรงดึงเฉลี่ยต่ออนุภาค / จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคของวัสดุเม็ดในสภาวะสมดุลทางสถิตยศาสตร์

γ	**ร้อยละของการสัมผัสแรงดึงเฉลี่ยต่ออนุภาค (z^-)/การสัมผัสเฉลี่ยรวม(z)**				
	$\frac{r_{max}}{r_{min}}=1$	$\frac{r_{max}}{r_{min}}=1.25$	$\frac{r_{max}}{r_{min}}=1.5$	$\frac{r_{max}}{r_{min}}=1.75$	$\frac{r_{max}}{r_{min}}=2$
0	0	0	0	0	0
k/250	47.597	50.231	49.683	56.213	65.655
k/200	47.456	53.112	52.520	55.299	54.615
k/150	49.986	57.928	58.069	63.366	60.991
k/50	48.231	49.818	49.830	52.525	53.549
k/20	49.675	51.006	50.135	50.638	50.690
k/10	53.155	51.300	50.651	51.435	51.119
k/7	51.981	52.662	52.128	51.514	51.483
k/3.5	51.915	52.246	52.138	51.834	51.533

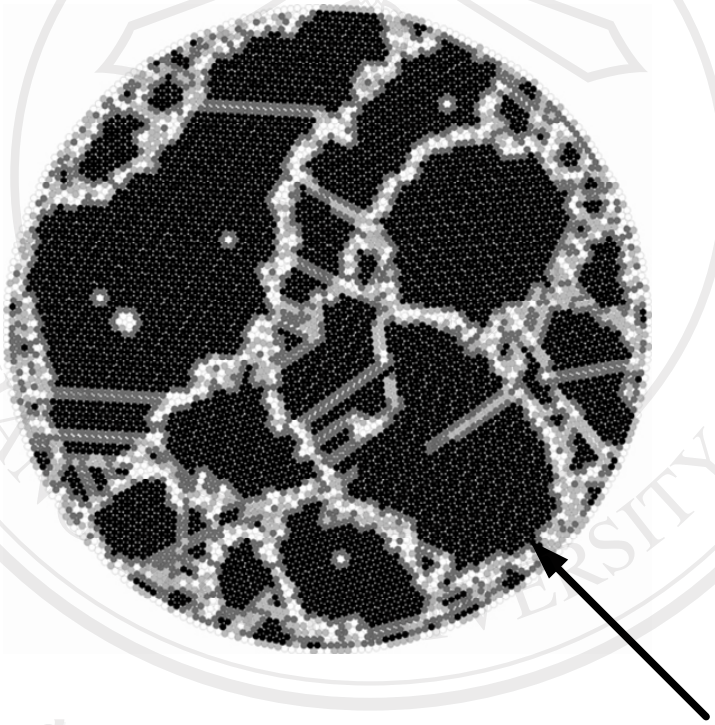
ตาราง 4.3 อัตราส่วนจำนวนการสัมผัสแรงกดเฉลี่ย (z^+) ต่อแรงดึงเฉลี่ย(z^-)

γ	**อัตราส่วนจำนวนการสัมผัสแรงกดเฉลี่ย (z^+)/ แรงดึงเฉลี่ย(z^-)**				
	$\frac{r_{max}}{r_{min}}=1$	$\frac{r_{max}}{r_{min}}=1.25$	$\frac{r_{max}}{r_{min}}=1.5$	$\frac{r_{max}}{r_{min}}=1.75$	$\frac{r_{max}}{r_{min}}=2$
0	0	0	0	0	0
k/250	1.101	0.991	1.013	0.779	0.523
k/200	1.107	0.883	0.904	0.808	0.831
k/150	1.001	0.726	0.722	0.578	0.640
k/50	1.073	1.007	1.007	0.904	0.867
k/20	1.013	0.961	0.995	0.975	0.973
k/10	0.881	0.949	0.974	0.944	0.956
k/7	0.924	0.899	0.918	0.941	0.942
k/3.5	0.926	0.914	0.918	0.929	0.941

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.1.3 การเกิดกลุ่มอนุภาค

การศึกษาการเกิดกลุ่มอนุภาคทำให้เราทราบถึงพฤติกรรมการเกิดกลุ่มอนุภาคในลักษณะที่แตกต่างกันจากการเปลี่ยนค่าแอดเฮชันและการกระจายรัศมีอนุภาค รวมไปถึงค่าต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นล้วนมีความสัมพันธ์กับการเกิดกลุ่มอนุภาคนี้ โดยได้นำเสนอตารางภาพรูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกันไว้ในลำดับต่อไป



รูป 4.3 อธิบายการแสดงภาพของกลุ่มอนุภาคในการจำลองวัสดุเม็ดแบบ 2 มิติ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

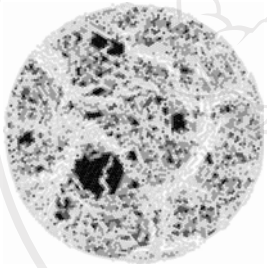
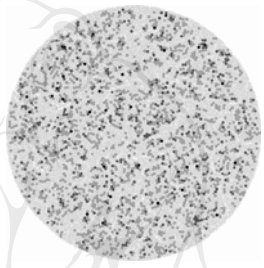
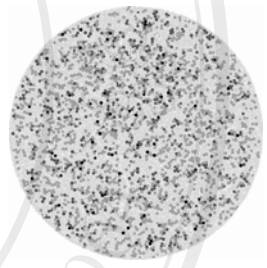
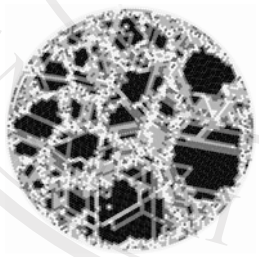
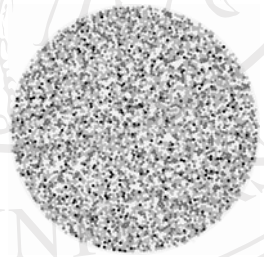
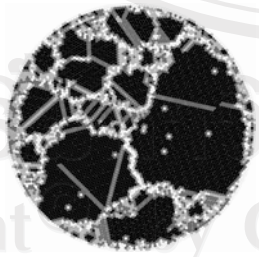
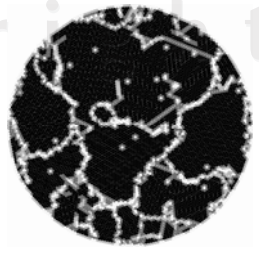
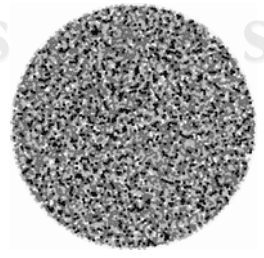
ปัจจัยที่ทำให้การเกิดกลุ่มอนุภาคของวัสดุเม็ดเปลี่ยนไปประกอบด้วยค่าแอดเฮชันและการกระจายรัศมีอนุภาค จากรูป 4.4 สามารถแบ่งอิทธิพลที่มีผลต่อพฤติกรรมของการเกิดกลุ่มอนุภาคได้ดังนี้

เมื่อวัสดุเม็ดมีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากัน $(r_{\max}/r_{\min}=1)$ วัสดุเม็ดที่มีค่าแอดเฮชันต่ำอนุภาคไม่สามารถก่อตัวเป็นกลุ่มอนุภาคได้ ทั้งนี้สามารถทราบได้จากจำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคมีค่าต่ำ แต่เมื่อวัสดุเม็ดมีค่าแอดเฮชันสูง จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคมีค่าสูงขึ้นทำให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคจะมีมากขึ้น กลุ่มอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับเมื่อแอดเฮชันเพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงข่ายของอนุภาคที่เป็นระเบียบมากขึ้น และโครงข่ายจะมีลักษณะเป็นผลึก (Crystallization) เมื่อค่าแอดเฮชันระหว่างอนุภาคสูงพอที่จะทำให้จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาค $z \geq 5$ ดังตาราง 4.1 และรูป 4.4 และจะสังเกตได้ว่าการเกิดกลุ่มอนุภาคเกิดขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าแอดเฮชันที่มากพอจะทำให้เกิดกลุ่มอนุภาคได้

เมื่อวัสดุเม็ดมีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคแตกต่างกัน $(r_{\max}/r_{\min}=1.25\rightarrow 2)$ ที่ค่าแอดเฮชันต่ำ อนุภาคไม่สามารถยึดเกาะตัวกันได้เช่นเดียวกับวัสดุเม็ดที่มีขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน ลักษณะดังกล่าวเป็นผลให้ไม่สามารถเกิดกลุ่มอนุภาคได้ ถ้าวัสดุเม็ดมีค่าแอดเฮชันสูง ๆ ถึงแม้ว่าจำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาค $z<5$ แต่ขนาดรัศมีอนุภาคของวัสดุเม็ดที่มีความแตกต่างกันมากเกินไป โครงข่ายของอนุภาคจะมีลักษณะโครงสร้างกระจัดกระจายและไม่เป็นระเบียบทำให้วัสดุเม็ดไม่เกิดกลุ่มอนุภาค ดังรูป 4.4 โครงข่ายที่มีลักษณะเป็นผลึกจะไม่เกิดขึ้นและไม่สามารถสังเกตกลุ่มของอนุภาคได้อย่างชัดเจนถึงแม้ว่าค่าแอดเฮชันระหว่างอนุภาคจะมีค่าสูงเท่าใดก็ตาม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

