

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	8
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	8
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	8
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	10
2.1 หลักการของระเบียบวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุล	10
2.2 แบบจำลองของแรงระหว่างอนุภาค	12
2.3 แบบจำลองแรงแอดเฮชันพื้นฐาน	15
2.4 คุณสมบัติแบบจำลองแรงแอดเฮชันพื้นฐาน	16
2.4.1 ระยะห่อหุ้มสูงสุด	17
2.4.2 เวลาของการเกิดการสัมผัส	17
2.4.3 แรงเสียดทานหรือแรงสัมผัส	18
2.4.4 แรงต้านทานการหมุน	19
2.4.5 แบบจำลองแอดเฮชันพื้นฐานเมื่อไม่คิดค่าแอดเฮชัน	20
2.4.6 การเลือกตัวแปร	21
2.5 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของวัสดุเม็ด	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.1 จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาค	22
2.5.2 ทิศทางเชิงมุมของการสัมผัส	22
2.5.3 โคจรข่าของแรงสัมผัส	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	24
3.1 ขั้นตอนสำหรับวิธีดำเนินการวิจัย	24
3.2 วิธีการทดสอบวัสดุเม็ดด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์	24
3.2.1 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุเม็ดที่ใช้ในการทดสอบ	24
3.2.2 การเตรียมแบบจำลองวัสดุเม็ด	25
3.2.3 การทดสอบวัสดุเม็ดโดยการกระทบกับพื้นเรียบ	27
บทที่ 4 ผลการวิจัย และการวิเคราะห์	29
4.1 ผลการทดสอบวัสดุเม็ดในสภาวะที่สมดุลทางสถิติศาสตร์ก่อนกระทบกับพื้นเรียบ	29
4.1.1 จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาค	29
4.1.2 จำนวนการสัมผัสแรงดึงเฉลี่ยต่ออนุภาค	32
4.1.3 การเกิดกลุ่มอนุภาค	34
4.1.4 โคจรข่าระหว่างอนุภาค	37
4.1.5 ทิศทางการสัมผัส	40
4.2 ผลการทดสอบโดยการกระทบกับพื้นเรียบ	45
4.2.1 การเกิดและการแพร่กระจายรอยแตกของวัสดุเม็ดหลังจากกระทบกับพื้นเรียบ	45
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลการวิจัย	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก ศัพท์บัญญัติ	63
ภาคผนวก ข ตารางแสดงภาพรูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่า แอดเฮชันแตกต่างกัน	67
ภาคผนวก ค ตารางแสดงภาพโครงข่ายของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮ ชันแตกต่างกัน	72
ภาคผนวก ง บทความงานวิจัยที่ได้นำเสนอ	77
ประวัติผู้เขียน	83

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคของวัสดุเม็ดในสภาวะสมดุลทางสถิติศาสตร์	32
4.2 ร้อยละของการสัมผัสแรงดึงเฉลี่ยต่ออนุภาค/จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคของวัสดุเม็ดในสภาวะสมดุลทางสถิติศาสตร์	33
4.3 อัตราส่วนจำนวนการสัมผัสแรงกดเฉลี่ย (z^+) ต่อแรงดึงเฉลี่ย (z^-)	33