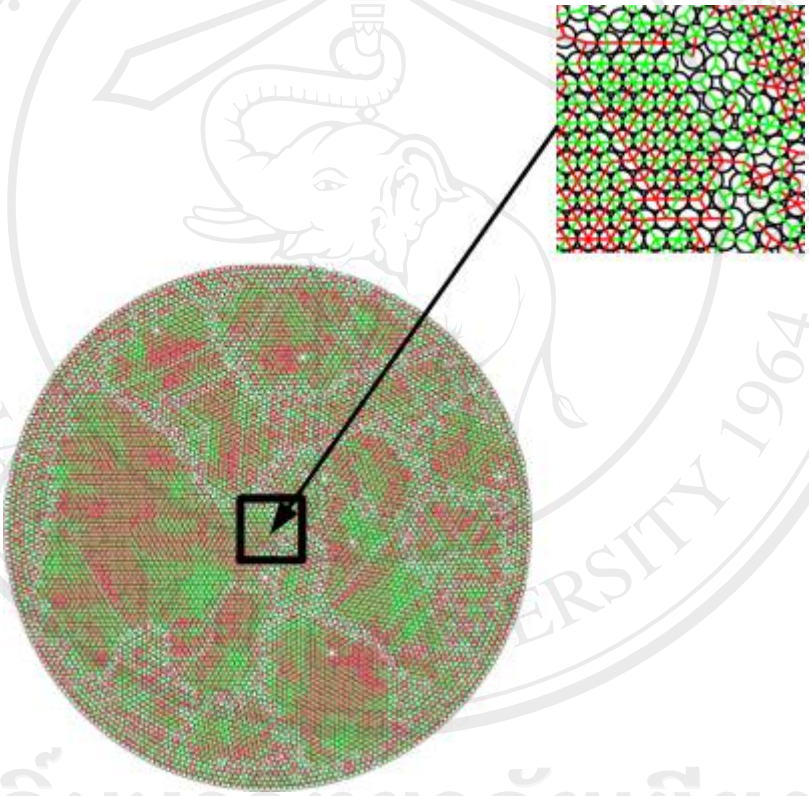
รูป 4.4 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงรหัสความเข้มสี (Grayscale) ตามจำนวนการสัมผัสต่ออนุภาค โดยกำหนดให้ สีดำ = 6, สีเทาเข้ม = 5, สีเทาอ่อน= 4 และ สีขาว < 4

γ	ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})		
	1	1.5	2
0			
k/200			
k/50			
k/10			
k/3.5			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.1.4 โครงข่ายของแรงระหว่างอนุภาค

การศึกษาโครงข่ายของแรงระหว่างอนุภาคทำให้เราทราบถึงลักษณะโครงข่ายที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเปลี่ยนค่าแอดเฮชันและการกระจายรัศมีอนุภาค รวมไปถึงค่าต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นล้วนมีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงข่ายนี้ โดยได้นำเสนอตารางภาพโครงข่ายของแรงระหว่างอนุภาคที่ค่าแอดเฮชันและรัศมีอนุภาคแตกต่างกันไว้ในลำดับต่อไป



รูป 4.5 อธิบายการแสดงภาพโครงข่ายของแรงตั้งฉากระหว่างอนุภาค

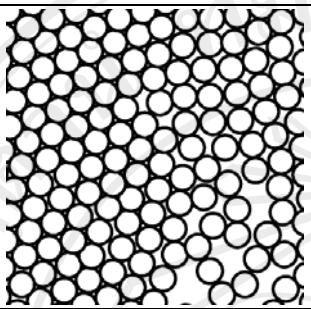
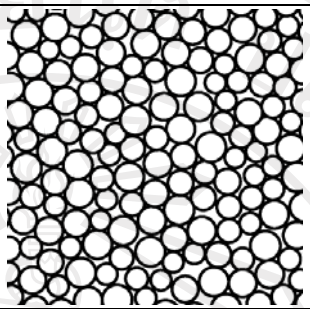
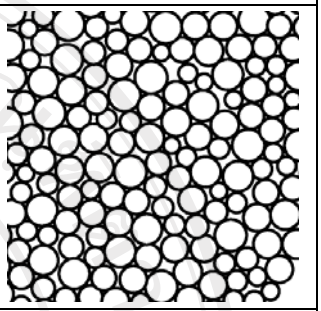
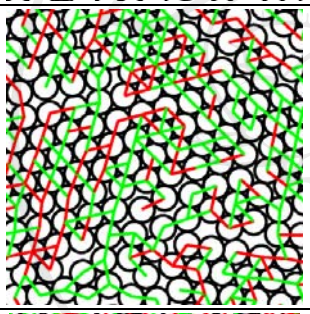
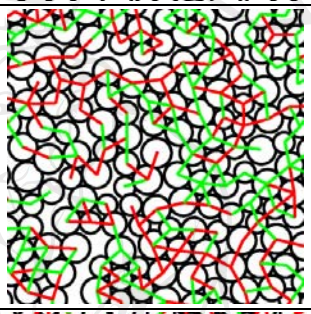
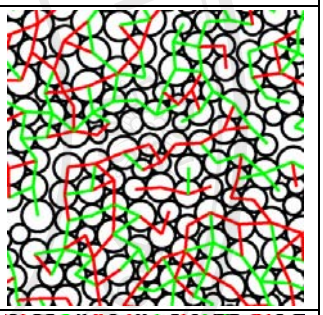
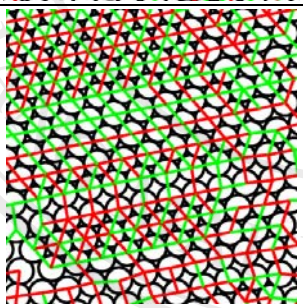
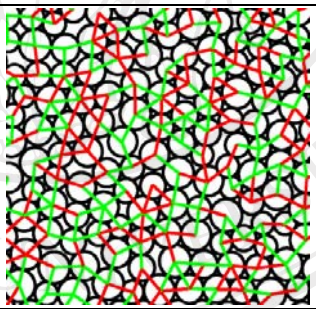
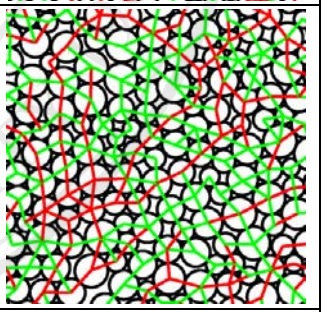
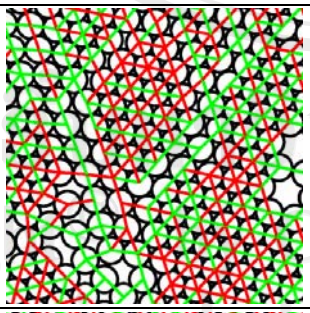
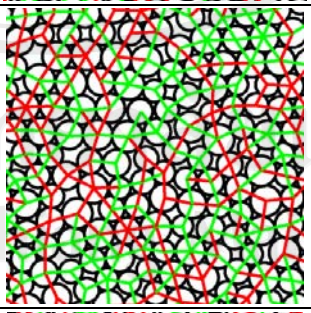
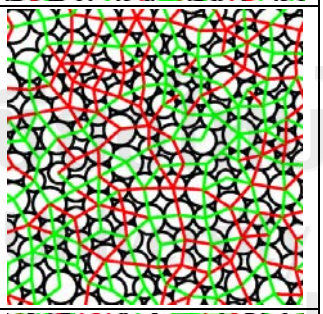
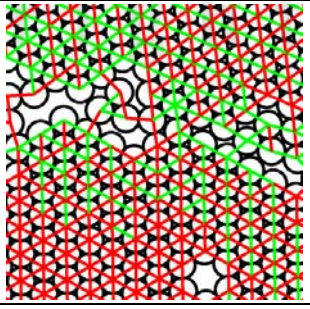
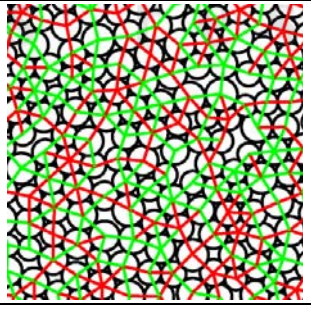
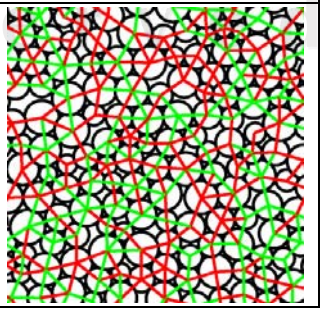
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ค่าแอดเฮชันและการกระจายรัศมีอนุภาคนอกจากเป็นตัวแปรที่มีผลต่อจำนวนของการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคแล้ว ค่าเหล่านี้ยังเป็นสาเหตุให้โครงข่ายของแรงสัมผัสตั้งฉากระหว่างอนุภาคมีลักษณะแตกต่างกันออกไป เมื่อค่าแอดเฮชันเท่ากับ 0 ไม่ว่าอัตราส่วนรัศมีอนุภาคจะมีค่าเท่าใดก็ตาม การศึกษาโครงข่ายของแรงระหว่างอนุภาคไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจากไม่เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาค ในกรณีที่วัสดุเม็ดมีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากันสำหรับค่าแอดเฮชันอยู่ในระดับต่ำ จำนวนการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคมีค่าน้อย โครงข่ายของแรงระหว่างอนุภาคมีลักษณะไม่หนาแน่น ซึ่งทำให้อนุภาคไม่สามารถที่จะเกาะตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคได้ และสำหรับกรณีที่ค่าแอดเฮชันสูงนั้น โครงข่ายของแรงระหว่างอนุภาคจะมีลักษณะที่หนาแน่นมากขึ้น และมีลักษณะเป็นผลึกเมื่อจำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาค $z \geq 5$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับหัวข้อที่ผ่านมา โครงข่ายลักษณะนี้จะเป็นโครงสร้างที่มีการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคมากที่สุด จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคจะมีค่ามากที่สุดตามไปด้วย

เมื่อวัสดุเม็ดมีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคแตกต่างกัน $(r_{\max}/r_{\min} = 1.25 \rightarrow 2)$ กรณีที่ค่าแอดเฮชันมีค่าต่ำ โครงข่ายของอนุภาคมีการยึดเกาะกันอย่างไม่หนาแน่นเช่นเดียวกับวัสดุเม็ดที่มีขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน แต่โครงข่ายของแรงระหว่างอนุภาคนี้จะมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบและมีลักษณะกระจัดกระจาย จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคจะมีค่าน้อยกว่ากรณีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากันอย่างเด่นชัด ทั้งนี้เพราะความแตกต่างระหว่างรัศมีอนุภาคทำให้เกิดโครงข่ายที่ไม่เป็นระเบียบ กลุ่มอนุภาคจึงมีลักษณะไม่เด่นชัด ในกรณีที่วัสดุเม็ดมีค่าแอดเฮชันสูง โครงข่ายของแรงระหว่างอนุภาคมีลักษณะที่หนาแน่นขึ้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน โครงข่ายจึงมีลักษณะไม่เป็นระเบียบเช่นเดิมทำให้โครงข่ายที่มีลักษณะเป็นผลึกจะไม่เกิดขึ้น ดังนั้นอนุภาคจึงไม่สามารถจัดเรียงตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคได้ตามที่ได้วิเคราะห์ในหัวข้อก่อนหน้านี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.6 โครงข่ายของแรงสัมผัสตั้งฉากระหว่างอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน กำหนดให้สีแดงคือแรงกด และสีเขียวคือแรงดึง

γ	ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})		
	1	1.5	2
0			
k/200			
k/50			
k/10			
k/3.5			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.1.5 ทิศทางการสัมผัส

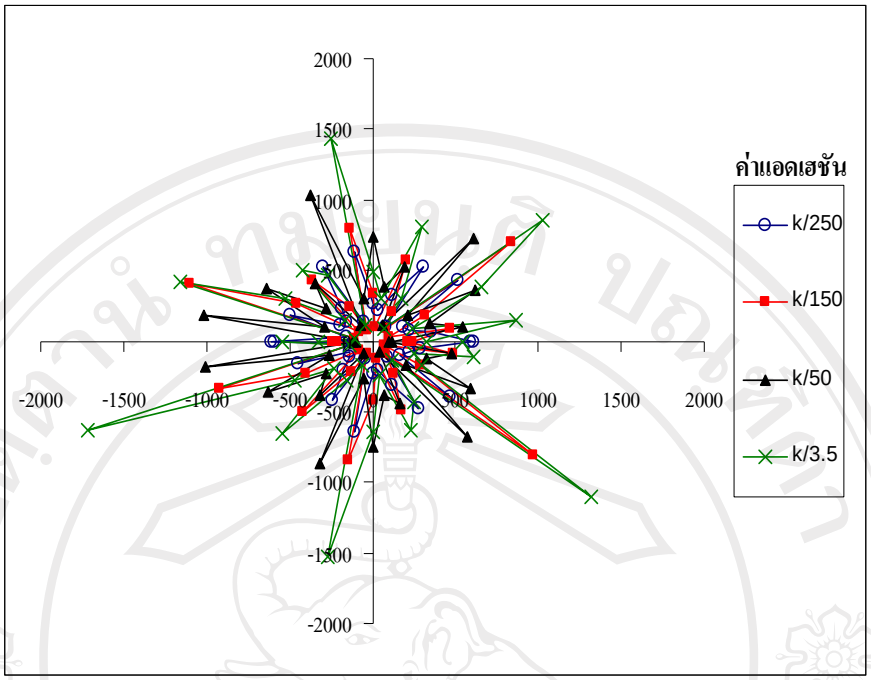
ทิศทางการสัมผัสของอนุภาคในที่นี้จะนำเสนอด้วยกราฟเชิงมุมของทิศทางการสัมผัสกัน $(N_P(\theta))$ กราฟดังกล่าวนี้ได้เลือกใช้ช่วงแบ่งเชิงมุม $(\Delta\theta)=10^\circ$ ซึ่งในระบบโครงข่ายของการสัมผัสจะกำหนดให้ ช่วงแบ่งเชิงมุมช่วงละ 10° จำนวน 18 ช่วง การสัมผัสแบบกดจะถูกแสดงในส่วนบนของกราฟ $[0,\pi]$ และการสัมผัสแบบดึงจะถูกแสดงในส่วนของกราฟ $[0,-\pi]$ ดังแสดงในรูป 4.7 ถึง 4.13

จากกราฟทิศทางเชิงมุมการสัมผัสกันของอนุภาคในวัสดุเม็ดพบว่า ทิศทางการสัมผัสกันของแรงสัมผัสแบบกดและดึงสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนสำหรับขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน $(r_{\max}/r_{\min}=1)$ และการสัมผัสกันของอนุภาคจะไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางทั้งแรงสัมผัสแบบกดและดึงสำหรับขนาดรัศมีอนุภาคแตกต่างกัน $(r_{\max}/r_{\min}=1.25\rightarrow 2)$

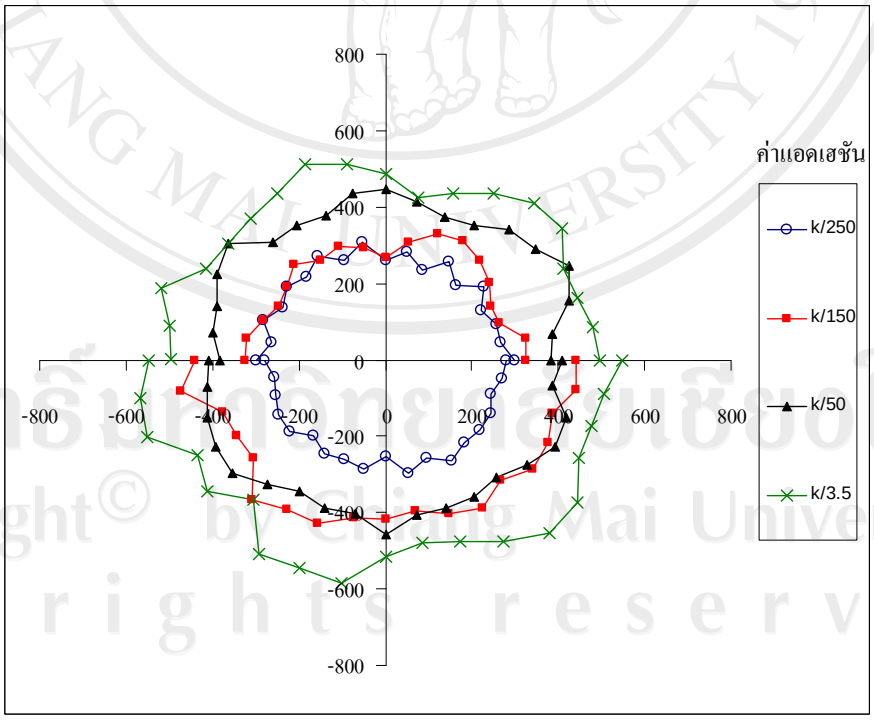
ในกรณีที่ขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากันและค่าแอดเฮชันอยู่ในระดับต่ำ ทิศทางการสัมผัสของอนุภาคจะมีทิศทางที่หลากหลายทางแรงสัมผัสแบบกดและดึง กลุ่มอนุภาคจะเกิดขึ้นเป็นกลุ่มเล็กๆเนื่องจากโครงข่ายของอนุภาคที่กระจัดกระจายและไม่หนาแน่น แต่เมื่อค่าแอดเฮชันมีค่าสูงขึ้น การสัมผัสจะมีทิศทางหลักที่เด่นชัดมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงข่ายของอนุภาคมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นและมีจำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคมากพอ

ในกรณีวัสดุเม็ดมีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคแตกต่างกัน เมื่อวัสดุเม็ดมีค่าแอดเฮชันต่ำ การสัมผัสมีทิศทางที่ไม่แน่นอนและกระจัดกระจายเมื่อเทียบกับขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน แรงสัมผัสแบบกดจะมีค่าน้อยกว่าแรงสัมผัสดึง แสดงให้เห็นว่าการยึดเกาะกันของอนุภาคมีน้อยกว่าการผลักออกจากกันทำให้อนุภาคไม่สามารถก่อตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคได้ และสำหรับวัสดุเม็ดที่มีค่าแอดเฮชันสูงขึ้น แรงสัมผัสแบบกดจะมีค่ามากขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับแรงสัมผัสแบบดึงเมื่อค่าแอดเฮชันสูงขึ้นตามลำดับ แต่การสัมผัสไม่มีทิศทางที่แน่นอนเช่นเดียวกับวัสดุเม็ดที่มีค่าแอดเฮชันต่ำ โครงข่ายของแรงระหว่างอนุภาคไม่เป็นระเบียบและกระจัดกระจายเนื่องจากอัตราส่วนรัศมีอนุภาคที่แตกต่างกัน ดังนั้นอนุภาคจะไม่สามารถเกิดโครงสร้างแบบผลึกที่เป็นสาเหตุให้เกิดกลุ่มอนุภาคได้ กลุ่มอนุภาคในกรณีนี้จึงมีลักษณะไม่เด่นชัด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

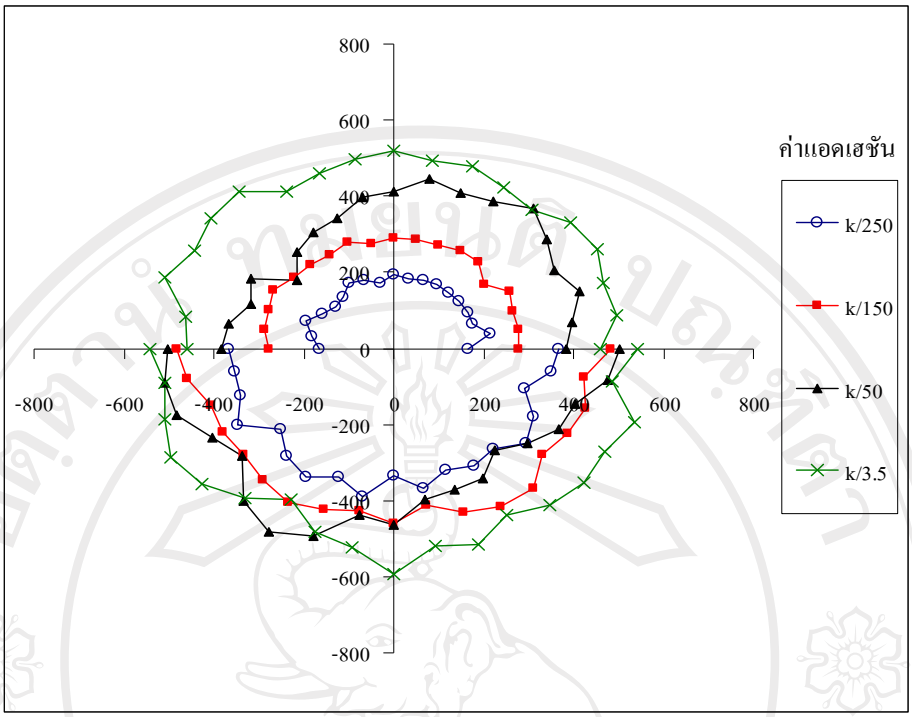


รูป 4.7 กราฟทิศทางการสัมผัสที่อัตราส่วนรัศมีของอนุภาคเท่ากัน $(r_{max}/r_{min}=1)$

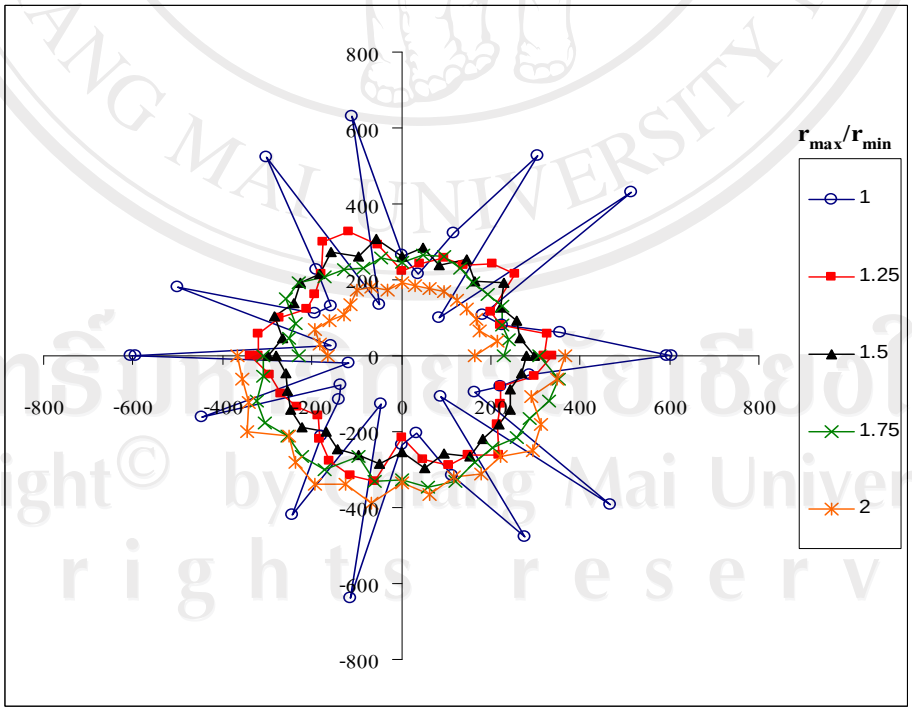


รูป 4.8 กราฟทิศทางการสัมผัสที่อัตราส่วนรัศมีของอนุภาค $r_{max}/r_{min}=1.5$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