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
1.1 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดทรงกลมในกล่องสี่เหลี่ยม	3
1.2 โคจรข่ายของแรงสัมผัสตั้งฉาก	4
1.3 Diametrical Compression แบบ 2 มิติ	5
1.4 การจำลองความเสียหายของกลุ่มอนุภาคที่ความเร็วในการกระแทก 0.1 m/s	5
1.5 ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์เรสคิวิตีชัน	6
1.6 ขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธี Brazilian Test	7
1.7 แบบแผนของการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบเชิงตัวเลข	7
2.1 แผนภูมิการทำงานของระเบียบวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุล	11
2.2 แรงต่างๆในการกระทบกันระหว่างอนุภาคทรงกลมทั้งสอง	12
2.3 การสัมผัสกันระหว่างอนุภาคทรงกลม 3 มิติและแบบ 2 มิติสำหรับ Disk	14
2.4 แรงสัมผัสตั้งฉากในฟังก์ชันของระยะเหลี่ยมกันสำหรับแบบจำลอง GA	15
2.5 กฎแรงเสียดทานแห้งของคูลอมบ์ที่คิดผลของแรงแอดเฮชัน	18
2.6 แรงต้านทานการหมุนของวัตถุทรงกลมบนพื้นเอียง	19
2.7 แรงคู่ควบเสียดทานต่อการหมุนที่คิดผลของแอดเฮชัน	20
2.8 การนิยามมุม θ ของการสัมผัสระหว่างอนุภาค	23
2.9 ลักษณะและขนาดของแรงที่ส่งผ่านกันโดยการสัมผัสระหว่างอนุภาค	23
3.1 ขั้นตอนการเตรียมแบบจำลองวัสดุเม็ด	26
3.2 ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบหาพฤติกรรมการแตกร้าวของวัสดุเม็ดภายใต้แรงกระแทก	28
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคกับค่าแอดเฮชัน	31
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาคกับขนาดรัศมีอนุภาค	31
4.3 อธิบายการแสดงผลภาพของกลุ่มอนุภาคในการจำลองวัสดุเม็ดแบบ 2 มิติ	34
4.4 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่ขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน	36
4.5 อธิบายการแสดงผลภาพ โคจรข่ายของแรงตั้งฉากระหว่างอนุภาค	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.6 โคจรข่ายของแรงสัมผัสตั้งฉากระหว่างอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคและค่าแอดเฮชันแตกต่างกัน	39
4.7 กราฟทิศทางการสัมผัสที่อัตราส่วนขนาดรัศมีอนุภาคเท่ากัน ($r_{\max}/r_{\min} = 1$)	41
4.8 กราฟทิศทางการสัมผัสที่อัตราส่วนขนาดรัศมีอนุภาค $r_{\max}/r_{\min} = 1.5$	41
4.9 กราฟทิศทางการสัมผัสที่อัตราส่วนขนาดรัศมีอนุภาค $r_{\max}/r_{\min} = 2$	42
4.10 กราฟทิศทางการสัมผัสที่ค่า $\gamma = k/250$	42
4.11 กราฟทิศทางการสัมผัสที่ค่า $\gamma = k/150$	43
4.12 กราฟทิศทางการสัมผัสที่ค่า $\gamma = k/50$	43
4.13 กราฟทิศทางการสัมผัสที่ค่า $\gamma = k/3.5$	44
4.14 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียดรูป	ความเร็วในการกระทบพื้น $v = 0.05$ m/s 49
4.15 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียดรูป	ความเร็วในการกระทบพื้น $v = 0.1$ m/s 50
4.16 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียดรูป	ความเร็วในการกระทบพื้น $v = 0.25$ m/s 51
4.17 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียดรูป	ความเร็วในการกระทบพื้น $v = 0.5$ m/s 52
4.18 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียดรูป	ความเร็วในการกระทบพื้น $v = 0.1$ m/s 53
4.19 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียดรูป	ความเร็วในการกระทบพื้น $v = 1$ m/s 54
4.20 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียดรูป	ความเร็วในการกระทบพื้น $v = 2.5$ m/s 55
4.21 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียดรูป	ความเร็วในการกระทบพื้น $v = 5$ m/s 56
4.22 รูปพรรณสัณฐานของวัสดุเม็ดที่มีการเสียดรูป	ความเร็วในการกระทบพื้น $v = 10$ m/s 57

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a	ความเร่ง	m/s^2
c	แรงคู่ควบ	N.m
c_0, c_1, c_2, \dots	ค่าสัมประสิทธิ์ของเกียร์	-
d_o	เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดทรงกลม	mm
f	แรงสัมผัสระหว่างอนุภาค	N
f_i	แรงสัมผัสระหว่างอนุภาคเริ่มต้น	N
f_n	แรงระหว่างผิวสัมผัสในทิศทางตั้งฉาก	N
f_t	แรงเสียดทานระหว่างอนุภาค	N
g	แรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
k	ค่าความแข็งของอนุภาค	N/m
m	มวลลดส่วน	g
r	รัศมีประสิทธิผล	m
r_{max}	ขนาดรัศมีอนุภาคสูงสุด	m
r_{min}	ขนาดรัศมีอนุภาคต่ำสุด	m
t	เวลาที่ใช้ในการทดสอบ	s
t_c	เวลาของการเกิดการสัมผัส	s
t_m	เวลาที่ความเร็วสัมผัสมีค่าเป็น 0	s
v	ความเร็ว	m/s
v_0	ความเร็วสัมผัสเริ่มต้นการกระทบของอนุภาค	m/s
v_c	ความเร็ววิกฤติ	m/s
v_r	ความเร็วหมุนกลิ้งสัมผัส	m/s
v_s	ความเร็วสัมผัสของการถื่นไถล	m/s
v_t	ความเร็วสัมผัสเฉื่อยของวัสดุเม็ด	m/s
v^c	ความเร็วที่ได้จากการคำนวณ	m/s

อักษรและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
v^f	ความเร็วสัมพัทธ์หลังการกระทบกันของอนุภาค	m/s
v^i	ความเร็วสัมพัทธ์ก่อนการกระทบกันของอนุภาค	m/s
F_c	แรงสัมผัสตั้งฉากวิกฤตต่อแรงดึง	N
N_C	จำนวนอนุภาคทั้งหมด	-
N_p	จำนวนอนุภาคทั้งหมดของระบบ	-
T_c	แรงสัมผัสวิกฤตต่อแรงดึง	N
Z	จำนวนการสัมผัสเฉลี่ยต่ออนุภาค	-
α	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด	Kg/s
θ	มุมบนพื้นเอียงที่ทำมุมกับแนวราบ	degree
δ	ระยะเลื่อนกันของอนุภาค	m
δ_c	การเลื่อนที่ตำแหน่งแรงดึงเริ่มต้น	m
δ_o	ระยะเลื่อนที่ตำแหน่งสมดุล	m
δ_{max}	ระยะเลื่อนสูงสุดของอนุภาค	m
γ	ค่าพลังงานแอคเซชัน	N/m
γ_r	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดต่อการหมุน	-
γ_s	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดในแนวสัมผัส	-
μ	ค่าคงที่ของแรงเสียดทาน	-
μ_r	ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการหมุน	-
Δt	ช่วงเวลาของการคำนวณ	s