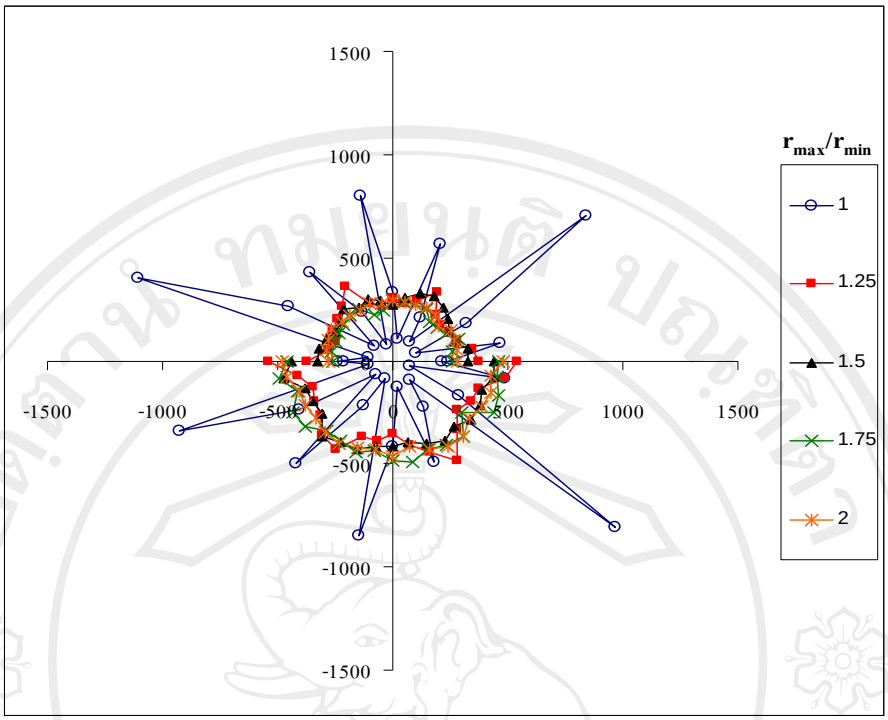


รูป 4.9 กราฟทิศทางการสัมผัสที่อัตราส่วนรัศมีของอนุภาค $r_{max}/r_{min} = 2$

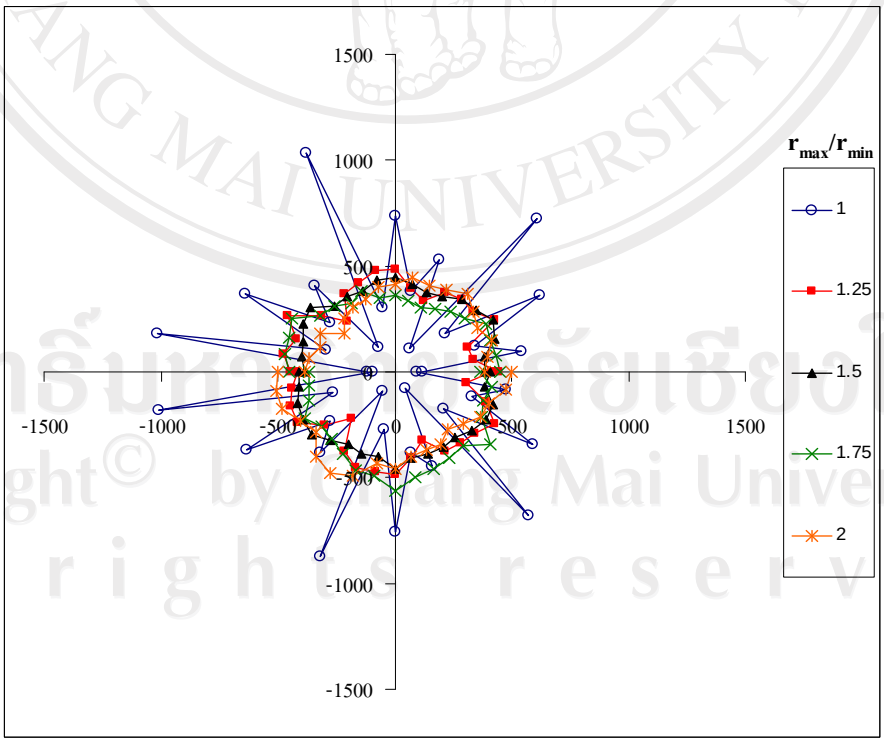


รูป 4.10 กราฟทิศทางการสัมผัสที่ค่า $\gamma = k/250$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

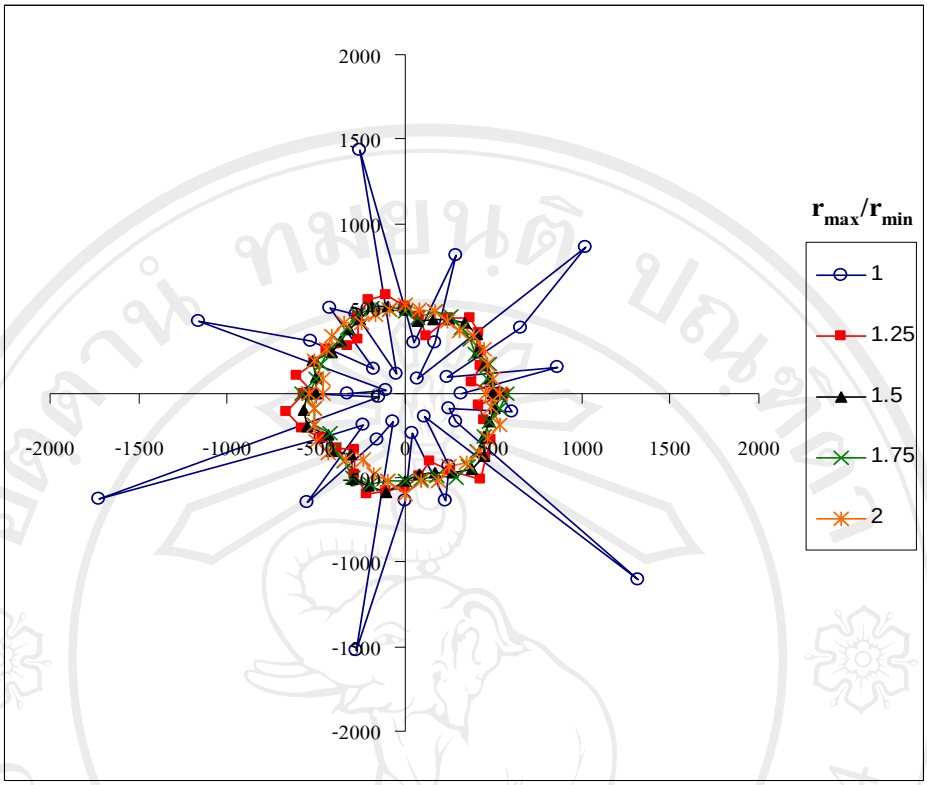


รูป 4.11 กราฟทิศทางการสัมผัสที่ค่า $\gamma = k/150$



รูป 4.12 กราฟทิศทางการสัมผัสที่ค่า $\gamma = k/50$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.13 กราฟทิศทางการสัมผัสที่ค่า $\gamma = k/3.5$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.2 ผลการทดสอบโดยการกระทบพื้นเรียบ

เมื่อนำวัสดุเม็ดอยู่ในสภาวะสมดุลทางสถิตยศาสตร์มาทดสอบโดยการกระทบพื้นเรียบในความเร็วต่าง ๆ ในขั้นตอนการทดสอบนี้ได้แบ่งวัสดุเม็ดออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีค่าแอดเฮชันต่ำ ความเร็วของวัสดุเม็ดที่ใช้ในการกระทบพื้นเรียบมี 4 ค่าคือ $v = 0.05$ m/s, 0.1 m/s, 0.25 m/s และ 0.5 m/s และกลุ่มที่มีค่าแอดเฮชันสูง ความเร็วของวัสดุเม็ดที่ใช้ในการกระทบพื้นเรียบมี 5 ค่าคือ $v = 0.1$ m/s, 1 m/s, 2.5 m/s, 5 m/s และ 10 m/s

4.2.1 การเกิดและลักษณะการแตกร้าวของวัสดุเม็ดหลังจากกระทบพื้นเรียบ

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงลักษณะการแตกร้าวของวัสดุเม็ดเนื่องจากความเร็วของการกระทบพื้นเรียบที่แตกต่างกัน และคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเม็ดดังหัวข้อถัดไปนี้

ก. ความเร็วของวัสดุเม็ดที่ตกกระทบพื้นเรียบ

รูป 4.14 ถึง 4.22 แสดงให้เห็นว่าความเร็วของวัสดุเม็ดที่กระทบพื้นเรียบแตกต่างกันทำให้ลักษณะและพฤติกรรมการแตกร้าวแตกต่างกันออกไป วัสดุเม็ดกระทบพื้นเรียบด้วยความเร็วทำให้เกิดแรงกระทำน้อยกว่าภาระแรงสูงสุดที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ สำหรับกรณีวัสดุเม็ดมีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากัน การแตกร้าวจะเกิดระหว่างรอยต่อของกลุ่มอนุภาค (Agglomerate Joint) และสำหรับกรณีวัสดุเม็ดมีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคแตกต่างกัน การเสียรูปเกิดขึ้นเล็กน้อย ณ จุดที่กระทบพื้นเรียบ

การกระทบพื้นเรียบด้วยความเร็วสูงทำให้แรงที่กระทำกับวัสดุเม็ดมีค่ามากตามไปด้วย เมื่อวัสดุเม็ดกระทบพื้นเรียบด้วยความเร็วที่ทำให้เกิดแรงกระทำมีค่าสูงกว่าภาระแรงสูงสุดที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ วัสดุเม็ดมีการเสียรูปอย่างชัดเจนและแตกออกจากกัน และแตกกระจายเป็นชิ้นเล็ก ๆ เมื่อวัสดุเม็ดกระทบพื้นเรียบด้วยความเร็วที่สูงขึ้นทั้งกรณีวัสดุเม็ดมีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากันและแตกต่างกัน

ข. คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเม็ด

ผลของการกระจายรัศมีอนุภาคและค่าแอดเฮชันที่มีต่อการแตกร้าวของวัสดุเม็ดได้ถูกแสดงรูป 4.14 ถึง 4.22 ภาระของแรงสูงสุดที่วัสดุเม็ดรับได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าแอดเฮชันมากขึ้นตามลำดับ

กรณีของวัสดุเม็ดที่มีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากัน $(r_{\max}/r_{\min} = 1)$ สำหรับวัสดุเม็ดที่มีค่าแอดเฮชันต่ำ วัสดุเม็ดจะแตกละเอียดในทุก ๆ ความเร็วของการกระทบพื้นเรียบเนื่องจากอนุภาค

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ยึดเกาะกันไม่หนาแน่นทำให้ภาระแรงสูงสุดที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้มีค่าน้อย และสำหรับวัสดุเม็ดที่มีค่าแอดเฮชันมีค่าสูงขึ้น โครงข่ายของแรงระหว่างอนุภาคจะมีลักษณะหนาแน่นและเป็นระเบียบมากขึ้น พฤติกรรมการแตกร้าวจะเหมือนวัสดุที่มีลักษณะแข็งเปราะ (Brittle) และสามารถสังเกตเห็นกลุ่มอนุภาคได้อย่างชัดเจน เมื่อความเร็วในการกระทบพื้นเรียบน้อยกว่าความเร็ววิกฤตที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ วัสดุเม็ดจะแตกร้าวตามรอยต่อของอนุภาคในทิศทางตั้งฉากกับพื้นเรียบ ถ้าความเร็วในการกระทบพื้นเรียบเข้าใกล้ความเร็ววิกฤตที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ วัสดุเม็ดจะแตกออกเป็นสองซีกตามรอยต่อของกลุ่มอนุภาคตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดในทิศทางตั้งฉากกับพื้นเรียบอย่างเห็นได้ชัด และวัสดุเม็ดจะแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ เมื่อความเร็วในการกระทบพื้นเรียบมีค่าสูงกว่าความเร็ววิกฤตที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ เนื่องจากแรงกระทำมีค่าสูงกว่าภาระแรงสูงสุดที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้

ในกรณีของวัสดุเม็ดที่มีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคแตกต่างกัน $\left(r_{\max}/r_{\min}=1.25\rightarrow 2\right)$ สำหรับวัสดุเม็ดที่มีค่าแอดเฮชันต่ำ วัสดุเม็ดจะแตกละเอียดกับทุก ๆ ความเร็วในการกระทบพื้นเรียบเนื่องจากการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคไม่หนาแน่นทำให้ภาระแรงสูงสุดที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้มีค่าน้อย พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกับวัสดุเม็ดที่มีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากัน และสำหรับวัสดุเม็ดที่มีค่าแอดเฮชันสูง การยึดเกาะกันมีลักษณะที่หนาแน่นแต่จะไม่เกิดกลุ่มอนุภาค เนื่องจากโครงข่ายของแรงระหว่างอนุภาคไม่เป็นระเบียบมากพอที่จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบผลึกได้สามารถสังเกตได้จากรูป 4.6 ($\gamma = k/3.5$, $r_{\max}/r_{\min}=1$) วัสดุเม็ดในกรณีนี้จะมีแนวโน้มที่สามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่าอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากัน เมื่อความเร็วในการกระทบพื้นเรียบน้อยกว่าความเร็ววิกฤตที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ วัสดุเม็ดจะเกิดการยุบตัวกับด้านที่สัมผัสพื้นเรียบเพียงเล็กน้อย การเสียรูปจะเกิดในทิศทางตั้งฉากกับพื้นเรียบ แต่ไม่สามารถสังเกตการแตกร้าวของวัสดุเม็ดได้เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเม็ดที่มีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากัน และสังเกตได้ว่าพฤติกรรมการเสียรูปจะเหมือนวัสดุที่มีลักษณะเหนียว (Ductility) ถ้าความเร็วในการกระทบพื้นเรียบเข้าใกล้ความเร็ววิกฤตที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ วัสดุเม็ดเกิดการเสียรูปอย่างชัดเจนและสามารถสังเกตเห็นรอยแตกร้าวที่ตรงกลางของวัสดุเม็ด และจะแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ เมื่อความเร็วในการกระทบพื้นเรียบทำให้เกิดแรงกระทำมีค่าสูงกว่าภาระแรงสูงสุดที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ และวัสดุเม็ดจะแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ มากขึ้นเมื่อใช้ความเร็วในการกระทบพื้นเรียบสูงขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.2.2 พฤติกรรมการแพร่กระจายการแตกร้าวของวัสดุเม็ด

เมื่อทราบถึงลักษณะการแตกร้าวของวัสดุเม็ดจากความเร็วในการกระทบพื้นเรียบและคุณสมบัติของวัสดุเม็ดที่แตกต่างกันแล้ว ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมการแพร่กระจายการแตกร้าวของวัสดุเม็ดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังรูป 4.14 ถึง 4.22 โดยวัสดุเม็ดที่มีค่าแอดเฮชันต่ำทั้งกรณีที่มีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากันหรือแตกต่างกัน พฤติกรรมการแตกร้าวไม่สามารถศึกษาได้เนื่องจากการยึดเกาะกันระว่างอนุภาคมีน้อยทำให้วัสดุเม็ดแตกละเอียดในทุก ๆ ความเร็วที่ใช้กระทบพื้นเรียบ

สำหรับวัสดุเม็ดที่มีค่าแอดเฮชันสูงและมีอัตราส่วนรัศมีอนุภาคเท่ากัน กรณีที่ความเร็วในการกระทบพื้นเรียบน้อยกว่าความเร็ววิกฤตที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ เมื่อวัสดุเม็ดกระทบพื้นเรียบ การแตกร้าวจะเริ่มจากรอยต่อระหว่างกลุ่มอนุภาคในแนวที่ตั้งฉากกับพื้นเรียบและจะเกิดการเสียรูปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และสังเกตได้ว่าการแตกร้าวของวัสดุเม็ดจะเกิดจากตรงกลางวัสดุเม็ดและแพร่กระจายสู่ภายนอก และเมื่อเพิ่มความเร็วในการกระทบพื้นเรียบให้มีค่าใกล้เคียงกับความเร็ววิกฤตที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ ในขณะที่วัสดุเม็ดกระทบพื้นเรียบ การแตกร้าวจะเริ่มจากรอยต่อระหว่างกลุ่มอนุภาคและจะแพร่กระจายจากตรงกลางวัสดุเม็ดสู่ภายนอก ถึงแม้ว่าวัสดุเม็ดจะมีการเสียรูปอย่างเห็นได้ชัดเจนแต่ยังไม่แตกออกจากกัน และในกรณีที่ความเร็วในการกระทบพื้นเรียบมากกว่าความเร็ววิกฤตที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ พฤติกรรมการแตกร้าวของวัสดุเม็ดในช่วงแรกหลังการกระทบพื้นเรียบจะมีลักษณะเดียวกับความเร็วในการกระทบพื้นเรียบที่ต่ำกว่า แต่เนื่องด้วยแรงที่กระทำวัสดุเม็ดที่มากกว่าภาระสูงสุดที่วัสดุเม็ดรับได้ทำให้วัสดุเม็ดแตกออกจากกัน และจะแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ มากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการกระทบพื้นเรียบมากขึ้น และจะสังเกตได้ว่าพฤติกรรมการแตกร้าวจะเหมือนวัสดุที่มีลักษณะแข็งเปราะ (Brittle) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา

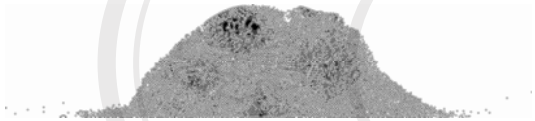
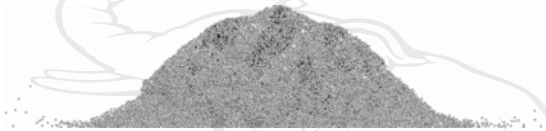
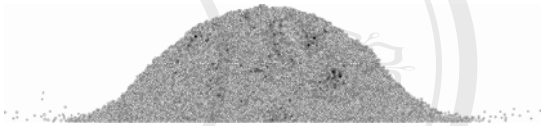
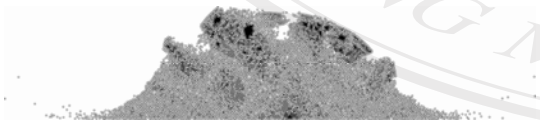
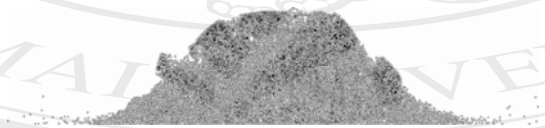
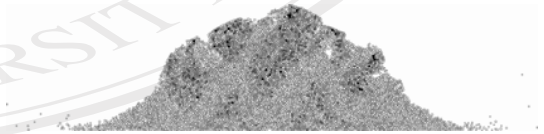
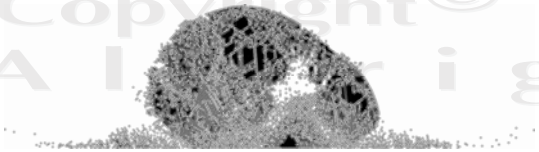
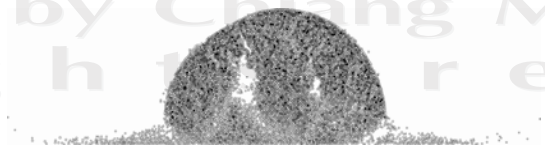
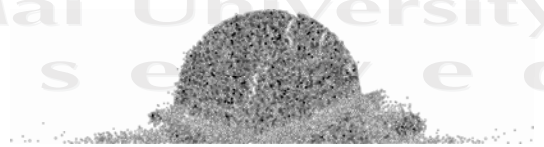
ในส่วนของวัสดุเม็ดที่มีค่าแอดเฮชันสูงและมีขนาดรัศมีอนุภาคแตกต่างกัน กรณีที่ความเร็วในการกระทบพื้นเรียบน้อยกว่าความเร็ววิกฤตที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ การเสียรูปจะแตกต่างกับวัสดุเม็ดที่มีขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน โดยไม่สามารถสังเกตการแตกร้าวของอนุภาคได้ เนื่องจากขนาดรัศมีอนุภาคที่แตกต่างกันทำให้ไม่เกิดกลุ่มอนุภาคตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้น วัสดุเม็ดจะเกิดการเสียรูปและยุบตัวในด้านที่กระทบพื้นเรียบเพียงเล็กน้อย ในส่วนกรณีที่ความเร็วในการกระทบพื้นเรียบมีค่าใกล้เคียงความเร็ววิกฤตที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ เมื่อวัสดุเม็ดกระทบพื้นเรียบ วัสดุเม็ดจะเริ่มเสียรูปและยุบตัวในด้านที่กระทบพื้นเรียบอย่างชัดเจน และสังเกตได้ถึงการแตกร้าวที่เริ่มเกิดขึ้นภายในวัสดุเม็ด โดยจะเริ่มแตกร้าวจากภายในวัสดุเม็ดและจะแพร่กระจายสู่ภายนอกแต่ยังไม่แตกออกจากกัน และในกรณีที่ความเร็วในการกระทบพื้นเรียบมากกว่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ความเร็ววิกฤตที่วัสดุเม็ดสามารถรับได้ พฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุเม็ดในช่วงแรกหลังการกระทบจะมีลักษณะเดียวกับความเร็วในการกระทบพื้นเรียบที่ต่ำกว่า แต่หลังจากนั้นจะเริ่มเสียรูปและยุบตัวในด้านที่กระทบพื้นเรียบอย่างชัดเจนและเกิดการแตกออกจากกันเป็นสองซีก วัสดุเม็ดจะแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ มากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการกระทบพื้นเรียบมากขึ้นเช่นเดียวกับวัสดุเม็ดที่มีขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน และจะสังเกตได้ว่าพฤติกรรมการแตกร้าวจะเหมือนวัสดุที่มีลักษณะเหนียว (Ductility) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น

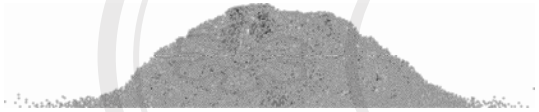
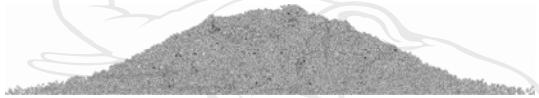
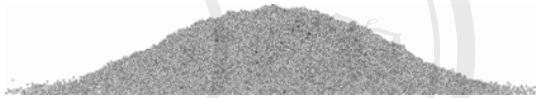
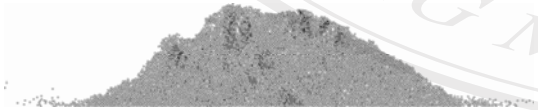
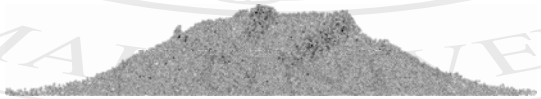
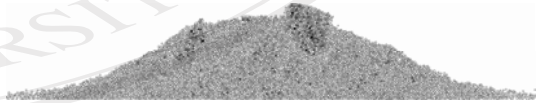
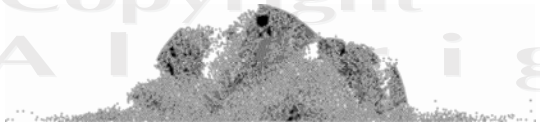
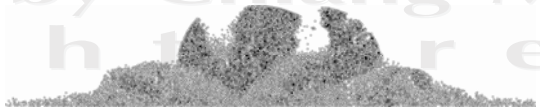
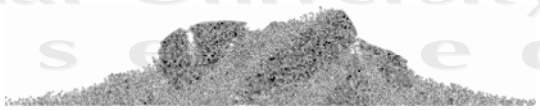
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.14 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียรูป ความเร็วในการกระทบพื้น v = 0.05 m/s ที่ขนาดรัศมีอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงรหัสความเข้มสี (Grayscale) ตามจำนวนการสัมผัสต่ออนุภาค โดยกำหนดให้ สีดำ = 6, สีเทาเข้ม = 5, สีเทาอ่อน = 4 และ สีขาว < 4

γ	ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})		
	1	1.5	2
k/250			
k/200			
k/150			

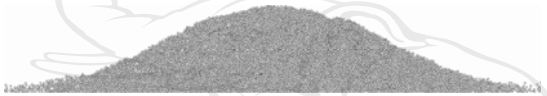
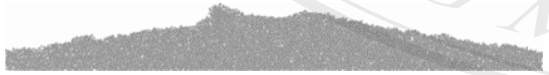
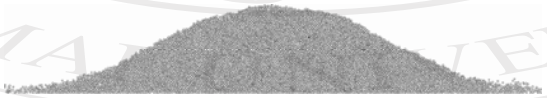
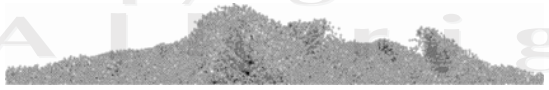
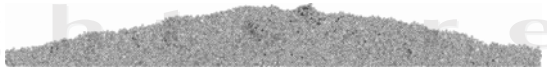
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.15 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียรูป ความเร็วในการกระทบพื้น v = 0.1 m/s ที่ขนาดรัศมีอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงรหัสความเข้มสี (Grayscale) ตามจำนวนการสัมผัสต่ออนุภาค โดยกำหนดให้ สีดำ = 6, สีเทาเข้ม = 5, สีเทาอ่อน = 4 และ สีขาว < 4

γ	ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})		
	1	1.5	2
k/250			
k/200			
k/150			

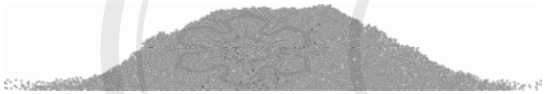
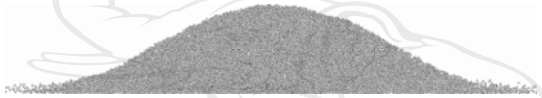
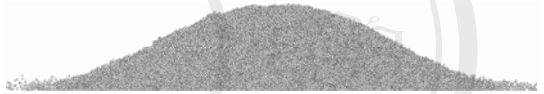
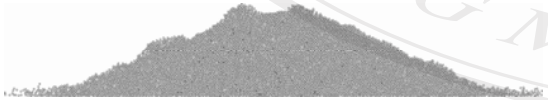
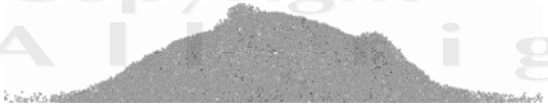
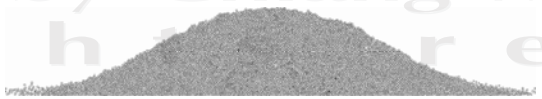
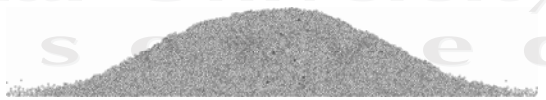
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.16 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียรูป ความเร็วในการกระทบพื้น v = 0.25 m/s ที่ขนาดรัศมีอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงรหัสความเข้มสี (Grayscale) ตามจำนวนการสัมผัสต่ออนุภาค โดยกำหนดให้ สีดำ = 6, สีเทาเข้ม = 5, สีเทาอ่อน = 4 และ สีขาว < 4

γ	ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})		
	1	1.5	2
k/250			
k/200			
k/150			

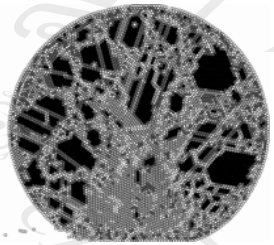
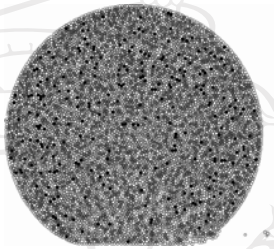
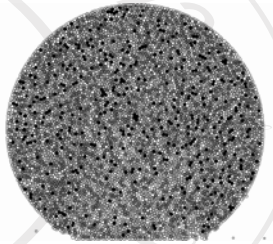
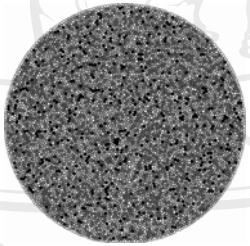
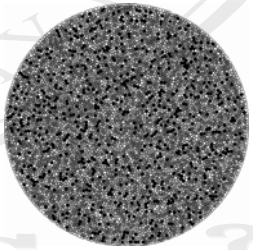
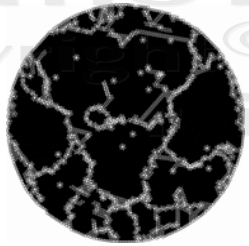
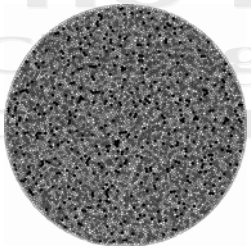
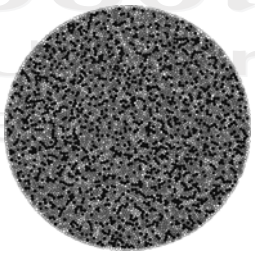
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.17 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียรูป ความเร็วในการกระทบพื้น v = 0.5 m/s ที่ขนาดรัศมีอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงรหัสความเข้มสี (Grayscale) ตามจำนวนการสัมผัสต่ออนุภาค โดยกำหนดให้ สีดำ = 6, สีเทาเข้ม = 5, สีเทาอ่อน = 4 และ สีขาว < 4

γ	ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})		
	1	1.5	2
k/250			
k/200			
k/150			

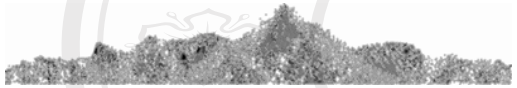
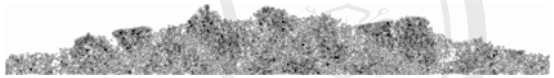
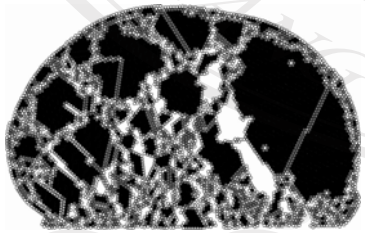
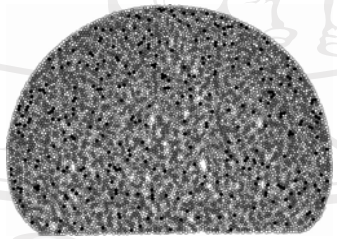
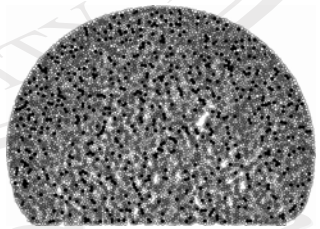
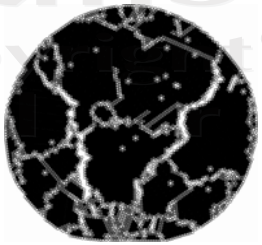
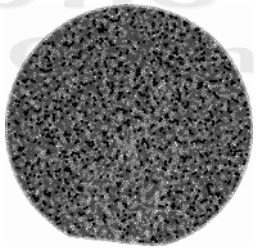
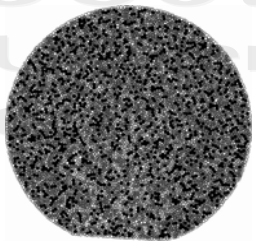
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.18 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียรูป ความเร็วในการกระทบพื้น v = 0.1 m/s ที่ขนาดรัศมีอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงรหัสความเข้มสี (Grayscale) ตามจำนวนการสัมผัสต่ออนุภาค โดยกำหนดให้ สีดำ = 6, สีเทาเข้ม = 5, สีเทาอ่อน = 4 และ สีขาว < 4

γ	ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})		
	1	1.5	2
k/50			
k/10			
k/3.5			

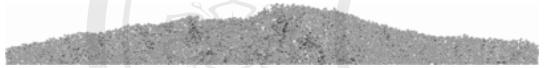
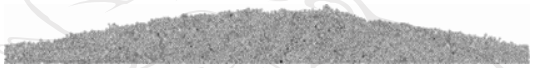
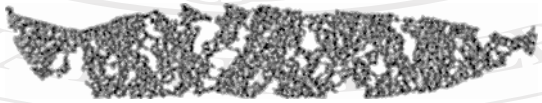
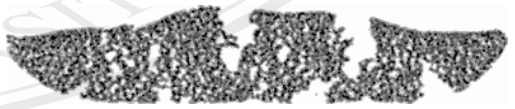
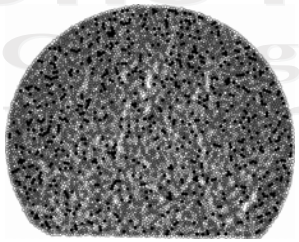
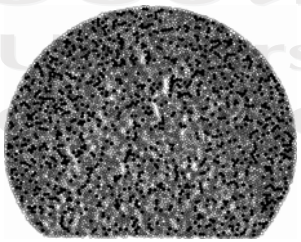
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.19 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียรูป ความเร็วในการกระทบพื้น v = 1 m/s ที่ขนาดรัศมีอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงรหัสความเข้มสี (Grayscale) ตามจำนวนการสัมผัสต่ออนุภาค โดยกำหนดให้ สีดำ = 6, สีเทาเข้ม = 5, สีเทาอ่อน = 4 และ สีขาว < 4

γ	ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})		
	1	1.5	2
k/50			
k/10			
k/3.5			

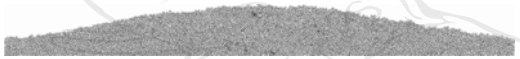
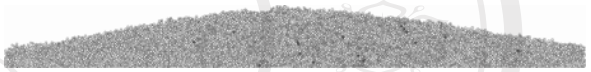
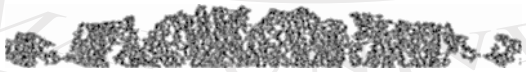
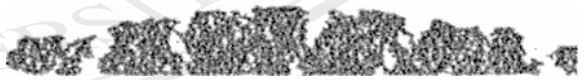
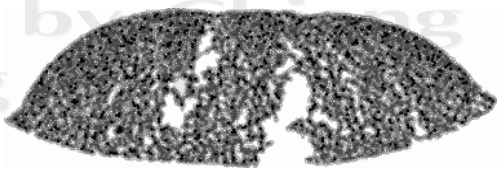
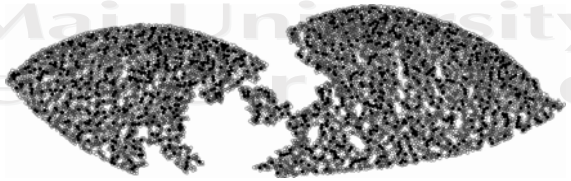
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.20 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียรูป ความเร็วในการกระทบพื้น v = 2.5 m/s ที่ขนาดรัศมีอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงรหัสความเข้มสี (Grayscale) ตามจำนวนการสัมผัสต่ออนุภาค โดยกำหนดให้ สีดำ = 6, สีเทาเข้ม = 5, สีเทาอ่อน = 4 และ สีขาว < 4

γ	ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})		
	1	1.5	2
k/50			
k/10			
k/3.5			

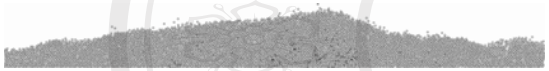
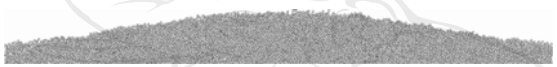
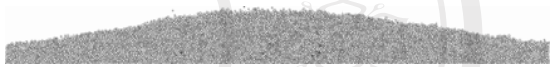
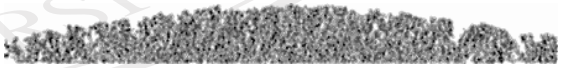
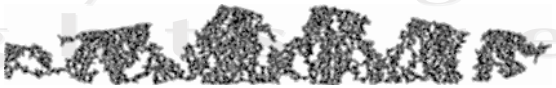
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.21 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียรูป ความเร็วในการกระทบพื้น v = 5 m/s ที่ขนาดรัศมีอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงรหัสความเข้มสี (Grayscale) ตามจำนวนการสัมผัสต่ออนุภาค โดยกำหนดให้ สีดำ = 6, สีเทาเข้ม = 5, สีเทาอ่อน = 4 และ สีขาว < 4

γ	ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})		
	1	1.5	2
k/50			
k/10			
k/3.5			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.22 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียรูป ความเร็วในการกระทบพื้น v = 10 m/s ที่ขนาดรัศมีอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงรหัสความเข้มสี (Grayscale) ตามจำนวนการสัมผัสต่ออนุภาค โดยกำหนดให้ สีดำ = 6, สีเทาเข้ม = 5, สีเทาอ่อน = 4 และ สีขาว < 4

γ	ขนาดรัศมีอนุภาค (r_{max}/r_{min})		
	1	1.5	2
k/50			
k/10			
k/3.5			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved