



รายงานฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การพัฒนาวัสดุกันกระแทกจากยางฟองน้ำ

Development of Cushioning Material from Natural Latex Foam

คณะผู้จัดทำ

ดร.ศุภชัย ภิสัชเพ็ญ

ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทคัดย่อ

ยางฟองน้ำเป็นวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมได้จากน้ำยางธรรมชาติ มีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่ต่อเนื่องกันภายในโครงสร้าง จึงมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ และเมื่อถูกกระทำด้วยแรงกดแล้วจะสามารถกลับคืนสู่สภาวะเดิมได้ดี ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสารก่อฟอง (โพแทสเซียมโอเลเอต), สารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนต), ผลของกระบวนการให้ความร้อน (นั่งและอบ) และความหนาของชั้นยางฟองน้ำต่อสมบัติทางกายภาพของยางฟองน้ำ โดยใช้กระบวนการดันลือปีในการเตรียมยางฟองน้ำ จากผลการทดลองพบว่าสมบัติของยางฟองน้ำขึ้นกับปริมาณของโพแทสเซียมโอเลเอต โดยเมื่อเติมโพแทสเซียมโอเลเอตในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ยางฟองน้ำมีความหนาแน่นและความสามารถในการต้านทานแรงกดลดลง นอกจากนี้โพแทสเซียมโอเลเอตส่งผลให้ยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบนั่งสามารถต้านทานต่อแรงกดได้ดี และมีความหนาแน่นและเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงกว่ายางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบ ในขณะที่การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ยางฟองน้ำมีความหนาแน่น ความสามารถในการต้านทานแรงกดและเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่สูงขึ้นและมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงสุดที่ระดับ 10 phr (part per hundred rubbers) และแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบสามารถต้านทานต่อแรงกดได้ดีกว่ายางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบนั่ง นอกจากนี้พบว่ายางฟองน้ำที่มีความหนามากสามารถต้านทานต่อแรงกด และสามารถป้องกันแรงกระแทกได้ดี เมื่อนำไปทดสอบที่ความเค้นสถิต 0.04 kg/cm^2 และตกกระแทกที่ความสูง 18 นิ้ว พบว่ายางฟองน้ำที่มีความสามารถในการป้องกันแรงกระแทกที่ดีที่สุด คือ ยางฟองน้ำที่เตรียมจากการใช้โพแทสเซียมโอเลเอต 1.40 phr, การให้ความร้อนแบบอบและมีความหนา 1.5 นิ้ว ซึ่งมีค่า G ต่ำสุด (42.9 G) แม้ว่ายางฟองน้ำจะมีความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกได้ต่ำกว่าโฟมพอลิสไตรีน (ความหนาแน่น 0.016 g/cm^3) แต่เมื่อนำไปทดสอบรับแรงกระแทกหลายๆครั้ง กลับพบว่ายางฟองน้ำมีสมบัติการป้องกันการแรงกระแทกได้ดีเนื่องจากยางฟองน้ำมีความยืดหยุ่นและความสามารถในการคืนตัวกลับได้ดีกว่าโฟมพอลิสไตรีน และยางฟองน้ำเมื่อเติมผสมกับขี้เลื่อยไม้ยางพาราส่งผลให้ความหนาแน่นและความสามารถต้านทานต่อแรงกดสูงขึ้น ขณะที่เปอร์เซ็นต์การหดตัวลดลง นอกจากนี้ยางฟองน้ำเติมขี้เลื่อยตั้งแต่ 10-25% ไม่มีความแตกต่างกันในด้านความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุสังเคราะห์โฟม Expandable Polystyrene พบว่า ยางฟองน้ำมีประสิทธิภาพในการดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่า 9-14% และช่วยให้ประหยัดพื้นที่การใช้ของวัสดุกันกระแทกได้ 2.2-14.7% ยางฟองน้ำจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัสดุกันกระแทกแบบใช้ซ้ำหรือแบบป้องกันการกระแทกซ้ำ

ABSTRACT

Natural latex foam, a cellular rubber, is a biodegradable foam material derived from milky sap blends from the rubber tree. It has many advantages including durable, highly resilient and recovery, non toxic and environmentally safe. The aims of this work were to prepare and investigate the effect of foaming agent (potassium oleate), vulcanization process (oven and steam), filling agent (calcium carbonate), and thickness of specimen on the physical and mechanical properties of foam. The Dunlop process was employed to prepare foam in various amounts of potassium oleate and thicknesses. It was found that the properties of latex foam depended upon the amounts of potassium oleate. As the amount of potassium oleate increased, the foam density and compression resistance significantly decreased. In addition, as a result of potassium oleate, foam vulcanized by steam had higher compression resistance, density and percent shrinkage than foam vulcanized by oven. On the other hand, calcium carbonate had an effect on increasing the foam density, compression resistance and percent shrinkage. The highest of percent shrinkage was found at the concentration of 10 phr (part per hundred rubber). The significantly higher compression resistance was found in ovened foam compared to steamed foam as a result of calcium carbonate. In addition, it was found than the thicker latex foam the better compression resistance and shock were obtained. Cushioning characteristics of natural latex foam were also determined. The best sample prepared from 1.4 phr of potassium oleate, oven vulcanized and 1.5 inches thick had the lowest G of 42.9 when tested at static stress of 0.04 kg/cm² and drop height of 18 inches. Although the natural latex foam had a lower shock absorbing properties compared to PS foam (density of 0.016 g/cm³), the discrepancy tended to decrease in thicker foam. The natural latex foam showed a better shock absorbing properties when tested with repeated drops due to a better elastic and recovery. In addition, latex foam mixed sawdust had higher density and compression resistance but lower percent shrinkage. Latex foam mixed sawdust from 10-25% had no significant difference in shock absorbing performance and had a better shock absorbing performance 9-14% compared to commercially synthetic material: Expandable Polystyrene Foam. Using natural latex foam also offered more economy cushion area 2.2-14.7% than the commercial material. Therefore, the natural latex foam has the feasibility in applying as a reusable package cushioning material or repeated drops protection.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติ ที่ให้เงินทุนสนับสนุนการทำงานวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับสถานที่และเครื่องมือในการทำงานวิจัย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ดร.ศุภชัย ภิสัชเพ็ญ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

คำนำ

รายงานนี้เป็นรายงานผลการวิจัยเรื่อง การพัฒนาวัสดุกันกระแทกจากยางพองน้ำ ซึ่งเป็นโครงการวิจัยที่มุ่งเน้นการหาแนวทางพัฒนาการใช้ประโยชน์น้ำยางพาราชั้นในด้านบรรจุภัณฑ์เพื่อเป็นแนวทางศึกษาต่อไปในอนาคต ซึ่งมุ่งเน้นการใช้วัสดุจากธรรมชาติมาทดแทนวัสดุสังเคราะห์ ตลอดจนเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับน้ำยางพาราในรูปแบบของผลิตภัณฑ์แปรรูป นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้สร้างพัฒนาชุดข้อมูลมาตรฐานเพื่อใช้ในการออกแบบวัสดุกันกระแทกจากยางพองน้ำ อันจะเป็นการส่งเสริมการใช้ประโยชน์ยางพองน้ำในด้านบรรจุภัณฑ์ป้องกันการกระแทกต่อไปในอนาคต

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	(6)
LIST OF TABLES.....	(7)
LIST OF FIGURES.....	(9)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง.....	1
1.2 การตรวจเอกสาร.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	20
1.4 ขอบเขตการโครงการวิจัย.....	20
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	20
2 วิธีการวิจัย.....	21
2.1 วิธีดำเนินการ.....	21
2.2 วัสดุและอุปกรณ์.....	28
3 ผลการวิจัย.....	33
3.1 ผลจากการเติมสารก่อฟอง (โพแทสเซียมโอเลเอต)	34
3.2 ผลจากการเติมสารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนต)	46
3.3 การเปรียบเทียบสมบัติการป้องกันการกระแทกกับโฟมสังเคราะห์พอลิสไตรีน.....	55
3.4 ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างยางฟองน้ำกับวัสดุสังเคราะห์โฟมพอลิสไตรีน.....	57
3.5 การศึกษาการใช้วัสดุชีวภาพ ขี้เลื่อยไม้ยางพาราในยางฟองน้ำ.....	58
4 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	90
สรุป.....	90
ข้อเสนอแนะ.....	93
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลข้อมูลการวิเคราะห์สมบัติของยางฟองน้ำ.....	95
ภาคผนวก ข ภาพถ่ายโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำ.....	112
ภาคผนวก ค ภาพถ่ายยางฟองน้ำที่เตรียมขึ้น.....	124
เอกสารอ้างอิง.....	125

LIST OF TABLES

Table	Page
1. The formulation for Dunlop process of Songkhla Rubber Research.....	23
2. Chemicals used in latex foam preparation.....	32
3. Formulation of latex foam - Dunlop process.....	33
4. Characteristics of natural latex foam.....	45
5. Characteristics of natural latex foam.....	54
6. Material cost of latex foam prepared from Dunlop process.....	58
7. Size distribution of sawdust collected from wood toys production process....	59
8. Recommended drop height from ASTM D4169.....	86
9. Shock absorbing performance of latex foam and DYLITE D195.....	87
10. Cushion design analysis of latex foam.....	88
11. Density of latex foam as the function of potassium oleate.....	95
12. Density of latex foam as the function of calcium carbonate.....	95
13. Compression resistance of latex foams as a function of potassium oleate.....	96
14. Compression resistance of latex foams as 1.5 inches-thick.....	96
15. Percent shrinkage of the latex foams as a function of potassium oleate.....	97
16. Percent shrinkage of the latex foams as a function of calcium carbonate.....	97
17. Cushioning characteristics of the latex foam as a function of potassium oleate	98
18. Cushioning characteristics of the latex foam at 1.40 phr of potassium oleate.	98
19. Cushioning characteristics as a function of thickness.....	99
20. Percent compression set as the function of potassium oleate.....	100
21. Percent compression set as 1.4 phr of potassium oleate and as the function of calcium carbonate.....	101
22. Percent volume ratio of latex foam and polystyrene foam at 0.5 inch-thick...	102
23. Percent volume ratio of latex foam and polystyrene foam at 1.0 inch-thick...	103
24. Percent volume ratio of latex foam and polystyrene foam at 1.5 inch-thick...	104
25. Definitions of latex foam formulation.....	105
26. Test no. Used for analyze of variation of latex foam.....	106
27. ANOVA of density of latex foam as a function of potassium oleate.....	106

LIST OF TABLES (CONTINUED)

Table	Page
28. ANOVA of percent shrinkage at center direction as a function of potassium oleate.....	106
29. ANOVA variation of percent shrinkage at edges direction on potassium oleate.....	106
30. ANOVA of percent shrinkage at lateral direction as a function of potassium oleate.....	107
31. ANOVA of percent compression set as a function of potassium oleate.....	107
32. Test no. used for analyze of variation of G value as a function of potassium oleate.....	108
33. ANOVA of G value as a function of potassium oleate.....	109
34. Test no. Used for analyze of variation of latex foam as a function of calcium carbonate.....	109
35. ANOVA of density of latex foam as a function of calcium carbonate.....	109
36. ANOVA of percent compression set as a function of calcium carbonate.....	110
37. ANOVA of percent shrinkage at center direction as a function of calcium carbonate.....	110
38. ANOVA of percent shrinkage at edges direction as a function of calcium carbonate.....	110
39. ANOVA of percent shrinkage at lateral direction as a function of calcium carbonate.....	110
40. Test no. Used for analyze variation of G value.....	111
41. ANOVA of G value as a function of calcium carbonate.....	111

LIST OF FIGURES

Figure	Page
1. Step for latex foam preparation.....	7
2. Corrugated fiberboard box.....	10
3. Polystyrene foam.....	11
4. Polyethylene foam.....	12
5. Air bubble pad.....	13
6. Accelerometer.....	14
7. Setup for measuring in – package shock.....	15
8. Shock pulse.....	15
9. Sample of cushion curves.....	17
10. Cellulose structure.....	18
11. Model of fibrous structure.....	18
12. Xylan structure.....	19
13. Lignin structure.....	19
14. Flow chart of experimental plan.....	22
15. Flow chart of latex foam preparation.....	24
16. Measuring the shrinkage of latex foam.....	26
17. Setup of shock absorbing test.....	26
18. Battering machine.....	29
19. Molds.....	29
20. Oven.....	29
21. Digital scale.....	30
22. Universal testing machine.....	30
23. Shock analyzer and accelerometers.....	30
24. Drop tester.....	31
25. Density of latex foam as the function of potassium oleate.....	34
26. SEM of latex foam density of 0.175 g/cm^3	35
27. SEM of latex foam density of 0.236 g/cm^3	36
28. Compression resistance of latex foams vulcanized by steam.....	37
	(9)

LIST OF FIGURES (CONTINUED)

Figure	Page
29. Compression resistance of latex foams vulcanized by oven.....	37
30. Percent compression set as the function of potassium oleate.....	38
31. SEM of latex foam vulcanized by oven.....	39
32. SEM of latex foam vulcanized by steam.....	39
33. The shrinkage of latex foam at lateral direction.....	41
34. Percent shrinkage of the latex foams vulcanized by steam as a function of potassium oleate.....	41
35. Percent shrinkage of the latex foams vulcanized by oven as a function of potassium oleate.....	42
36. Cushioning characteristics of the latex foam vulcanized by steam.....	43
37. Cushioning characteristics of the latex foam vulcanized by oven.....	43
38. Density of latex foam as the function of calcium carbonate.....	46
39. SEM of latex foam vulcanized by oven.....	47
40. SEM of latex foam vulcanized by steam.....	48
41. Percent compression set as the function of calcium carbonate.....	49
42. Compression resistance of latex foams at 1.5 inches-thick and as function of calcium carbonate.....	50
43. Percent shrinkage of the latex foams vulcanized by steam as a function of calcium carbonate.....	51
44. Percent shrinkage of the latex foams vulcanized by oven as a function of calcium carbonate.....	51
45. Cushioning characteristics of the latex foam at 1.40 phr of potassium oleate, 1.5 inch-thick and as a function of calcium carbonate.....	53
46. Cushioning characteristics as a function of thickness of Natural latex foam and Polystyrene foam.....	55
47. Cushioning characteristics of volume ratio of the latex foam and polystyrene foam.....	56

LIST OF FIGURES (CONTINUED)

Figure		Page
48	SEM of sawdust particle.....	59
49	Density of latex foam mixed sawdust.....	60
50	Density of latex foam mixed sawdust as a function of % of sawdust.....	61
51	SEM of latex foam without sawdust at density of 0.145 g/cm ³	62
52	SEM of latex foam mixed 25% sawdust at density of 0.208 g/cm ³	62
53	Compression resistance of latex foam mixed sawdust.....	64
54	Percent shrinkage of the latex foam mixed sawdust.....	65
55	Sample of shock pulse from test of latex foam cushion.....	66
56	Dynamic stress vs energy density curve of latex foam.....	67
57	Dynamic stress vs energy density curve of 10% latex foam.....	67
58	Dynamic stress vs energy density curve of 15% latex foam.....	68
59	Dynamic stress vs energy density curve of 20% latex foam.....	68
60	Dynamic stress vs energy density curve of 25% latex foam.....	69
61	Cushion curves of latex foam 12" drop height.....	70
62	Cushion curves of latex foam 18" drop height.....	70
63	Cushion curves of latex foam 24" drop height.....	71
64	Cushion curves of latex foam 30" drop height.....	71
65	Cushion curves of latex foam 36" drop height.....	72
66	Cushion curves of latex foam 42" drop height.....	72
67	Cushion curves of latex foam mixed 10% sawdust 12" drop height.....	73
68	Cushion curves of latex foam mixed 10% sawdust 18" drop height.....	73
69	Cushion curves of latex foam mixed 10% sawdust 24" drop height.....	74
70	Cushion curves of latex foam mixed 10% sawdust 30" drop height.....	74
71	Cushion curves of latex foam mixed 10% sawdust 36" drop height.....	75
72	Cushion curves of latex foam mixed 10% sawdust 42" drop height.....	75
73	Cushion curves of latex foam mixed 15% sawdust 12" drop height.....	76
74	Cushion curves of latex foam mixed 15% sawdust 18" drop height.....	76
75	Cushion curves of latex foam mixed 15% sawdust 24" drop height.....	77

LIST OF FIGURES (CONTINUED)

Figure		Page
76	Cushion curves of latex foam mixed 15% sawdust 30" drop height.....	77
77	Cushion curves of latex foam mixed 15% sawdust 36" drop height.....	78
78	Cushion curves of latex foam mixed 15% sawdust 42" drop height.....	78
79	Cushion curves of latex foam mixed 20% sawdust 12" drop height.....	79
80	Cushion curves of latex foam mixed 20% sawdust 18" drop height.....	79
81	Cushion curves of latex foam mixed 20% sawdust 24" drop height.....	80
82	Cushion curves of latex foam mixed 20% sawdust 30" drop height.....	80
83	Cushion curves of latex foam mixed 20% sawdust 36" drop height.....	81
84	Cushion curves of latex foam mixed 20% sawdust 42" drop height.....	81
85	Cushion curves of latex foam mixed 25% sawdust 12" drop height.....	82
86	Cushion curves of latex foam mixed 25% sawdust 18" drop height.....	82
87	Cushion curves of latex foam mixed 25% sawdust 24" drop height.....	83
88	Cushion curves of latex foam mixed 25% sawdust 30" drop height.....	83
89	Cushion curves of latex foam mixed 25% sawdust 36" drop height.....	84
90	Cushion curves of latex foam mixed 25% sawdust 42" drop height.....	85
91	Cushion curves of DYLITE D195, drop height 18 in.....	86
92	Cushion curves of DYLITE D195, drop height 36 in.....	88
93	Corner protector of cushion material.....	89
94.	SEM of latex foam density of 0.223 g/cm ³	112
95.	SEM of latex foam density of 0.207 g/cm ³	112
96.	SEM of latex foam density of 0.175 g/cm ³	113
97.	SEM of latex foam density of 0.236 g/cm ³	114
98.	SEM of latex foam density of 0.217 g/cm ³	115
99.	SEM of latex foam density of 0.177 g/cm ³	114
100.	SEM of latex foam density of 0.237 g/cm ³	115
101.	SEM of latex foam density of 0.256 g/cm ³	115
102.	SEM of latex foam density of 0.265 g/cm ³	116
103.	SEM of latex foam density of 0.182 g/cm ³	116

LIST OF FIGURES (CONTINUED)

Figure	Page
104. SEM of latex foam density of 0.185 g/cm ³	117
105. SEM of latex foam density of 0.201 g/cm ³	117
106. SEM of latex foam density of 0.223 g/cm ³	118
107. SEM of latex foam density of 0.207 g/cm ³	118
108. SEM of latex foam density of 0.175 g/cm ³	119
109. SEM of latex foam density of 0.236 g/cm ³	119
110. SEM of latex foam density of 0.217 g/cm ³	120
111. SEM of latex foam density of 0.177 g/cm ³	120
112. SEM of latex foam density of 0.237 g/cm ³	121
113. SEM of latex foam density of 0.256 g/cm ³	121
114. SEM of latex foam density of 0.265 g/cm ³	122
115. SEM of latex foam density of 0.182 g/cm ³	122
116. SEM of latex foam density of 0.185 g/cm ³	123
117. SEM of latex foam density of 0.201 g/cm ³	123
118. Latex foam mixed sawdust.....	124

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ยางพาราจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย อุตสาหกรรมยางพาราเป็นอุตสาหกรรมสำคัญที่มีผลกระทบต่อประชากรของประเทศไทยไม่น้อยกว่า 6 ล้านคน หรือร้อยละ 10 ของประชากรทั้งประเทศ (กรมวิชาการเกษตร, 2550) ดังนั้นการพัฒนาและเติบโตของอุตสาหกรรมยางพาราจึงมีบทบาทอย่างสูงต่อการพัฒนาประเทศ ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากน้ำยางพาราในปัจจุบันจัดเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีการพัฒนาและมีศักยภาพในการขยายปริมาณการผลิตเพื่อการส่งออกและทดแทนการนำเข้าอย่างต่อเนื่อง ซึ่งผลิตภัณฑ์แปรรูปประเภทดังกล่าวได้แก่ ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย และอุปกรณ์เครื่องมือแพทย์อื่นๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์แปรรูปจากน้ำยางพาราที่มีศักยภาพอีกหลายชนิดซึ่งขาดการพัฒนาในการเพิ่มมูลค่าและปริมาณการใช้งาน ได้แก่ เส้นยางยืดและยางพองน้ำ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางพองน้ำจัดเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปจากน้ำยางพาราที่น่าสนใจ เนื่องจากการนำยางพองน้ำมาใช้ในปัจจุบันยังอยู่ในขอบเขตที่จำกัด ได้แก่ การนำมาใช้เป็นวัสดุเพื่อทำที่นอน หมอน เบาะรองนั่ง และตุ๊กตา เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางพองน้ำให้มีรูปแบบการใช้งานที่กว้างขวางขึ้นจะเป็นการส่งเสริมให้เกิดการนำน้ำยางพารามาใช้มากขึ้นจะช่วยผลักดันให้อุตสาหกรรมยางพาราในประเทศเติบโตยิ่งขึ้น

อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์จัดเป็นอุตสาหกรรมสำคัญที่มีความเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมผลิตเกือบทุกประเภท โดยในส่วนของวัสดุกันกระแทกที่นิยมใช้กับงานทางด้านบรรจุภัณฑ์นั้น จัดเป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำยางพองน้ำมาทดแทนเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการใช้อย่างกว้างขวางในปริมาณการใช้งานที่สูงในอุตสาหกรรม ในปัจจุบันวัสดุกันกระแทกที่นิยมใช้จะผลิตจากวัสดุสังเคราะห์ เช่น โพลีสไตรีน โพลียูรีเทน เป็นต้น ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและประสิทธิภาพการป้องกันการกระแทกยังไม่ดีเท่าที่ควร ขณะเดียวกันในตลาดปัจจุบันก็ยังไม่มีการนำวัสดุธรรมชาติมาใช้เป็นวัสดุกันกระแทกมากเท่าที่ควร ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุกันกระแทกที่แปรรูปจากกระดาษที่ยังขาดความทนทานและประสิทธิภาพการดูดซับแรงกระแทก โดยเฉพาะเมื่อใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักมาก มีโอกาสตกกระแทกจากที่สูงหรือมีความรุนแรงจากการขนส่งและตกกระแทกและในสภาวะการขนส่งและการเก็บรักษาที่มีความชื้นสูง นอกจากนี้ในงานวิจัยยังได้ทำการศึกษาผลของการนำวัสดุชีวภาพซึ่งเอื้อมาใช้ผสมร่วมกับยางพองน้ำ เนื่องจากมีเนื้อเป็นวัสดุเศษเหลือจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ เช่น

เฟอร์นิเจอร์ ของเล่นจากไม้ เป็นต้น จุดเด่นของซีลี้อยมีหลายประการ ได้แก่ มีปริมาณมาก มูลค่าต่ำ สามารถย่อยสลายได้ เป็นต้น (Kuti and Adegoke, 2008) จากการทำกรณีศึกษาพบว่ากระบวนการผลิตของเด็กเล่นจากไม้ยางพาราของ บริษัท แพลนตรีเอชเอ็นส์ จำกัด พบว่าในปี พ.ศ. 2551 มีเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต ได้แก่ ชี้กบ (Wood Shavings) ปริมาณ 2500 ตันต่อปี, ชี้ฝุ่น (Wood Dust) ปริมาณ 190 ตันต่อปี และเศษไม้ปริมาณ (Solid waste wood) 660 ตันต่อปี ซึ่งเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตนี้มีวัสดุเศษเหลือที่เป็นซีลี้อยรวมทั้งหมดเท่ากับ 2,690 ตันต่อปี คิดเป็นประมาณ 20% ของวัตถุดิบที่เข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับการกระแทกของยางพองน้ำได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุโพลีเอทิลีน ในปัจจุบันการกำจัดเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตโดยการขายในมูลค่าต่ำ หรือนำไปเผาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง หากนำมาเพิ่มมูลค่าโดยการนำมาผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบจากซีลี้อยแล้วจะสามารถมีมูลค่าเพิ่มขึ้นได้หลายเท่าตัว และยังเป็นการช่วยลดมลพิษที่เกิดจากการกำจัดได้อีกด้วย ซึ่งผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการป้องกันหรือดูดซับการกระแทกของยางพองน้ำได้ถูกนำมาสังเคราะห์ในรูปแบบของชุดกราฟเส้น โค้งของวัสดุกันกระแทกที่แสดงประสิทธิภาพการดูดซับการกระแทกเพื่อสามารถนำไปใช้ในการออกแบบวัสดุกันกระแทกตามหลักสากลต่อไป ดังนั้นการศึกษาคูณสมบัติในการป้องกันแรงกระแทกของยางพองน้ำ จึงจัดเป็นงานวิจัยที่สำคัญเพื่อหาแนวทางในการนำยางพองน้ำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านบรรจุภัณฑ์ที่มีปริมาณการใช้งานสูง นอกจากนี้ยังจะเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าน้ำยางพาราได้ต่อไปในอนาคต

1.2 การตรวจเอกสาร

1. ภาพรวมของอุตสาหกรรมยางพาราในประเทศ

อุตสาหกรรมยางในปัจจุบันสามารถแบ่งได้ตามประเภท ดังต่อไปนี้

อุตสาหกรรมยางดิบ

อุตสาหกรรมยางแผ่นและยางแท่ง : มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีคุณภาพมาตรฐานที่สม่ำเสมอ (consistency) ตรงตามความต้องการของผู้ใช้ และแข่งขันกับผู้อื่นได้

อุตสาหกรรมน้ำยางข้น: มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตน้ำยางข้น โดยวิธีที่ปฏิบัติโดยทั่วไปคือ การใช้เครื่องเหวี่ยง (centrifuge machine) ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ได้คุณภาพน้ำยางข้นตามความต้องการของผู้ใช้ รวมทั้งการวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีใหม่นอกเหนือจากการใช้เครื่อง

บั้น เพื่อสนับสนุนกลุ่มเกษตรกรให้สามารถเตรียมน้ำยางชั้นเพื่อการแปรรูปผลิตภัณฑ์ระดับท้องถิ่น ได้โดยตรง

ยางดิบชนิดใหม่ : มีการเพิ่มความหลากหลายชนิดยางธรรมชาติ โดยการดัดแปลงโมเลกุล ด้วยวิธีทางเคมีหรือด้วยวิธีทางกล ทำให้ได้ยางธรรมชาติที่มีคุณภาพพิเศษสามารถใช้แทนยางสังเคราะห์หรือพอลิเมอร์บางชนิดได้

อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง

ผลิตภัณฑ์จากยางแห้ง : มีการพัฒนาเทคโนโลยีให้สามารถต่อยอดเพื่อดำเนินการเชิงพาณิชย์ได้ ทั้งในรูปการพัฒนาผลิตภัณฑ์เดิมที่มีการผลิตอยู่แล้ว ให้มีประสิทธิภาพในการผลิตดีขึ้น มีคุณภาพได้มาตรฐานสามารถแข่งขันได้ ขยายการผลิตเพื่อเพิ่มการส่งออก การวิจัยที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ยางชนิดใหม่ๆและมีตลาดรองรับ

ผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง : มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีศักยภาพในการขยายปริมาณการผลิต เพื่อขยายตลาดส่งออก ทดแทนการนำเข้า ได้แก่ ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย และอุปกรณ์เครื่องมือแพทย์ อื่นๆ การวิจัยที่นำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง เช่น เส้นด้ายยึด ยางฟองน้ำ Adhesive และ Binder เป็นต้น ตลอดจนการวิจัยการใช้น้ำยางธรรมชาติผลิตผลิตภัณฑ์ ทดแทนการใช้น้ำยางสังเคราะห์และการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำยางชนิดใหม่ๆที่มีตลาดรองรับ

อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางระดับท้องถิ่น : มีการประยุกต์องค์ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีการทำผลิตภัณฑ์ยางให้เหมาะสมกับการประกอบอุตสาหกรรมการผลิตของกลุ่มชุมชนระดับท้องถิ่น เช่นกลุ่มสหกรณ์อุตสาหกรรมการเกษตร ชุมชนสหกรณ์ หรือสมาคมเกษตรกรต่างๆ เป็นต้น ให้กลุ่มเหล่านี้สามารถทำการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางพาราออกสู่ตลาดและจำหน่ายได้

การใช้ประโยชน์จากส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber) : มีการพัฒนานำส่วนที่ไม่ใช่ยาง ที่มีอยู่ในน้ำยางพารา เช่น สารโปรตีน ไขมัน น้ำตาล ฯลฯ มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์บางอย่างได้แก่ ยา สารเคมี อาหารเสริม เป็นต้น จะทำให้เกิดมูลค่าเพิ่มกับยางพาราได้อีกแนวทางหนึ่ง

ยางฟองน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากน้ำยางธรรมชาติ ประกอบด้วยเซลล์ของอากาศที่ต่อเนื่องติดกันไปในโครงสร้างของยางฟองน้ำ ยางฟองน้ำสามารถเตรียมให้มีคุณสมบัติค่อนข้างหลากหลาย เช่น มีความยืดหยุ่นดี นิ่ม มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อถูกกระทำด้วยแรงกด สามารถกลับคืนสู่สภาวะเดิมได้ ไปจนกระทั่งเป็นยางฟองน้ำที่มีคุณภาพกึ่งแข็ง ที่มีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้ยางฟองน้ำเป็นที่นิยมใช้ในงานประเภทต่าง ๆ มากมาย ซึ่งทำผลิตภัณฑ์จำพวก เบาะนั่ง ที่นอน หมอน อุปกรณ์ตกแต่งต่าง ๆ วัสดุกันกระแทก ฉนวนความร้อน เป็นต้น (วารสารณ์, 2548)

2. กระบวนการผลิตยางฟองน้ำ

กระบวนการผลิตยางฟองน้ำโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ (Calvert, 1982) คือ กระบวนการดันลอป (Dunlop process) ซึ่งมีการพัฒนามาตั้งแต่ปี 1929 โดยใช้โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium Silicofluoride, SSF) เป็นสารทำให้น้ำยางเกิดการจับตัวและเกิดการคงรูป ส่วนกระบวนการแบบที่สอง คือ กระบวนการแบบทาลเลย์ (Talalay process) ซึ่งมีการพัฒนาประมาณปี 1946 โดยมีวิธีการให้ความเย็นกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีหน้าที่ทำให้น้ำยางเกิดการจับตัวและเกิดการคงรูป

โดยปกติในกระบวนการผลิตยางฟองน้ำจากน้ำยางพารา พบว่าฟองน้ำจะเกิดการหดตัวภายหลังจากการวัลคาไนซ์ ซึ่งทำให้ขนาดของฟองน้ำยางธรรมชาติได้ขนาดเล็กกว่าที่กำหนดไว้จากขนาดเบ้า ซึ่งเป็นปัญหาต่อการใช้งานที่ต้องการรูปร่างที่แน่นอนของยางฟองน้ำ ปัญหาการหดตัวนี้เกิดจากยางพารามีการทนทานต่อการบวมตัวในตัวทำละลายค่อนข้างต่ำ และอัตราในการบั่นไม่คงที่ ส่งผลให้ความหนาแน่นของยางแตกต่างกัน รวมทั้งปริมาณของแข็ง ชนิดและปริมาณของสารเกิดฟอง (Blowing agent) ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของยางไม่แน่นอน

ยางฟองน้ำมีลักษณะที่อาจเป็นเซลล์เปิด (ฟองหรือช่องว่างเชื่อมติดกันโดยไม่มีผนังเซลล์) แบบเซลล์ปิด (ฟองมีขนาดเล็ก บางส่วนมีผนังเซลล์และบางส่วนไม่มีผนังเซลล์) และแบบเซลล์เล็ก (ฟองมีขนาดเล็ก) ซึ่งการเกิดลักษณะเซลล์ที่แตกต่างกันนั้นจะขึ้นกับปัจจัยการควบคุมกระบวนการในการเกิดฟอง สารเคมีที่ใช้ ซึ่งผลความแตกต่างของลักษณะเซลล์จะส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและการรับแรงกระแทกได้ ยางฟองน้ำจัดเป็นวัสดุชีวภาพที่ได้จากธรรมชาติที่น่าสนใจและมีศักยภาพสูงในการพัฒนา ปรับปรุงเพื่อนำมาใช้ในงานในระดับอุตสาหกรรม ในปัจจุบันการใช้น้ำยางพารามาแปรรูปเป็นยางฟองน้ำยังอยู่ในระดับที่ต่ำมาก มีการใช้งานที่จำกัด เนื่องจากรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปได้มีเพียงไม่กี่ชนิด ตลอดจนข้อมูลพื้นฐานทางคุณสมบัติยังไม่ครบถ้วน จึงทำให้การนำน้ำยางพารามาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มประเภทยางฟองน้ำจึงต่ำมาก ในขณะที่ความต้องการใช้วัสดุกันกระแทกในอุตสาหกรรมมีสูงมาก ตลอดจนการที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญกับการรักษาสีสิ่งแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มียานวิจัยใดทั้งในและต่างประเทศที่พิจารณาการนำยางพารามาแปรรูปเพื่อใช้งานทางด้านบรรจุภัณฑ์ จึงเป็นโอกาสที่ดีที่การวิจัยนี้ได้นำน้ำยางพาราที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติที่ผลิตได้ในประเทศมาพัฒนาเพื่อแปรรูปเป็นวัสดุกันกระแทก ซึ่งวัสดุกันกระแทกที่ปรับปรุงขึ้นได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุกันกระแทกสังเคราะห์ เช่น Expanded polystyrene foam และสำหรับงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุกันกระแทกจากยางฟองน้ำในรูปแบบของการหล่อขึ้นรูปเป็นแผ่น (Slab) ซึ่งวัสดุกันกระแทกในลักษณะนี้มีการใช้ในปริมาณมาก

ที่สุดและง่ายต่อการปรับเปลี่ยนรูปทรงของวัสดุกันกระแทกตามลักษณะผลิตภัณฑ์และกล่องชั้นนอกที่ใช้บรรจุ

งานวิจัยนี้จึงใช้กระบวนการเตรียมยางพองน้ำด้วยกระบวนการดันล้อยู่เพื่อศึกษาสมบัติของยางพองน้ำที่ได้สัดส่วนต่างๆ รวมทั้งผลของสารเคมีต่อสมบัติของยางพองน้ำ ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางพองน้ำให้มีสมบัติที่ดีขึ้นและเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปใช้ผลิตเป็นวัสดุกันกระแทกจากยางพองน้ำของประเทศไทยต่อไป

3. กระบวนการผลิตยางพองน้ำโดยกระบวนการดันล้อยู่

หลักการสำคัญของการผลิตยางพองน้ำประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ๆ 3 ขั้นตอน คือ

- (1) การทำให้น้ำยางเกิดฟองเป็นฟองอากาศ หรือ ฟองของก๊าซต่าง ๆ
- (2) การทำให้น้ำยางที่เป็นฟองแล้วเกิดเจลในเบ้าหรือในบริเวณที่กำหนด
- (3) การวัลคาไนซ์ฟองยางที่ได้

แนวคิดและการค้นคว้าทดลอง เพื่อผลิตยางรูปฟองหรือยางพองน้ำสำหรับใช้งานในด้านต่างๆ ได้มีการพัฒนามาเป็นระยะเวลาอันยาวนานแล้ว และหลักการพื้นฐานของการทำยางให้เกิดฟองหรือยางพองน้ำได้ประสบความสำเร็จอย่างชัดเจน เกิดขึ้นเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1929 ซึ่งเป็นเทคนิคที่เรียกว่า กระบวนการดันล้อยู่ หรือกระบวนการ ซิลิโคฟลูออไรด์ เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในการผลิตยางพองน้ำ ประกอบด้วยการทำให้น้ำยางเป็นฟองด้วยการใช้เครื่องกลตีหรือปั่นอากาศเข้าไปในน้ำยางที่มีส่วนผสมของสารเคมีต่าง ๆ อย่างเหมาะสมแล้ว เมื่อได้ฟองดีแล้วจะเติมสารเคมีที่จะช่วยให้เกิดเจลช้าๆ (Delayed – action gelling agent) เพื่อให้ฟองเหลวได้มีเวลาขึ้นรูปตามแบบของเบ้าก่อนที่จะเกิดลักษณะเป็นเจล จากนั้นจึงวัลคาไนซ์ฟองเจลที่เป็ยก แล้วนำยางพองน้ำที่ได้มาล้าง อบแห้ง และตกแต่งในขั้นสุดท้ายต่อไป (Morton, 1995)

สำหรับวิธีการอื่น ๆ ที่มีการค้นคว้าและยังคงมีการผลิตกันในปัจจุบัน ได้แก่ วิธีการของ Joseph Talalay ซึ่งคิดค้นในปี ค.ศ. 1936 เรียกว่า กระบวนการทาลาเลย์ (Talalay process) (Blackley, 1997) ซึ่งกระบวนการนี้ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง กระบวนการทาลาเลย์ในปัจจุบัน เริ่มต้นโดยการให้น้ำยางที่ปั่นเป็นฟองโดยทางกลแล้วทำให้เกิดการฟูหรือพองตัวโดยใช้ระบบสุญญากาศ จากนั้นใช้ความเย็นทำให้น้ำยางเกิดลักษณะเป็นเจล ซึ่งเทคนิคการใช้ความเย็นนี้จะใช้ส่วนผสมของเอทิลีนไกลคอล – น้ำ ให้ได้อุณหภูมิประมาณ -30 องศาเซลเซียส หล่อระบบเบ้าที่บรรจุฟองน้ำยางที่เกิดการฟูหรือพองตัวแล้วเพื่อให้ฟองยางที่ได้มีอุณหภูมิต่ำ แล้วจึงผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปที่เบ้า ระบบสุญญากาศ ซึ่งได้เปลี่ยนเป็นส่วนผสมของคาร์บอนไดออกไซด์-อากาศ จากนั้นจึงอุ่นเบ้า

ให้อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 2 ระดับ เป็น 4 องศาเซลเซียส และต่อมาเป็น 38 องศาเซลเซียสจากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น 110 องศาเซลเซียสตามลำดับ เพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์

กระบวนการทำยางพองน้ำอีกเทคนิคหนึ่งคือ กระบวนการรีเวอเท็กซ์ (Revertex process) (Blackley, 1997) โดยกระบวนการนี้จะใช้น้ำยางข้น 75% จากวิธีการระเหยน้ำและรักษาไว้ด้วยโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้น้ำยางเกิดการฟูหรือพองตัวโดยก๊าซออกซิเจน ซึ่งได้มาจากการแตกตัวของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ถูกเร่งการแตกตัวด้วยสารตัวเร่ง (ที่อาจมาจากพวก ซีโมโกลบิน หรือ บีสท์ ฯลฯ) แล้วทำให้เกิดเจลโดยใช้โซเดียมซัลไฟฟลูออไรด์ร่วมกับแอมโมเนียมซัลเฟต แล้ววัลคาไนซ์ด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นานอย่างน้อย 20 นาที

หลักการและขั้นตอน โดยสังเขปของกระบวนการคั้นล้อย ซึ่งอธิบายโดย Klempner and Frisch, 1991 มีดังนี้ ขั้นแรกจะทำการปรับปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางธรรมชาติขั้น แล้วนำน้ำยางที่ปรับแอมโมเนียแล้วเติมสารเคมีต่าง ๆ ได้แก่ สบู่ สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่ง สารช่วยเกิดฟอง สารป้องกันการเสื่อมสลายของยาง สารตัวเติม ซึ่งสารเหล่านี้อาจเติมในรูปสารแขวนลอย (Dispersion) หรือสารละลาย (Solution) หรือ อิมัลชัน (Emulsion) ทั้งนี้แล้วแต่ธรรมชาติของสารนั้น ๆ การผสมสารเคมีต่าง ๆ อาจจะแบ่งเป็นสองช่วง โดยที่เมื่อเติมส่วนหนึ่งในช่วงแรกแล้วจะทิ้งน้ำยาไว้ระยะหนึ่ง (Maturation) แล้วจึงเติมส่วนที่เหลือในช่วงที่สอง หลังการปั่นน้ำยางเกิดฟองแล้ว ขณะที่การปั่นฟองเกือบสมบูรณ์ จะเติม ซิงค์ออกไซด์ที่อยู่ในรูปสารแขวนลอย และสารก่อเจลเสริม แล้วจึงเติมสารก่อเจลหลัก เป็นตัวสุดท้าย จากนั้นจึงเทฟองยางลงในเบ้าอลูมิเนียม หลังจากนั้นฟองยางเริ่มมีการเจลอย่างช้า ๆ ในเบ้า ซึ่งเรียกระบบนี้ว่าการทำให้เกิดการเจลอย่างช้า ๆ จากนั้นนำยางพองน้ำไปวัลคาไนซ์โดยใช้ความร้อน ซึ่งปกติจะใช้ไอน้ำ ขั้นต่อไปเปิดเบ้าลอกฟองยางที่วัลคาไนซ์แล้ว และยังมีเยือกอยู่ออกจากเบ้า นำไปล้างน้ำเพื่อกำจัดสิ่งที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น สบู่ หรือสารเคมีอื่น แล้วนำไปอบในตู้อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ลำดับการเตรียมยางพองน้ำสามารถแสดงดังภาพที่ 1

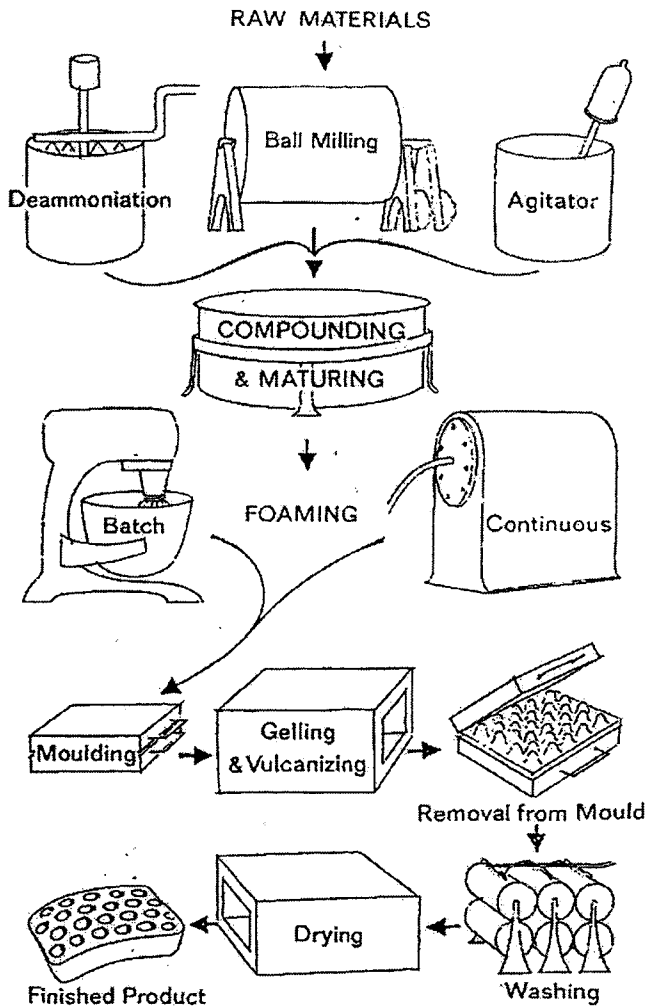


Figure 1. Step for latex foam preparation.

Source: NR Technical Bulletin (1966a)

4. องค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อกระบวนการผลิตยางฟองน้ำ

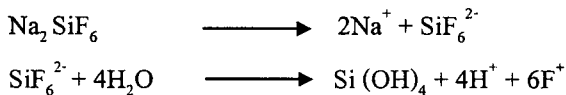
4.1 ปริมาณแอมโมเนียในน้ำยาง

น้ำยางธรรมชาติที่ใช้ในการทำยางฟองน้ำโดยมากจะใช้น้ำยางชั้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตยางฟองน้ำที่เลือกใช้ ซึ่งอาจทำได้โดยการเติมสารในกลุ่มฟอร์มาลดีไฮด์หรือใช้กระบวนการทางกลโดยการพ่นอากาศขึ้นไปที่ผิวน้ำยางและกวนน้ำยางในอัตราเร็วประมาณ 50 รอบต่อนาที จนกระทั่งระดับของ

แอมโมเนียลดลงจนอยู่ที่ระดับ 0.12-0.22% ในทางปฏิบัติ ถ้าในกรณี que เลือกใช้กระบวนการตีฟองแบบไม่ต่อเนื่อง จะควบคุมให้มีปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางประมาณ 0.22% ส่วนถ้าเลือกใช้กระบวนการตีฟองแบบต่อเนื่อง จะควบคุมให้มีปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางประมาณ 0.12% (NR Technical Bulletin, 1966b)

4.2 โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์

สารก่อเจลที่นิยมในการผลิตยางฟองน้ำคือ โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ โดยมักจะเตรียมให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอยในตัวกลางที่เป็นน้ำ ซึ่งมีค่า pH ประมาณ 3.3 ณ อุณหภูมิห้อง โดยปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจะช่วยควบคุมเวลาในการเกิดเจลและช่วยในการจัดตัวของฟองยางให้จับตัวแน่นขึ้นและยึดติดกันได้ดี อย่างไรก็ตามการเกิดซิลิคอนไฮดรอกไซด์ (Silicon hydroxide, Si(OH)_4) ดังแสดงในสมการเคมีข้างล่าง ซึ่งจะดูดซับสารพวกสบู่จากอนุภาคของน้ำยาง อาจทำให้เกิดความไม่เสถียรของการเกิดเจลได้



4.3 ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารก่อเจลที่เมื่อใช้ร่วมกับโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ แล้วจะทำให้เกิดเจลในน้ำยางข้นติ่มากขึ้น ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากสารตั้งต้นดังกล่าวคือ ซิงค์เอมีน (Zinc amine complexes, $\text{Zn(NH}_3)_n^{2+}$) จะไปรวมตัวกับสบู่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเกิดเป็น Insoluble zinc soap ซึ่งช่วยลดความเสถียรของน้ำยางลงทำให้เกิดเจลได้ง่ายขึ้น (นนทศักดิ์, 2523)

4.4 สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent)

ระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางฟองน้ำ โดยปกติจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ทำยางฟองน้ำ สำหรับน้ำยางธรรมชาติ ระบบวัลคาไนซ์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ กำมะถันที่ปริมาณประมาณ 2 phr โดยใช้ร่วมกับ Zinc-daily dithiocarbamate เช่น Zinc-diethyl dithiocarbamate (1 phr) เป็นสารตัวเร่งการวัลคาไนซ์ และอาจมีการใช้สารตัวเร่งเสริมในปริมาณ

เล็กน้อย ซึ่งเป็นการเพิ่มโมดูลัสความยืดหยุ่น (elastic modulus) ให้กับฟองยางและความสามารถในการรับแรงกดเพิ่มขึ้น เช่น สารตัวเร่งเสริมในกลุ่ม Thiazoles เช่น 2-meceptobenzothiazole แต่อาจจะมีปัญหาเรื่องของความเป็นกรดเล็กน้อย ซึ่งอาจส่งผลต่อความหนืดและความไม่เสถียรของน้ำยางคอมปาวด์ที่ได้ (นนทศักดิ์, 2523)

ส่วนการใช้ 2-benzothiazyl disulphide อาจจะไม่เหมาะสมเพราะมีความว่องไวต่ำที่อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ปกติที่ใช้สำหรับยางฟองน้ำ แม้ว่าสามารถนำสารละลายต่างของ 2-

mercaptbenzothiazole เช่น สารละลายโลหะ alkali-metal 2-mercaptbenzothiazole มาใช้ได้ แต่เนื่องจากความเป็นด่างของสารละลายจะทำให้สมบัติการเป็นเจลของยางพองน้ำเปลี่ยนแปลงไป ด้วยเหตุนี้จึงแนะนำให้ใช้อนุพันธ์ของซิงค์ที่ไม่ละลายน้ำ คือ Zinc 2-mercaptbenzothiazolate และพบว่าการใช้ Zinc 2-mercaptbenzothiazolate แทนที่ Zinc-diethyl dithiocarbamate เป็นการเพิ่มสมบัติทางด้าน compressive modulus และลดค่า compression set แต่มีผลให้ความสามารถในการยึดคลดลง โดยทั่วไปปริมาณของ Zinc 2-mercaptbenzothiazolate ที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันสำหรับยางพองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติ และใช้ประมาณ 0.5 phr ส่วนสารประกอบอะมิโน เช่น Diphenylguanidine และ Triethyltrimethylenethiamine ที่ใช้เป็นสารรักษาความเสถียรของพองยาง เจลเสริมให้กับยางพองน้ำ ยังทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งเสริมในกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มอัตราและระดับการวัลคาไนซ์ ระบบการวัลคาไนซ์เดียวกันนี้ยังสามารถใช้กับการทำยางพองน้ำจากยางชนิดอื่น เช่น น้ำยางเอสปีอาร์ (Styrene Butadiene Rubber Lattices) จะมีความแตกต่างกันที่ในน้ำยางเอสปีอาร์จะใช้ Zinc-diethyl dithiocarbamate น้อยกว่า (0.5-0.75 phr) และใช้ Zinc 2-mercaptbenzothiazolate มากกว่า (ใช้มากกว่า 1 phr) เมื่อเทียบกับการใช้ในน้ำยางธรรมชาติ (เบญจ, 2546)

หมายเหตุ : phr = per hundred rubber

$$\text{phr} = (\% \text{ ความเข้มข้น (w/w)} \times \text{น้ำหนักเปียก (g)}) / 100$$

5. วัสดุกันกระแทก

วัสดุกันกระแทก คือ วัสดุที่นำมาใช้เพื่อปกป้องสินค้าจากความเสียหายเนื่องมาจากการกระแทกอย่างรุนแรง หรือสั่นสะเทือนระหว่างกระบวนการขนส่ง เคลื่อนย้ายและขนถ่าย

5.1 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของวัสดุกันกระแทก

หลักการพื้นฐานที่สำคัญ 2 ประการของวัสดุกันกระแทกในการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับสินค้า คือ

1. วัสดุกันกระแทกถูกใช้เพื่อดูดซับแรงกระแทกและป้องกันการส่งผ่านแรงกระแทกมายังตัวสินค้า
2. วัสดุกันกระแทกมีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของสินค้าที่บรรจุภายในหีบห่อ ซึ่งเป็นการลดการเคลื่อนที่มากกระแทกกันจากการสั่นสะเทือน

5.2 ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาเลือกวัสดุกันกระแทก

ในปัจจุบันมีวัสดุหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุกันกระแทก การเลือกใช้วัสดุที่ให้ผลในการปกป้องเพียงพอระดับราคาที่เหมาะสมจะช่วยควบคุมต้นทุนของสินค้าและลดการสูญเสียของสินค้าลงได้ ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาเลือกวัสดุกันกระแทก คือ

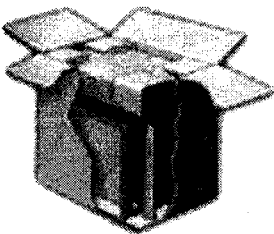
1. รูปทรง ขนาด และน้ำหนักของสินค้า
2. ความเปราะบางของสินค้า
3. ลักษณะของการขนส่ง
4. สมบัติ ราคา และการใช้ประโยชน์อื่นๆของวัสดุกันกระแทก

5.3 ชนิดของวัสดุกันกระแทก

วัสดุกันกระแทกที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ แผ่นกระดาษลูกฟูก โฟมพอลิสไตรีน โฟมพอลิยูรีเทน โฟมพอลิเอทิลีน แผ่นพลาสติกอัดอากาศ ฝอยไม้ และฝอยกระดาษ วัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติ และความเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนี้

5.3.1 แผ่นกระดาษลูกฟูก

แผ่นกระดาษลูกฟูก ใช้ทำเป็นแผ่นรองตัวกัน เพื่อเก็บสินค้าภายในบรรจุภัณฑ์ หรือทำหน้าที่เป็นตัวห่อหุ้มสินค้า แผ่นกระดาษลูกฟูกมีข้อจำกัดในการดูดซับแรงกระแทกอย่างรุนแรง และไม่คืนรูปกลับสู่สภาพเดิมหลังถูกแรงกระทำ มีการดูดซึมความชื้น และอ่อนตัวลงในสภาวะอากาศที่มีความชื้นสูง แต่เนื่องจากการที่สามารถนำกลับเข้ากระบวนการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาจากเศษวัสดุเหลือหลังใช้งาน ตัวอย่างการนำกระดาษลูกฟูกมาใช้งาน ได้แก่ การใช้แผ่นชนิด 3 ชั้นในการกันแบ่งช่องของกล่องบรรจุเครื่องแก้ว เพื่อป้องกันการกระทบกระแทกซึ่งกันและกัน หรือใช้ทำหน้าที่ลดการเคลื่อนที่ภายในกล่องหัตถกรรมที่มีรูปทรงไม่แน่นอน กระดาษลูกฟูกที่มีชั้นกระดาษ 2 ชั้น (กระดาษลูกฟูกหน้าเดียว) ใช้เพื่อการห่อหุ้มเป็นหลัก เช่น ใช้ห่อหุ้มชิ้นส่วนของเฟอร์นิเจอร์หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักร



Corrugated fiberboard box



Single wall



Double wall

Figure 2. Corrugated fiberboard box.

Source: <http://www.tipack.com/th/product.php> (15 มีนาคม 2550)

5.3.2 โฟมพอลิสไตรีน

โฟมพอลิสไตรีน วัสดุมีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิด น้ำหนักเบามาก มีคุณสมบัติป้องกันการกระแทกได้เป็นอย่างดี ไม่ดูดซับความชื้น แต่มีขีดจำกัดในการขึ้นรูป ทำให้ไม่เหมาะกับงานที่ต้องรับการกระแทกรุนแรงหลายๆ ครั้ง มีลักษณะกึ่งแข็ง สามารถขึ้นรูปทรงซับซ้อนได้ง่าย และมีราคาที่ไม่แพงเกินไป เช่น ใช้ในรูปของการทำตามแม่แบบเฉพาะตามรูปของสินค้าแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดความหนาต่างๆ และขึ้นรูปเป็นชิ้นเล็กๆ ในกรณีใช้งานหลายๆ และในการขึ้นรูปสามารถเติมสีเข้าไปเพื่อให้เกิดความสวยงาม โฟมพอลิสไตรีนมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่การใช้งานทำให้เกิดปัญหาเศษวัสดุเหลือใช้ เนื่องจากสลายตัวได้ยาก ตัวอย่างการนำโฟมพอลิสไตรีนมาใช้งาน ได้แก่ การนำโฟมไปขึ้นรูปจากแม่แบบใช้กับเครื่องแก้ว เซรามิก อุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องมือเครื่องใช้ที่มีความประณีต ชนิดชิ้นเล็กๆ ใช้สำหรับเติมในช่องว่างของกล่องที่ใช้ในการขนส่งผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงไม่แน่นอน

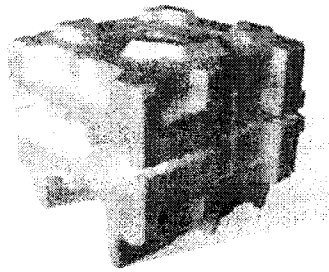


Figure 3. Polystyrene foam.

Source: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene> (15 มีนาคม 2550)

5.3.3 โฟมพอลิยูรีเทน

โฟมพอลิยูรีเทน มีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิดจนถึงเซลล์เปิด 80 เปอร์เซ็นต์ โดยจะปล่อยอากาศออกจากเซลล์เมื่อได้รับแรงกระแทกและดูดอากาศกลับเมื่อหมดแรงกระแทก มีการขึ้นรูปที่ดีมากทำให้เป็นวัสดุกันกระแทกที่ดี ไม่ดูดซับความชื้นในอากาศ มีการใช้งานทั้งชนิดที่ขึ้นรูปจากแม่แบบมาก่อนและขึ้นรูปด้วยการฉีดเข้าไปขยายตัวในช่องว่าง ในกรณีขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดเข้าไปขยายตัวในช่องว่าง สินค้าจะถูกนำมาห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติก (ปกติใช้ฟิล์มพอลิเอทิลีน) เพื่อป้องกันการติดของโฟมที่ใส่ไม่ให้เกาะติดสินค้า จากนั้นวางสินค้านั้นลงในกล่องแล้วฉีดโฟมลงในที่ว่าง การใช้เครื่องเติมโฟมขนาดเล็กจะช่วยให้เคลื่อนย้ายได้ง่ายขึ้น การใช้งานโฟมชนิด

นี้จะพบในการห่อสินค้าที่ค่อนข้างละเอียดอ่อน เครื่องมือที่มีราคาแพงหรือสินค้าที่มีขนาดรูปทรงเปลี่ยนแปลงบ่อยมากๆ

5.3.4 โฟมพอลิเอทิลีน

โฟมพอลิเอทิลีน มีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์ปิด มีการคืนรูปได้ดีหลังรับแรงกระแทก น้ำหนักเบา ทนทานต่อสารเคมี โฟมพอลิเอทิลีนมีการใช้ใน 2 รูปแบบ คือ ครอสลิงค์ (Crosslink) และนอนครอสลิงค์ (Non Crosslink) ชนิดครอสลิงค์จะมีน้ำหนักมากกว่า และมีราคาสูงกว่าชนิดนอนครอสลิงค์ แต่จะมีสมบัติในการเป็นวัสดุกันกระแทกที่ดีกว่า มีการผลิตโฟมชนิดนี้ในรูปแบบสี่เหลี่ยมที่มีความหนาต่างกัน สามารถตัดหรือเลื่อยแล้วนำมาเชื่อมต่อด้วยความร้อนหรือกาวเพื่อให้ได้รูปทรงต่างๆ การผลิตอีกวิธีหนึ่ง คือการผลิตจากแม่แบบ ตัวอย่างการใช้งานโฟมพอลิเอทิลีน ได้แก่ การใช้เป็นวัสดุกันกระแทกให้กับอุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้านและ เครื่องมือต่างๆ

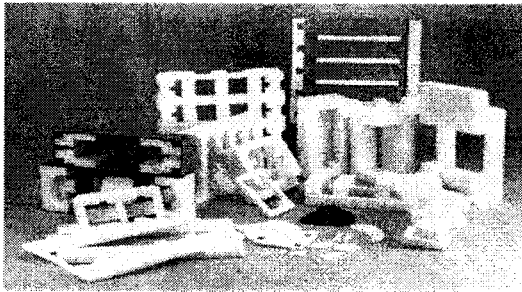


Figure 4. Polyethylene foam.

Source: http://www.alibaba.com/catalog/10953710/Expanded_Polyethylene_EPE_Foam.html

5.3.5 แผ่นพลาสติกอัดอากาศ

แผ่นพลาสติกอัดอากาศทำจากแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีน 2 แผ่นประกบกัน โดยทำให้เกิดที่กั้นอากาศเล็กๆ ขึ้นระหว่างแผ่น มีการผลิตออกมาเป็นม้วน ปกติใช้ห่อหุ้มสินค้าชิ้นเล็กๆ เช่น เซรามิก เครื่องหัตถกรรม บางครั้งใช้ห่อหุ้มภายนอกอุปกรณ์ใหญ่ๆ เช่น ตู้เย็น ซึ่งมีการขนส่งโดยแผ่นรองรับสินค้า แผ่นพลาสติกอัดอากาศมีความเหนียวทน สะอาด และไม่เป็นตัวการทำให้เกิดการผุกร่อน ไม่มีการดูดซับความชื้น ทนต่อแรงกระแทก แต่ไม่เหมาะกับสินค้าที่มีความไวต่อการสั่นสะเทือน จากที่มีการผลิตเป็นม้วนจึงง่ายต่อการนำมาใช้งานกับสินค้าที่มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน

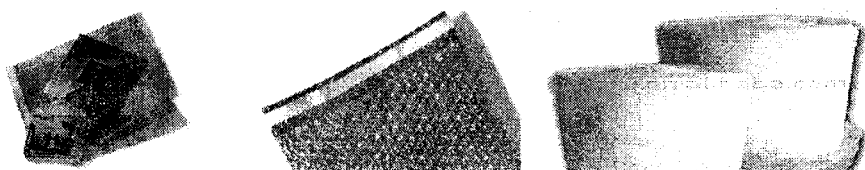


Figure 5. Air bubble pad.

Source: http://www.alibaba.com/catalog/11419314/Air_Bubble_Paded_Envelope.html

5.3.6 ฟอยล์

ฟอยล์เป็นวัสดุกันกระแทกที่มีการใช้งานมานาน โดยใช้ใส่ลงในช่องว่างของกล่องหรือลัง ความสามารถในการเป็นวัสดุกันกระแทกขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการบรรจุและความชื้น โดยปกติมีค่าประมาณ 12-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการใช้งานอย่างกว้างขวางตั้งแต่ผักผลไม้จนกระทั่งสินค้าอุตสาหกรรม แต่ในปัจจุบันประเทศอุตสาหกรรมมักไม่นิยมใช้ฟอยล์เป็นวัสดุกันกระแทกแล้วเนื่องจากเสี่ยงต่อการปนเปื้อนเมื่อใช้กับผักผลไม้ ในขณะที่ความชื้นของฟอยล์เองอาจก่อให้เกิดการสุกเร็วกว่าสินค้าอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามในสินค้าบางประเภทก็ยังมีความต้องการใช้เนื่องจากเป็นวัสดุที่ให้ลักษณะของความเป็นธรรมชาติเมื่อนำมาใช้กับสินค้าประเภทของขงวัญหรือสินค้าที่แสดงควมมีคุณค่าสูง เช่น หินแกะสลักขนาดเล็ก หรืองานฝีมือจำพวกเซรามิก

5.3.7 ฟอยกระดาษ

ฟอยกระดาษมีการใช้งานเช่นเดียวกับฟอยล์ เป็นวัสดุที่มีราคาถูกและหาได้ง่าย มีข้อเสียคือ ดูดซับความชื้นในอากาศได้ง่าย มีการปนเปื้อนของฝุ่นละอองและไม่สะอาด ในประเทศอุตสาหกรรมจะไม่นิยมใช้ โดยเฉพาะฟอยกระดาษที่ได้จากกระดาษที่ผ่านการพิมพ์มาก่อน

ในปัจจุบันวัสดุกันกระแทกประเภทโฟมมีการใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากสามารถผลิตให้ได้ความหนาแน่นตรงตามความต้องการได้ แต่เนื่องจากโฟมหลายชนิดมีการสลายตัวได้ยาก และบางชนิดไม่สามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ จึงก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการจัดการเศษวัสดุที่เหลืออยู่

6. พื้นฐานของการกระแทกทางบรรจุภัณฑ์

6.1 คำจำกัดความ

Shock คือแรงกระแทกที่มีความรุนแรงสูงและเกิดภายในระยะเวลาสั้นๆ

Shock fragility เป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงความสามารถของการต้านทานแรงกระแทกสูงสุดของผลิตภัณฑ์ ก่อนที่ผลิตภัณฑ์จะแตกหัก

6.2 สัญลักษณ์

G คือหน่วยวัดของแรงกระแทกโดยเปรียบเทียบเป็นจำนวนเท่าของความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก และจะเป็นตัวบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อเวลา

$$\text{Deceleration} = \text{Velocity change} / \text{Time}$$

$$G = \text{Deceleration} / g$$

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งมีค่าเท่ากับ 386.4 in/sec^2 หรือ 32.2 ft/sec^2 หรือ 9.81 m/sec^2 (Burgess, 2002)

7. เครื่องมือวัดค่าแรงกระแทก (Accelerometer)

เป็นเครื่องมือวัด (Sensor) โดยวัดค่าแรงกระแทกในหน่วย G หลักการโดยทั่วไปคือ เซรามิคซึ่งมีสมบัติ piezoelectric เมื่อถูกแรงกระแทกจากแท่งเหล็กจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร เมื่อนำไปต่อกับเครื่องวัดและขยายสัญญาณก็จะสามารถอ่านค่าแรงกระแทกได้

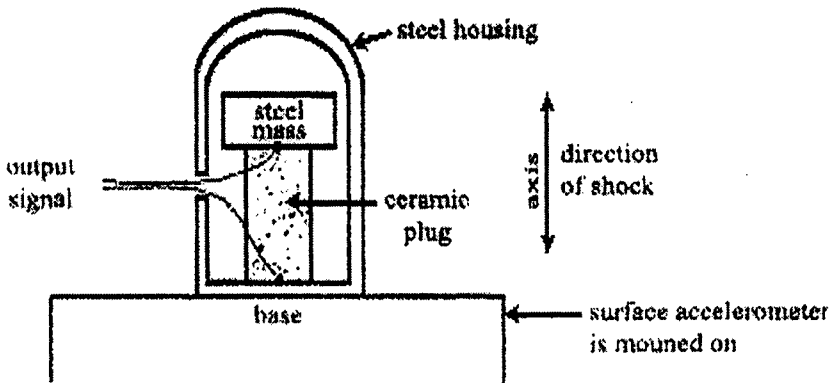


Figure 6. Accelerometer.

Source: Burgess (2002)

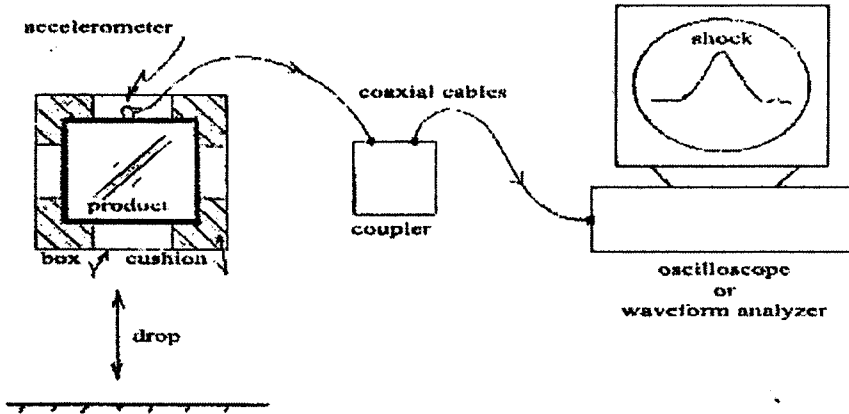


Figure 7. Setup for measuring in – package shock.

Source: Burgess (2002)

8. สัญญาณแรงกระแทก (Shock pulse)

สัญญาณแรงกระแทกเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งหรือความหน่วง (Acceleration or Deceleration) กับเวลาที่เกิดการตกกระทบบนอย่างฉับพลัน โดยจะแสดงค่าแรงกระแทกสูงสุด (Peak G), เวลาที่ใช้ในการตกกระทบบน (Shock duration) อัตราเร็วที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดจากการตกกระทบบนสิ้นสุดการกระดอนขึ้น (Velocity change) ดังภาพ

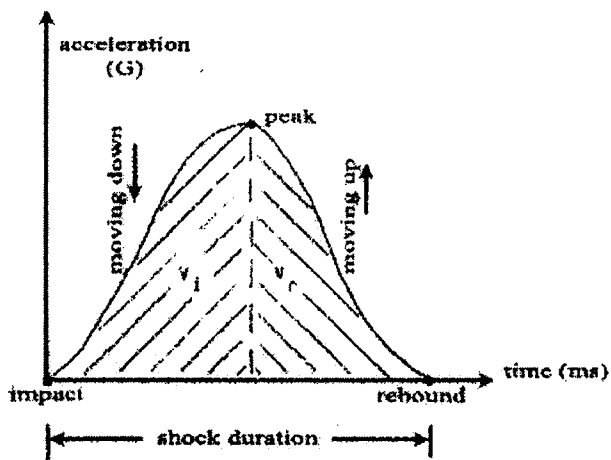


Figure 8. สัญญาณการกระแทก (Shock pulse).

Source: Burgess (2002)

จากกราฟข้างต้นแสดงข้อมูล ได้แก่

1. แรงกระแทกสูงสุด (Peak G) คือจุดที่มีค่า G สูงสุดจากกราฟสัญญาณแรงกระแทก (Shock pulse)

2. เวลาที่ใช้ในการตกกระแทก (Shock duration) คือช่วงฐานของกราฟตั้งแต่เริ่มต้นตกกระแทก (Impact) จนกระทั่งสิ้นสุดการกระดอน (Rebound) มีหน่วยเป็นมิลลิวินาที

3. อัตราเร็วที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดตั้งแต่การตกกระแทกจนถึงสิ้นสุดการกระดอน คือพื้นที่ใต้กราฟ หรือ

$$\Delta V = v_i + v_r$$

โดย $\Delta V = \text{Shape factor} \times \text{base} \times \text{height}$ หรือพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณแรงกระแทก สำหรับกราฟรูปสามเหลี่ยม Shape factor มีค่าเท่ากับ 0.5, สี่เหลี่ยมเท่ากับ 1.0 และ Half sine เท่ากับ 0.636

4. ความสูงของการกระแทก (Drop height) มีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วในการตกกระแทก (Impact velocity) โดย

$$v_i = \sqrt{2gh}$$

5. สัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of restitution) ใช้สัญลักษณ์ “e” มีค่าตั้งแต่ 0-1 โดย

$$e = \frac{v_r}{v_i}$$

เมื่อ $e = 0$ หมายถึง ไม่มีการคืนตัว คือความเร็วของการกระดอนมีค่าเป็นศูนย์ หรือไม่เกิดการกระดอนขึ้น

$e = 1$ หมายถึง เกิดการคืนตัวอย่างสมบูรณ์ หรืออัตราเร็วของการกระดอนมีค่าเท่ากับอัตราเร็วการตกกระแทก

9. เส้นโค้งของวัสดุกันกระแทก (Cushion curve)

คือ เส้นโค้งที่แสดงความสามารถในการรับหรือดูดซับแรงกระแทกของวัสดุกันกระแทก ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงค่าแรงกระแทกสูงสุดในหน่วย G ในแนวแกน Y โดยมีความเค้นสถิตย์ (Static loading) ในแนวแกน X (น้ำหนักของผลิตภัณฑ์หารด้วยพื้นที่สัมผัสระหว่างผลิตภัณฑ์และวัสดุกันกระแทก) และระดับความหนาของวัสดุกันกระแทกและที่แตกต่างกันออกไป ในระหว่างที่ทำการทดสอบ การตกกระแทก (Drop test) ที่ระดับความสูงต่าง ๆ ดังภาพที่ 9

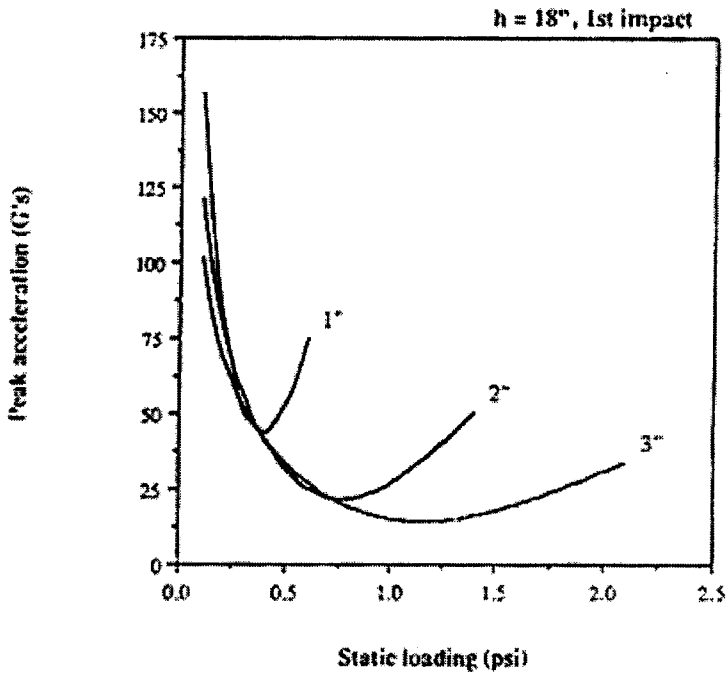


Figure 9 Sample of cushion curves

Source: Burgess (2002)

10. ขี้เลื่อย (Saw dust)

ขี้เลื่อยเป็นเส้นใยธรรมชาติ ที่ความเหมาะสมที่สามารถใช้เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcing material) ในวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) เนื่องจากมีราคาถูก ความหนาแน่นต่ำซึ่งสามารถช่วยในการเพิ่มสมบัติเชิงกลซึ่งเหมาะต่อการใช้เป็นวัสดุโครงสร้างทางวิศวกรรมได้นอกจากนี้การนำเอาขี้เลื่อยมาใช้ประโยชน์ยังสามารถช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการกำจัดขยะที่เป็นวัสดุเศษเหลือจากพวกนี้ได้อีกด้วย (Sombatsompop and Chaochanhaikul, 2004) โดยทั่วไปแล้วขี้เลื่อยซึ่งได้จากการแปรรูปไม้จะมีอยู่ราวร้อยละ 10 ถึง 16 ของเนื้อไม้ท่อนที่เข้าแปรรูป จากข้อมูลของกรมป่าไม้ประเทศสหรัฐอเมริกา (The United State department of Agriculture, Forest Service) (2002 อ้างโดย McKeever and Falk, 2004) ได้รายงานว่าวัสดุเศษเหลือจากไม้จากแหล่งต่างๆ ในปี ค.ศ. 2002 มีประมาณ 178 ล้านตันและวัสดุเศษเหลือจากไม้ในจำนวนนี้ยังไม่ได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ถึง 86 ล้านตัน ซึ่งคิดเป็น 48% ของวัสดุเศษเหลือจากไม้ทั้งหมด

องค์ประกอบทางเคมีของขี้เลื่อย

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสต่อกันเป็นสายยาว โดยคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสโมเลกุลหนึ่งเชื่อมต่อกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสอีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่

ถัดไปด้วยพันธะไกลโคซิดิก (β -1, 4-glycosidic bonds) ไม่มีกิ่งก้านสาขา มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ และตัวทำละลายอินทรีย์หรือสารละลายต่างอ่อน แต่ละลายในสารละลายกรด และต่างแก่ ในพืชมี เซลลูโลสประมาณร้อยละ 30 – 50 ของน้ำหนักแห้ง เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืช โครงสร้างของเซลลูโลสคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ (Beg, 2007) ดัง Figure 10 เซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 20,000 – 750,000 ดาลตัน ซึ่งเท่ากับ 100 – 4,000 หน่วยกลูโคส (น้ำหนักโมเลกุลของกลูโคสเท่ากับ 180.16 ดาลตัน) โมเลกุลของเซลลูโลสจะเรียงกันเป็นมัด หรือเรียกว่าไฟบริล (Fibril) ในแต่ละมัดของโมเลกุลเซลลูโลสพบว่ามี การจัดเรียงตัว 2 แบบ คือ แบบที่เป็นกระจุกอัดตัวกันแน่น (Crystalline fibrils) หรือแบบที่อยู่รวมกันแบบหลวมๆ (Amorphous or Non-crystalline regions) (Bledzki and Gassan, 1999) ดัง Figure 11

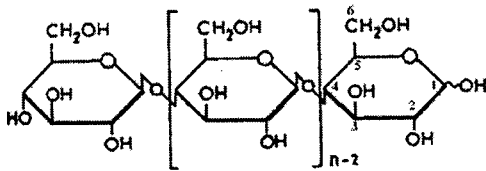


Figure 10 Cellulose structure.

Source : Beg (2007)

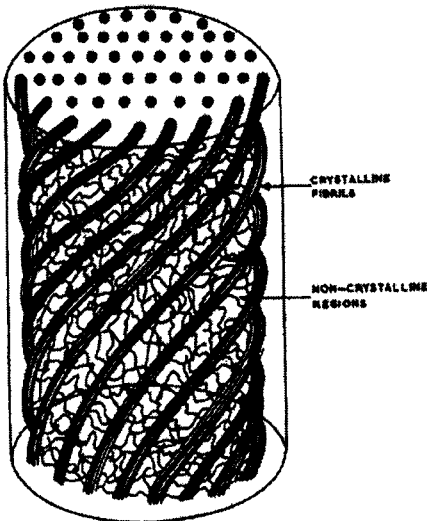


Figure 11. Model of fibrous structure.

Source : Bledzki and Gassan (1999)

เฮมิเซลลูโลส (Hemi-cellulose) เป็นสารประกอบพวก Amorphous polymeric carbohydrate มีลักษณะเป็น Heterogeneous โดยเป็นโพลิเมอร์น้ำตาลหลายชนิดที่รวมตัวกัน พบใน ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน และพืชตระกูลหญ้า โดยทั่วไปไม่ละลายน้ำ ละลายได้ในด่าง ถูกย่อยสลาย

ด้วยกรด มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นกิ่งก้านสาขา น้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส มักพบว่ายูรวมกับเซลลูโลส และลิกนิน ทั่วไปมีโครงสร้างหลักเป็นโพลิเมอร์น้ำตาลดีไซโลส ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1, 4 β -linked โดยมี Branch chain เป็นน้ำตาลชนิดอื่น เช่น แอล-อะราบินโนฟูรานอส (L-arabinofuranose) เชื่อมต่อกับดีไซโลสที่ตำแหน่งคาร์บอนที่ 3 ดี-กลูคิวโรนิกแอซิด (D-glucuronic acid) และแอล-อะราบินโนฟูรานอส (L-arabinofuranose) ด้วยพันธะแอลฟา แต่ไม่มีหมู่อะซิทธิลในโครงสร้างของไซแลน ดัง Figure 12 เซมิเซลลูโลสในไม้เนื้อแข็งได้แก่ไซแลน และเฮมิเซลลูโลสในไม้เนื้ออ่อน ได้แก่ กลูโคแมนแนน

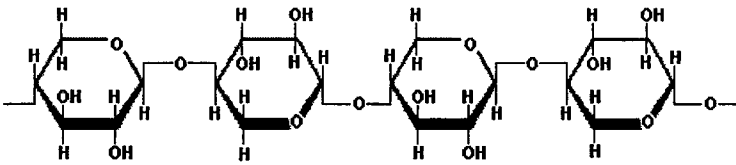


Figure 12. Xylan structure.

Source : Zamora (2008)

ลิกนิน (Lignin) เป็นสารพอลิอะโรมาติกที่สลับซับซ้อนแบบ 3 มิติ เกิดจากการรวมตัวของพารา-ไฮดรอกซีซินนามิล แอลกอฮอล์ (p-Hydroxycinnamyl alcohol) และซินาปิล แอลกอฮอล์ (Cinaply alcohol) โครงสร้างภายในประกอบด้วยพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C - C bond) ซึ่งทนต่อการย่อยสลาย ทำให้การย่อยสลายลิกนินเป็นไปได้ยาก (Beg, 2007)

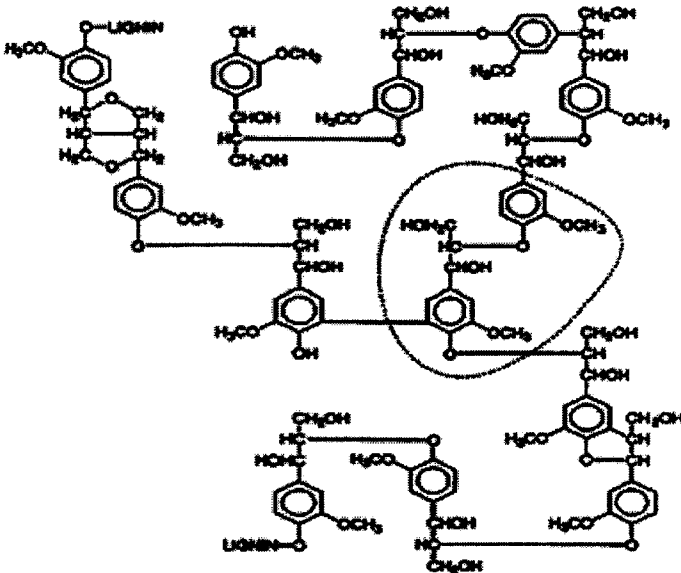


Figure 13. Lignin structure.

Source : Beg (2007)

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแนวทางการเพิ่มมูลค่าของน้ำยางพาราในรูปแบบของวัสดุกันกระแทก
2. เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์จากวัสดุชีวภาพ
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของวัสดุกันกระแทกจากน้ำยางพารา

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

เป็นการผลิตวัสดุกันกระแทกเพื่อใช้กับงานทางด้านบรรจุภัณฑ์จากน้ำยางพาราโดยอาศัยพื้นฐานจากกระบวนการผลิตยางฟองน้ำแบบดันล้อป (Dunlop process) พร้อมทั้งศึกษาอัตราส่วนผสมขององค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุกันกระแทกที่พัฒนาขึ้น รวมทั้งพัฒนากระบวนการขึ้นรูปวัสดุกันกระแทกจากน้ำยางพาราและตัวอย่างชุดข้อมูลมาตรฐานการออกแบบวัสดุกันกระแทกจากยางฟองน้ำ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับเชิงปริมาณ

สามารถพัฒนาสูตรวัสดุกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งสินค้า

2. ความคาดหวังเชิงคุณภาพ

-สามารถมีข้อมูลทางเทคนิคและสมบัติของวัสดุกันกระแทกเพื่อใช้ในการออกแบบ

-เป็นแนวทางหนึ่งในการใช้ทดแทนวัสดุกันกระแทกที่นำเข้าจากต่างประเทศเช่น โฟมจากวัสดุสังเคราะห์ซึ่งย่อยสลายได้ยากและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ในส่วนของงานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปและสมบัติของยางพองน้ำ เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย วิธีดำเนินการวิจัย อุปกรณ์ สารเคมีสำหรับยางพองน้ำ เทคนิคการเตรียมยางพองน้ำในการวิจัย และการทดสอบ

2.1 วิธีดำเนินการ

การศึกษาผลของปัจจัยในการผลิตยางพองน้ำต่อสมบัติในการป้องกันการกระแทก ประกอบด้วย 3 ปัจจัย ดังนี้

1. อิทธิพลของปริมาณสารทำให้น้ำยางเป็นฟอง โปแทสเซียมโอเลเอต 3 ระดับความเข้มข้น ได้แก่ 0.75, 1.0, 1.4 phr
2. อิทธิพลของสารตัวเติม แคลเซียมคาร์บอเนต 4 ระดับความเข้มข้น ได้แก่ 0, 10, 20 และ 30 phr
3. วิธีการให้ความร้อนในกระบวนการผลิต 2 วิธี ได้แก่ การอบไอน้ำ และการอบด้วยตู้อบ

วิธีการวิจัยสามารถสรุปได้ ดัง Figure 14

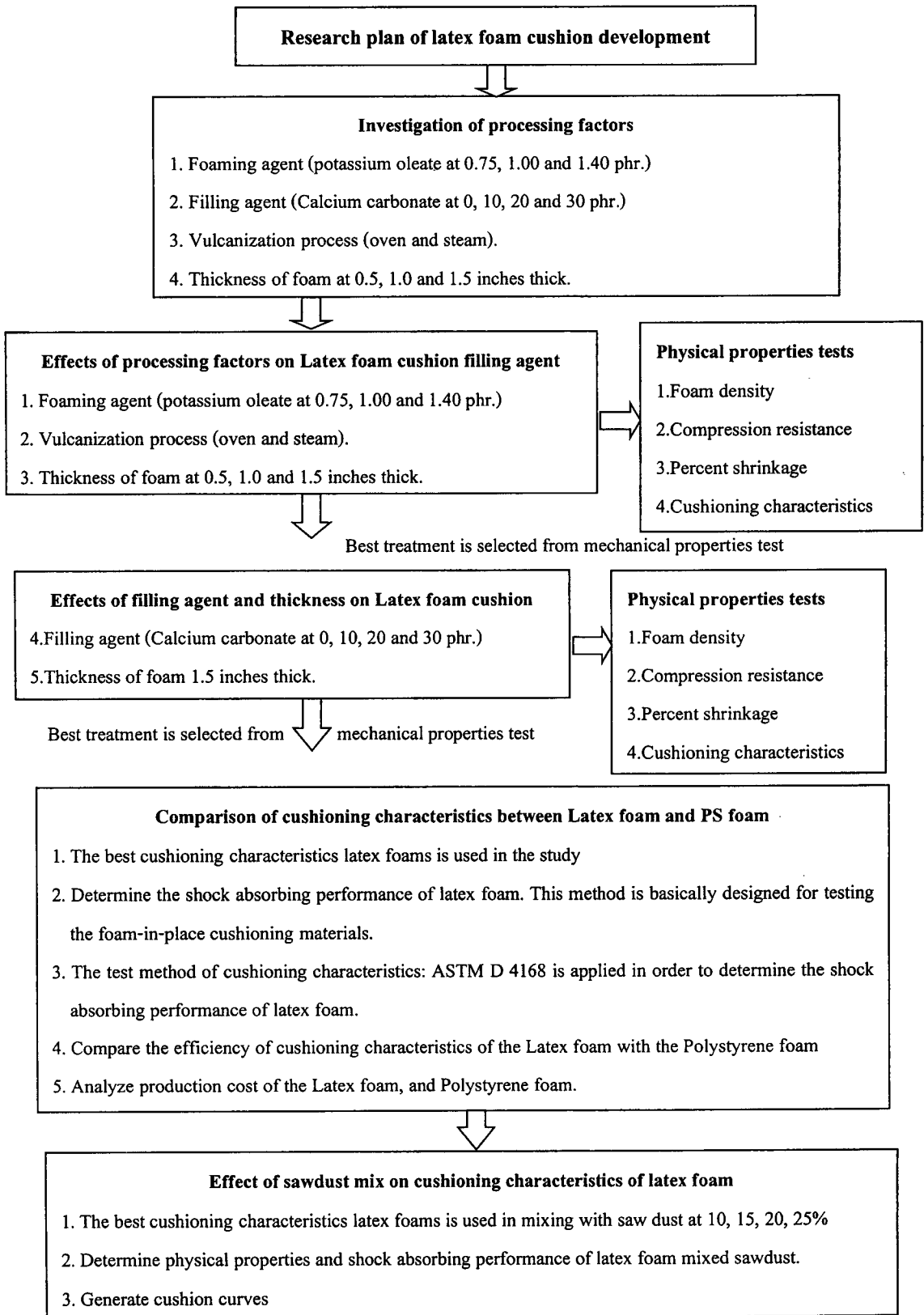


Figure 14. Flow chart of experimental plan.

1. สูตรการผลิตยางฟองน้ำ

สำหรับโครงการวิจัยนี้ได้เริ่มการพัฒนาระบวนการผลิตวัสดุกันกระแทกโดยอ้างอิงสูตรการผลิตยางฟองน้ำพื้นฐานของศูนย์วิจัยยางสงขลา โดยมีสูตรดัง Table 1

Table 1. The formulation for Dunlop process of Songkhla Rubber Research.

Materials	Weight	
	Dry (phr)	Wet (g)
High ammonia concentrated natural latex 60% DRC	100	167
Potassium-oleate solution 10%	0.75, 1.00, 1.40	7.5, 10.0, 14.0
Sulphur dispersion 50%	2.5	5.0
Zinc-N-diethyl dithiocarbamate dispersion 50%	1.0	2.0
Zinc-2-mercaptobenzothiazole dispersion 50%	1.0	2.0
Wing stay L dispersion 50%	1.0	2.0
Zinc Oxide dispersion 50%	5.0	10.0
Diphenyl guanidine dispersion 33%	1.0	3.0
Sodium silicofluoride dispersion 20%	0.45	2.25
Calcium carbonate dispersion 50%	10, 20, 30	20, 40, 60

ที่มา : ศูนย์วิจัยยางสงขลา (2546)

2. วิธีการเตรียมยางฟองน้ำ

1. เตรียมน้ำยางข้นและสารเคมีตามสูตร
2. ปั่นน้ำยางข้น และเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงในเครื่องปั่นฟองตามลำดับดังนี้

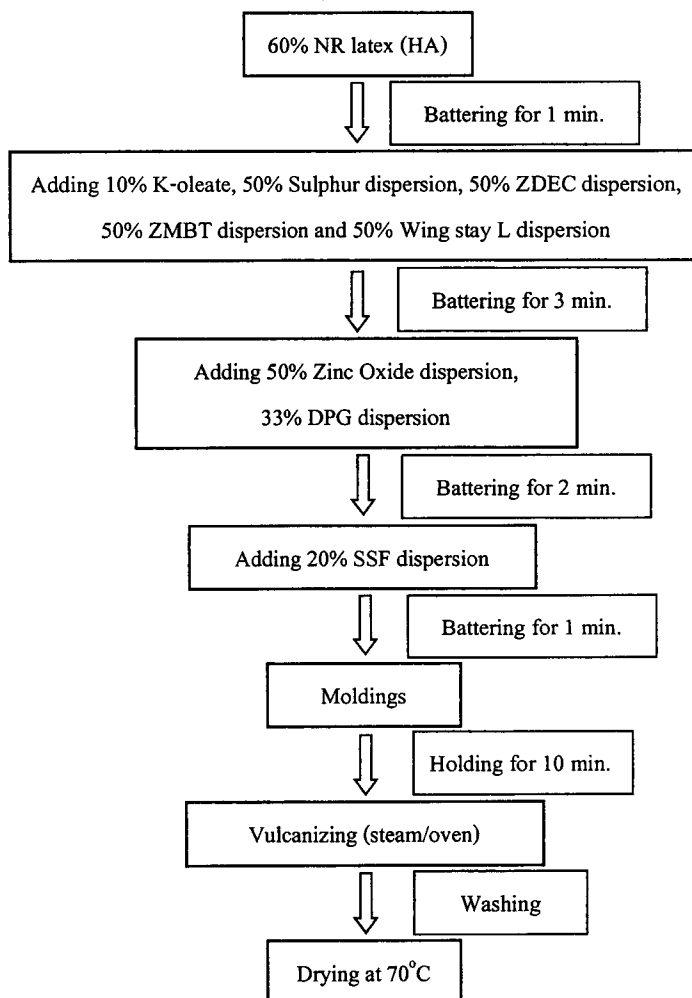


Figure 15. Flow chart of latex foam preparation.

3. นำฟองยางที่ปั่นได้เทลงในเบ้า พิมพ์โลหะ แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที หรือนำไปนึ่งไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ยางฟองน้ำเกิดการคงรูป
4. นำยางฟองน้ำออกจากเบ้าพิมพ์ใส่ลงในอ่างล้างและรีดสารเคมีที่ตกค้างออกด้วยน้ำสะอาด
5. นำฟองน้ำที่ล้างสารเคมีแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางฟองน้ำ

3.1 การทดสอบความหนาแน่น (Density)

การทดสอบดัดแปลงมาจากมาตรฐาน ASTM D 3574-95 โดยตัดชิ้นยางฟองน้ำที่ใช้ในการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง คำนวณความหนาแน่นของตัวอย่างโดยใช้สูตรดังนี้

$$D = \frac{M}{V}$$

D = ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ (g/cm^3)

M = น้ำหนักชิ้นทดสอบ (g)

V = ปริมาตรชิ้นทดสอบ (cm^3)

3.2 การทดสอบค่าความสามารถในการทนแรงกด (Compression resistance)

โดยใช้หัวกดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3.17 เซนติเมตร กดลงบนชิ้นยางฟองน้ำให้ยุบตัวลงเหลือ 50% ของความสูงเดิมหรือจนกว่าชิ้นยางฟองน้ำจะเกิดความเสียหาย ด้วยเครื่องทดสอบ ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR30K และใช้ความเร็วในการกด 1 มิลลิเมตรต่อวินาที

3.3 การทดสอบค่าความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกด (Compression set)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1055-90 โดยตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร สูง 19 มิลลิเมตร แล้ววางชิ้นทดสอบในแผ่นเหล็กอัด (ชุดทดสอบ) กดให้ยุบตัว 50% ของความสูงเดิม ตั้งไว้ประมาณ 15 นาที นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง นำออกจากเตาอบ วางทิ้งไว้ 30 นาที วัดความสูงของชิ้นตัวอย่าง โดยมีสูตรในการคำนวณ ดังนี้

$$\text{Compression set \%} = \left(\frac{t_0 - t}{t_0} \right) \times 100$$

t = ความหนาหลังการทดสอบ (mm)

t_0 = ความหนาเดิม (mm)

3.4 เปอร์เซนต์การหดตัวของฟองน้ำ (Percent shrinkage)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1055 โดยการวัดรูปร่างด้านกว้าง-ยาว ความสูงด้านข้าง และความสูงตรงกลางของชิ้นงาน โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดของฟองน้ำหลังการวัลคาไนซ์ กับขนาดด้านต่าง ๆ ของเบ้าที่เตรียมในการเตรียมฟองน้ำ มีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$\% \text{ การหดตัว} = \left(\frac{x_1 - x_2}{x_1} \right) \times 100$$

X_1 = ขนาดของด้านต่าง ๆ ของเบ้า (cm)

X_2 = ขนาดของยางพองน้ำด้านต่าง ๆ หลังวัลคาไนซ์ (cm)

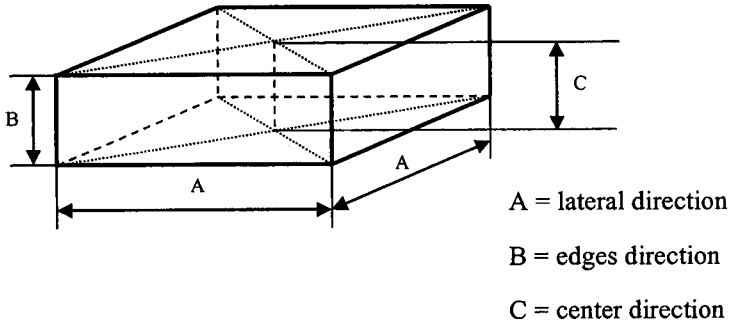


Figure 16. Measuring the shrinkage of latex foam.

3.5 การทดสอบคุณสมบัติการป้องกันแรงกระแทกของยางพองน้ำ

โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 4168 Standard Test Methods For Transmitted Characteristics of Foam- in- Place Cushioning Materials โดยการขึ้นรูปยางพองน้ำตามขนาดของกล่องกระดาษลูกฟูกที่ใช้ทดสอบ บรรจุน้ำหนักถ่วงตามระดับน้ำหนักที่ต้องการทดสอบภายในกล่องเหล็ก วางหัววัด Accelerometer ตรงกลางของกล่องเหล็ก ทำการปิดฝากล่องแล้ววางกล่องบนเครื่องทดสอบการตกกระแทก (Drop tester) โดยวางก้นกล่องตามแนวราบกับแท่นเครื่องทดสอบ ตั้งความสูงตามระยะที่สัมพันธ์กับน้ำหนักบรรจุที่ทดสอบ กดปุ่มเครื่องทดสอบให้ปล่อยกล่องตกกระแทกในแนวตั้งแบบอิสระ (Free fall drop) อ่านค่าแรงกระแทกที่ส่งผ่านจากยางพองน้ำไปสู่หัววัด

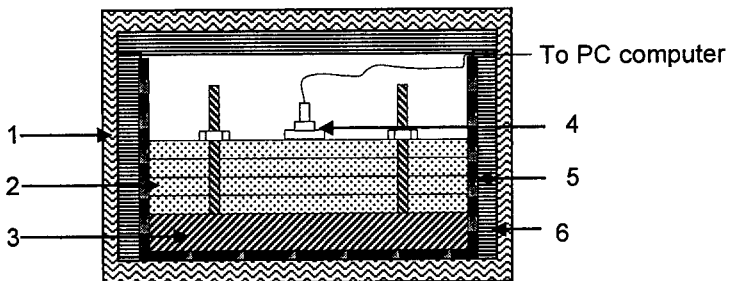


Figure 17. Setup for shock absorbing test; 1. Corrugated box. 2. Ballast weights.

3. Test foam. 4. Accelerometer. 5. Enclosed metal test box. 6. Foam

3.6 การเปรียบเทียบสมบัติการป้องกันการกระแทกกับโฟมสังเคราะห์

โดยใช้ชุดการทดสอบยางพองน้ำ ซึ่งมีสมบัติการป้องกันแรงกระแทกที่ดีที่สุด เพื่อใช้รองรับน้ำหนักทดสอบขนาด 14.3 กิโลกรัม ซึ่งมีน้ำหนักเช่นเดียวกับจอกคอมพิวเตอร์ขนาด 17 นิ้ว และในกล่องกระดาษลูกฟูกอีกชั้น จากนั้นทำการทดสอบการตกกระแทกโดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM D 4168 โดยผลการทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับแรงกระแทกกับวัสดุกันกระแทกที่ผลิตจากวัสดุสังเคราะห์โฟมพอลิโอสไตรีน

3.7 การศึกษาลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำ ศึกษาโดยใช้การถ่ายภาพด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

4. การศึกษาการกระจายตัวของขี้เลื่อยไม้ยางพารา

ทำการร่อนแยกขนาดขี้เลื่อย เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคขี้เลื่อยที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธีตาม ASTM E828-81

5. การศึกษาการผลของการเติมขี้เลื่อยไม้ยางพาราในยางพองน้ำ

1 การเตรียมขี้เลื่อยจากโรงงานแปรรูปของเล่นจากไม้ยางพารา โดยวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของขี้เลื่อยเริ่มต้น

2 คัดแยกขนาดผงขี้เลื่อย โดยนำขี้เลื่อยมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 mesh (รูเปิดขนาด 2.00 mm), 20 mesh (รูเปิดขนาด 0.85 mm) และ 35 mesh (รูเปิดขนาด 0.50 mm) ตามลำดับ ซึ่งจะได้อะไร 4 ขนาด ดังนี้

- (1) ขี้เลื่อยขนาดใหญ่กว่า 2.00 mm
- (2) ขี้เลื่อยขนาด 0.84-2.00 mm
- (3) ขี้เลื่อยขนาด 0.50-0.84 mm
- (4) ขี้เลื่อยขนาดเล็กกว่า 0.50 mm

3. นำขี้เลื่อยไปอบด้วยตู้อบลมร้อนให้มีความชื้นไม่เกิน 5% ก่อนใช้ในการผสมผลิตเพื่อลดผลกระทบซึ่งเกิดจากความชื้น

4. ทำการเติมผสมขี้เลื่อยไม้ยางพาราในระดับ 10% 15% 20% และ 25% โดยน้ำหนักแห้งของยางพารา ตามลำดับตามกระบวนการเตรียมยางพองน้ำที่อธิบายไว้ในข้างต้น ตัวอย่างที่เตรียมได้จะทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติการป้องกันการกระแทกเช่นเดียวกับยางพองน้ำ

6. การพัฒนาชุดข้อมูลมาตรฐานวัสดุกันกระแทกในรูปแบบของเส้นโค้งวัสดุกันกระแทก

(Cushion curves)

ทำการพัฒนาชุดข้อมูลมาตรฐานวัสดุกันกระแทกในรูปแบบของเส้นโค้งวัสดุกันกระแทก (Cushion curves) สำหรับโครงการวิจัยนี้ได้อ้างอิงวิธีการที่พัฒนาโดย Burgess G. (1990) และ (1994) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมวัสดุกันกระแทกยางฟองน้ำขนาด 6" x 6" ที่มีความหนาแน่นตามที่ต้องการ กำหนดช่วงการทดสอบในระดับ ความเค้นสถิตย์ (Static stress) 0.5 psi, ความสูงในการตกกระแทก 12 นิ้ว และความหนาของยางฟองน้ำ 6 นิ้ว ถึง ความเค้นสถิตย์ (Static stress) 3 psi, ความสูงในการตกกระแทก 48 นิ้ว และความหนาของยางฟองน้ำ 3 นิ้ว ซึ่งจะให้ความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) ตั้งแต่ 1 in-lb/in³ ถึง 48 in-lb/in³

2. แบ่งช่วงของความหนาแน่นพลังงานสำหรับการทดสอบออกเป็น 10 ช่วง เท่าๆกัน เช่น 5, 10, 15...และ 45 in-lb/in³

3. สำหรับแต่ละช่วงที่แบ่งในข้อ 2 เลือกชุดผสมของ ความเค้นสถิตย์ ความสูงในการตกกระแทก ความหนาของยางฟองน้ำ จำนวน 5 ชุดที่ให้ค่าความหนาแน่นพลังงานเดียวกัน แล้วทำการทดสอบการตกกระแทก บันทึกของแรงกระแทกที่วัดได้ผ่านวัสดุกันกระแทกยางฟองน้ำในหน่วย G โดยใช้ Accelerometer ทดสอบต่อจนครบทุกชุดการทดลอง

4. สร้างกราฟระหว่าง ความเค้นพลวัต (Dynamic stress) และ ค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) แล้วความสัมพันธ์ของข้อมูลในรูปแบบของสมการ

$$\text{Dynamic stress} = a \cdot e^{b \cdot \text{Energy density}}$$

5. สร้างชุดกราฟเส้นโค้งวัสดุกันกระแทกยางฟองน้ำ (Cushion curves) ระหว่างค่าแรงกระแทก (G) และ ความเค้นสถิตย์ (Static stress) ในระดับความสูงการตกกระแทกและความหนาของวัสดุ โดยใช้ความสัมพันธ์ของ

$$\text{Energy density} = \frac{(\text{static stress}) \times (\text{Drop height})}{\text{Cushion thickness}}$$

$$\text{Dynamic stress} = (\text{Peak G}) \times (\text{Static stress})$$

2.2 วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องผสมและตีฟอง ซึ่งประกอบด้วยภาชนะบรรจุน้ำขนาด 2 ลิตร และมอเตอร์ตีปั่นเป็นซีลวดความเร็วในการปั่นแบบปรับระดับได้ 5 ระดับ (60-360 รอบต่อนาที) ยี่ห้อ Imaflex รุ่น IF-309

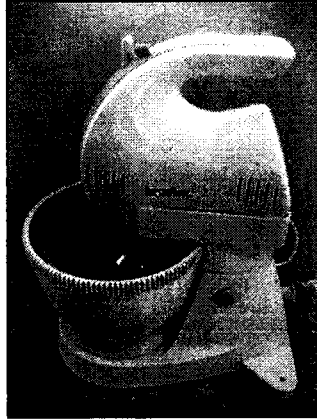


Figure 18. Battering machine.

2. เบ้าพิมพ์ (Mold) ทำจากโลหะอลูมิเนียม มีขนาดกว้าง 7 นิ้ว ยาว 11 นิ้วและสูง 0.5, 1.0 และ 1.5 นิ้ว ตามเงื่อนไขการทดลอง

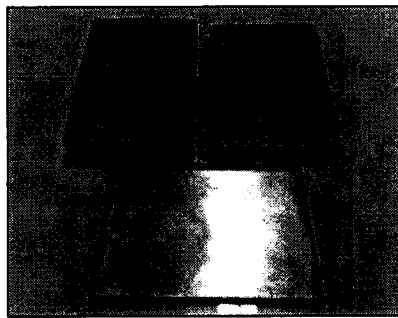


Figure 19. Molds.

3. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ยี่ห้อ Memmert รุ่น UM-500 มีขนาดภายนอก 70 x 54 x 70 เซนติเมตร และขนาดช่องอบภายใน 58 x 40 x 50 เซนติเมตร ผลิตโดยบริษัท Memmert GmbH ประเทศเยอรมัน เป็นตัวให้ความร้อนเพื่อให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์

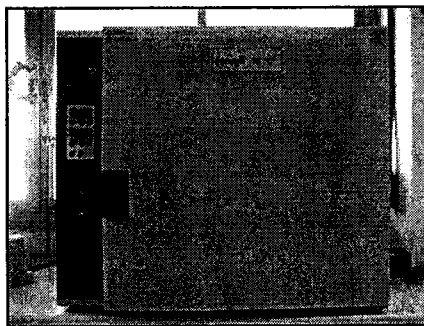


Figure 20. Oven.

4. เครื่องชั่งแบบทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP-2100S

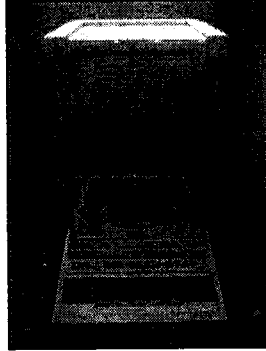


Figure 21. Digital scale.

5. เครื่องทดสอบแรงกด ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR 30 K จัดจำหน่ายโดยบริษัท อินโทรเตอร์ไพร์ส จำกัด

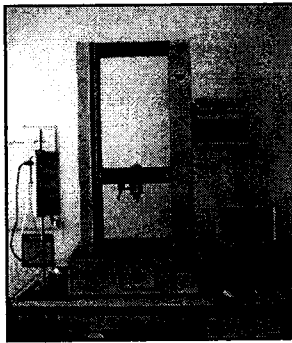


Figure 22. Universal testing machine.

6. เครื่องวัดและบันทึกแรงกระแทก ยี่ห้อ Lansmont รุ่น Test Partner TP3-Lite ผลิตโดยบริษัท Lansmont และหัววัดแรงกระแทก (Accelerometer) แบบ ICP รุ่น 353B18 ผลิตโดยบริษัท PCB Piezotronics, Sensitivity @ 100.0 Hz 10.05 mV/g, Filter frequency 50 Hz

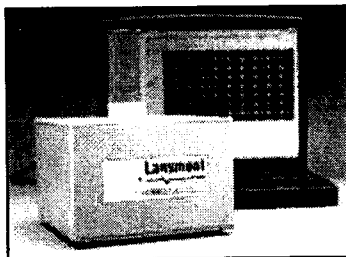


Figure 23. Shock analyzer and accelerometers.

7. เครื่องทดสอบแรงตกกระทบ ยี่ห้อ GOTTECH รุ่น GT-7003 จัดจำหน่ายโดยบริษัท สิทธิพร แอสโซซิเอต จำกัด

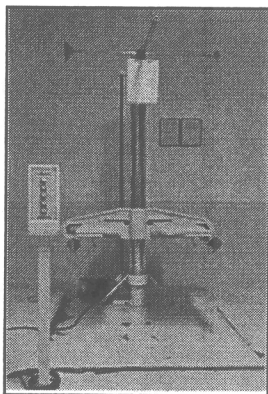


Figure 24. Drop tester.

สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติ

1. น้ำยางธรรมชาติเข้มข้นแอมโมเนียสูง (High ammonia concentrated natural latex, HA TZ type) มีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) ประมาณ 60.08% ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid content, TSC) ในน้ำยาง 61.77% และเก็บรักษาด้วยแอมโมเนีย 0.7% ผลิตโดยบริษัท ฉลองน้ำยางชั้น จำกัด
2. สารละลายโพแทสเซียมโอเลต (Potassium oleate solution) เตรียมอยู่รูปสารละลายเข้มข้น 10% (w/v) สารละลายมีลักษณะใส หนืด เตรียมสำเร็จจาก บริษัท ลักกี้โพร จำกัด
3. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ลักษณะเป็นผงสีขาวครีมขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50% ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยาง เตรียมสำเร็จจาก บริษัท ลักกี้โพร จำกัด
4. กำมะถัน (Sulphur, S) เป็นกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50% ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ เตรียมสำเร็จจาก บริษัท ลักกี้โพร จำกัด
5. ซิงค์ไดเอทิลไดไธโอคาร์บาเมต (Zinc-N-diethyl dithiocarbamate, ZDEC) มีลักษณะเป็นผงสีขาวเทาขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50% ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง เตรียมสำเร็จจาก บริษัท ลักกี้โพร จำกัด

6. ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (Zinc-2-mercaptobenzothiazole, ZMBT) มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50% ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง เตรียมสำเร็จจาก บริษัท ลักกี้โพร จำกัด

7. โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 20% ทำหน้าที่เป็นสารก่อเจลหลัก เตรียมสำเร็จจาก บริษัท ลักกี้โพร จำกัด

8. แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO₃) มีลักษณะเป็นผงสีขาวขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50% ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม เตรียมสำเร็จจาก บริษัท ลักกี้โพร จำกัด

9. ไดฟีนิลกวานิดีน (Diphenyl guanidine, DPG) มีลักษณะเป็นผงหยาบสีขาวขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 33% ทำหน้าที่เป็นสารก่อเจลเสริม เตรียมสำเร็จจาก บริษัท ลักกี้โพร จำกัด

หมายเหตุ : บริษัท ลักกี้โพร จำกัด ตั้งอยู่ที่ 40/204 ถ.รามคำแหง (สุขาภิบาล 3) แขวงหัวหมาก เขต บางกะปิ กรุงเทพฯ 10240

10. ยี่เลื้อยไม้ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) ซึ่งผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตของแผ่นจากไม้ยางพาราจาก บริษัท แพลนตรีเอชเอ็นเอส จำกัด จ.ตรัง

หน้าที่ของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางฟองน้ำสามารถสรุปได้ดัง Table 2

Table 2. Chemicals and used in latex foam preparation.

Chemicals	Function
Potassium oleate solution	Foaming agent
Sulphur dispersion	Vulcanizing agent
Zinc-N-diethyl dithiocarbamate dispersion	Accelerator
Zinc-2-mercaptobenzothiazole dispersion	Accelerator
Wing stay L dispersion	Antioxidant
Calcium carbonate dispersion	Filling agent
Zinc Oxide dispersion	Activator gelling agent
Diphenyl guanidine dispersion	Secondary gelling agents
Sodium silicofluoride dispersion	Gelling agent

ที่มา : พงษ์ธร แซ่ฮุย (2550)

บทที่ 3

ผลการวิจัย

การเตรียมยางฟองน้ำในการทดลองครั้งนี้ ใช้วิธีการเตรียมและสูตรพื้นฐานโดยอ้างอิงจากสูตรของศูนย์วิจัยยางสงขลา และได้ปรับปรุงอัตราส่วนของสารเคมีให้มีความเข้ากันได้มากขึ้น เนื่องจากสูตรที่อ้างอิงมาจากศูนย์วิจัยยางสงขลานั้นทำให้ยางฟองน้ำที่ได้มีความคงตัวต่ำ และมีการหดตัวสูงเกินไป ได้สูตรปรับปรุงใหม่ดัง Table 3.

Table 3. Formulation of latex foam - Dunlop process.

Materials	Weight	
	Dry (phr)	Wet (g)
High ammonia concentrated natural latex 60% DRC	100	167
Potassium-oleate solution 10%	0.75, 1.00, 1.40	7.5, 10.0, 14.0
Sulphur dispersion 50%	2.5	5.0
Zinc-N-diethyl dithiocarbamate dispersion 50%	1.0	2.0
Zinc-2-mercaptobenzothiazole dispersion 50%	1.0	2.0
Wing stay L dispersion 50%	1.0	2.0
Zinc Oxide dispersion 50%	5.0	10.0
Diphenyl guanidine dispersion 33%	1.0	3.0
Sodium silicofluoride dispersion 20%	0.45	2.25

ผลการเตรียมยางฟองน้ำจากสูตรที่ได้ปรับปรุงแล้วพบว่า ยางฟองน้ำที่เตรียมได้มีลักษณะทางกายภาพดีขึ้นกว่าเดิม การหดตัวลดลง มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น ภายในโครงสร้างของยางฟองน้ำมีความเป็นรูพรุนสม่ำเสมอมากขึ้น โดยสูตรปรับปรุงนี้ถูกนำมาใช้ในการเตรียมยางฟองน้ำเพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ที่เกิดจากการเติมสารก่อฟอง (โพแทสเซียมโอเลียด) วิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกันและผลจากการเติมสารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนต) ได้ผลการทดลองดังนี้

3.1. ผลของเติมสารก่อฟอง (โพแทสเซียมโอเลเอต)

3.1.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่เกิดจากการเติมสารก่อฟอง (โพแทสเซียมโอเลเอต) ความเข้มข้น 0.75, 1.00 และ 1.40 phr ได้ผลการทดลองดัง Figure 25 พบว่าปริมาณโพแทสเซียมโอเลเอตที่เติมในสูตรการเตรียมยางฟองน้ำเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของยางฟองน้ำอย่างมีนัยสำคัญ โดยความหนาแน่นของยางฟองน้ำลดลงตามปริมาณโพแทสเซียมโอเลเอตที่เพิ่มขึ้น

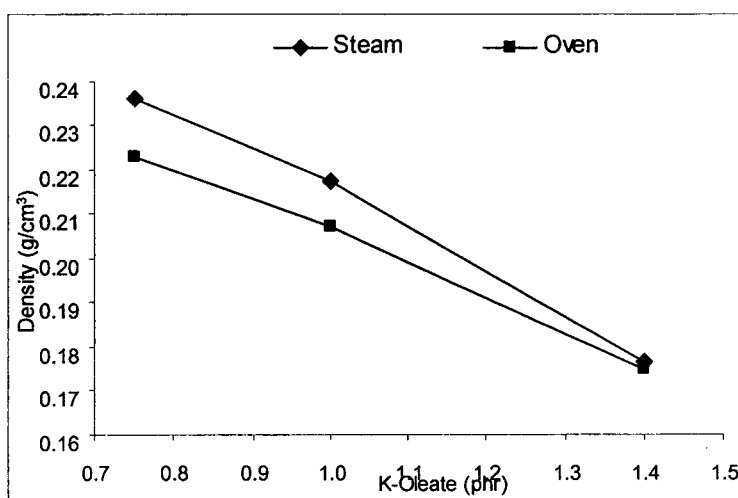


Figure 25. Density of latex foam as a function of potassium oleate.

ยางฟองน้ำที่มีการเติมโพแทสเซียมโอเลเอตในปริมาณสูงสุด (1.40 phr) มีความหนาแน่นต่ำสุด (0.175 g/cm^3) และสูตรยางฟองน้ำที่มีการเติมโพแทสเซียมโอเลเอตในปริมาณต่ำสุด (0.75 phr) มีความหนาแน่นสูงสุด (0.236 g/cm^3) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโพแทสเซียมโอเลเอตเป็นสารที่ทำหน้าที่ให้ยางฟองน้ำมีการพองตัว เมื่อใช้ในปริมาณมากขึ้น การเกิดฟองง่ายขึ้น มีฟองมาก ลักษณะฟองมีความสม่ำเสมอมากขึ้น โพแทสเซียมโอเลเอตยังมีส่วนช่วยในการลดความตึงผิวของน้ำยางขึ้นด้วย (พงษ์ธร, 2548) ดังนั้นยางฟองน้ำที่มีโพแทสเซียมโอเลเอตในปริมาณต่ำจึงสามารถเกิดฟองได้ยาก มีปริมาณฟองน้อยและไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการเติมโพแทสเซียมโอเลเอตลงไปปริมาณต่ำ ปริมาตรของยางฟองน้ำที่เท่ากันมีปริมาณของฟองอากาศน้อยกว่า ส่งผลให้ยางฟองน้ำมีความหนาแน่นสูงกว่า ในทางกลับกันเมื่อเติมโพแทสเซียมโอเลเอตในปริมาณสูงขึ้น ยางฟองน้ำมีความหนาแน่นต่ำลง เนื่องจากเกิดฟองได้ง่ายขึ้น ทำให้ยางฟองน้ำมีปริมาณของอากาศต่อหน่วยปริมาตรของยางฟองน้ำสูงกว่า

ปริมาณโพแทสเซียมโอเลตเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อความหนาแน่นของยางฟองน้ำ โดยสูตรยางฟองน้ำที่มีปริมาณโพแทสเซียมโอเลตต่ำ ทำใหยางฟองน้ำเนื้อสัมผัสแน่นขึ้น และมีการหดตัวต่ำ เนื่องจากในระหว่างการตีฟองเกิดฟองอากาศขึ้นค่อนข้างน้อยและไม่สม่ำเสมอ ทำให้ผนังของฟองแข็งแรงเกินไปเกิดการขยายตัวได้ยาก จึงมีส่วนของเนื้อยางมากกว่าส่วนของฟองอากาศ แต่เมื่อเพิ่มโพแทสเซียมโอเลตในปริมาณมากขึ้น พบว่ายางฟองน้ำมีความยืดหยุ่นมากขึ้น นิ่ม และมีการหดตัวสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากการมีฟองอากาศที่มากขึ้น ทำให้ฟองอากาศมีการแตกตัวและยุบตัวลงบางส่วน ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากการจับตัวของฟองยางซ้ำจึงส่งผลให้มีการหดตัวมากขึ้น และยังพบว่ายางฟองน้ำจะมีการหดตัวที่สูงขึ้นเมื่อมีปริมาณโพแทสเซียมโอเลตที่มากขึ้น

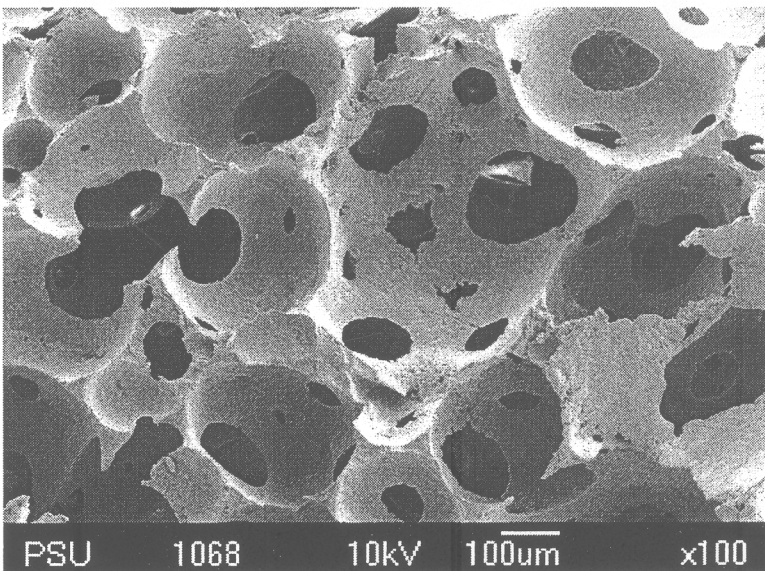


Figure 26. SEM of latex foam density of 0.175 g/cm^3 .

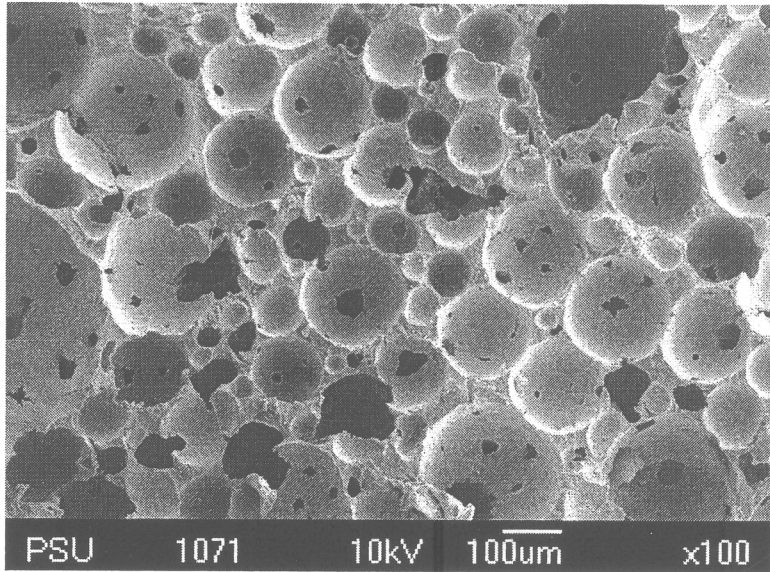


Figure 27. SEM of latex foam density of 0.236 g/cm^3 .

จาก Figure 26 เป็นภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำที่มีความหนาแน่นต่ำสุด (0.175 g/cm^3) พบว่าฟองอากาศภายในยางฟองน้ำมีขนาดใหญ่ มีลักษณะการเรียงตัวแบบหลวมๆ มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีลักษณะเป็นเซลล์เปิดอย่างเห็นได้ชัด และ Figure 27 เป็นภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำที่มีความหนาแน่นสูงสุด (0.236 g/cm^3) พบว่าโครงสร้างของยางฟองน้ำมีฟองอากาศขนาดเล็ก การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และมีระยะห่างระหว่างเซลล์น้อย

วิธีการให้ความร้อนที่ต่างกัน เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของยางฟองน้ำ โดยพบว่ายางฟองน้ำที่ผ่านวิธีการให้ความร้อนแบบอบมีความหนาแน่นต่ำกว่า ($0.175 - 0.223 \text{ g/cm}^3$) ยางฟองน้ำที่ผ่านวิธีการให้ความร้อนแบบนึ่ง ($0.175 - 0.236 \text{ g/cm}^3$) และมีแนวโน้มใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ขึ้น โดยพบว่าในกระบวนการให้ความร้อนแบบอบน้ำถูกระเหยแห้งทันที ส่งผลให้ยางฟองน้ำมีความคงตัวสูง มีการหดตัวน้อยกว่า ในขณะที่ยางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบนึ่ง ยางฟองน้ำเซตตัวได้ช้า ยางฟองน้ำมีการหดตัวสูง จึงส่งผลให้ยางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบนึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่า

3.1.2 ความสามารถในการต้านทานแรงกด (Compression resistance)

การทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำ ทดสอบโดยใช้หัวกดทรงกระบอก กดลงบนชิ้นยางฟองน้ำจนกระทั่งยางฟองน้ำยุบตัวลงไป 50 เปอร์เซ็นต์ของความหนาเดิม ได้ผลการทดสอบดัง Figure 28 และ Figure 29

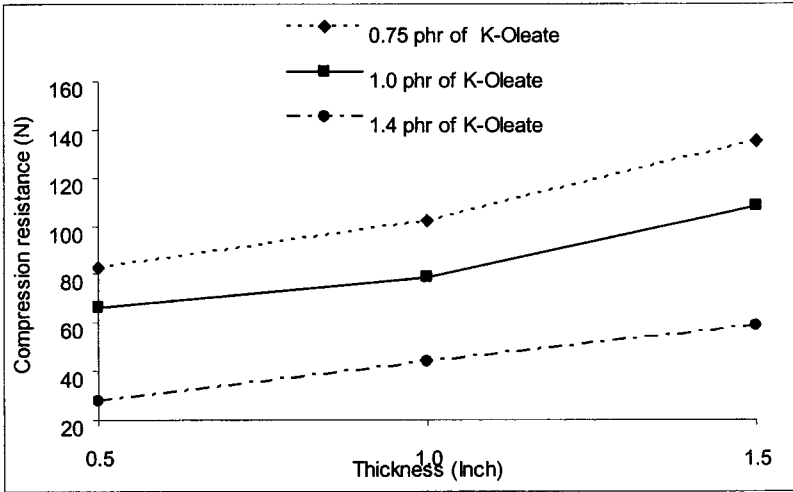


Figure 28. Compression resistance of latex foams vulcanized by steam.

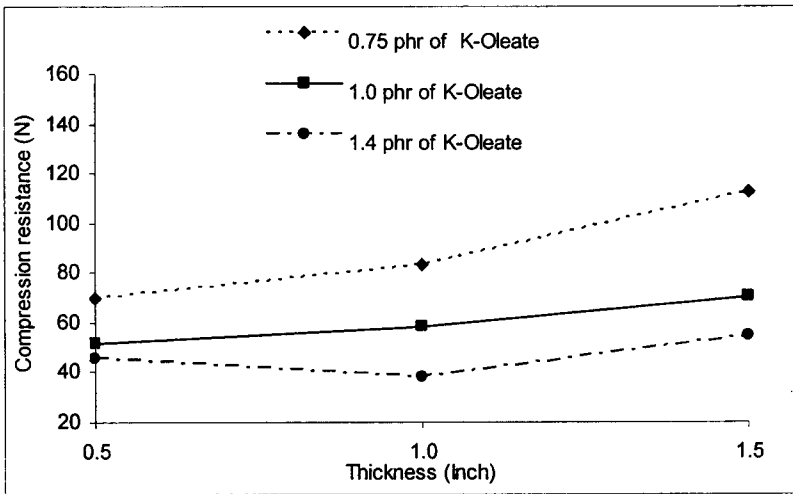


Figure 29. Compression resistance of latex foams vulcanized by oven.

ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงกดของยางฟองน้ำพบว่า ยางฟองน้ำที่มีความหนาแน่นสูง (0.223 – 0.236 g/cm³) และเป็นชิ้นตัวอย่างที่มีความหนามาก (1.5 นิ้ว) สามารถต้านทานแรงกดได้ดี โดยพบว่ายางฟองน้ำที่สามารถต้านทานแรงกดได้ดีที่สุดคือ ยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบหนึ่ง มีปริมาณโพแทสเซียมโอเลต 0.75 phr และมีความหนา 1.5 นิ้ว สามารถต้านทานแรงกดได้ 134.95 นิวตัน ในขณะที่ยางฟองน้ำที่มีความหนาแน่นต่ำ (0.175 – 0.177 g/cm³) และขนาดของชิ้นตัวอย่างที่บางกว่า สามารถต้านทานแรงกดได้เพียง 69.35 นิวตัน เนื่องจากขนาด

เซลล์ของยางพองน้ำที่มีความหนาแน่นสูง มีการจัดเรียงตัวใกล้ชิดกันมากและมีขนาดเล็กทำให้สามารถต้านทานต่อแรงกดได้ดีกว่า

3.1.3 ความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกด (Compression set)

ความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดของยางพองน้ำที่ระดับการใช้โพแทสเซียมโอเลตในปริมาณต่างๆ พบว่าปริมาณโพแทสเซียมโอเลตมีอิทธิพลต่อความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดของยางพองน้ำ โดยความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมีปริมาณโพแทสเซียมโอเลตที่สูงขึ้น เนื่องจากการทดสอบความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดเป็นการทำให้ชิ้นยางพองน้ำมีการเปลี่ยนรูปร่างโดยการกดจากความสูงเดิม 50% เป็นเวลานาน 22 ชั่วโมงและที่อุณหภูมิสูงถึง 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นเหตุให้โครงสร้างของเซลล์เปลี่ยนจากรูปร่างปกติ เป็นลักษณะแบน แน่น เป็นวงรี และบิดเบี้ยว จึงทำให้โครงสร้างของเซลล์เกิดความล้าและความเครียดเพิ่มขึ้น เมื่อหยุดให้แรงกดทำให้โครงสร้างเซลล์ที่ไม่แข็งแรงคืนกลับสู่สภาพเดิมได้น้อย หรือโครงสร้างเซลล์อาจเกิดการแตกและฉีกขาด จึงทำให้มีการเสียรูปไปจากเดิม ดังนั้นหลังการทดสอบ ยางพองน้ำจึงมีความสามารถในการคืนรูปต่ำกว่าปกติ

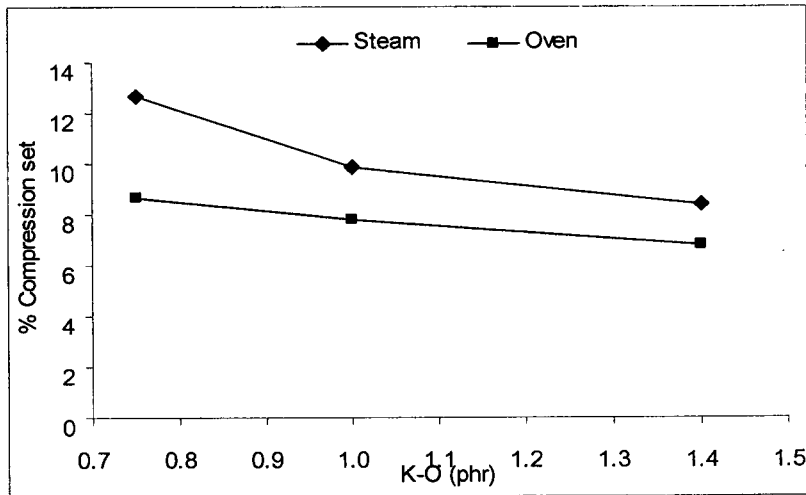


Figure 30. Percent compression set as a function of potassium oleate.

จาก Figure 30 พบว่ายางพองน้ำมีเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดสูงเมื่อมีการใช้โพแทสเซียมโอเลตในปริมาณต่ำ เนื่องจากเซลล์มีขนาดเล็กและแข็งกระด้างจึงทำให้เซลล์มีความแข็งแรงมากกว่า ทำให้มีความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดสูง และเมื่อใช้โพแทสเซียมโอเลตในปริมาณสูงขึ้นไปพบว่ายางพองน้ำมีเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดต่ำลง เนื่องจากโครงสร้างของเซลล์มีขนาดใหญ่ และมีช่องว่างระหว่างเซลล์ที่ใหญ่และกว้างเป็นสาเหตุให้ยางพองน้ำมีความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดต่ำกว่า

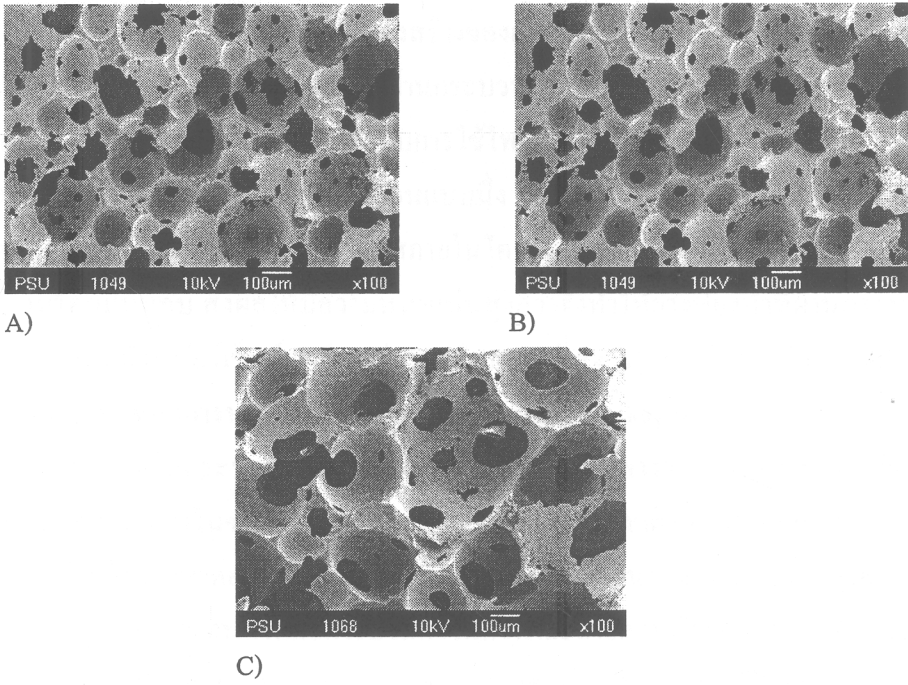


Figure 31. SEM of latex foam vulcanized by oven. A) 0.75 phr of potassium oleate, B) 1.00 phr of potassium oleate, C) 1.40 phr of potassium oleate.

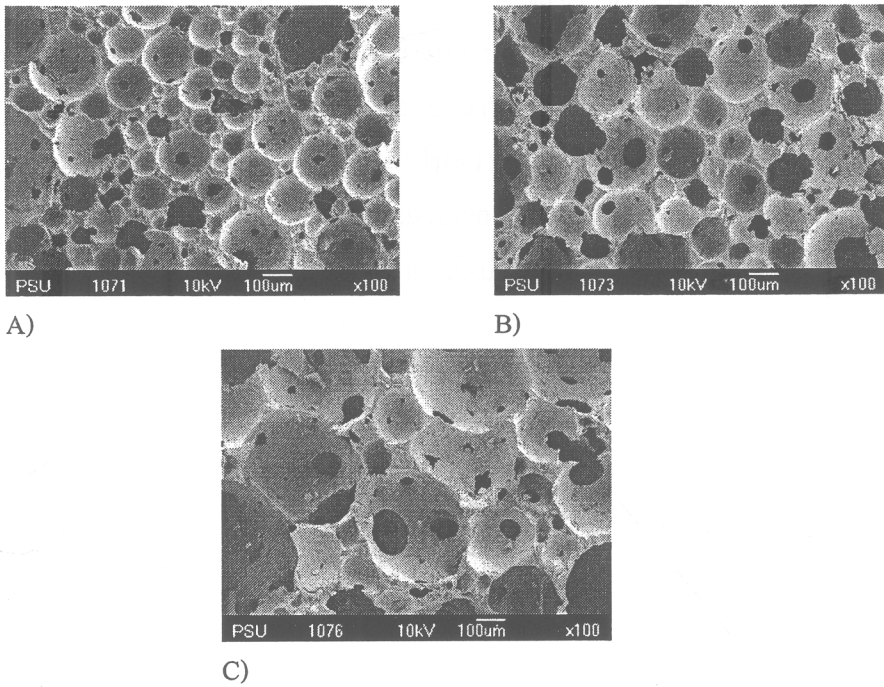


Figure 32. SEM of latex foam vulcanized by steam. A) 0.75 phr of potassium oleate, B) 1.00 phr of potassium oleate, C) 1.40 phr of potassium oleate.

จาก Figure 31 เป็นภาพถ่ายโครงสร้างของยางฟองน้ำที่ระดับการใช้โพแทสเซียมโพลีเอตในปริมาณ 0.75, 1.00 และ 1.40 phr โดยผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบอบ และ Figure 32 เป็นภาพถ่ายโครงสร้างของยางฟองน้ำที่ระดับการใช้โพแทสเซียมโพลีเอตในปริมาณ 0.75, 1.00 และ 1.40 phr โดยผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบนึ่ง โดยจะเห็นได้ว่ายางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบนึ่งมีช่องว่างของอากาศภายในโครงสร้างน้อยกว่ายางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบอบ ส่งผลให้มีความหนาแน่นสูงกว่าจึงทำให้ยางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบนึ่งมีเปอร์เซ็นต์การคืนรูปภายหลังจากการกดที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (Figure 30)

3.1.4 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของยางฟองน้ำ (Percent shrinkage)

โดยปกติในกระบวนการผลิตยางฟองน้ำจากน้ำยางพารา พบว่าฟองน้ำจะเกิดการหดตัวภายหลังจากการวัลคาไนซ์ ซึ่งทำให้ขนาดของฟองน้ำยางธรรมชาติได้ขนาดเล็กกว่าที่กำหนดไว้จากขนาดเบ้า ซึ่งเป็นปัญหาต่อการใช้งานที่ต้องการรูปทรงที่แน่นอนของยางฟองน้ำ ปัญหาการหดตัวนี้เกิดจากยางพารามีการทนทานต่อการบวมตัวในตัวทำลายค่อนข้างต่ำ และอาจเกิดจากอัตราในการตีฟองไม่คงที่ ส่งผลให้ความหนาแน่นของยางแตกต่างกัน รวมทั้งปริมาณของแข็ง ชนิดและปริมาณของสารเกิดฟอง (Blowing agent) ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของยางไม่แน่นอนโดยเปอร์เซ็นต์การหดตัวขึ้นอยู่กับปริมาณของแข็งในสารเคมีที่ใช้ในสูตร (สุรศักดิ์, 2545) จากผลการทดลองพบว่าการเติมปริมาณ โพแทสเซียม โพลีเอตในปริมาณที่แตกต่างกันเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวของยางฟองน้ำ โดยยางฟองน้ำที่มีการเติมโพแทสเซียมโพลีเอตสูงสุด (1.40 phr) มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงสุด เช่น ยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบนึ่งมีเปอร์เซ็นต์การหดตัว 12.69% ส่วนยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบมีเปอร์เซ็นต์การหดตัว 11.07% ในขณะที่ยางฟองน้ำที่มีการเติมโพแทสเซียมโพลีเอตต่ำสุด (0.75 phr) มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำสุด เช่น ยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบนึ่งมีเปอร์เซ็นต์การหดตัว 10.27% ส่วนยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบมีเปอร์เซ็นต์การหดตัว 7.20%

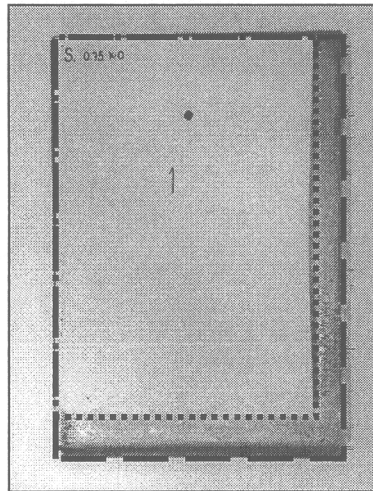


Figure 33. The shrinkage of latex foam at lateral direction.

จาก Figure 33 เป็นตัวอย่างลักษณะของยางฟองน้ำที่มีการหดตัวจากเบ้าหลังจากผ่านการให้ความร้อน โดยเส้นประด้านนอกคือขนาดของเบ้า ส่วนเส้นประด้านในคือชิ้นยางฟองน้ำที่มีการหดตัวภายหลังจากการให้ความร้อน และจากผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวทั้งสามด้านของยางฟองน้ำ พบว่าความสูงบริเวณตรงกลางของชิ้นตัวอย่างมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงสุด (8.40-17.07%) ส่วนด้านกว้าง-ยาวมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำสุด (5.87-10.20%) ดัง Figure 34

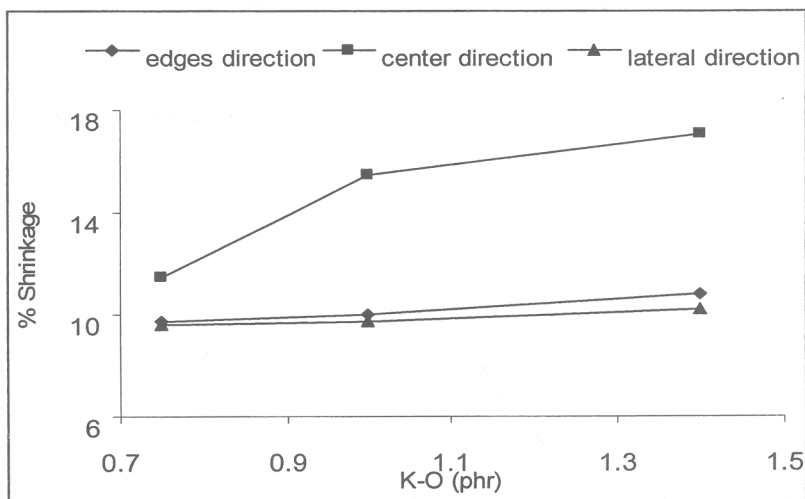


Figure 34. Percent shrinkage of the latex foams vulcanized by steam as a function of potassium oleate.

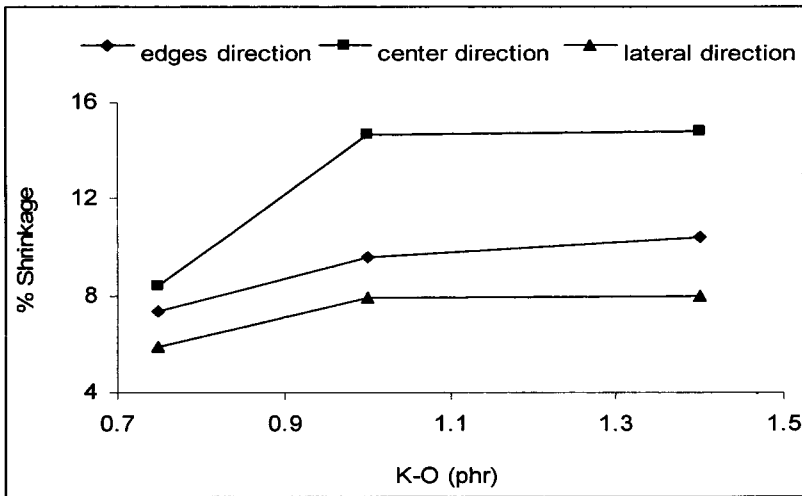


Figure 35. Percent shrinkage of the latex foams vulcanized by oven as a function of potassium oleate.

นอกจากผลของปริมาณสารก่อฟองที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวแล้วยังพบว่าวิธีการให้ความร้อนก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวของยางฟองน้ำเช่นกัน โดยพบว่าการให้ความร้อนแบบหนึ่งทำให้ยางฟองน้ำมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงกว่า (11.56%) ยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบ (9.67%) การหดตัวที่มากกว่านี้ ส่งผลให้ยางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบหนึ่ง มีความหนาแน่นสูงกว่ายางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบอบ

3.1.5 สมบัติการป้องกันแรงกระแทกของยางฟองน้ำ

สมบัติการป้องกันแรงกระแทกของยางฟองน้ำเป็นสมบัติที่ต้องคำนึงถึงมากที่สุดในการทดลองนี้ เนื่องจากเป็นสมบัติที่ใช้บ่งบอกว่ายางฟองน้ำที่ผลิตได้มีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใดที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับแรงกระแทก โดยค่าดัชนีที่บ่งชี้สมบัติการป้องกันแรงกระแทก คือ ค่า G ซึ่งเป็นค่าความหน่วงสูงสุดเมื่อวัสดุที่ทดสอบตกกระทบบนอย่างอิสระที่ยางฟองน้ำดูดซับแรงกระแทกได้ต่ำจะส่งผลแรงกระแทกถูกส่งผ่านมายังผลิตภัณฑ์ภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายกับผลิตภัณฑ์ที่บรรจุได้ ดังนั้นวัสดุกันกระแทกที่ดีจึงต้องสามารถดูดซับแรงกระแทกได้มาก และส่งผ่านแรงกระแทกมายังผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด (ค่า G ต่ำ)

ผลการทดสอบพบว่าปริมาณ โพลีเอทิลีน โอลีเอต ไม่มีอิทธิพลต่อสมบัติการป้องกันแรงกระแทกของยางฟองน้ำ โดยทุกระดับปริมาณ โพลีเอทิลีน โอลีเอต ในชั้นตัวอย่างความหนาแน่นเดียวกัน สมบัติการป้องกันแรงกระแทกของยางฟองน้ำไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และขนาดความหนาของชั้นตัวอย่างเป็นเพียงปัจจัยเดียวที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการป้องกันแรงกระแทก โดยผลการทดสอบสมบัติการป้องกันแรงกระแทกของยางฟองน้ำที่เตรียมจากสูตรที่เติม

โพแทสเซียมโอเลต 0.75, 1.00, 1.40 phr ความหนา 0.5, 1.0, 1.5 นิ้ว และที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ต่างกัน พบว่าฟองน้ำที่มีขนาดความหนา 1.5 นิ้ว สามารถป้องกันแรงกระแทกได้ดีที่สุดประมาณ 43 G, ขางฟองน้ำที่มีความหนา 1.0 นิ้ว สามารถป้องกันแรงกระแทกได้ประมาณ 55 G และขางฟองน้ำที่มีความหนา 0.5 นิ้ว สามารถป้องกันแรงกระแทกได้ดีที่สุดประมาณ 63 G

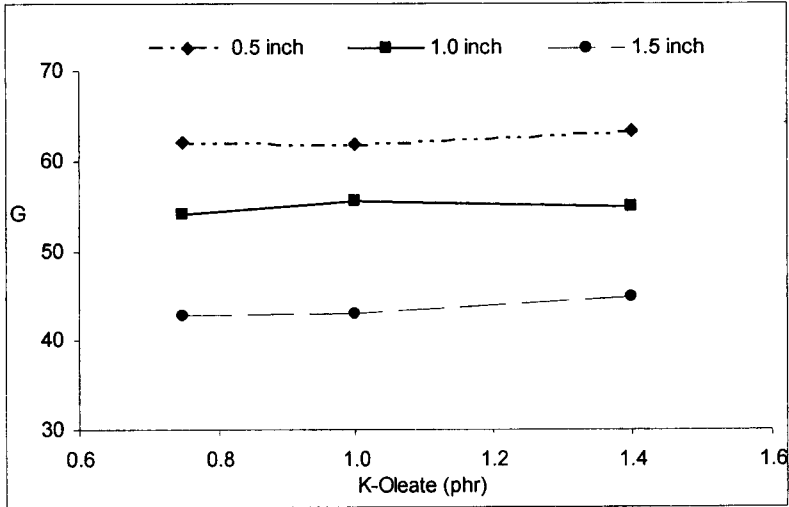


Figure 36. Cushioning characteristics of the latex foam vulcanized by steam.

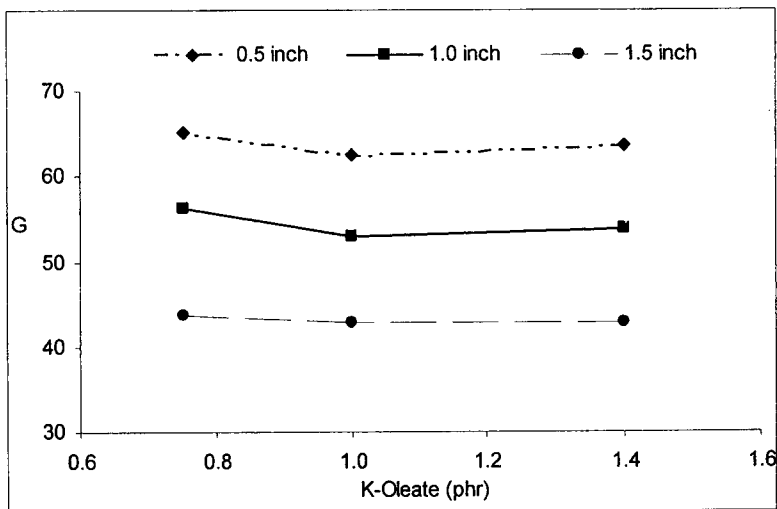


Figure 37. Cushioning characteristics of the latex foam vulcanized by oven.

จาก Figure 36 และ Figure 37 เป็นภาพที่แสดงสมบัติในการป้องกันแรงกระแทกของขางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแตกต่างกัน พบว่าขนาดความหนาของขึ้นตัวอย่างเป็นเพียง

ปัจจัยเดียวที่มีอิทธิพลต่อสมบัติในการป้องกันแรงกระแทก ในขณะที่ปริมาณสารก่อกองและวิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกันไม่มีอิทธิพลต่อสมบัติการป้องกันแรงกระแทก เนื่องจากวัสดุกันกระแทกเป็นวัสดุที่ถูกใช้เพื่อดูดซับแรงกระแทกและปกป้องการส่งผ่านแรงกระแทกมายังตัวผลิตภัณฑ์ (Burgess, 2002) ซึ่งวัสดุที่มีขนาดความหนามากกว่าจะสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่าวัสดุที่บางกว่า ดังนั้นชิ้นตัวอย่างที่มีความหนามากกว่าจึงสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่าและส่งผ่านมายังผลิตภัณฑ์ได้น้อยกว่า การเลือกใช้งานยางพองน้ำที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกันกระแทกจึงควรเลือกพิจารณาที่ความหนาของวัสดุกันกระแทกเป็นประเด็นหลัก

จาก Table 4 เป็นผลการทดสอบสมบัติของยางพองน้ำที่เตรียมจากสูตรที่มีปริมาณสารก่อกองในระดับต่างๆ และกระบวนการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน พบว่ายางพองน้ำที่มีสมบัติที่ดีในการป้องกันแรงกระแทกคือ ยางพองน้ำที่มีขนาดความหนาของชิ้นตัวอย่าง 1.5 นิ้ว และใช้โพแทสเซียมโอเลเอตในปริมาณ 1.40 phr ดังนั้นการทดลองในขั้นต่อไป จึงเลือกเตรียมยางพองน้ำจากสมบัติที่ดีที่สุดจากผลการทดลองข้างต้น โดยจะเตรียมและทดสอบสมบัติของยางพองน้ำที่มีความหนา 1.5 นิ้ว ใช้โพแทสเซียมโอเลเอตในปริมาณ 1.40 phr ผ่านกระบวนการให้เบบนิ่งและแบบอบ ที่ปริมาณสารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนต) แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 0, 10, 20 และ 30 phr

Table 4. Characteristics of natural latex foam as a function of potassium oleate.

Vulcanization	Foaming agent	%Compression set	%Shrinkage			Density (g/cm ³)	Cushioning characteristic(G)			Compression resistant (N)		
			Edges	Center	Lateral		Thickness (Inch)			Thickness (Inch)		
							0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
Steam	1.40	8.4	10.8	17.1	10.2	0.177	63.31	54.94	44.91	27.42	44.17	58.49
	1.00	9.9	10.0	15.5	9.7	0.217	61.86	55.59	43.06	66.60	78.93	108.30
	0.75	12.7	9.7	11.5	9.6	0.236	62.11	53.99	42.87	82.48	102.37	134.95
Oven	1.40	6.8	10.4	14.8	8.0	0.175	63.62	53.89	42.87	45.45	38.10	54.73
	1.00	7.8	9.6	14.7	7.9	0.207	62.51	52.99	42.82	51.90	58.10	70.56
	0.75	8.7	7.3	8.4	5.9	0.223	65.06	56.30	43.71	69.35	82.96	112.95

3.2. ผลของการเติมสารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนต)

3.2.1 ความหนาแน่น (Density)

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่เตรียมจากสูตรที่เติมโพแทสเซียมโอเลตในระดับที่แตกต่างกัน พบว่ายางฟองน้ำที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุดทั้งแบบที่ผ่านการให้ความร้อนแบบนั่งและแบบอบ คือ ยางฟองน้ำที่เตรียมมาจากสูตรที่เติมโพแทสเซียมโอเลตในปริมาณ 1.40 phr ซึ่งได้ถูกคัดเลือกนำมาใช้ศึกษาผลจากการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้น 0, 10, 20 และ 30 phr ตามลำดับ

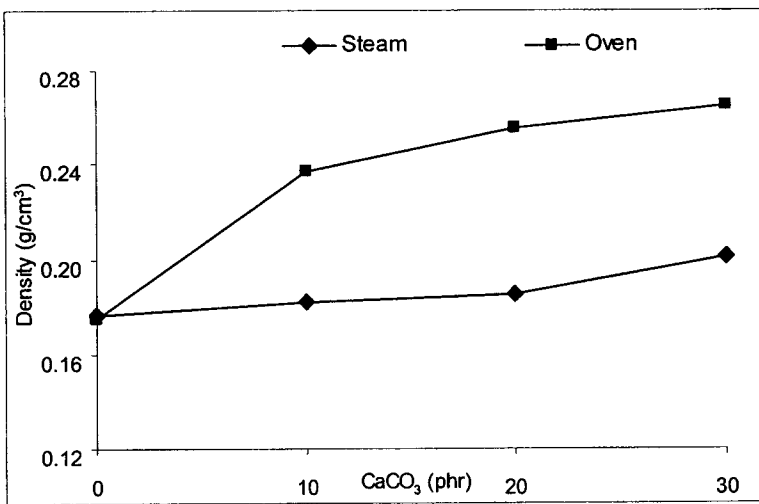


Figure 38. Density of latex foam as the function of calcium carbonate.

พบว่าสารตัวเติมเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของยางฟองน้ำอย่างมีนัยสำคัญ โดยยางฟองน้ำมีความหนาแน่นสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณสารตัวเติมที่สูงขึ้น และยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบจะมีความหนาแน่นสูงกว่ายางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบนั่งอย่างมีนัยสำคัญ

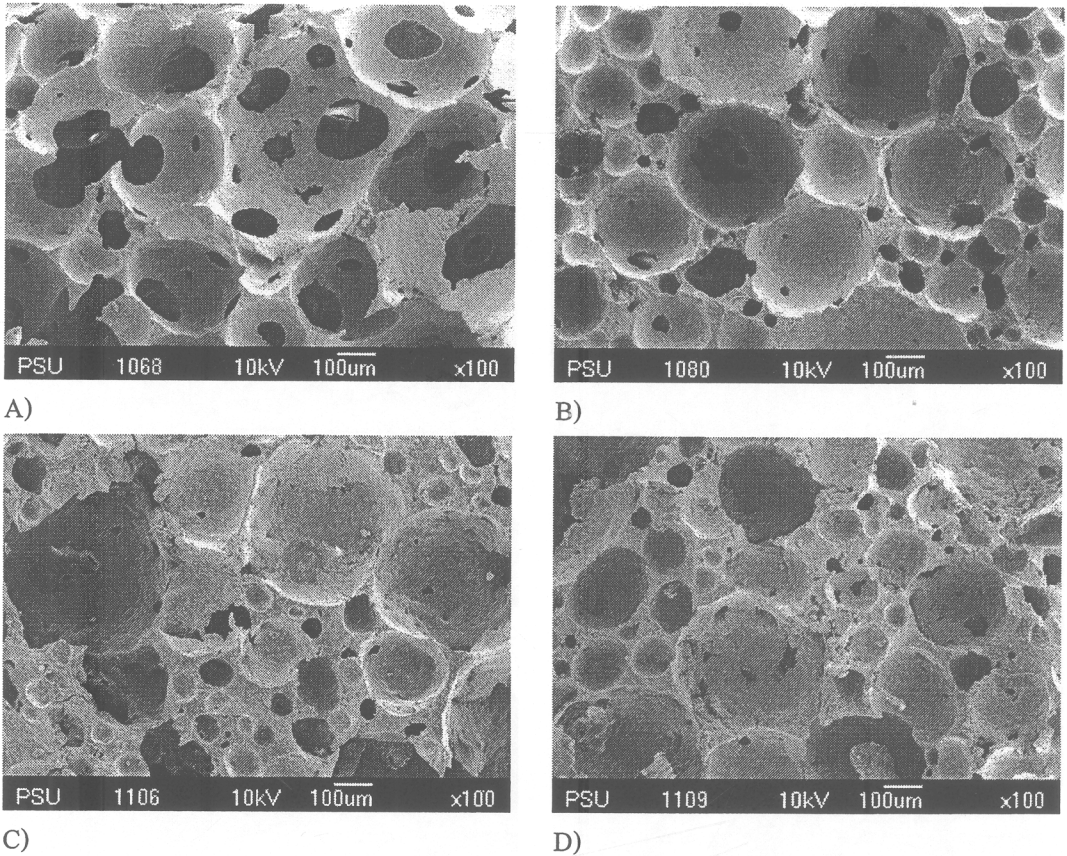


Figure 39. SEM of latex foam vulcanized by oven

- A) 0 phr of calcium carbonate, B) 10.0 phr of calcium carbonate,
C) 20.0 phr of calcium carbonate, D) 30.0 phr of calcium carbonate.

Figure 39 เป็นภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในระดับที่แตกต่างกัน พบว่าในแต่ละระดับแคลเซียมคาร์บอเนตยางฟองน้ำมีความหนาแน่นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยยางฟองน้ำที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีความหนาแน่นต่ำสุด (0.175 g/cm^3) และยางฟองน้ำที่มีความหนาแน่นสูงสุด (0.265 g/cm^3) คือ ยางฟองน้ำที่เกิดจากการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 30.0 phr โดยโครงสร้างของยางฟองน้ำมีการยึดเกาะกันหนาแน่นมากขึ้นเมื่อมีแคลเซียมคาร์บอเนตผสมอยู่ในปริมาณที่สูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีการยึดเกาะภายในช่องว่างระหว่างเซลล์ของยางฟองน้ำ และเข้าไปแทนที่น้ำบางส่วนหนึ่ง จึงทำให้ยางฟองน้ำมีส่วนของยางและแคลเซียมคาร์บอเนต เกิดเป็นฟองน้ำได้ยากขึ้น ขนาดของฟองจึงเล็กและไม่มีความสม่ำเสมอของเซลล์ เป็นเหตุให้ยางฟองน้ำมีความหนาแน่นสูงขึ้น ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ยางฟองน้ำมีความกระด้างมากยิ่งขึ้น ทำให้ยางฟองน้ำเกิดการฉีกขาดได้ง่ายอีกด้วย

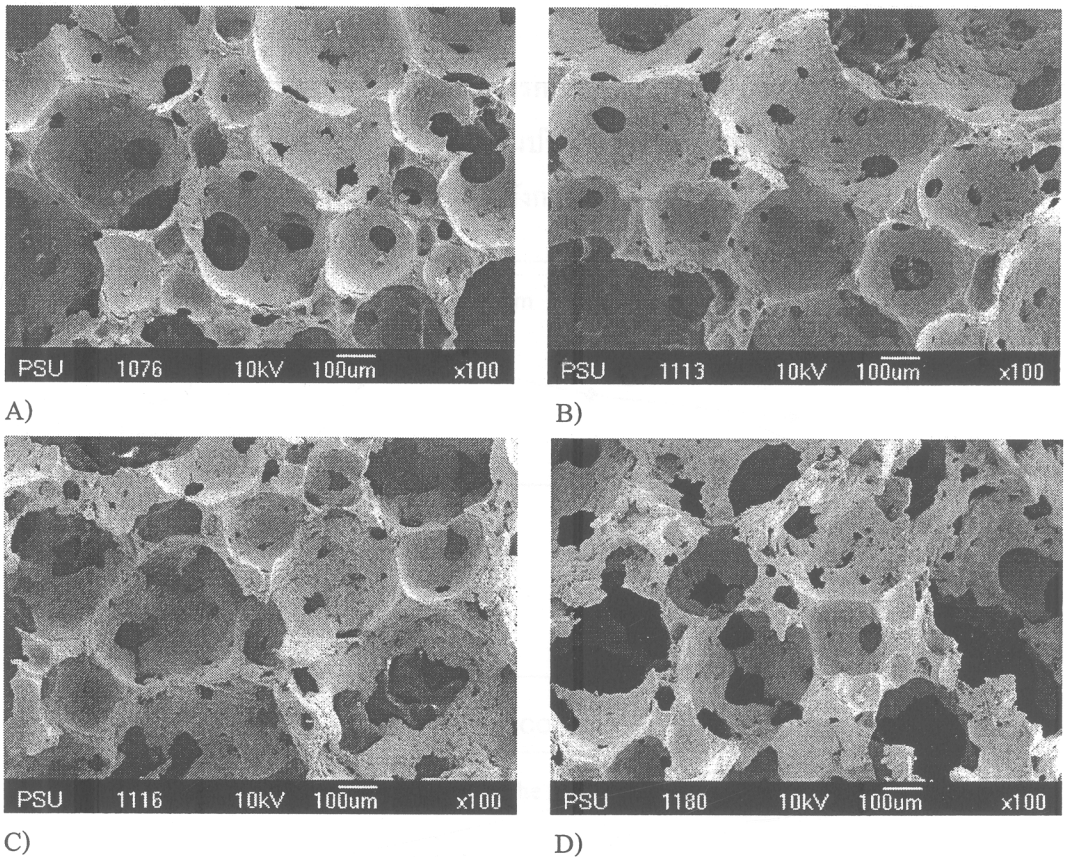


Figure 40. SEM of latex foam vulcanized by steam

- A) 0 phr of calcium carbonate, B) 10.0 phr of calcium carbonate,
C) 20.0 phr of calcium carbonate, D) 30.0 phr of calcium carbonate.

Figure 40 เป็นภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบหนึ่ง พบว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้หนาแน่นของยางฟองน้ำเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ($0.177-0.201 \text{ g/cm}^3$) เนื่องจากลักษณะของเซลมีความเสียหายเพิ่มขึ้นตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการให้ความร้อนแบบหนึ่งทำให้น้ำที่อยู่ภายในเซลของยางฟองน้ำร้อนและเดือด ทำให้เกิดแรงดันไอน้ำไปทำลายการยึดเกาะกันของเซลฟองยางในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนได้ง่าย ทั้งนี้แคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมเพิ่มขึ้นยังไปลดประสิทธิภาพในการยึดเกาะกันของยางภายในเซลของยางฟองน้ำ ในขณะที่ยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบนั้น ไอน้ำที่ร้อนจัดในยางฟองน้ำจะค่อยๆ ถูกระเหยแห้งออกไป ทำให้เซลมีความเป็นระเบียบมากกว่าและถูกทำลายน้อยกว่า ดังนั้นยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบหนึ่ง

(0.177-0.201 g/cm³) จึงมีความหนาแน่นต่ำกว่ายางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบ (0.175-0.265 g/cm³) อย่างมีนัยสำคัญ

3.2.2 ความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกด (Compression set)

ยางฟองน้ำที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆ และผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน มีความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดที่แตกต่างกัน

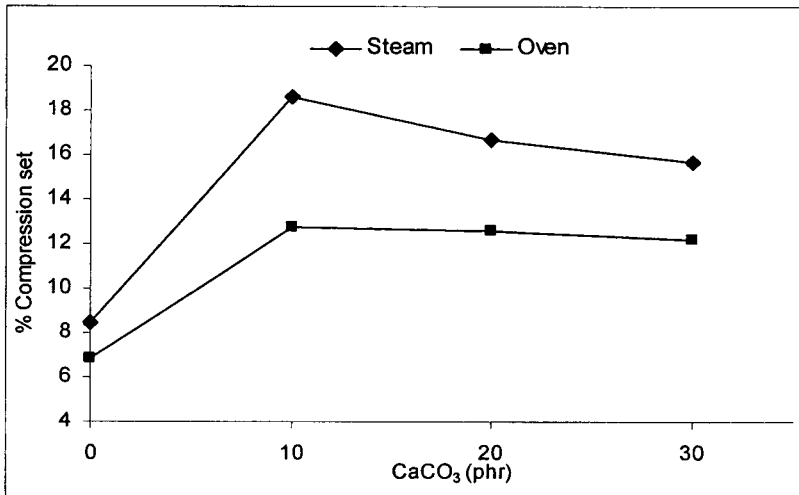


Figure 41. Percent compression set as the function of calcium carbonate.

จาก Figure 41 เป็นเปอร์เซ็นต์ค่าความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดของยางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบหนึ่งและแบบอบ โดยมีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่ายางฟองน้ำที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดสูงกว่ายางฟองน้ำที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่สูงขึ้น เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมลงไปปริมาณมากเกินไป เข้าไปแทนที่น้ำภายในระหว่างการตีฟองทำให้ยางฟองน้ำมีความเปราะ และมีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดจึงมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมยังมีผลทำให้ความยืดหยุ่นของยางฟองน้ำลดลงด้วย เป็นสาเหตุให้เมื่อถูกแรงกดเพิ่มขึ้นจึงมีการคืนตัวกลับได้ช้าและมีการคืนรูปกลับช้ามากขึ้นเมื่อเติมในปริมาณที่สูงขึ้น และพบว่ายางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบหนึ่งมีความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดสูงกว่ายางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบอบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากยางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบหนึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าและมีช่องว่างของอากาศภายใน โครงสร้างมากกว่ายางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบอบ ส่งผลให้มีความยืดหยุ่นสูงกว่าจึงมีเปอร์เซ็นต์การคืนรูปภายหลังการกดที่สูงกว่าด้วย

3.2.3 ความสามารถในการต้านทานแรงกด (Compression resistance)

การเติมแคลเซียมคาร์บอเนต และกระบวนการให้ความร้อนที่ต่างกัน เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการต้านทานแรงกดของยางพองน้ำอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าความสามารถในการต้านทานแรงกดของยางพองน้ำสูงขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความหนาแน่น ซึ่งยางพองน้ำที่มีความหนาแน่นสูง สามารถต้านทานแรงกดได้ดี เนื่องจากการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในส่วนผสมของยางพองน้ำ สารตัวเติมเข้าไปแทนที่น้ำยาง จึงเกิดเป็นฟองได้น้อยในขณะตีฟอง ทำให้มีฟองอากาศขนาดเล็ก ความหนาแน่นจึงสูงขึ้น จึงสามารถต้านทานแรงกดได้ดี และยางพองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบสามารถต้านทานแรงกดได้ดีกว่ายางพองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบนึ่ง เนื่องจากยางพองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบมีโครงสร้างที่มีความหนาแน่นมากกว่ายางพองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบนึ่งจึงสามารถต้านทานต่อแรงกดได้ดีกว่า

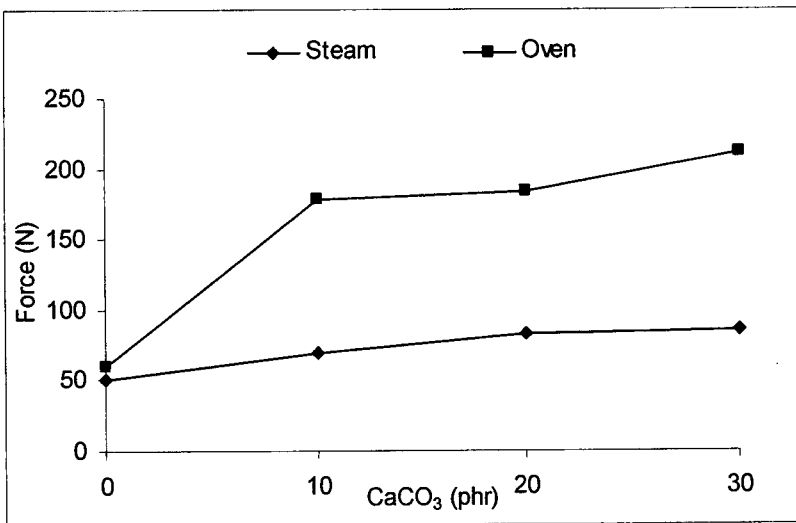


Figure 42. Compression resistance of latex foams at 1.5 inches-thick and as function of calcium carbonate.

ยางพองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบสามารถต้านทานแรงกดได้ดีกว่ายางพองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบนึ่ง โดยยางพองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบที่มีความหนาแน่นต่ำสุด คือ 0.175 g/cm^3 (ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต) สามารถต้านทานแรงกดได้เพียง 59.5 นิวตัน ในขณะที่ยางพองน้ำที่มีความหนาแน่นสูงสุด คือ 0.265 g/cm^3 (เติมแคลเซียมคาร์บอเนต 30 phr) สามารถต้านทานแรงกดได้ถึง 211.8 นิวตัน

3.2.4 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของยางฟองน้ำ (Percent shrinkage)

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การหดตัวของยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบหนึ่งและแบบอบหลังจากที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของยางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบหนึ่งมีค่าสูงกว่ายางฟองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบในทุกๆ ด้านอย่างมีนัยสำคัญ

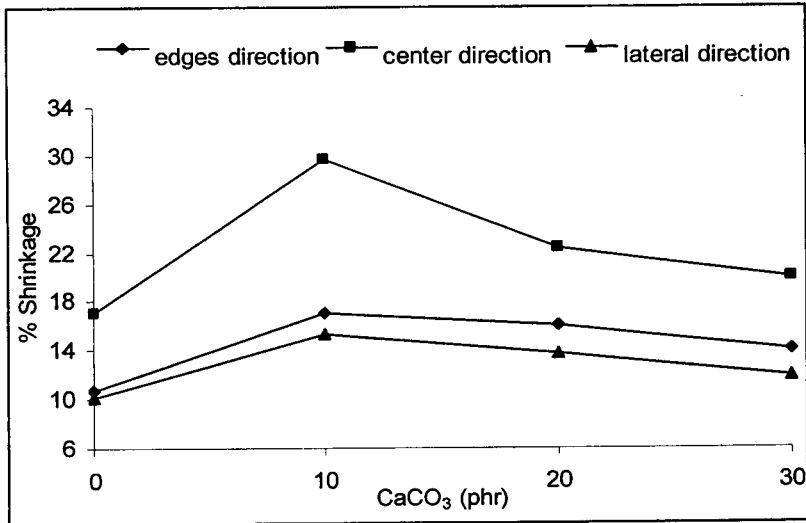


Figure 43. Percent shrinkage of the latex foams vulcanized by steam as a function of calcium carbonate.

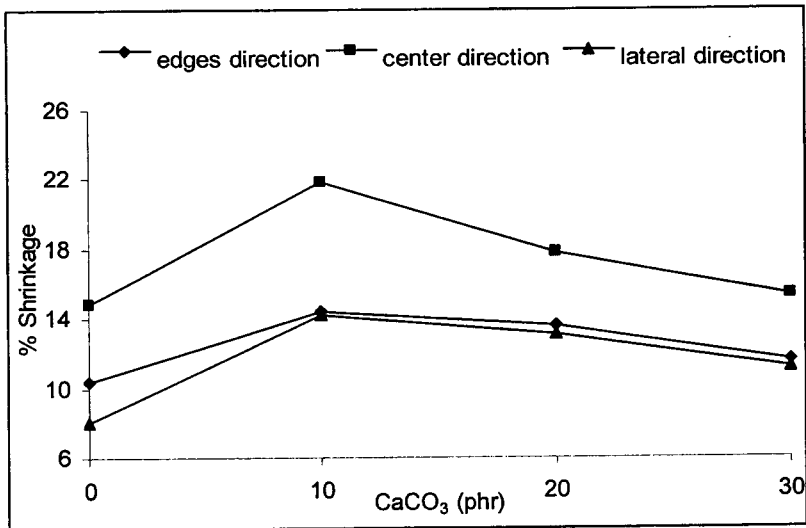


Figure 44. Percent shrinkage of the latex foams vulcanized by oven as a function of calcium carbonate.

จาก Figure 43 และ Figure 44 พบว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในระดับที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ยางพองน้ำมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่แตกต่างกัน โดยยางพองน้ำทั้งแบบที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบหนึ่งและแบบอบมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงที่สุดที่บริเวณตรงกลางของชิ้นตัวอย่าง ส่วนด้านกว้าง-ยาวและด้านข้างมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน และยางพองน้ำจะมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ สูงสุดที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตระดับ 10.0 phr และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมลงไปในส่วนผสมของยางพองน้ำ ทำให้เปอร์เซ็นต์ของยางในน้ำยางลดลง เพราะแคลเซียมคาร์บอเนตเข้าไปแทนที่บางส่วนหนึ่ง ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตมีลักษณะคล้ายผงแป้ง มีการจับตัวกันแน่นหรือมีการกระจายตัวไปยังโครงสร้างของยางพองน้ำ ทำให้ยางพองน้ำมีโครงสร้างที่แข็งแรงกระด้าง จึงเป็นเหตุให้มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่ลดลงเมื่อมีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่มากขึ้น

จาก Figure 39 เป็นภาพถ่ายโครงสร้างของยางพองน้ำที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในระดับต่างๆ และผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบอบ และ Figure 40 เป็นภาพถ่ายโครงสร้างของยางพองน้ำที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในระดับต่างๆ และผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบหนึ่ง พบว่ายางพองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบหนึ่งมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงกว่าการให้ความร้อนแบบอบ สาเหตุเกิดจากในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบหนึ่งนั้นยางพองน้ำถูกแรงดันไอน้ำไปทำลายโครงสร้างของพองน้ำ ทำให้ผนังเซลล์ของพองน้ำได้รับความเสียหาย จึงส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่สูงกว่าแบบอบ

3.2.5 สมบัติการป้องกันแรงกระแทกของยางพองน้ำ (Cushioning characteristics)

การทดสอบสมบัติการป้องกันแรงกระแทกของยางพองน้ำที่เตรียมจากสูตรที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในระดับต่างๆ และผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน พบว่ายางพองน้ำมีสมบัติการป้องกันแรงกระแทกที่แตกต่างกัน โดยยางพองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบมีสมบัติในการป้องกันแรงกระแทกได้ดีกว่ายางพองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบหนึ่งในทุกๆ ปริมาณสารตัวเติมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากยางพองน้ำที่ผ่านการอบให้ความร้อนแบบอบเป็นยางพองน้ำที่มีความหนาแน่นสูง มีความสามารถในการต้านทานแรงกดได้ดีและมีความหนาแน่นสูงกว่ายางพองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบหนึ่ง ดังนั้นเมื่อถูกแรงกระแทกจึงสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่า และพบว่ามีการหดตัวที่ต่ำกว่าด้วย

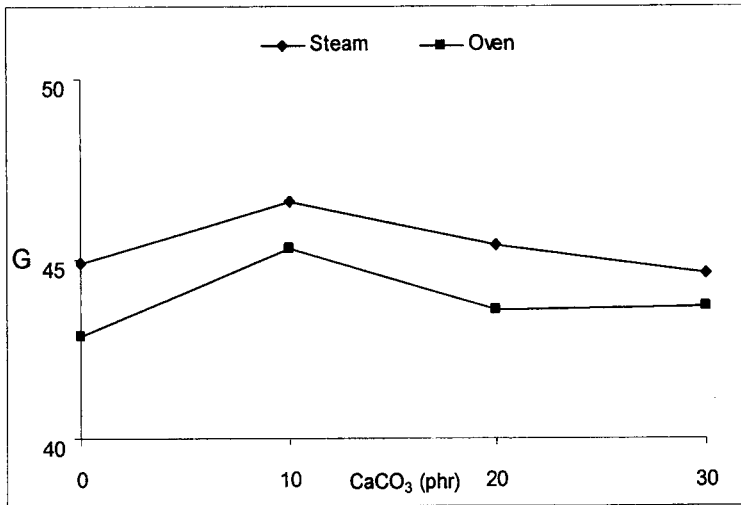


Figure 45. Cushioning characteristics of the latex foam at 1.40 phr of potassium oleate, 1.5 inch-thick and as a function of calcium carbonate.

จาก Figure 45 พบว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมในการเตรียมยางฟองน้ำมีผลทำให้ความสามารถในการป้องกันแรงกระแทกของยางฟองน้ำมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปปริมาณมากนั้น มีผลทำให้ยางฟองน้ำมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูง แต่มีความสามารถในการต้านทานแรงกดสูงขึ้น แคลเซียมคาร์บอเนตไปทำลายการเกาะติดกันของเซลล์ฟองน้ำ ทำให้ยางฟองน้ำมีความกระด้างเพิ่มขึ้น เกิดการเปื่อยยุ่ยได้ง่าย เมื่อได้รับแรงกระแทกสามารถฉีกขาดได้ง่ายจึงสามารถรับแรงกระแทกได้น้อย ดังนั้นยางฟองน้ำที่เตรียมจากสูตรที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตเลยจึงสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีที่สุด (42.9 G) และยางฟองน้ำที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 10 phr สามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีที่สุด (46.6 G) และมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวและความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดสูงสุดด้วย

Table 5. Characteristics of natural latex foam.

Vulcanization	Filling agent CaCO ₃ (phr)	%Compression set	%Shrinkage			Density (g/cm ³)	Cushioning characteristic (G)	Compression resistant (N)
			Edges	Center	Lateral		1.5 inches - thick	1.5 inches - thick
Steam	0.0	8.4	10.8	17.1	10.2	0.177	44.87	51.1
	10.0	18.6	17.1	29.7	15.0	0.182	46.57	69.2
	20.0	16.7	16.0	22.4	13.8	0.185	45.37	82.6
	30.0	15.7	14.0	20.0	11.9	0.201	44.61	84.9
Oven	0.0	6.8	10.4	14.8	8.0	0.175	42.88	59.5
	10.0	12.8	14.4	21.9	14.2	0.237	45.31	178.3
	20.0	12.6	13.6	17.7	13.1	0.256	43.59	184.2
	30.0	12.2	11.6	15.3	11.2	0.265	43.69	211.8

จาก Table 5 พบว่ายางฟองน้ำที่เตรียมโดยใช้โพแทสเซียมโอเลต 1.40 phr ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบอบที่มีความหนา 1.5 นิ้ว และไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นชุดการทดลองที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมยางฟองน้ำเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกันกระแทก เนื่องจากเป็นยางฟองน้ำที่มีความหนาแน่นต่ำ มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำ และมีความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกได้ดีที่สุด และในการทดลองนี้ พบว่าการให้ความร้อนแบบอบเป็นวิธีการที่สะดวกและรวดเร็วกว่าการให้ความร้อนแบบนึ่งรวมทั้งมีความสิ้นเปลืองน้อยกว่า ดังนั้นในการเลือกวิธีการให้ความร้อนที่เหมาะสมแก่ยางฟองน้ำนั้นยังช่วยประหยัดเวลา ต้นทุนและมีความสะดวกกว่าด้วย

3.3. การเปรียบเทียบสมบัติการป้องกันแรงกระแทกระหว่างยางฟองน้ำกับโพลีสไตรีน

จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางฟองน้ำที่เตรียมจากสูตรที่แตกต่างกัน พบว่ายางฟองน้ำที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีสมบัติโดยรวมต่ำกว่ายางฟองน้ำที่เตรียมโดยไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำสมบัติความสามารถในการป้องกันแรงกระแทกของยางฟองน้ำที่เตรียมโดยไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมาเปรียบเทียบกับสมบัติการป้องกันแรงกระแทกของโพลีสไตรีน ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุกันกระแทกในปัจจุบัน ดัง Figure 46

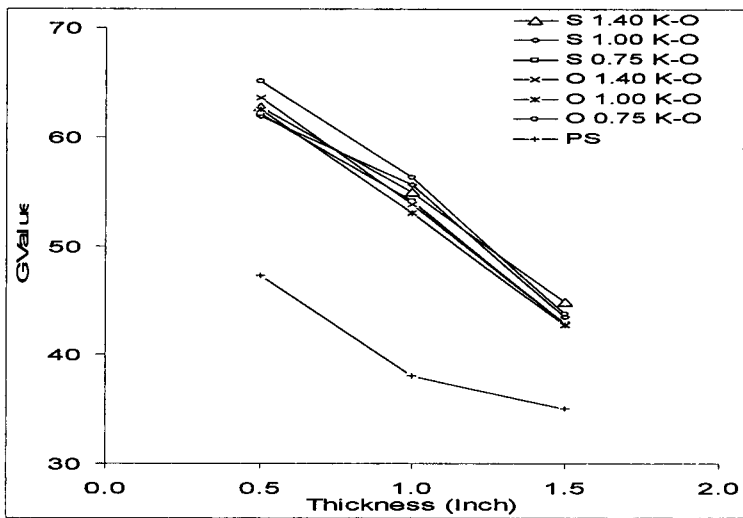
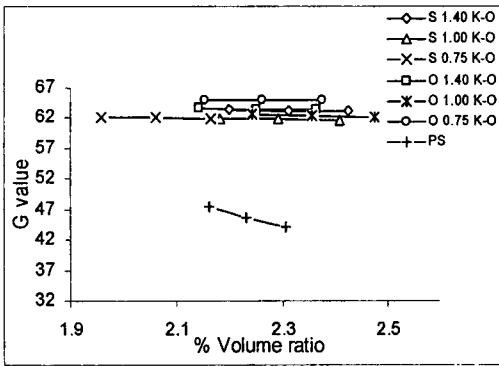


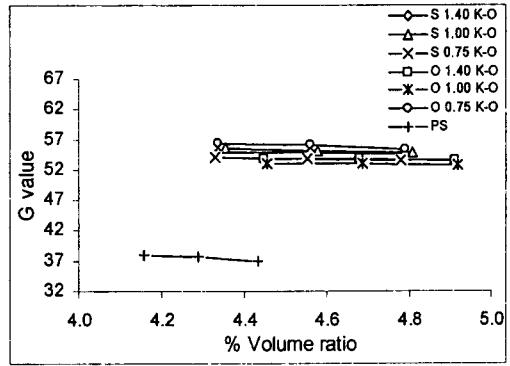
Figure 46. Cushioning characteristics of Natural latex foam and Polystyrene foam.

เนื่องจากการใช้งานวัสดุกันกระแทกในปัจจุบัน มีการเลือกใช้วัสดุกันกระแทกที่ผลิตมาจากวัสดุสังเคราะห์อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะโพลีสไตรีน เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการป้องกันแรงกระแทกของยางฟองน้ำที่เตรียมโดยสูตรต่างๆ กับความสามารถในการป้องกันแรง

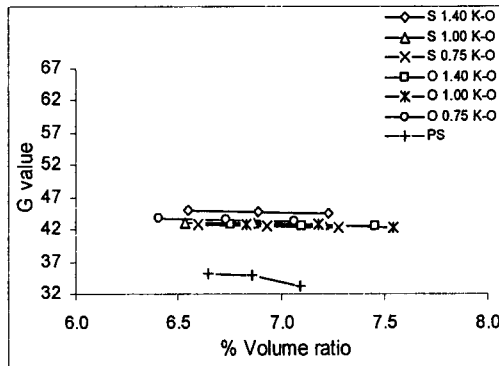
กระแทกของวัสดุสังเคราะห์พอลีสไตรีนพบว่า วัสดุกันกระแทกประเภทวัสดุสังเคราะห์พอลีสไตรีนที่มีขนาดความหนาของชั้นตัวอย่างเท่ากับยางพองน้ำสามารถป้องกันแรงกระแทกได้ดีกว่ายางพองน้ำ และชั้นตัวอย่างที่มีขนาดความหนามากสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีเช่นเดียวกับสมบัติของยางพองน้ำ โดยสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ 35.1 G ซึ่งเป็นความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกที่ดีกว่ายางพองน้ำ แต่พบว่าวัสดุสังเคราะห์พอลีสไตรีนนั้น เมื่อถูกแรงกระทำหลายๆ ครั้งแล้วจะทำให้ความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกลดน้อยลง เนื่องจากเม็ดโฟมเกิดการเสียรูปได้ง่ายและไม่คืนตัวกลับหลังจากรับแรงกระแทก ในขณะที่ยางพองน้ำนั้นมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อได้รับแรงกดหรือแรงกระแทกแล้วเกิดการเสียรูปน้อยมาก มีความสามารถในการคืนตัวกลับสูงกว่า เพราะเซลล์ของยางพองน้ำที่ขยายตัวออกเป็นชนิดเซลล์เปิด อากาศภายในโครงสร้างสามารถเคลื่อนที่ได้ดี ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของยางพองน้ำ



A)



B)



C)

Figure 47. Cushioning characteristics of volume ratio of the latex foam and polystyrene foam

A) 0.5 inch - thick, B) 1.0 inch - thick, C) 1.5 inch – thick.

จาก Figure 47 ความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกกับเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนปริมาตรระหว่างปริมาตรของยางฟองน้ำค่อน้ำหนักจำลองที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการป้องกันการกระแทกของยางฟองน้ำเปรียบเทียบกับวัสดุสังเคราะห์พอลิสไตรีน พบว่ายางฟองน้ำมีประสิทธิภาพในการป้องกันแรงกระแทกได้ดีที่สุดในกรณีที่ขึ้นตัวอย่างของยางฟองน้ำมีขนาดความหนาตามาก โดยพบว่าความสามารถในการป้องกันแรงกระแทกของยางฟองน้ำที่มีความหนา 1.5 นิ้ว มีความสามารถในการป้องกันแรงกระแทกได้ดีที่สุด และมีแนวโน้มที่จะใกล้เคียงกับสมบัติการป้องกันแรงกระแทกของวัสดุสังเคราะห์พอลิสไตรีน

3.4. การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างยางฟองน้ำกับวัสดุสังเคราะห์พอลิสไตรีน

จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางฟองน้ำพบว่ายางฟองน้ำที่มีสมบัติดีที่สุดที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกันกระแทกคือ ยางฟองน้ำที่เตรียมจากการใช้โฟมเตสซีเอ็มโอทีเอ็ด 1.40 phr, การให้ความร้อนแบบอบและมีความหนา 1.5 นิ้ว และไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต โดยจากสูตรการเตรียมดังกล่าวประกอบด้วยน้ำยางข้นและสารเคมีหลายชนิด ดังนั้นราคาต้นทุนในการผลิตยางฟองน้ำจึงขึ้นอยู่กับราคาตั้งต้นของสารเคมีและน้ำยางข้น จากตารางที่ 6 แสดงราคาของวัตถุดิบแต่ละชนิด ที่จะนำมาใช้ในการเตรียมยางฟองน้ำและวัสดุสังเคราะห์พอลิสไตรีนที่มีปริมาตรเท่ากับ 1 ลูกบาศก์เมตร แต่ความหนาแน่นต่างกัน โดยเปรียบเทียบกับยางฟองน้ำมีความหนาแน่น 0.175 g/cm^3 กับวัสดุสังเคราะห์พอลิสไตรีนมีความหนาแน่น 0.026 g/cm^3 โดยพบว่ายางฟองน้ำต้องใช้ต้นทุนในการผลิต 6,512 บาทต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร และวัสดุสังเคราะห์พอลิสไตรีนที่มีปริมาตรเท่ากันใช้ต้นทุนในการผลิต 1,260 บาท

อย่างไรก็ตามจากราคาของต้นทุนที่แตกต่างกันนั้น เกิดจากความหนาแน่นที่แตกต่างกันของยางฟองน้ำและวัสดุสังเคราะห์พอลิสไตรีน เนื่องจากไม่สามารถเตรียมยางฟองน้ำให้มีความหนาแน่นต่ำๆ และเท่ากับวัสดุสังเคราะห์พอลิสไตรีนได้ เพราะการเติมสารก่อฟองในปริมาณมากจนเกินไปส่งผลให้ฟองยางใช้เวลาในการจับตัวนานขึ้น ลักษณะฟองไม่สม่ำเสมอมากนัก เนื่องจากความเข้มข้นของสารก่อฟองเลยจากจุด Critical Micelle Concentration (c.m.c.) ของสารก่อฟองแล้ว เมื่อเพิ่มปริมาณลงไปจึงไม่มีผลในการลดความตึงผิวลงอีก (สมนึก, 2526 อ้างโดยสุรศักดิ์, 2545) ทำให้เม็ดฟองยางบางส่วนแตกก่อนที่จะจับตัวเป็นโครงสร้าง และเป็นเหตุให้ยางฟองน้ำเกิดการหดตัวสูงขึ้นในทุกๆ ด้าน

Table 6. Material cost of latex foam prepared from Dunlop process.

Chemicals	Latex foam (density of 0.175 g/cm ³)	
	Weight (g)	Price (Baht)
High ammonia concentrated natural latex 60% DRC	98,864	4,440
Potassium-oleate solution 10%	8,880	474
Sulphur dispersion 50%	1,776	118
Zinc-N-diethyl dithiocarbamate dispersion 50%	1,184	118
Zinc-2-mercaptobenzothiazole dispersion 50%	1,184	178
Wing stay L dispersion 50%	1,184	59
Zinc Oxide dispersion 50%	5,920	710
Diphenyl guanidine dispersion 33%	1,776	296
Sodium silicofluoride dispersion 20%	1,332	59
Total	122,100	6,512

3.5. การศึกษาการใช้วัสดุชีวภาพ ขี้เลื่อยไม้ยางพาราในยางฟองน้ำ

3.5.1. การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคขี้เลื่อย

จาก Figure 48 เมื่อวิเคราะห์ลักษณะของขี้เลื่อยด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) พบว่าขี้เลื่อยที่ใช้ในการวิจัยมีลักษณะบาง มีความเป็นรูพรุนสูงและมีผิวขรุขระ และเมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคขี้เลื่อยด้วยการร่อนผ่านตะแกรงที่มีรูเปิด 10, 20 และ 35 mesh (ASTM E828-81) ได้ผลดัง Table 7 ซึ่งแสดงปริมาณการกระจายตัวของอนุภาคขี้เลื่อยที่ได้จากการบดการผลิตของเด็กเล่นจากไม้ยางพาราและนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการ พบว่าขนาดของอนุภาคขี้เลื่อยที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีขนาดอนุภาคที่ 0.84-2.00 mm มากที่สุด (38.2%) รองลงมาคือขนาด > 2.0 mm (28.8%), 0.50-0.84 mm (21.7%) และขี้เลื่อยขนาด < 0.50 mm (11.3%) ตามลำดับ

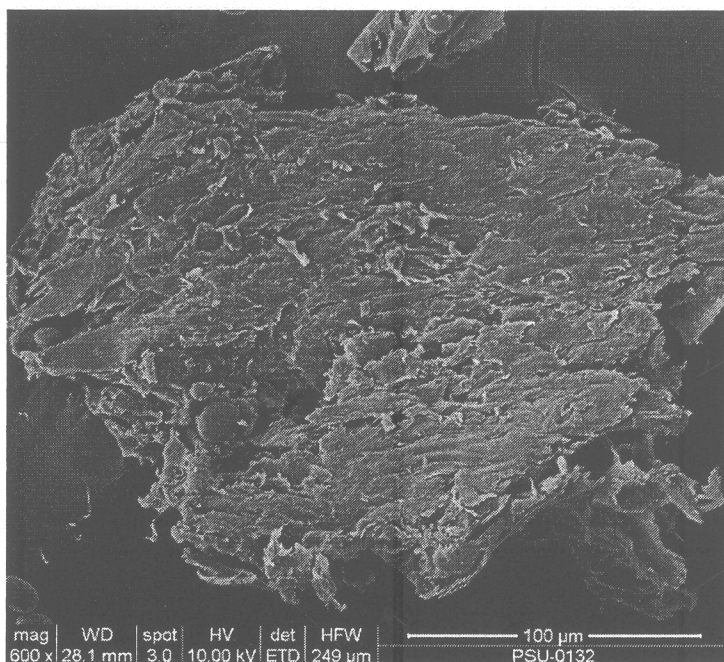


Figure 48. SEM of sawdust particle.

Table 7. Size distribution of sawdust was collected from wood toys production process.

Particle size (mm)	Sieve (mesh)	Percent by weight
> 2.00 mm	Upper 10 mesh	28.8%
0.84-2.00 mm	10-20 mesh	38.2%
0.50-0.84 mm	20-35 mesh	21.7%
<0.50 mm	Under 35 to pan mesh	11.3%

3.5.2. ความหนาแน่น

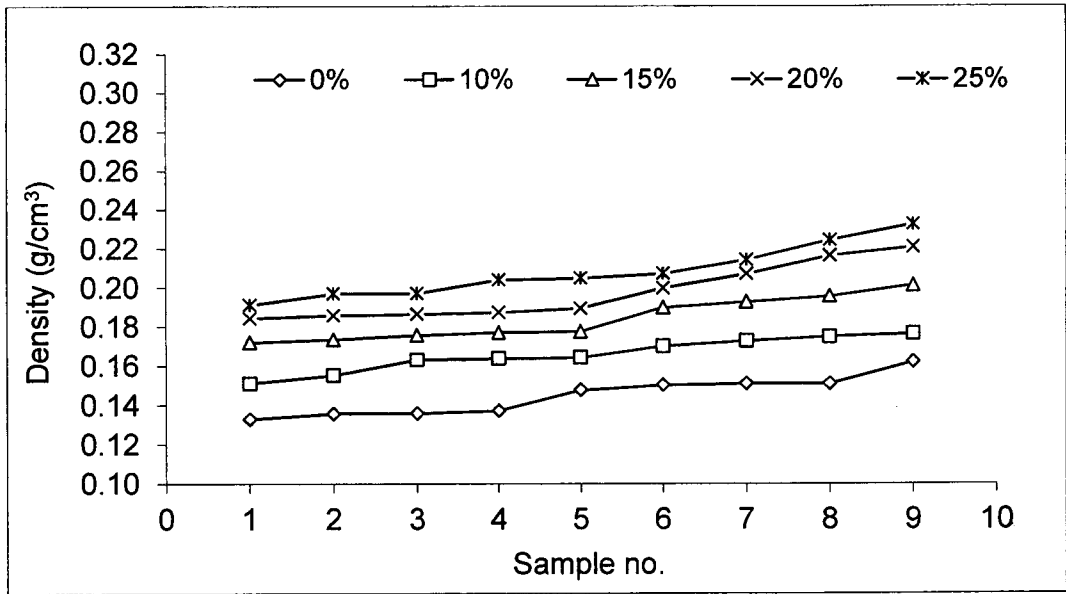


Figure 49. Density of latex foam mixed sawdust.

จากการเตรียมยางฟองน้ำโดยใช้ซีลี้อยู่เป็นสารตัวเติม โดยเตรียมจากสูตรพื้นฐานของยางฟองน้ำที่มีความหนาแน่นต่ำ นำมาเติมซีลี้อยู่ในอัตราส่วน 0%, 10%, 15%, 20%, 25% และวัสดุเชิงประกอบจากซีลี้อยู่ โดยน้ำหนักของยางฟองน้ำ ได้ผลการทดลองดัง Figure 48

ความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่เกิดจากการเติมซีลี้อยู่อัตราส่วน 0%, 10%, 15%, 20%, 25% และวัสดุเชิงประกอบจากซีลี้อยู่ พบว่าปริมาณอัตราส่วน 0%, 10%, 15%, 20%, 25% และวัสดุเชิงประกอบจากซีลี้อยู่ ที่เติมในสูตรการเตรียมยางฟองน้ำเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของยางฟองน้ำอย่างมีนัยสำคัญ โดยความหนาแน่นของยางฟองน้ำสูงขึ้นตามปริมาณซีลี้อยู่ที่เติมเพิ่มขึ้นตามลำดับ

ยางฟองน้ำที่มีการเติมซีลี้อยู่ในปริมาณต่ำสุด (0%) มีความหนาแน่นต่ำสุด (0.145 g/cm^3) ส่วนยางฟองน้ำที่มีการเติมซีลี้อยู่ในปริมาณที่สูงขึ้น มีความหนาแน่นที่สูงขึ้นตามลำดับ และยางฟองน้ำที่เติมวัสดุเชิงประกอบจากซีลี้อยู่เป็นยางฟองน้ำที่มีความหนาแน่นสูงสุด (0.227 g/cm^3) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากซีลี้อยู่เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม เมื่อใช้ในปริมาณมากขึ้น การเกิดฟองยากขึ้น มีฟองน้อย ลักษณะฟองมีความสม่ำเสมอลดลง ซีลี้อยู่ยังส่งผลให้ยางฟองน้ำจับตัวกันเร็วขึ้น เนื่องจากพื้นผิวของซีลี้อยู่มีลักษณะเป็นเส้นใยและขรุขระจึงไปเพิ่มพื้นที่ผิวในส่วนผสมของยางฟองน้ำระหว่างการตีฟอง ในทางกลับกันเมื่อเติมซีลี้อยู่ในปริมาณน้อยยางฟองน้ำก็มีความหนาแน่นน้อยลง เนื่องจากสามารถเกิดฟองได้ง่าย ทำให้ยางฟองน้ำมีปริมาณของฟองอากาศต่อหน่วยปริมาตรของยางฟองน้ำสูงกว่า จึงมีความหนาแน่นต่ำลง (Figure 50)

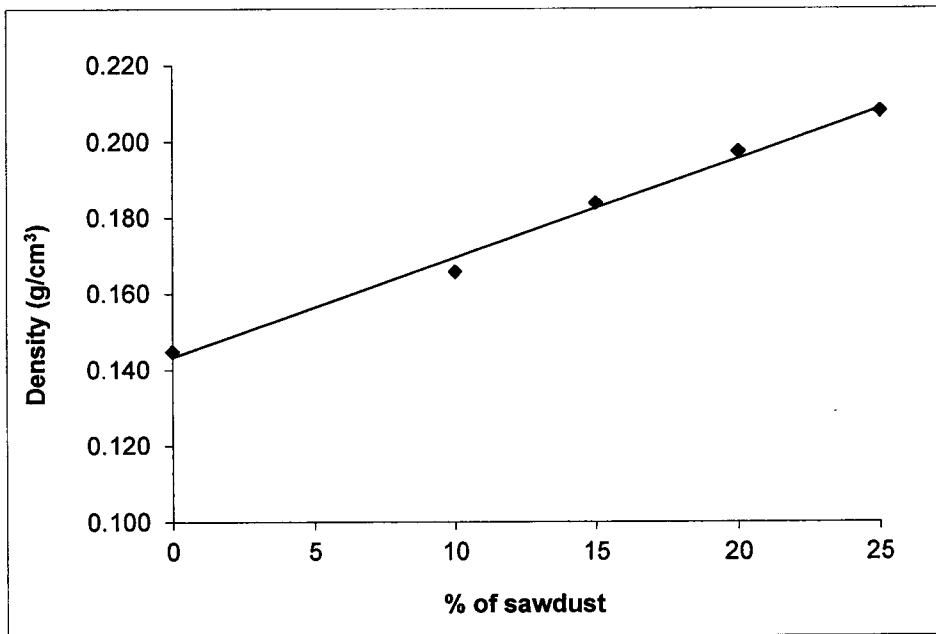


Figure 50. Density of latex foam mixed sawdust as a function of % of sawdust.

ปริมาณขี้เลื่อยเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อความหนาแน่นของยางฟองน้ำ โดยสูตรยางฟองน้ำที่มีปริมาณขี้เลื่อยสูง ทำให้ยางฟองน้ำเนื้อสัมผัสแน่นขึ้นและมีการหดตัวต่ำ เนื่องจากในระหว่างการตีฟองเกิดฟองอากาศขึ้นค่อนข้างน้อยและไม่สม่ำเสมอ ทำให้ผนังของฟองแข็งแรงเกินไป เกิดการขยายตัวได้ยาก จึงมีส่วนของเนื้อยางและขี้เลื่อยมากกว่าส่วนของฟองอากาศ แต่เมื่อลดปริมาณขี้เลื่อยลง พบว่ายางฟองน้ำมีความยืดหยุ่นมากขึ้น นุ่ม และมีการหดตัวสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากการมีฟองอากาศที่มากขึ้น ทำให้ฟองอากาศมีการแตกตัวและยุบตัวลงบางส่วน ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากการจับตัวของฟองยางซ้ำจึงส่งผลให้มีการหดตัวมากขึ้น

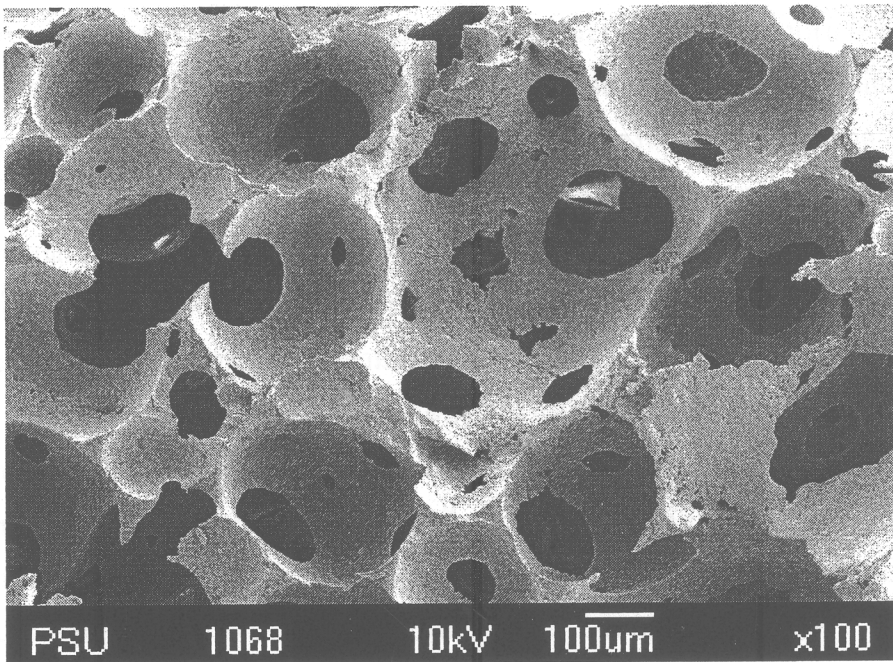


Figure 51. SEM of latex foam without sawdust at density of 0.145 g/cm^3 .

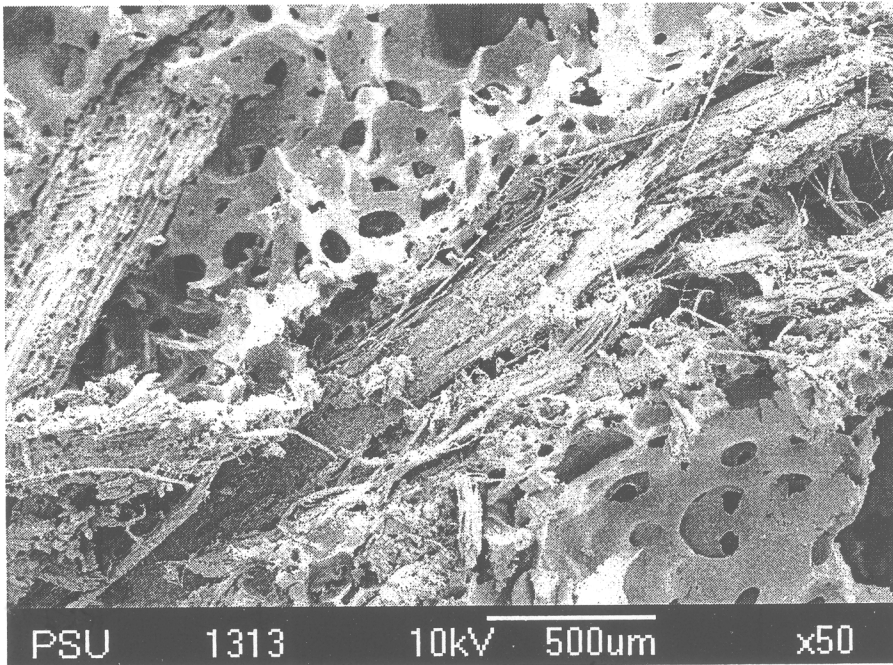


Figure 52. SEM of latex foam mixed 25% sawdust at density of 0.208 g/cm^3 .

จาก Figure 51 เป็นภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำที่มีความหนาแน่นต่ำสุด (0.145 g/cm^3) พบว่าฟองอากาศภายในยางฟองน้ำมีขนาดใหญ่ มีลักษณะการเรียง

ตัวแบบหลวมๆ มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีลักษณะเป็นเซลเปิดอย่างเห็นได้ชัด และ Figure 52 เป็นภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำที่มีการเติมซีลี้อย 25% ความหนาแน่นยางฟองน้ำ 0.208 g/cm^3 พบว่าโครงสร้างของยางฟองน้ำมีฟองอากาศขนาดเล็ก การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ระยะห่างระหว่างเซลน้อย มีซีลี้อยแทรกอยู่ระหว่างฟองอย่างเห็นได้ชัดซึ่งมีลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาคล้ายกับยางฟองน้ำที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต คือ ยางฟองน้ำที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีความหนาแน่นต่ำ และจะมีความหนาแน่นสูงขึ้นเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่มากขึ้นตามลำดับ โดยโครงสร้างของยางฟองน้ำมีการยึดเกาะกันหนาแน่นมากขึ้นเมื่อมีแคลเซียมคาร์บอเนตผสมอยู่ในปริมาณที่สูงขึ้น เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีการยึดเกาะภายในช่องว่างระหว่างเซลของยางฟองน้ำ และเข้าไปแทนที่น้ำบางส่วนหนึ่ง จึงทำให้ยางฟองน้ำมีส่วนของยางและแคลเซียมคาร์บอเนต เกิดเป็นฟองน้ำได้ยากขึ้น ขนาดของฟองจึงเล็กและไม่มีควมสม่ำเสมอของเซล เป็นเหตุให้ยางฟองน้ำมีความหนาแน่นสูงขึ้น ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ยางฟองน้ำมีความกระด้างมากยิ่งขึ้น ทำให้ยางฟองน้ำเกิดการฉีกขาดได้ง่ายอีกด้วย

นอกจากนี้การเติมซีลี้อยหรือแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณมากจนเกินไป อาจส่งผลต่อการจับตัวกันหรือการยึดเกาะกันของฟองยาง ทำให้ยางฟองน้ำมีมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะกันได้น้อยลง

3.5.3. ความสามารถในการต้านทานแรงกด (Compression resistance)

การทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำ ทดสอบโดยใช้หัวกดทรงกระบอก กดลงบนชิ้นยางฟองน้ำจนกระทั่งยางฟองน้ำยุบตัวลงไป 50 เปอร์เซ็นต์ของความหนาเดิม ได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 53

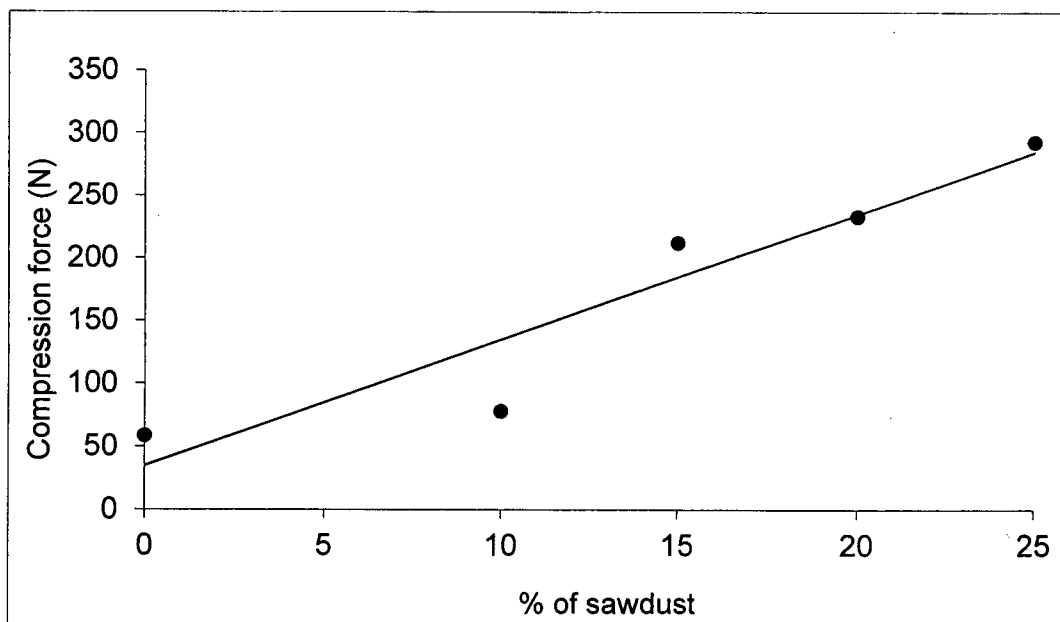


Figure 53. Compression resistance of latex foam mixed sawdust.

ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงกดของยางพองน้ำพบว่า ยางพองน้ำที่มีความหนาแน่นสูง (0.227 g/cm^3) สามารถต้านทานแรงกดได้ดี โดยพบว่ายางพองน้ำที่สามารถต้านทานแรงกดได้ดีที่สุดคือ ยางพองน้ำที่มีการเติมขี้เลื่อย 25% สามารถต้านทานแรงกดได้ 293.06 นิวตัน ในขณะที่ยางพองน้ำที่มีความหนาแน่นต่ำ (0.145 g/cm^3) สามารถต้านทานแรงกดได้เพียง 58.62 นิวตัน เนื่องจากขนาดเซลล์ของยางพองน้ำที่มีความหนาแน่นสูง มีการจัดเรียงตัวใกล้ชิดกันมากและมีขี้เลื่อยแทรกอยู่ภายในเซลล์มากทำให้สามารถต้านทานต่อแรงกดได้ดีกว่า โดยการต้านทานแรงกดจะสูงขึ้นเมื่อมีการเติมปริมาณขี้เลื่อยมากขึ้นและปัจจัยปริมาณขี้เลื่อยจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความต้านทานแรงกด

การเติมขี้เลื่อยเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการต้านทานแรงกดของยางพองน้ำอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าความสามารถในการต้านทานแรงกดของยางพองน้ำสูงขึ้นตามปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความหนาแน่น ซึ่งยางพองน้ำที่มีความหนาแน่นสูงสามารถต้านทานแรงกดได้ดี เนื่องจากการเติมขี้เลื่อยลงไปในส่วนผสมของยางพองน้ำ ขี้เลื่อยเข้าไปแทนที่น้ำยาง จึงเกิดเป็นฟองได้น้อยในขณะที่ฟอง ทำให้มีฟองอากาศขนาดเล็ก ความหนาแน่นจึงสูงขึ้น จึงสามารถต้านทานแรงกดได้ดี

3.5.4. เปอร์เซนต์การหดตัวของยางพองน้ำ (Percent Shrinkage)

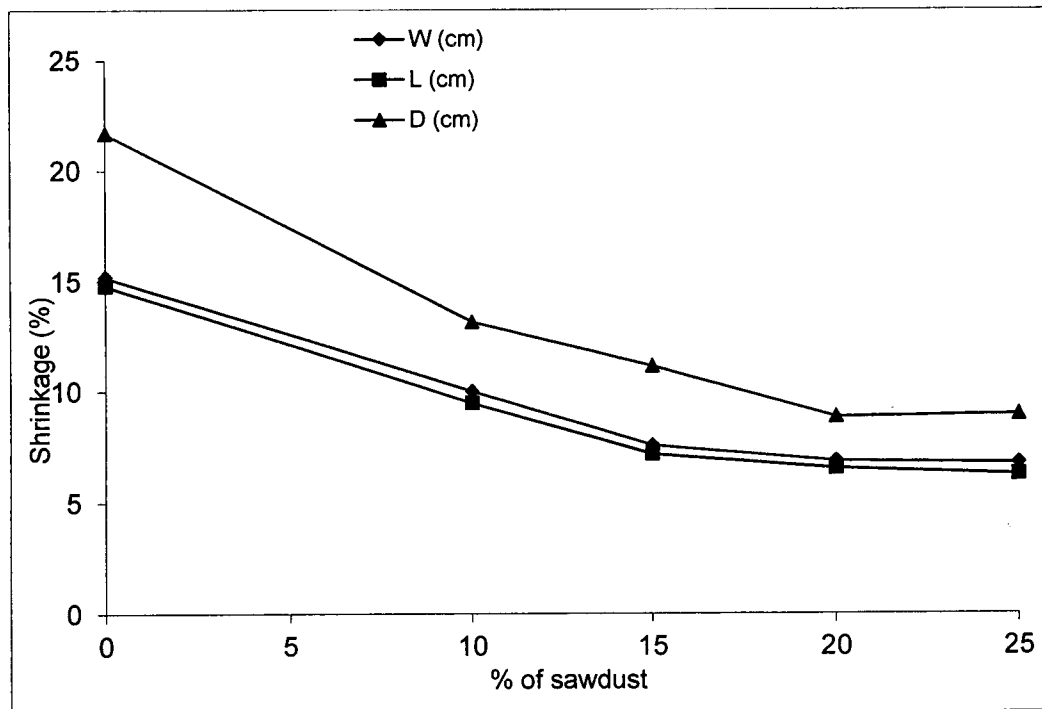


Figure 54. Percent shrinkage of the latex foam mixed sawdust.

โดยปกติในกระบวนการผลิตยางฟองน้ำจากน้ำยางพารา พบว่าฟองน้ำจะเกิดการหดตัวภายหลังจากการวัลคาไนซ์ ซึ่งทำให้ขนาดของฟองน้ำยางธรรมชาติได้ขนาดเล็กกว่าที่กำหนดไว้จากขนาดเบ้า ซึ่งเป็นปัญหาต่อการใช้งานที่ต้องการรูปทรงที่แน่นอนของยางฟองน้ำ ปัญหาการหดตัวนี้เกิดจากยางพารามีการทนทานต่อการบวมตัวในตัวทำละลายค่อนข้างต่ำ และอาจเกิดจากอัตราในการตีฟองไม่คงที่ ส่งผลให้ความหนาแน่นของยางแตกต่างกัน รวมทั้งปริมาณของแข็ง ชนิดและปริมาณของสารเกิดฟอง (Blowing agent) ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของยางไม่แน่นอนโดยเปอร์เซ็นต์การหดตัวขึ้นอยู่กับปริมาณของแข็งในสารเคมีที่ใช้ในสูตร (สุรศักดิ์, 2545) จากผลการทดลองพบว่าการเติมขี้เลื่อยในปริมาณที่แตกต่างกันเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวของยางฟองน้ำ โดยยางฟองน้ำที่มีการเติมขี้เลื่อยสูงสุด (25%) มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำสุด (7.35%) ในขณะที่ยางฟองน้ำที่มีการเติมขี้เลื่อย 0% มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงสุด (17.22%) เนื่องจากขี้เลื่อยที่เติมลงในสูตรยางฟองน้ำเป็นของแข็ง เมื่อเติมในปริมาณมาก ขี้เลื่อยเข้าไปแทนที่ฟองยางได้มากและไปทำหน้าที่เป็นโครงสร้างค้ำจุนฟองน้ำ ทำให้ยางฟองน้ำเกิดการจับตัวกันรวดเร็วยิ่งขึ้น และจากผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวทั้งสามด้านของยางฟองน้ำพบว่าความสูงบริเวณตรงกลางของชิ้นตัวอย่างมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงสุด ส่วนด้านกว้าง-ยาวมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำสุด ดัง Figure 54.

3.5.5. ความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก (Cushioning Characteristic)

จากผลการศึกษาเบื้องต้น วัสดุกันกระแทกยางพองน้ำที่มีส่วนผสมของซีลีเนียมได้ถูกเตรียมในขนาด 6"x6" และทำการทดสอบการตกกระแทกเพื่อวัดค่าความหน่วงสูงสุด (Deceleration) ดังตัวอย่างกราฟผลการทดสอบ (Figure 55) ซึ่งเป็นค่าที่สะท้อนถึงความรุนแรงของการตกกระแทก แล้วนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์สร้างกราฟความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) และความเค้นพลวัต (Dynamic stress) ซึ่งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ได้ดัง Figure 56-60

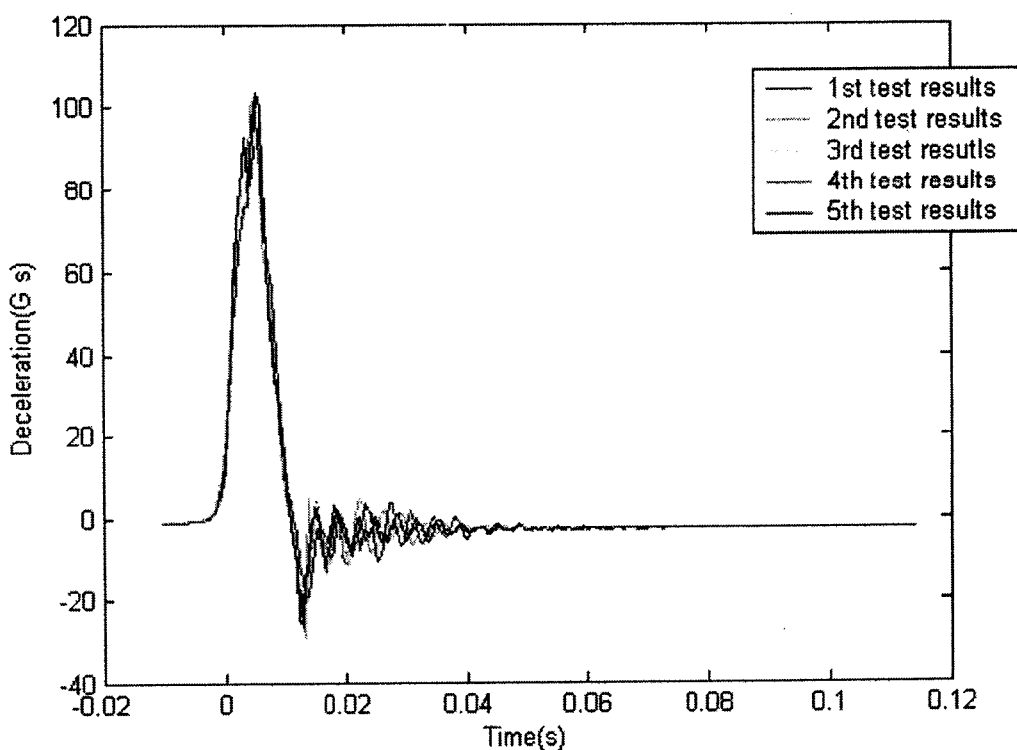


Figure 55. Sample of shock pulse from drop test of latex foam cushion

เมื่อทดสอบการตกกระแทกปล่อยจากระดับความสูงตั้งแต่ 15-36 นิ้ว พบว่าการเปลี่ยนมวลทดสอบไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความหน่วงสูงสุด ค่าความหน่วงสูงสุดไม่มีความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญเมื่อความหนาแน่นยางพองน้ำเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบตามระดับความหนาต่างๆ การเพิ่มความหนาของยางพองน้ำจะทำให้ค่าความหน่วงสูงสุดลดลง ค่าความหน่วงสูงสุดที่เกิดขึ้นจะลดลงเมื่อความหนาของยางพองน้ำเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ความหนา 0.5 นิ้ว จะพบว่าค่าความเร่งสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มมวลทดสอบและความสูงในการทดสอบ ในขณะที่ความหนาของยางพองน้ำมาก ๆ กล่าวคือ ตั้งแต่ 2 นิ้วขึ้นไป ค่าความเร่งสูงสุดจะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มมวลทดสอบ ซึ่ง

สอดคล้องกับผลการทดสอบ จากข้อสังเกตนี้แสดงว่าเมื่อเลือกวัสดุกันกระแทกที่มีความหนาแน่นหรือบางมาใช้ แรงกระแทกหรือความหน่วงที่เกิดขึ้นกับมวลจะมีค่าสูง และขนาดมวลมากจะส่งผลให้ขนาดความหน่วงที่สูงขึ้น ในกรณี que เลือกใช้วัสดุกันกระแทกที่มีความหนาแน่นมากเกินไป จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดมวลแทบจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหน่วง

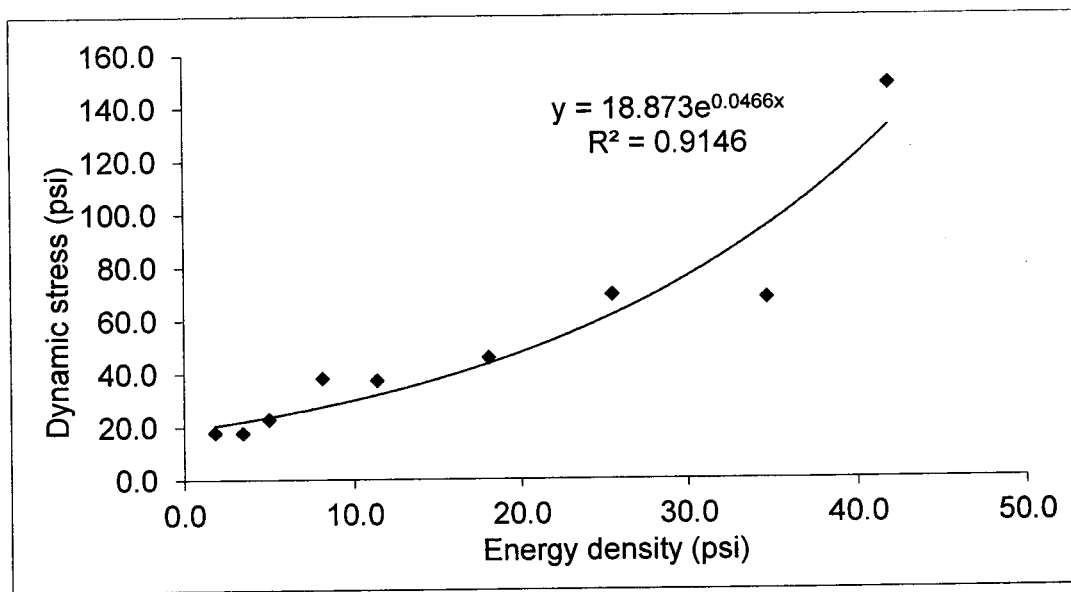


Figure 56 Dynamic stress vs energy density curve of latex foam.

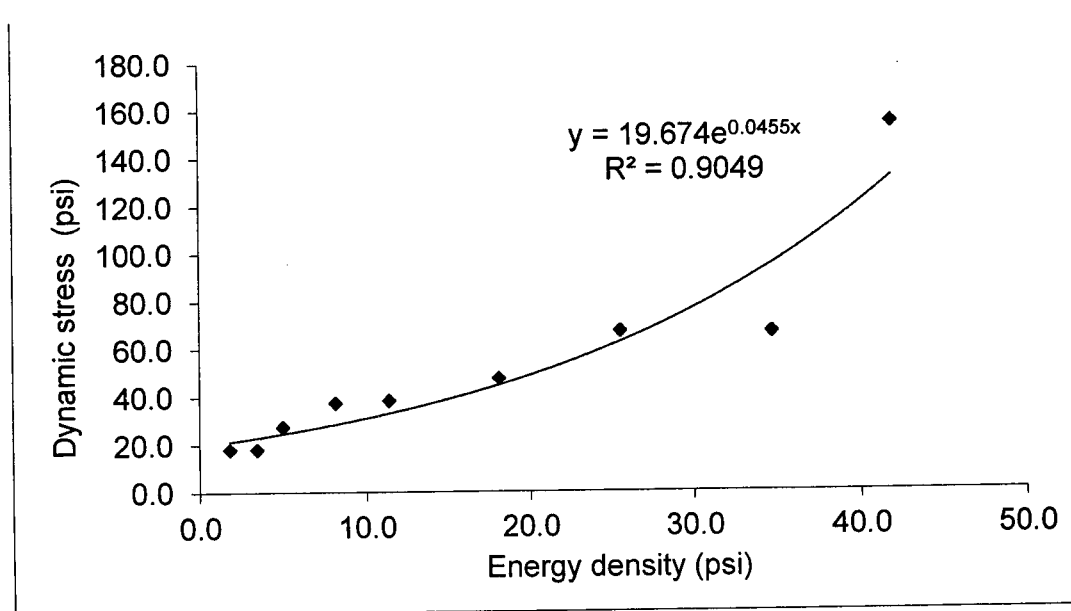


Figure 57 Dynamic stress vs energy density curve of latex foam mixed 10% sawdust.

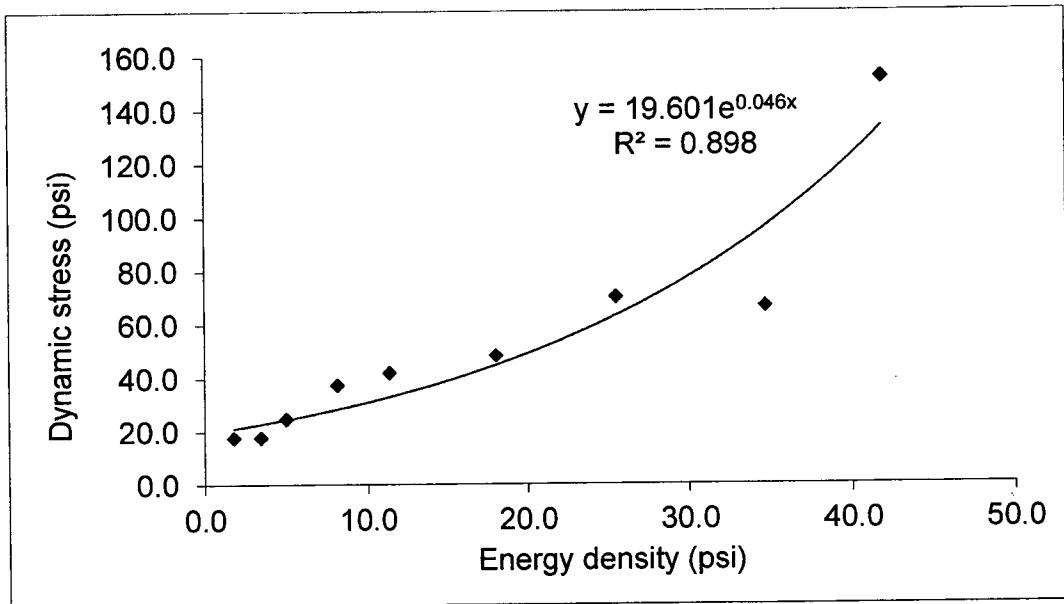


Figure 58 Dynamic stress vs energy density curve of latex foam mixed 15% sawdust.

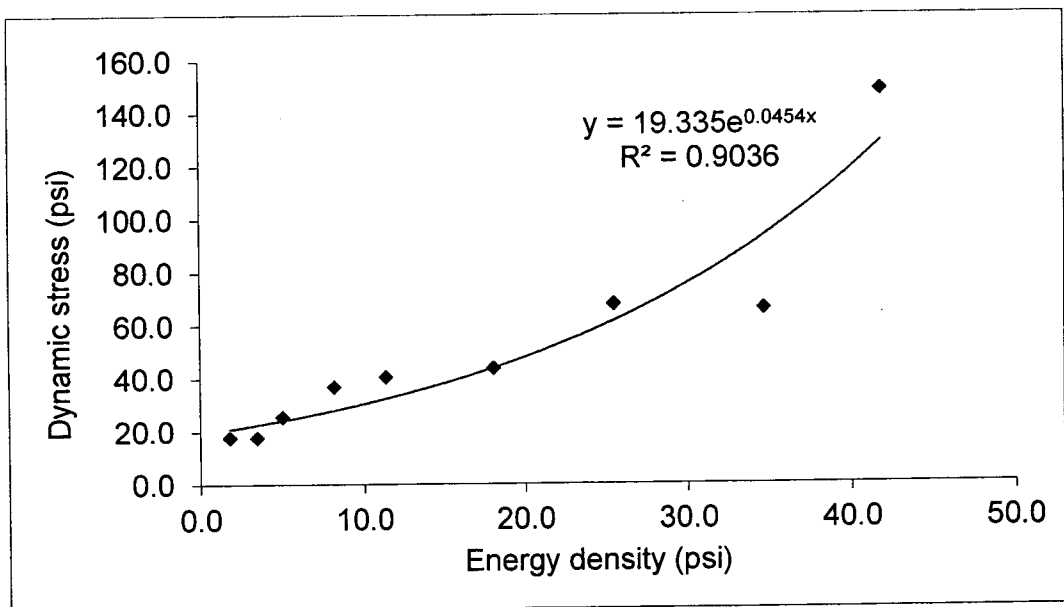


Figure 59 Dynamic stress vs energy density curve of latex foam mixed 20% sawdust.

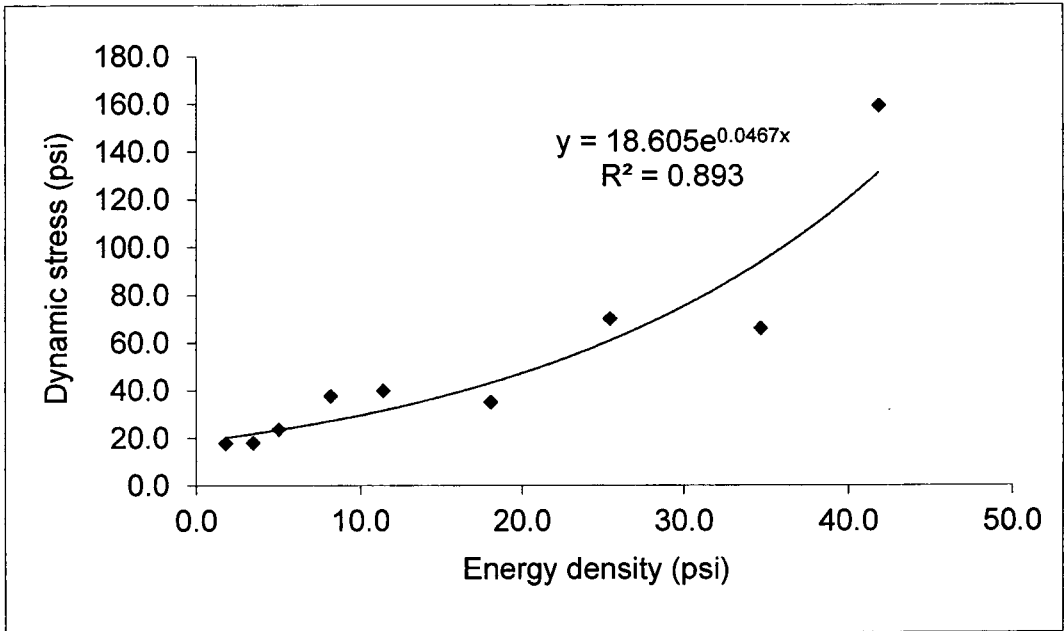


Figure 60 Dynamic stress vs energy density curve of latex foam mixed 25% sawdust.

จากผลการทดลอง กราฟความเค้นพลวัตและความหนาแน่นพลังงานของยางพองน้ำทั้งชนิด สามารถแสดงได้ดัง Figure 56-60 โดยความหนาแน่นพลังงานซึ่งเป็นพลังงานการกระแทกที่ถูกดูดซับโดยยางพองน้ำต่อหน่วยปริมาตรวัสดุซึ่งเมื่อความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้นจากการทดสอบความเค้นพลวัตหรือแรงตกกระแทกพลวัตต่อหน่วยพื้นที่จะมีค่าสูงสุด โดยมีแนวโน้มเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Burgess (2002) อย่างไรก็ตามจะพบว่ากราฟมีความเบี่ยงเบนมากขึ้นเมื่อน้ำหนักและความสูงจากการตกกระแทกมากขึ้น นอกจากนี้สมการเอ็กซ์โปเนนเชียลที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรในกราฟของทุกชุดยางพองน้ำที่ทดสอบ มีค่าคงที่ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับแรงกระแทกของยางพองน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับยางพองน้ำผสมซีลีอูไม้อย่างพารา 10-25 % ไม่มีที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลจากกราฟดังกล่าว สามารถนำมาใช้ในการสร้างชุดกราฟเส้นโค้งวัสดุกันกระแทกยางพองน้ำ (Cushion curves) ดัง Figure 61-90

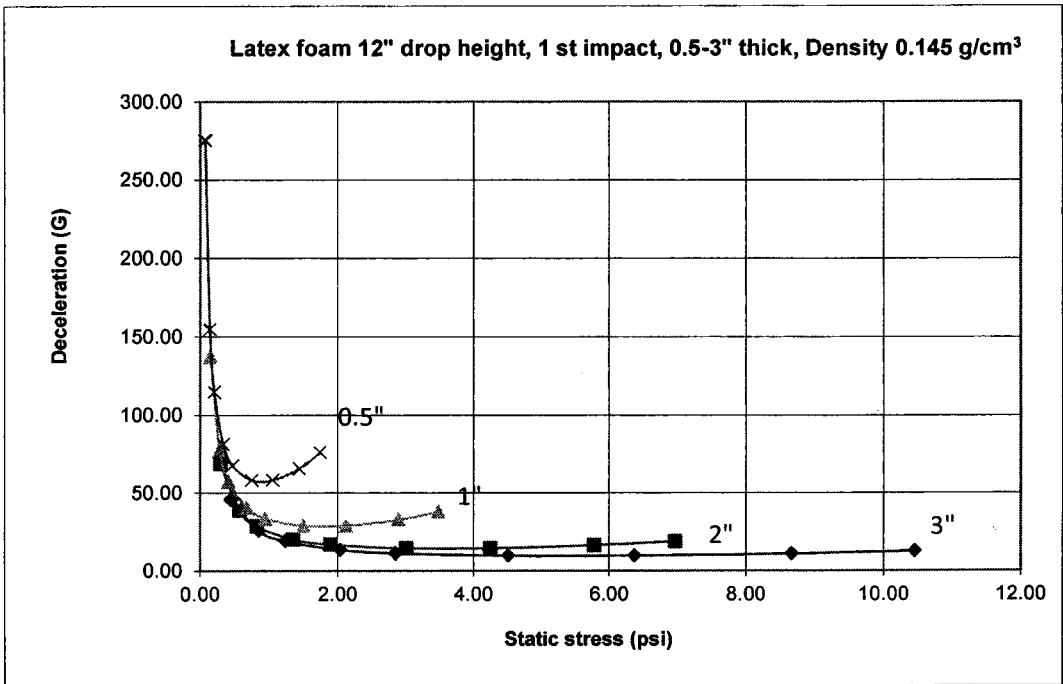


Figure 61 Cushion curves of latex foam 12" drop height

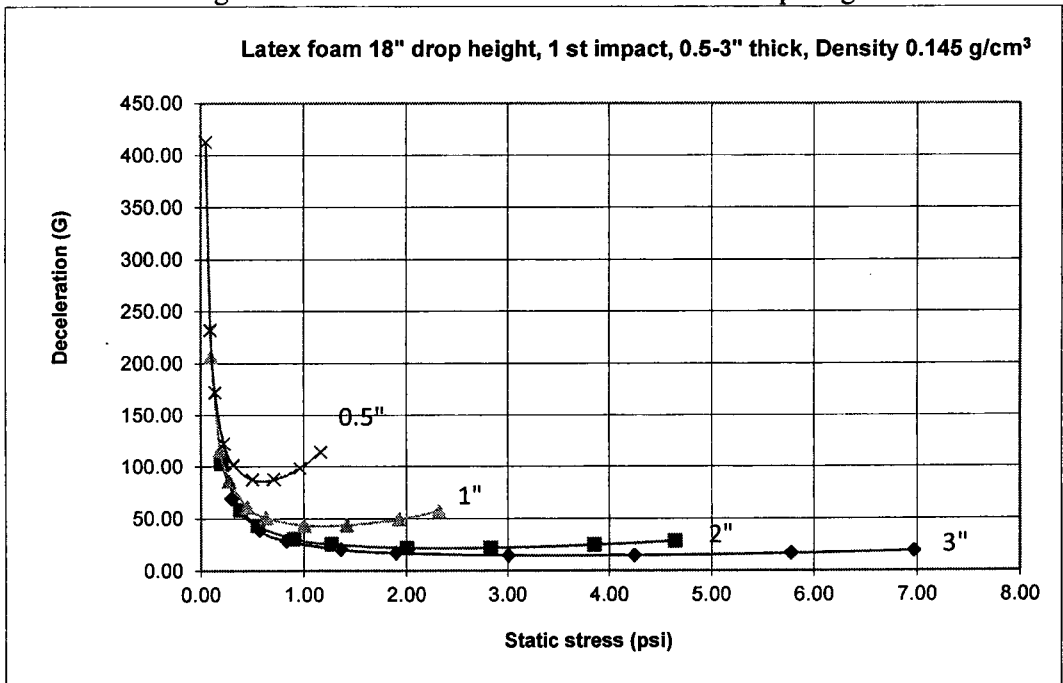


Figure 62 Cushion curves of latex foam 18" drop height

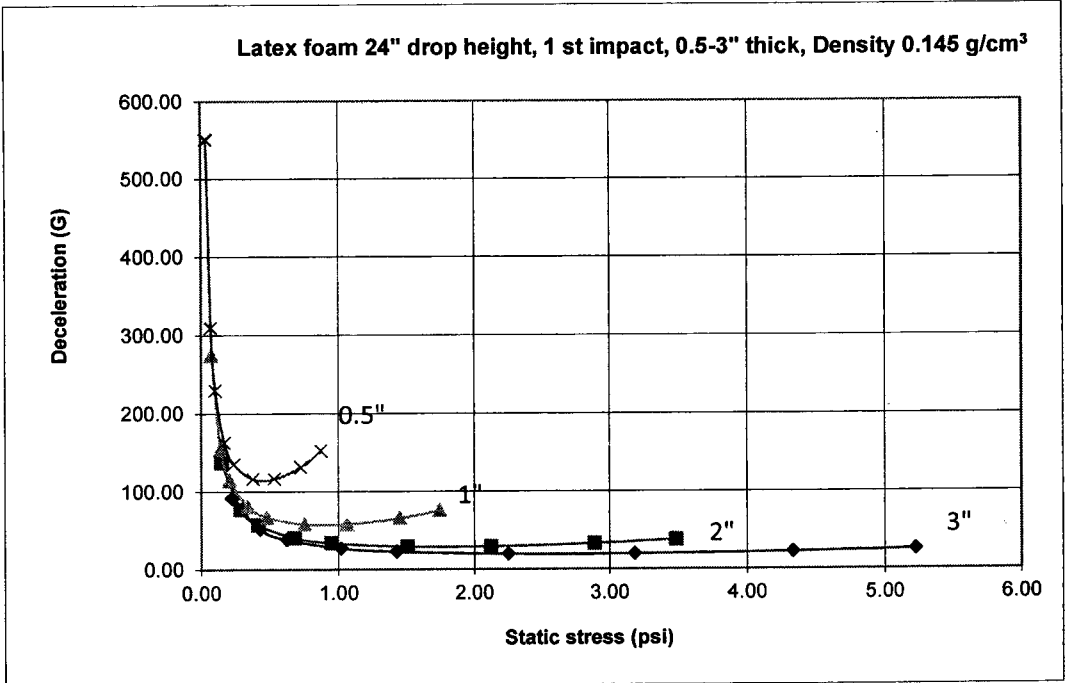


Figure 63 Cushion curves of latex foam 24" drop height

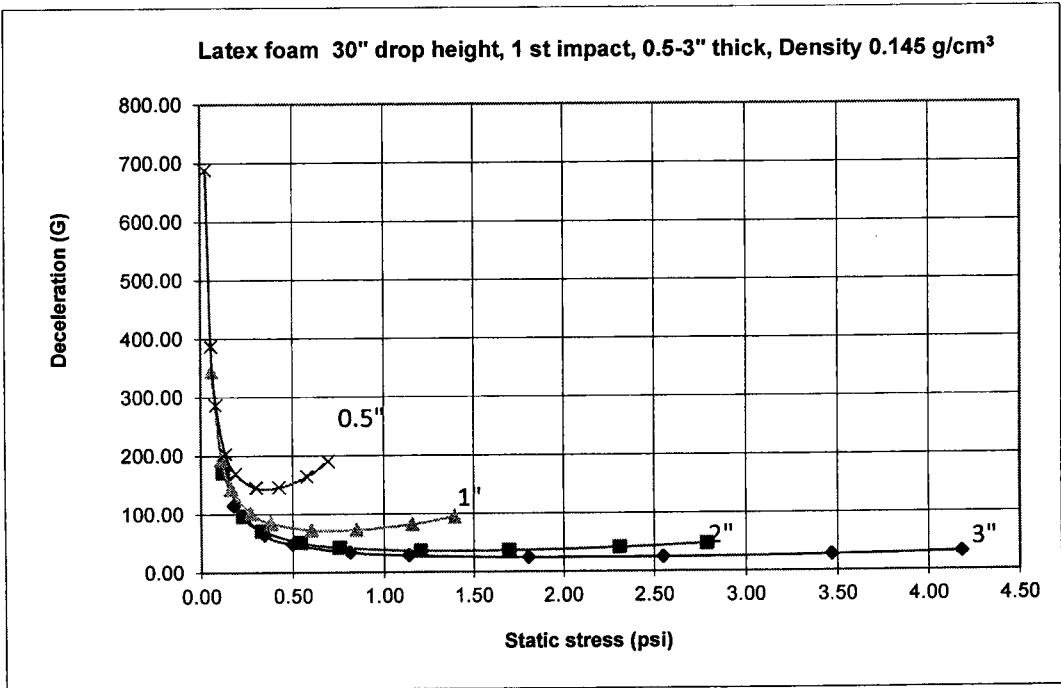


Figure 64 Cushion curves of latex foam 30" drop height

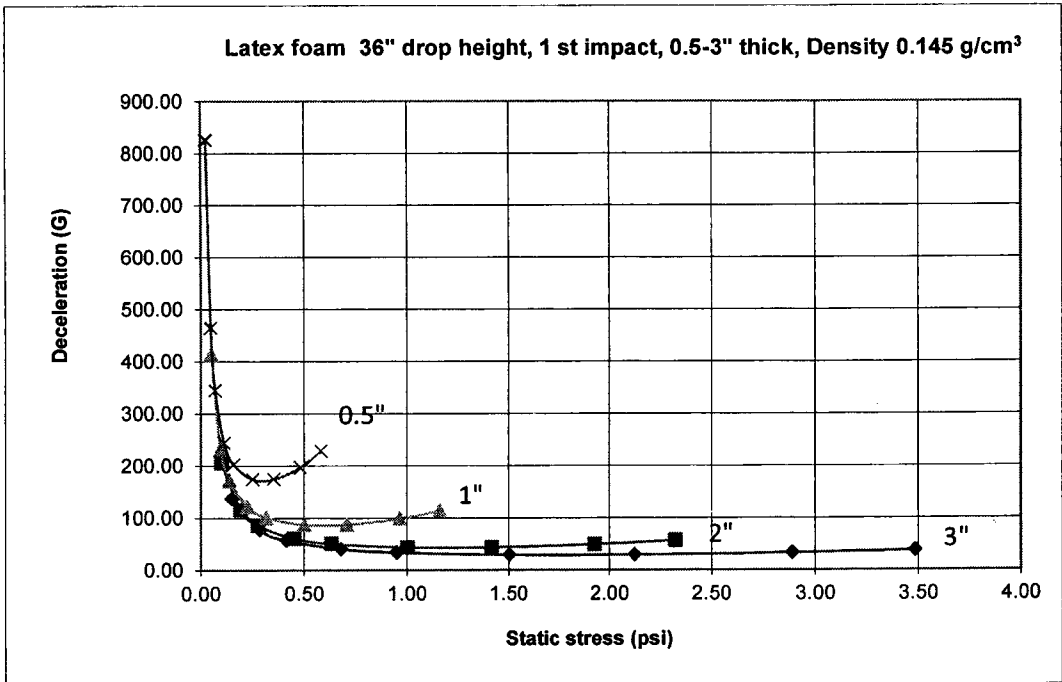


Figure 65 Cushion curves of latex foam 36" drop height

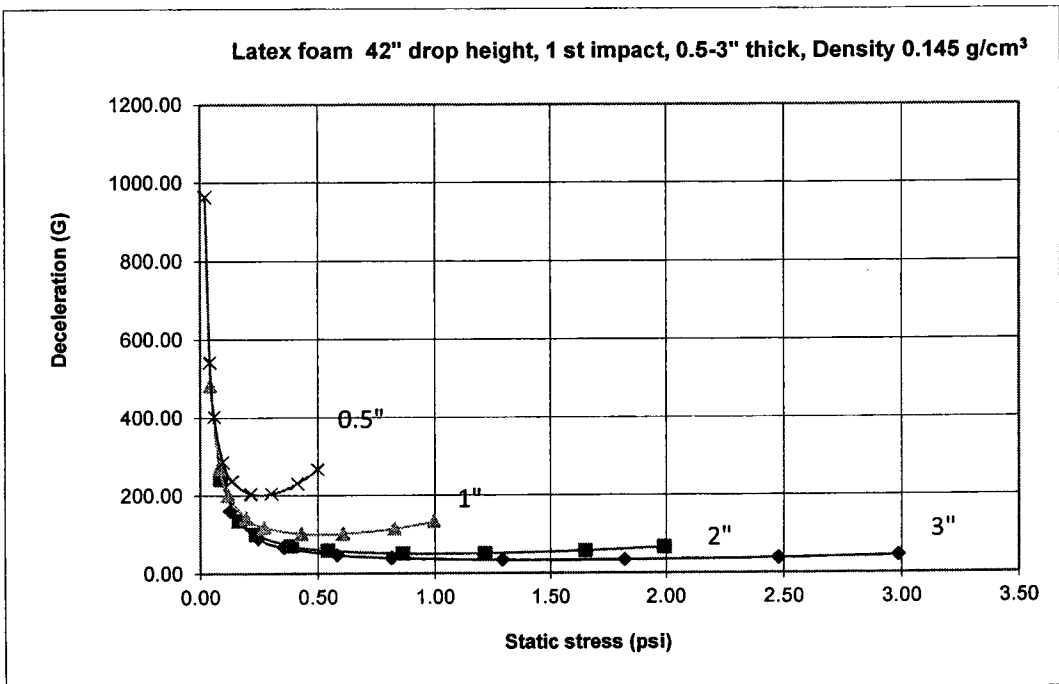


Figure 66 Cushion curves of latex foam 42" drop height

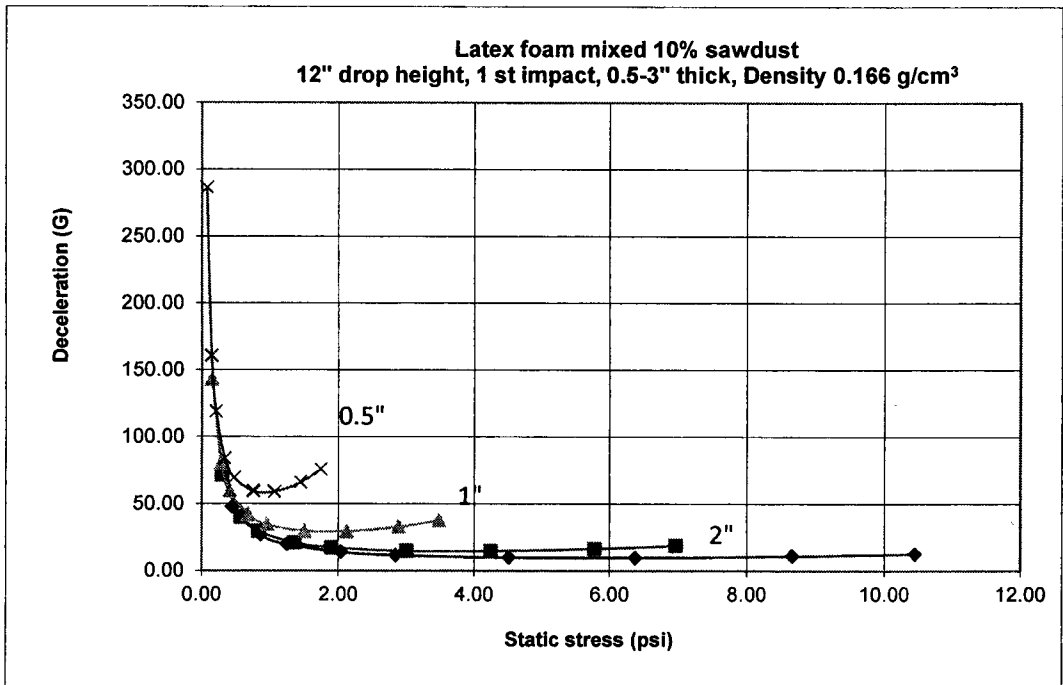


Figure 67 Cushion curves of latex foam mixed 10% sawdust 12" drop height

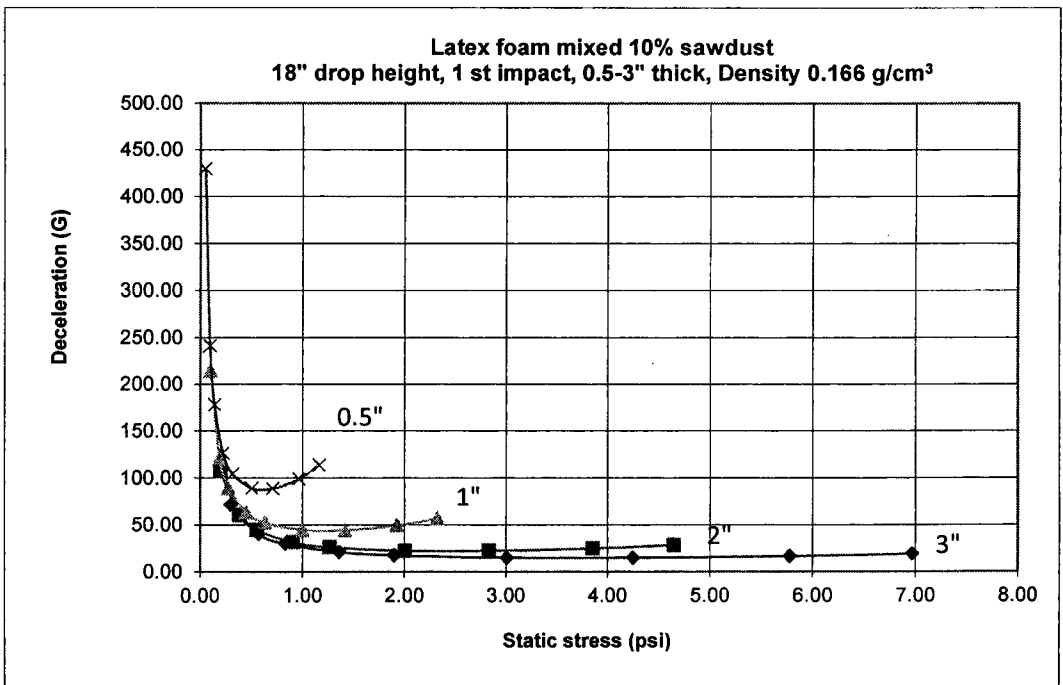


Figure 68 Cushion curves of latex foam mixed 10% sawdust 18" drop height

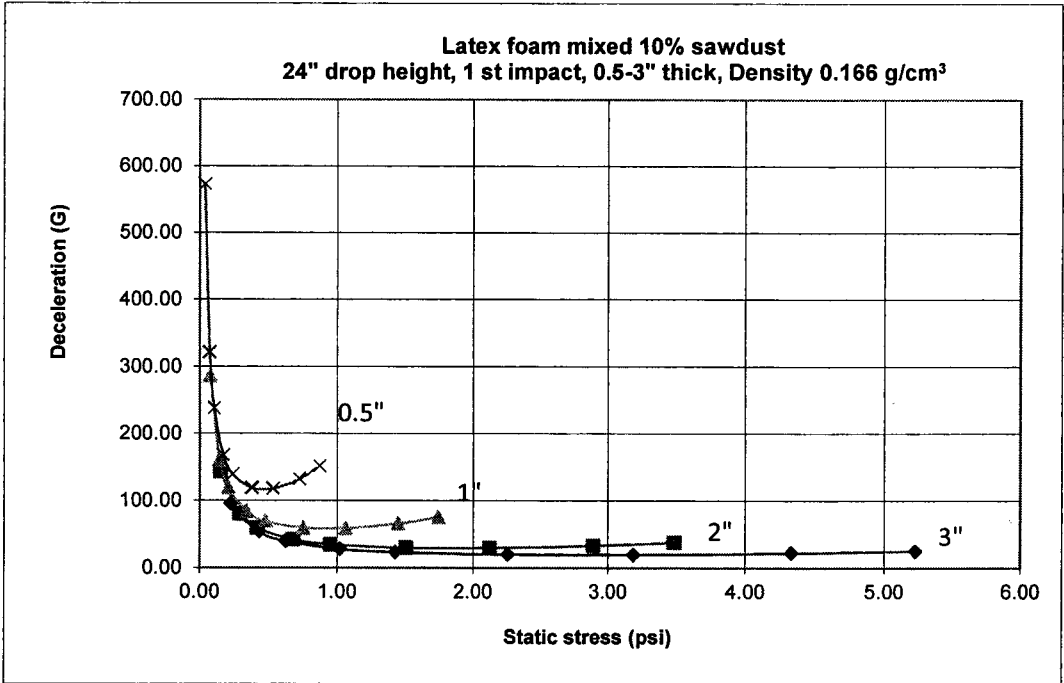


Figure 69 Cushion curves of latex foam mixed 10% sawdust 24" drop height

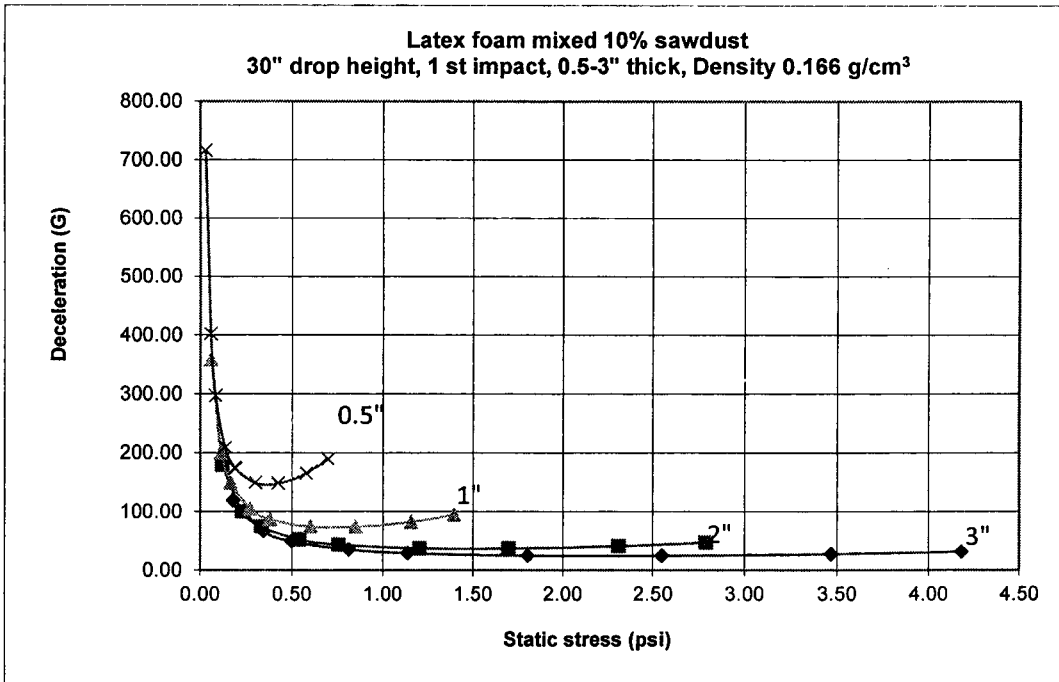


Figure 70 Cushion curves of latex foam mixed 10% sawdust 30" drop height

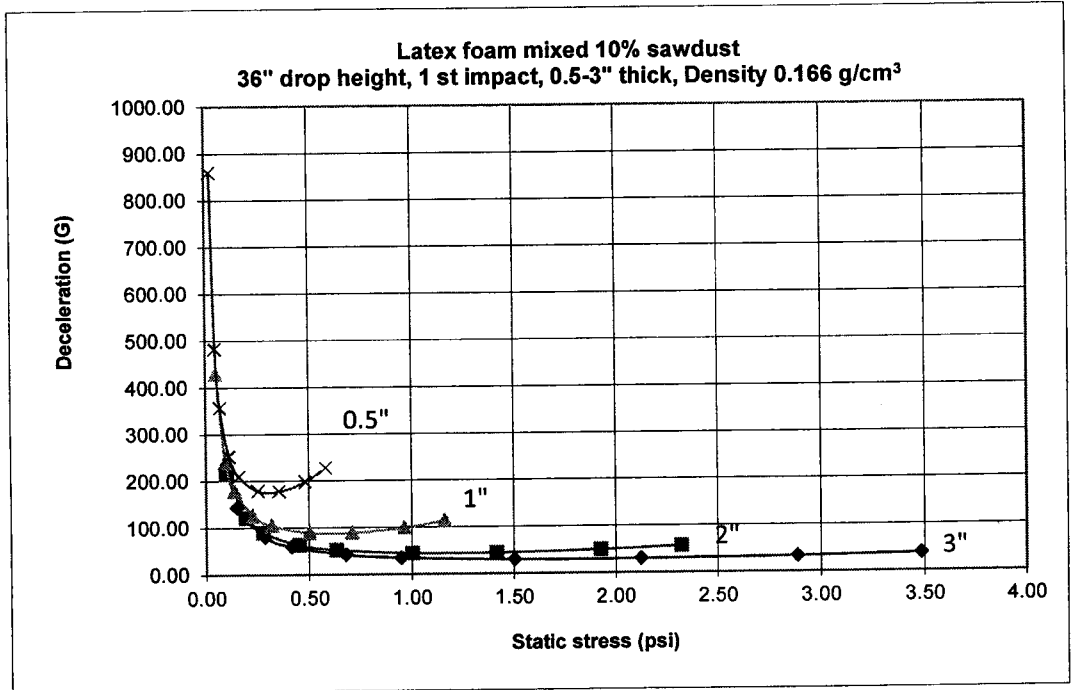


Figure 71 Cushion curves of latex foam mixed 10% sawdust 36" drop height

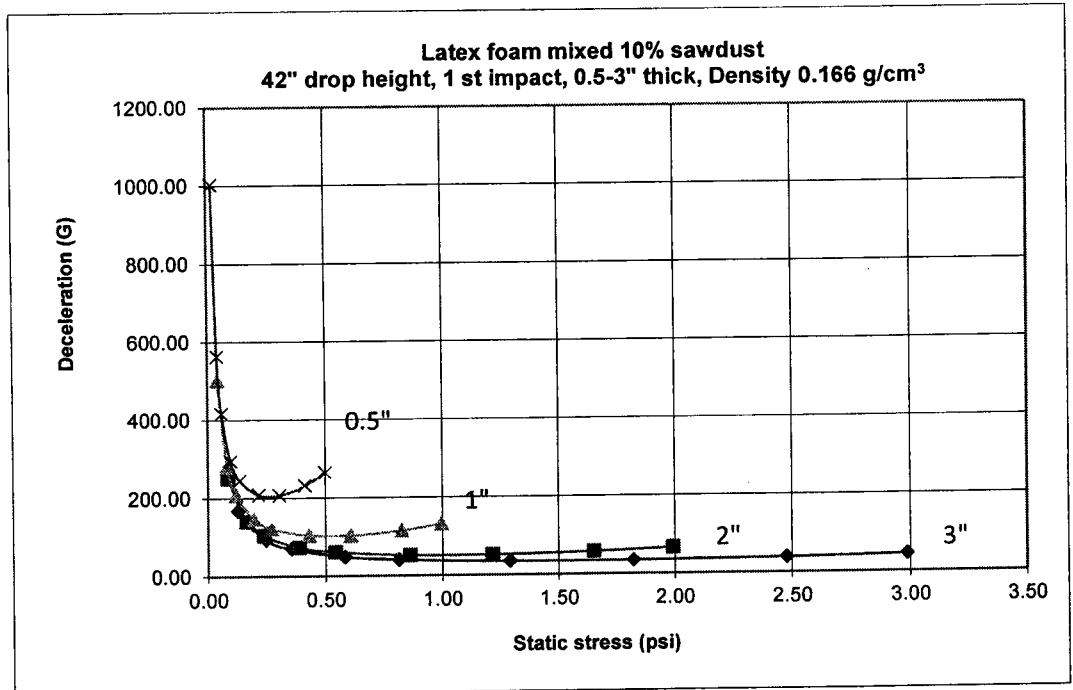


Figure 72 Cushion curves of latex foam mixed 10% sawdust 42" drop height

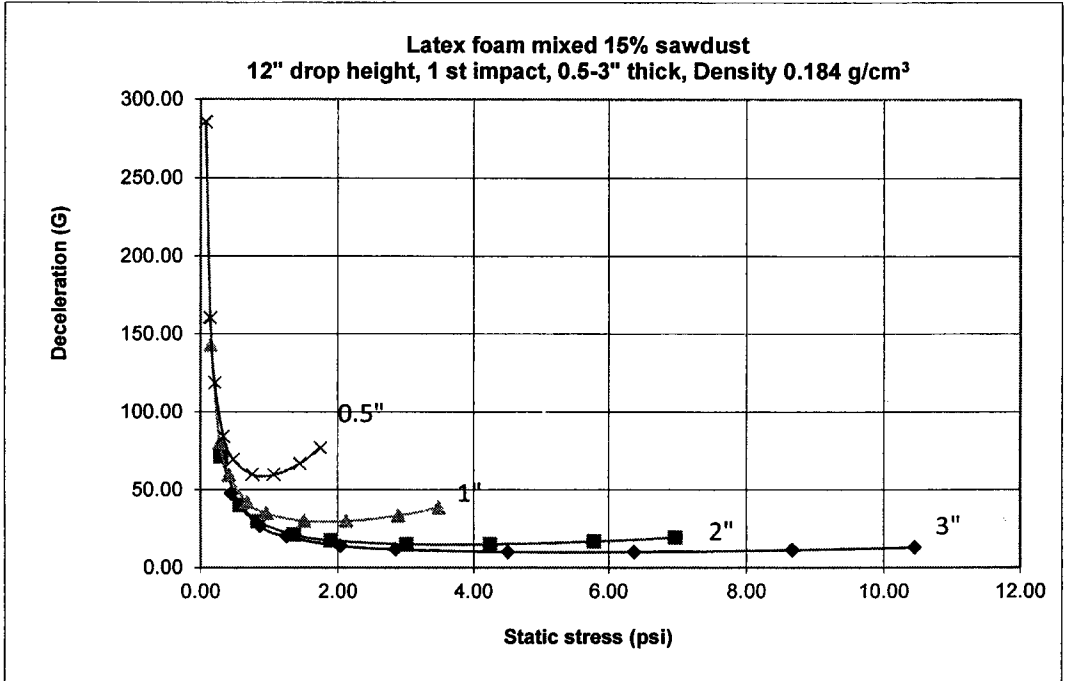


Figure 73 Cushion curves of latex foam mixed 15% sawdust 12" drop height

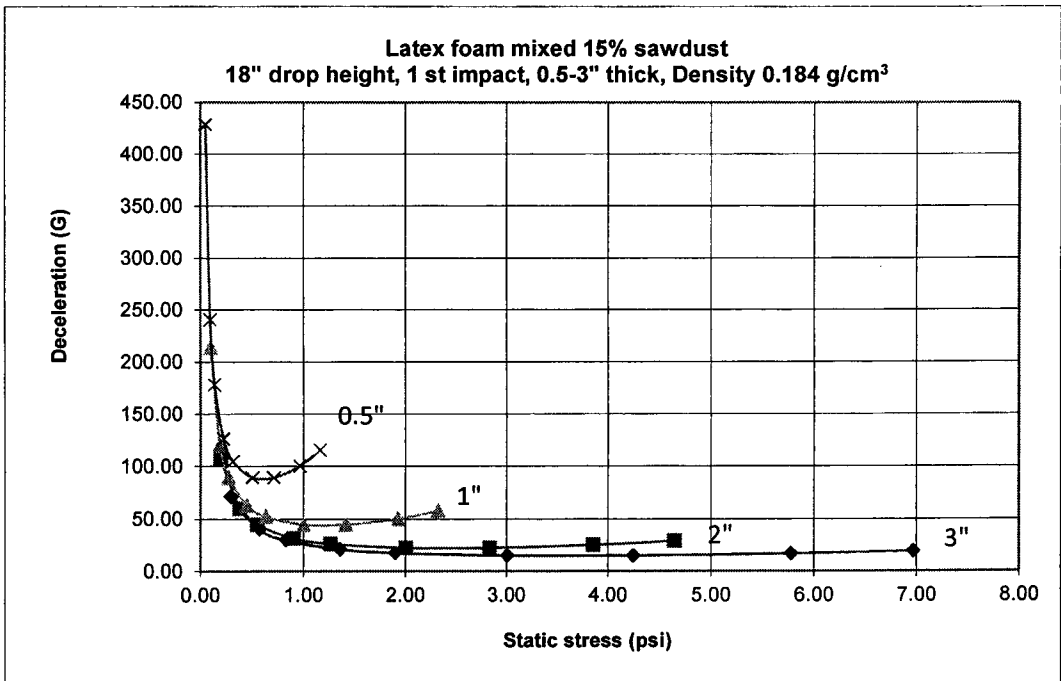


Figure 74 Cushion curves of latex foam mixed 15% sawdust 18" drop height

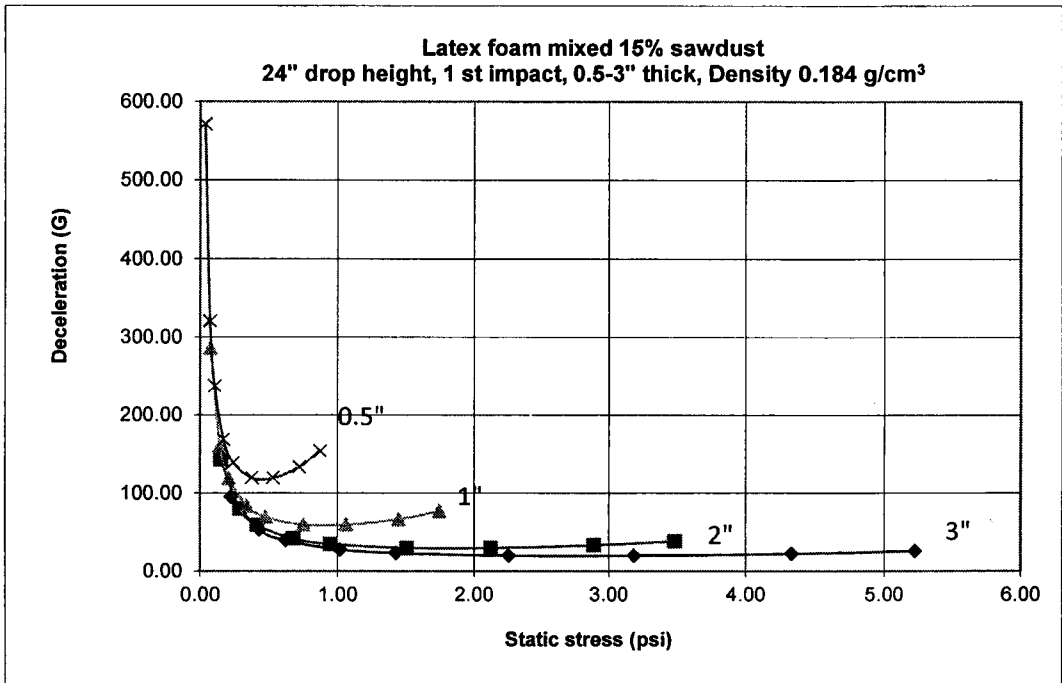


Figure 75 Cushion curves of latex foam mixed 15% sawdust 24" drop height

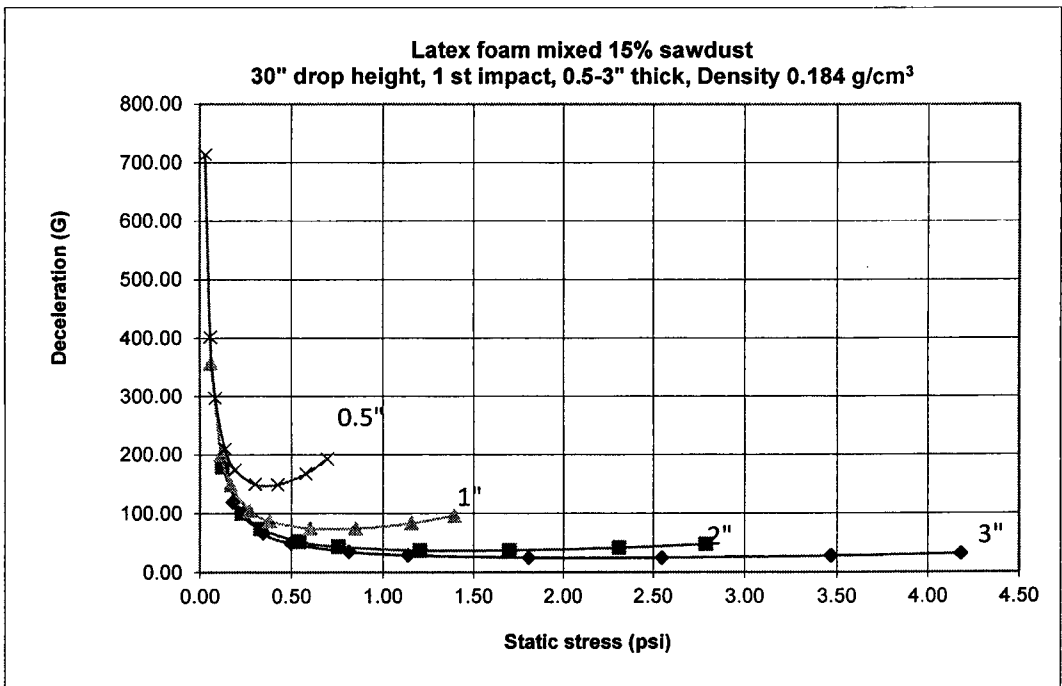


Figure 76 Cushion curves of latex foam mixed 15% sawdust 30" drop height

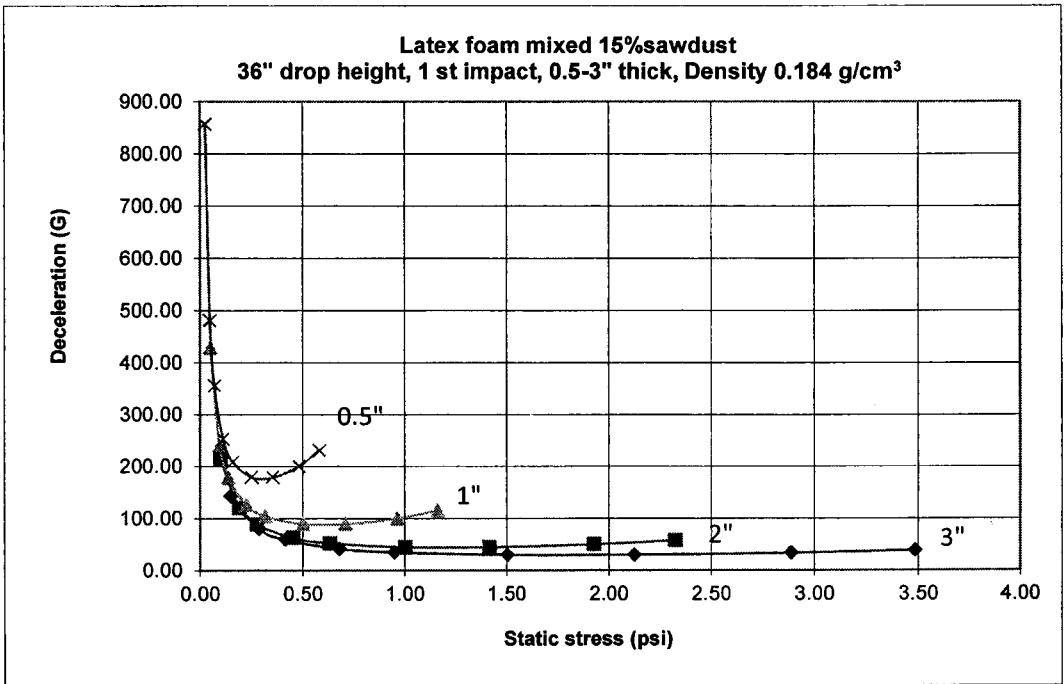


Figure 77 Cushion curves of latex foam mixed 15% sawdust 36" drop height

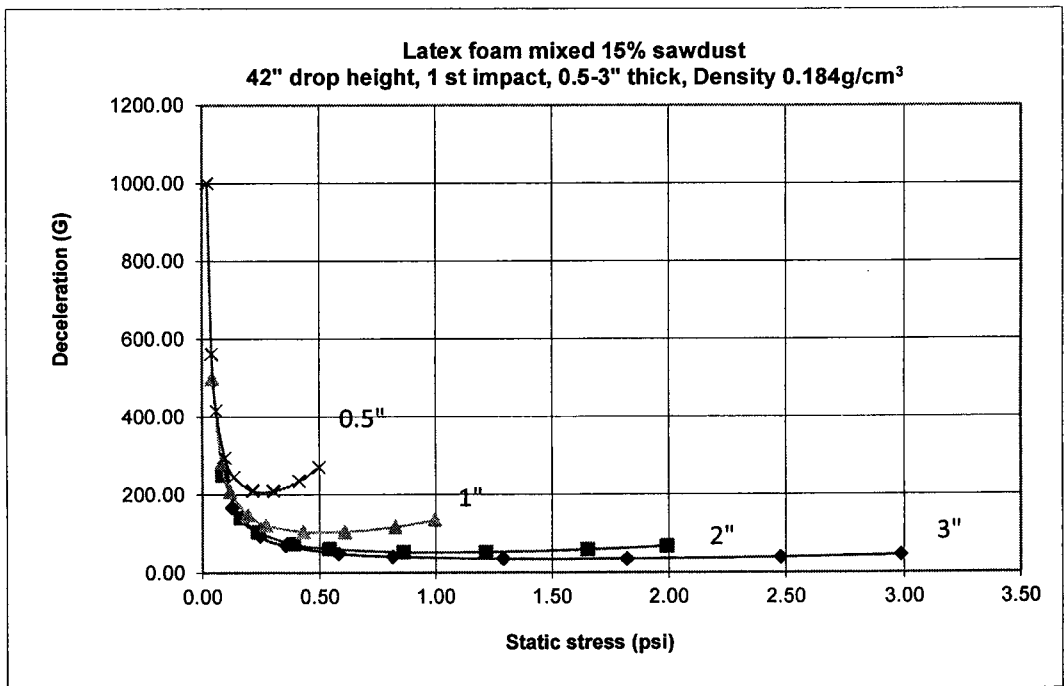


Figure 78 Cushion curves of latex foam mixed 15% sawdust 42" drop height

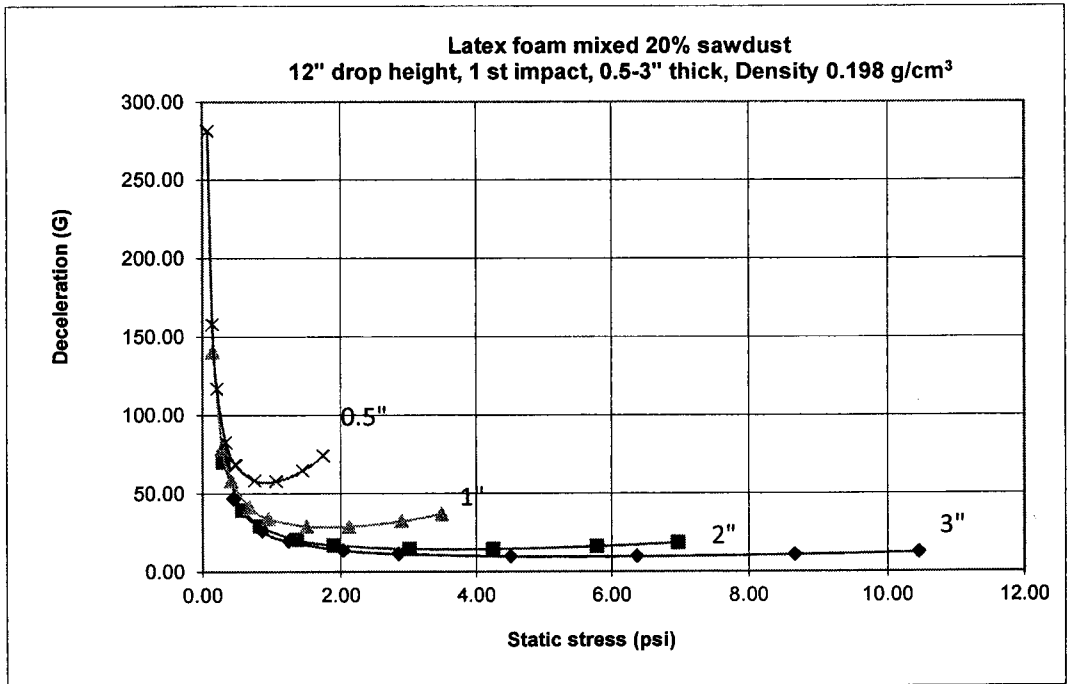


Figure 79 Cushion curves of latex foam mixed 20% sawdust 12" drop height

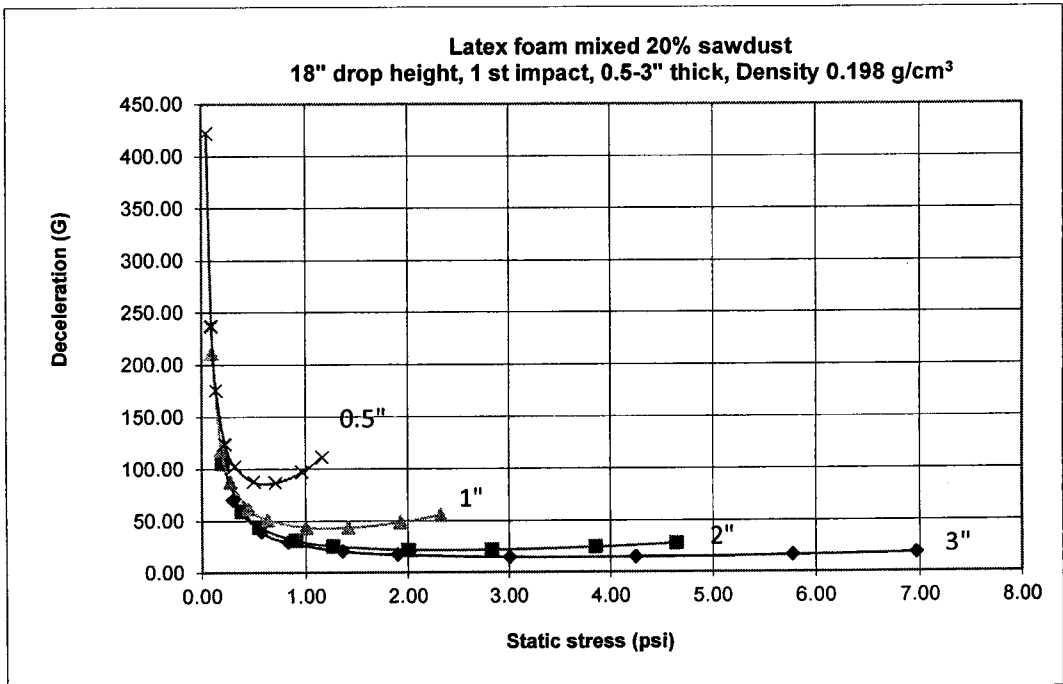


Figure 80 Cushion curves of latex foam mixed 20% sawdust 18" drop height

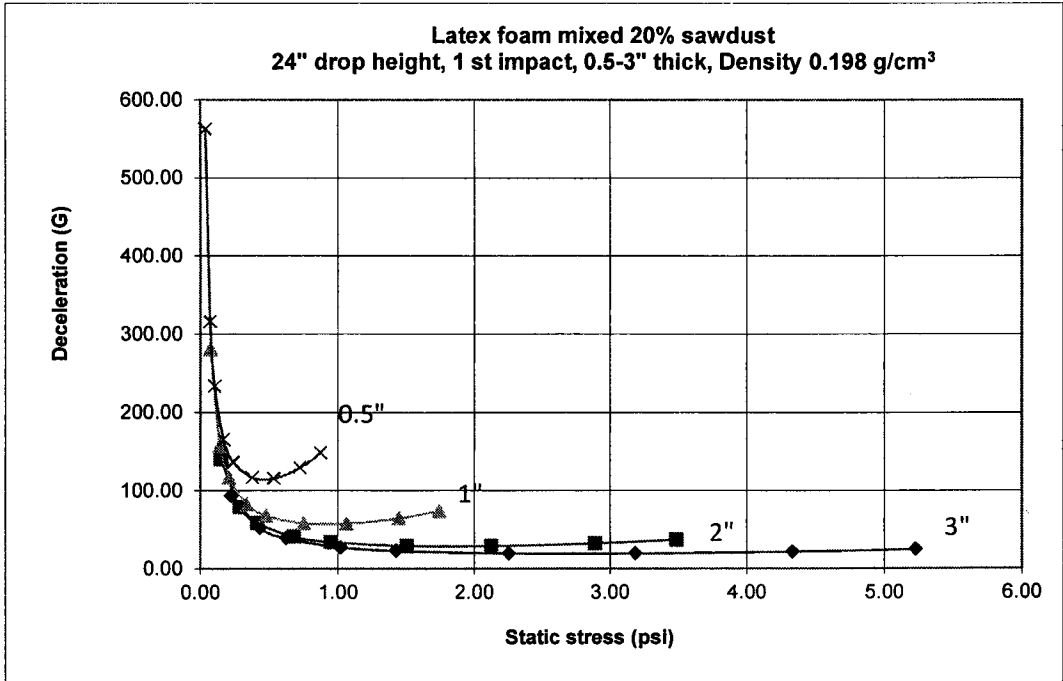


Figure 81 Cushion curves of latex foam mixed 20% sawdust 24" drop height

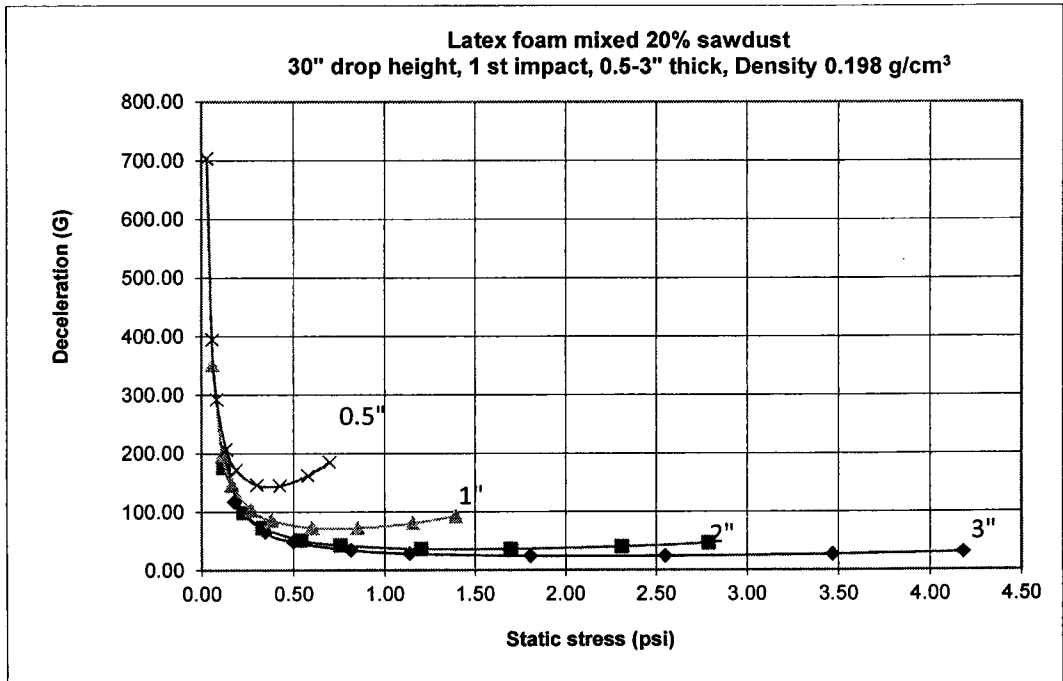


Figure 82 Cushion curves of latex foam mixed 20% sawdust 30" drop height

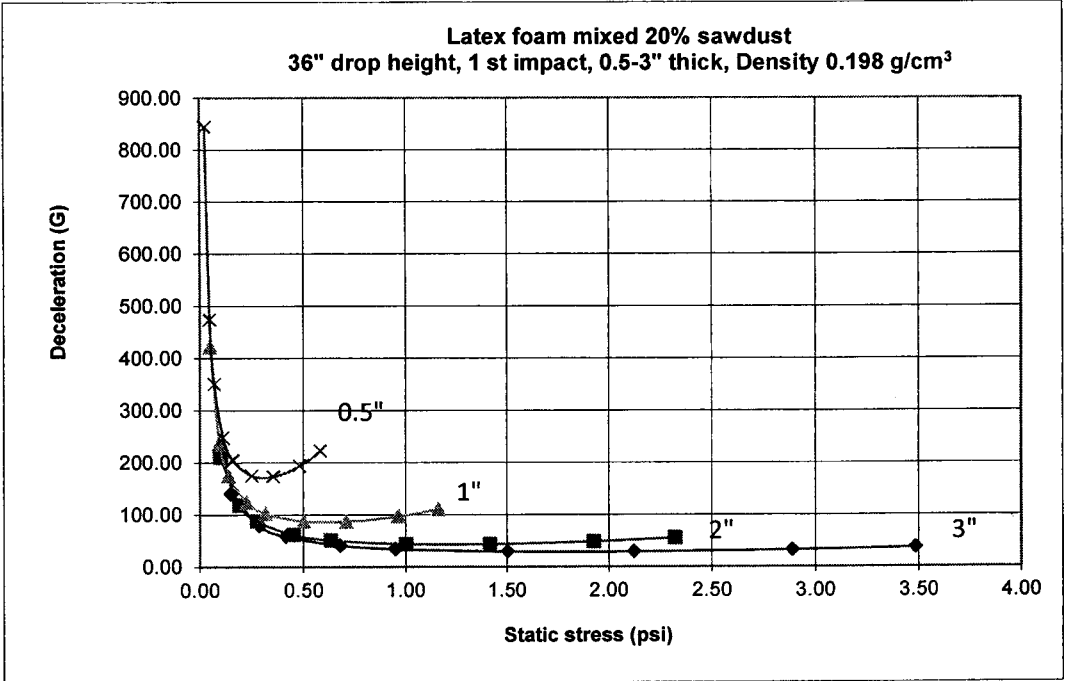


Figure 83 Cushion curves of latex foam mixed 20% sawdust 36'' drop height

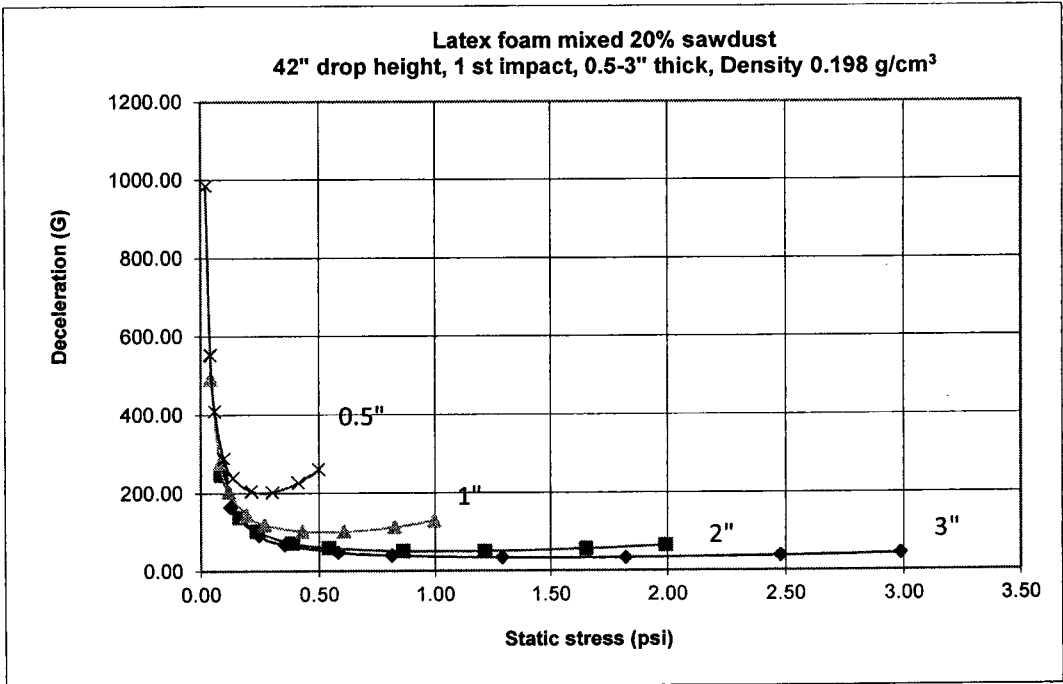


Figure 84 Cushion curves of latex foam mixed 20% sawdust 42'' drop height

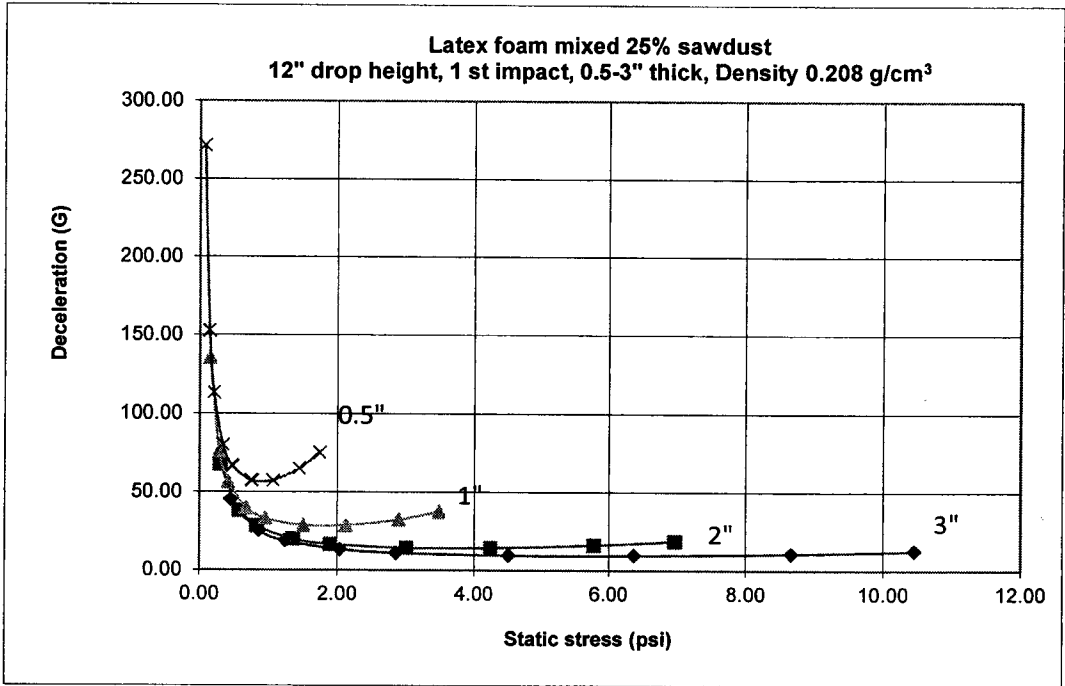


Figure 85 Cushion curves of latex foam mixed 25% sawdust 12" drop height

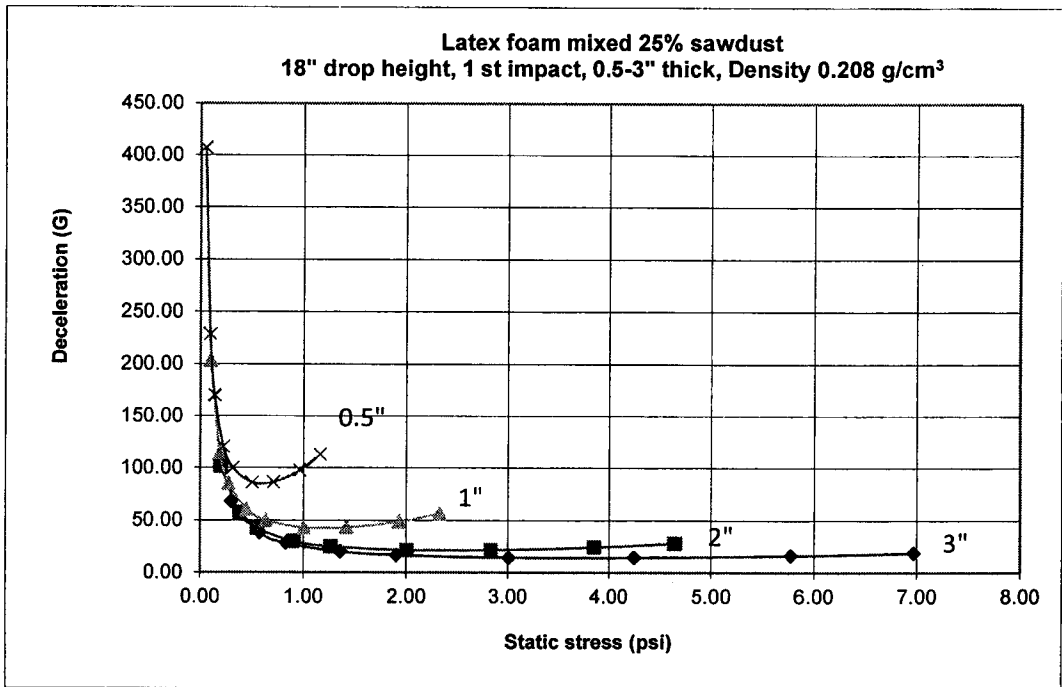


Figure 86 Cushion curves of latex foam mixed 25% sawdust 18" drop height

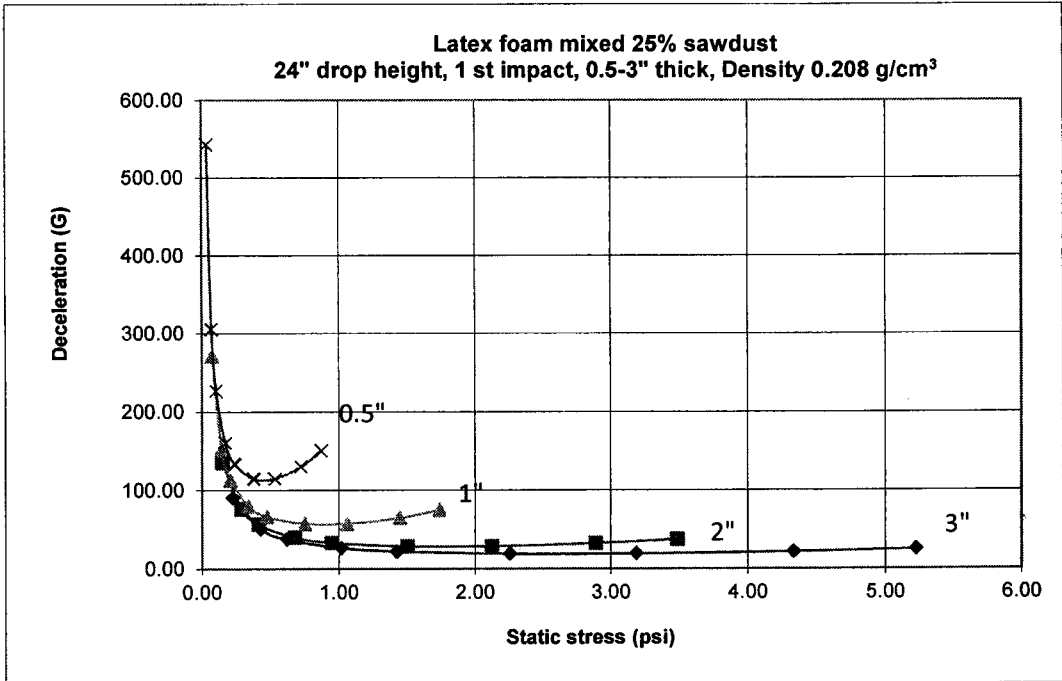


Figure 87 Cushion curves of latex foam mixed 25% sawdust 24" drop height

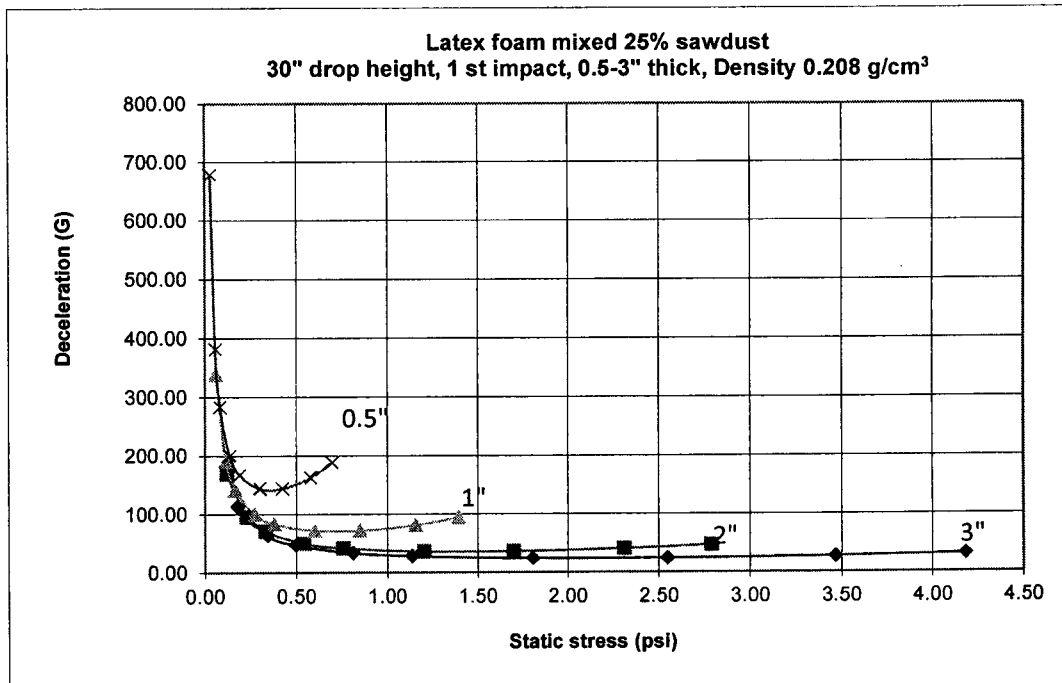


Figure 88 Cushion curves of latex foam mixed 25% sawdust 30" drop height

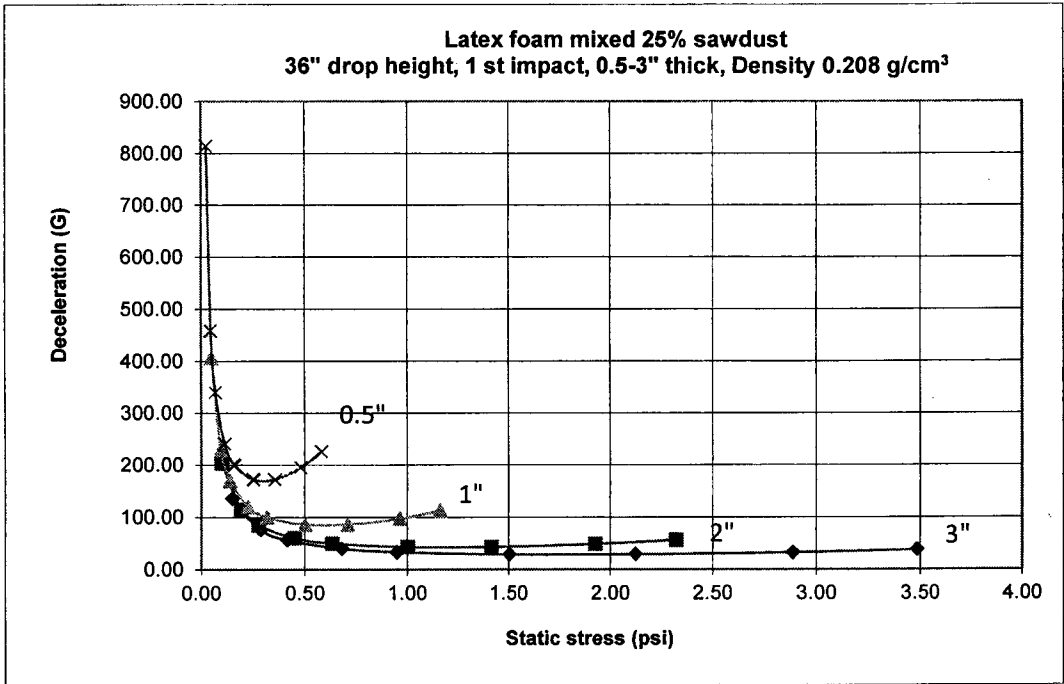


Figure 89 Cushion curves of latex foam mixed 25% sawdust 36" drop height

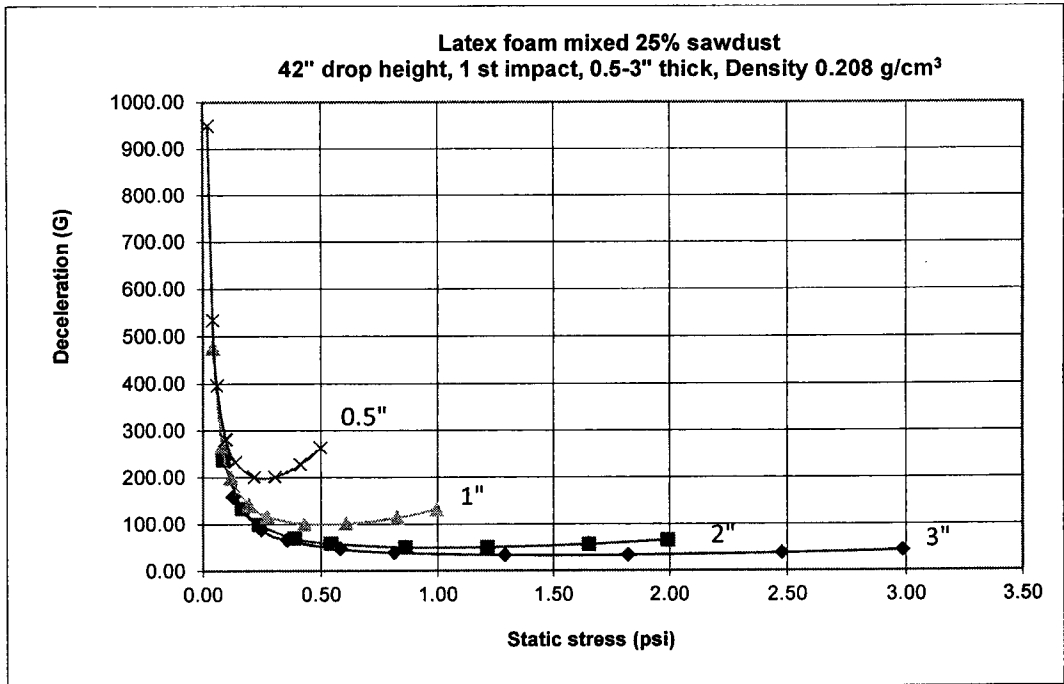


Figure 90 Cushion curves of latex foam mixed 25% sawdust 42" drop height

จากกราฟเส้นโค้งวัสดุกันกระแทกยางฟองน้ำจะเห็นว่าเมื่อ ค่าแรงกระแทกหรือความหน่วง (Deceleration) ในหน่วย G จะเริ่มต้นจากค่าที่สูง เมื่อความเค้นสถิตย์ (Static stress) สูงขึ้น แล้วค่า G ก็จะลดต่ำลงจนถึงจุดหนึ่ง ค่า G ก็จะเพิ่มสูงขึ้นเป็นแนวโน้มลักษณะระฆังหงาย โดย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การลดพื้นที่วัสดุกันกระแทก (Contact area) ซึ่งจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเค้นสถิตย์จะช่วยลดค่าความหน่วงลงได้ถึงจุดหนึ่ง จากนั้นการลดพื้นที่ดังกล่าวจะส่งผลในทิศทางตรงข้ามคือ จะยังเพิ่มความหน่วงให้สูงขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมของยางฟองน้ำจากการรับแรงกระแทกคือ ในช่วงแรกของกราฟ แรงกระแทกหรือความหน่วงจะลดลงเมื่อความเค้นสถิตย์เพิ่มขึ้นเนื่องจากโพรงอากาศในเซลล์ของยางฟองน้ำที่มีอากาศแทรกตัวอยู่จะช่วยดูดซับแรงกระแทกได้ดีจนกระทั่งถึงจุดต่ำสุดของความหน่วง และเมื่อเพิ่มความเค้นสถิตย์ต่อไปความหน่วงที่เกิดขึ้นจะสูงเกินกว่าอากาศที่แทรกตัวอยู่ในเซลล์ยางฟองน้ำจะดูดซับได้ ทำให้เกิดการดูดซับแรงกระแทกหรือความหน่วงโดยตัววัสดุยางฟองน้ำเองเป็นหลัก ซึ่งมีความเหนียว กระด้างกว่าการดูดซับโดยอากาศในเซลล์ จึงทำให้ค่าความหน่วงกลับมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการคัดเลือกและออกแบบวัสดุกันกระแทกเพื่อใช้ในงานบรรจุภัณฑ์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบข้อมูลกราฟเส้นโค้งวัสดุกันกระแทก เพื่อสามารถออกแบบ คัดเลือกชนิดวัสดุ ตลอดจนขนาดของวัสดุได้อย่างเหมาะสมทั้งในด้านความสามารถในการป้องกันและความสิ้นเปลืองในการใช้วัสดุกันกระแทก

3.5.6. การวิเคราะห์การออกแบบวัสดุกันกระแทกจากยางฟองน้ำ (Analysis of Cushioning Design)

ในการวิเคราะห์การออกแบบวัสดุกันกระแทกจากยางฟองน้ำจะใช้ข้อมูลมาตรฐานและแนวทางการออกแบบตาม ASTM D4169 Standard practice for performance testing shipping containers and systems

3.5.6.1 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก

สำหรับในกรณีนี้ หากกำหนดให้น้ำหนักให้น้ำหนักผลิตภัณฑ์ในการบรรจุเพื่อป้องกันการกระแทกมีค่า 50 lb. มีขนาด 8" x 6.25" x 10" พื้นที่ในการตกกระแทกมีค่าเท่ากับ 8"x6.25" หรือ 50 in² โดยมีมูลค่าอยู่ในระดับปานกลางซึ่งเทียบเท่ากับระดับประกันคุณภาพ II ใน Table 8 ดังนั้นระดับความสูงที่มีโอกาสจะตกกระแทกจะมีค่า 18 นิ้ว ซึ่งเมื่อพิจารณาจากข้อมูลพื้นฐานดังกล่าวแล้ว สามารถใช้ข้อมูลกราฟเส้นโค้งวัสดุกันกระแทกยางฟองน้ำในการเปรียบเทียบวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกกับวัสดุกันกระแทกชนิดสังเคราะห์ที่นิยมใช้คือ Expandable Polystyrene Foam ซึ่งมีชื่อทางการค้า DYLITE D195B โดยมีกราฟเส้นโค้งวัสดุกันกระแทกดัง Figure 91 พบว่าเมื่อใช้เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกกับยาง

ฟองน้ำ ซึ่งมีกราฟเส้นโค้งวัสดุกันกระแทก Figure 62, 68, 74, 80 และ 86 โดยที่กำหนดความสูงการตกกระแทก 18" ความเค้นสถิตย์ซึ่งมีค่าน้ำหนักบรรจุหารด้วยพื้นที่สัมผัส เท่ากับ 1 psi สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ดัง Table 9

Table 8 Recommended drop height from ASTM D4169

Package Weight (lbs)	Assurance Levels (I, II, III) and Drop Height (inches)			Handling Method
	I	II	III	
0 - 20	48	30	18	Manual
21 - 40	42	24	15	Manual
41 - 60	36	18	12	Manual
61 - 80	30	18	9	Manual
81 - 100	24	18	6	Manual
101 - 200	18	18	3	Manual
201 - 600	12	9	6	Mechanical
Over 600	9	6	3	Mechanical

18" DROP

Figure 3
18" Drop, 1st Impact

Density = 1.25 PCF

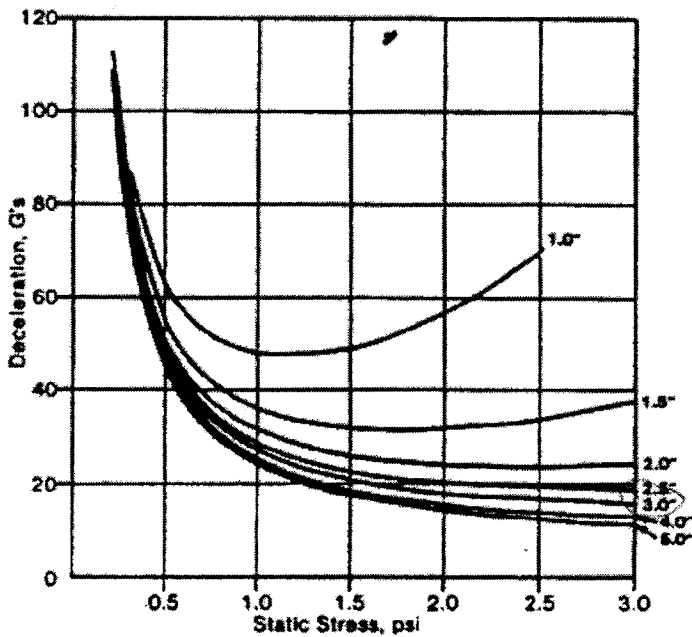


Figure 91 Cushion curves of DYLITE D195, drop height 18 in.

Table 9 Shock absorbing performance of latex foam and DYLITE D195

Cushion materials	(Transmitted) Deceleration (G)
DYLITE D195B	49
Latex foam	43.64
Latex foam mixed 10%sawdust	44.60
Latex foam mixed 15%sawdust	44.84
Latex foam mixed 20%sawdust	43.75
Latex foam mixed 25%sawdust	43.10

จาก Table 9 ค่าความหน่วงหรือแรงกระแทกที่ส่งผ่านจากวัสดุ ซึ่งสามารถอ่านได้จากกราฟเส้นโค้งๆ พบว่า ค่าความหน่วงของ DYLITE D195 จะมีค่าสูงสุด 49 G ในขณะที่ค่าความหน่วงของยางพองน้ำจะมีค่าแกว่งตัวในช่วงแคบๆตั้งแต่ 43.1-44.8 G คำนี้นยางพองน้ำในทุกชนิดที่ทดสอบจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับแรงกระแทกที่ดีกว่าวัสดุกันกระแทกทางการค้า DYLITE D195 ประมาณ 9-14%

3.5.6.2 การวิเคราะห์ขนาดวัสดุกันกระแทก

ในการวิเคราะห์ขนาดวัสดุกันกระแทก เมื่อกำหนดให้ผลิตภัณฑ์มีข้อกำหนดในการรับแรงกระแทกหรือความหน่วงจากการขนส่ง เคลื่อนย้าย ได้ไม่เกิน 60 G ผลิตภัณฑ์มีมูลค่าสูงและมีรูปทรงเป็นลูกบาศก์กว้าง 10" x ยาว 10" x สูง 8" น้ำหนัก 50 lb. จากข้อมูลดังกล่าว สามารถจัดเงื่อนไขตาม ASTM D4169 ได้เทียบเท่ากับระดับประกันคุณภาพ I (Table 8) ดังนั้นระดับความสูงในการตกกระแทกจึงมีโอกาสที่ 36" ซึ่งจากข้อมูลเมื่อนำไปเทียบกับกราฟเส้นโค้งๆ Figure 65, 71, 77, 83, 89 โดยกำหนดให้จำกัดความหน่วง 60 G จะพบว่าเส้นกราฟจะตัดที่ความหนาของยางพองน้ำและ DYLITE 2" และเมื่อลากเส้นจากจุดตัดของความหนา 2 นิ้ว ลงมาจะตัดกับแกน x ซึ่งเป็นความเค้นสถิตย์ ในกรณีที่ตัดกับความเค้นสถิตย์ 2 จุด (Figure 92) ให้เลือกจุดที่มีค่าความเค้นสถิตย์สูงสุดในการคำนวณขนาดพื้นที่ เพื่อที่จะช่วยให้ใช้พื้นที่วัสดุกันกระแทกได้ประหยัดที่สุด ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดัง Table 10

36" DROP

Figure 9
36" Drop, 1st Impact

Density = 1.25 PCF

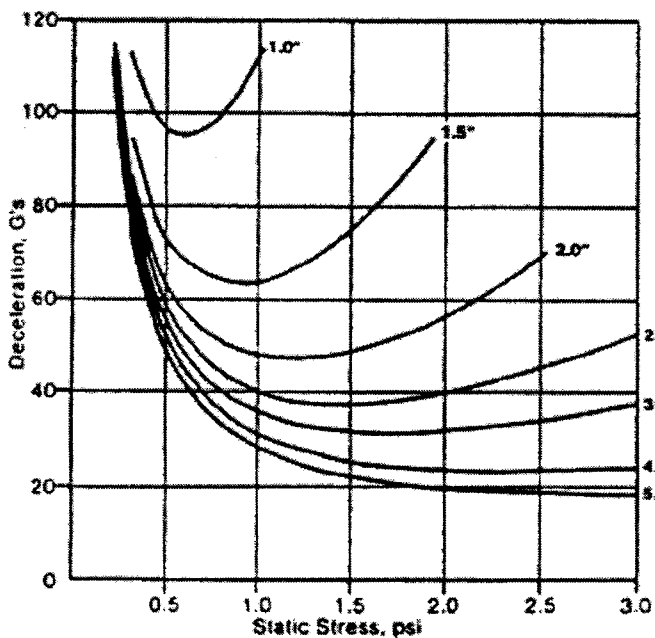


Figure 92 Cushion curves DYLITE D195B, drop height 36 in.

Table 10 Cushion design analysis of latex foam

Cushion materials	Thickness (in)	Static stress (psi)	Cushion area (in ²)	Cushion size :y x y (in)
DYLITE D195B	2	2.15	23.26	2.41x2.41
Latex foam	2	2.20	22.73	2.38x2.38
Latex foam mixed 10%sawdust	2	2.47	20.24	2.25x2.25
Latex foam mixed 15%sawdust	2	2.42	20.66	2.27x2.27
Latex foam mixed 20%sawdust	2	2.52	19.84	2.23x2.23
Latex foam mixed 25%sawdust	2	2.47	20.24	2.25x2.25

ในการวิเคราะห์ห้ขนาดวัสดุกันกระแทกดัง Table 10 พบว่าขนาดพื้นที่ของวัสดุกันกระแทกสำหรับยางพองน้ำจะใช้พื้นที่ต่ำกว่าขนาดพื้นที่ของวัสดุกันกระแทกทางการค้า DYLITE D195B ประมาณ 2.2-14.7% โดยการผสมขี้เลื่อยขางพาราจะช่วยให้ประสิทธิภาพการดูดซับแรงกระแทกดีขึ้น ส่งผลให้การใช้พื้นที่หรือขนาดวัสดุกันกระแทกลดลงทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากขึ้น ซึ่งการเติมขี้เลื่อยจะช่วยให้การเกิดโพรงอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นและจำนวนมากขึ้น ทำให้มีอากาศแทรกตัวในเซลล์ยางพองน้ำมากขึ้น จึงมีความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกได้ดีขึ้น

เพื่อให้การวิเคราะห์สามารถเห็นภาพขนาดวัสดุกันกระแทกที่ออกแบบได้ชัดเจนขึ้น จึงได้ทำการออกแบบวัสดุกันกระแทกในรูปทรงแบบป้องกันมุม 4 ชั้น (Corner protector) ดังนั้นจากพื้นที่วัสดุกันกระแทกทั้งหมด สามารถกำหนดขนาดของรูปทรงป้องกันมุมแต่ละชั้น ได้ดัง Table 10 และมีรูปร่างดัง Figure 93.

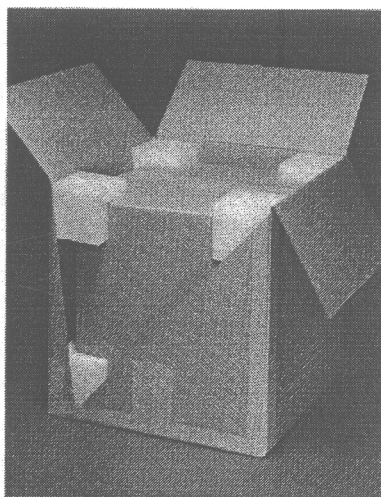
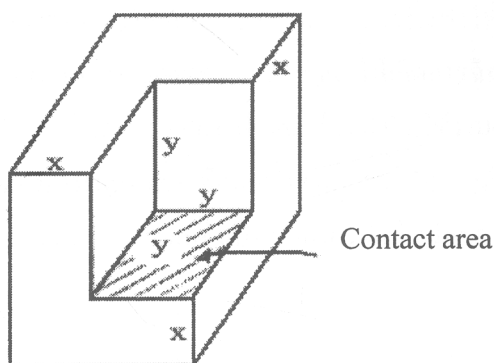


Figure 93 Corner protector of cushion material

บทที่ 4

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1. สรุป

ความหนาแน่น (Density)

ยางพองน้ำที่เตรียมจากสูตรที่มีปริมาณสารก่อฟอง (โพแทสเซียม โอลิเอต) ในปริมาณที่แตกต่างกันส่งผลต่อความหนาแน่นของยางพองน้ำอย่างมีนัยสำคัญ โดยยางพองน้ำที่เตรียมจากสูตรที่มีปริมาณสารก่อฟองสูงจะมีความหนาแน่นต่ำ และสูตรที่มีปริมาณสารก่อฟองต่ำยางพองน้ำจะมีความหนาแน่นสูง

ปริมาณสารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนต) ที่สูงขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของยางพองน้ำสูงขึ้นตามลำดับ และพบว่ายางพองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบนิ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่ายางพองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบอบ เนื่องจากในระหว่างการนึ่งนั้นยางพองน้ำเกิดการหดตัวได้น้อย และยังพบว่าการนึ่งทำให้เกิดแรงดันไอน้ำภายในชั้นยางพองน้ำ ทำให้เซลล์ของยางพองน้ำถูกทำลาย และส่งผลให้เกิดการฉีกขาดง่ายอีกด้วย

ในการเลือกยางพองน้ำที่จะนำไปใช้งานเป็นวัสดุกันกระแทกนั้น ต้องพิจารณายางพองน้ำที่มีความหนาแน่นต่ำ เพื่อลดน้ำหนักภายในบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นยางพองน้ำที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเป็นวัสดุกันกระแทกจึงเป็นยางพองน้ำที่เตรียมจากสูตรที่มีสารก่อฟองในปริมาณสูง และไม่ใช้สารตัวเติม

ความสามารถในการต้านทานแรงกด (Compression resistance)

ความสามารถในการต้านทานแรงกดของยางพองน้ำขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นตัวอย่างของยางพองน้ำ โดยพบว่าชิ้นตัวอย่างที่มีความหนามาก สามารถต้านทานแรงกดได้ดีกว่ายางพองน้ำที่มีขนาดบาง และยางพองน้ำที่มีความหนามากที่สุดสามารถต้านทานแรงกดได้สูงสุด ส่วนผลจากการใช้วิธีการ ให้ความร้อนที่ต่างกันนั้นพบว่า ยางพองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบนิ่งสามารถต้านทานต่อแรงกดได้ดีกว่ายางพองน้ำที่ผ่านการให้ความร้อนแบบอบ

ยางพองน้ำที่เติมสารตัวเติมในปริมาณที่ต่างกัน มีความสามารถในการต้านทานแรงกดที่ต่างกัน โดยพบว่ายางพองน้ำที่มีการเติมสารตัวเติมในปริมาณที่สูงขึ้น สามารถต้านทานต่อแรงกดได้ดีขึ้น นอกจากนี้สารตัวเติมจะส่งผลให้ยางพองน้ำมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นแล้วยังทำให้ยางพองน้ำมีความกระด้างเพิ่มขึ้นอีกด้วย

ความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกด (Compression set)

ปริมาณ โพลีเอทิลีนและปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมีอิทธิพลต่อความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดของยางพองน้ำ โดยความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเติมโพลีเอทิลีนในปริมาณที่สูงขึ้น และยางพองน้ำที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดสูงกว่ายางพองน้ำที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต และพบว่าที่ทุกๆ ระดับการเติมโพลีเอทิลีนและแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น ยางพองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบหนึ่งมีความสามารถในการคืนรูปภายหลังการกดสูงกว่ายางพองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบอบ

เปอร์เซ็นต์การหดตัวของยางพองน้ำ (Percent shrinkage)

ยางพองน้ำที่มีความหนาแน่นต่ำ (สารก่อพองมาก) จะมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูง และยางพองน้ำที่มีความหนาแน่นสูงจะมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำ เนื่องจากโครงสร้างของยางพองน้ำที่มีความหนาแน่นสูงกว่าจะมีการเชื่อมต่อกันของเซลล์ที่คิดว่าโครงสร้างของยางพองน้ำที่มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งมีการเชื่อมต่อกันของเซลล์เป็นไปในลักษณะหลวมๆ ทำให้เกิดการฉีกขาดหรือการเสียหายของเซลล์ได้ง่ายกว่า จึงส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูง

วิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวของยางพองน้ำ พบว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบหนึ่ง ทำให้ยางพองน้ำมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงกว่า ยางพองน้ำที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบอบ และปริมาณสารตัวเติมที่สูงขึ้นส่งผลให้ยางพองน้ำมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่สูงขึ้นด้วย

สมบัติการป้องกันแรงกระแทกของยางพองน้ำ (Cushioning characteristic)

ผลการทดสอบสมบัติการดูดซับแรงกระแทกของยางพองน้ำ พบว่าขนาดความหนาของชั้นยางพองน้ำเป็นเพียงปัจจัยเดียวที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก ในขณะที่ปริมาณ โพลีเอทิลีนและปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่แตกต่างกันไม่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญ โดยยางพองน้ำที่มีขนาดความหนามาก สามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดี และพบว่ายางพองน้ำที่มีความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกที่ดีที่สุด คือ ยางพองน้ำที่เตรียมจากการใช้โพลีเอทิลีน 1.40 phr, การให้ความร้อนแบบอบและมีความหนา 1.5 นิ้ว ซึ่งมีค่า G ต่ำสุด (42.9 G) เมื่อทดสอบที่ความเค้นสถิต 0.04 kg/cm^2 และตกกระแทกที่ความสูง 18 นิ้ว

การเปรียบเทียบสมบัติการป้องกันแรงกระแทกระหว่างยางพองน้ำกับโพลีสไตรีน

ความสามารถในการป้องกันแรงกระแทกที่ดีที่สุดของยางพองน้ำถูกนำมาใช้เปรียบเทียบกับโพลีสไตรีนพบว่า วัสดุกันกระแทกประเภทโพลีสไตรีนที่มีความหนาเท่ากับความหนาของยางพองน้ำสามารถป้องกันแรงกระแทกได้ดีกว่า แต่วัสดุกันกระแทกจากโพลีสไตรีนนั้น เมื่อถูกแรงกระทำหลายๆ ครั้งแล้วทำให้ความสามารถในการป้องกันแรงกระแทกลดลง เนื่องจากเม็ดโพลีเมอร์รูปได้ง่าย และมีความสามารถในการคืนตัวต่ำ ในขณะที่ยางพองน้ำ เมื่อได้รับแรงกระทำหลายๆ ครั้งแล้วยางพองน้ำยังมีความสามารถในการป้องกันแรงกระแทกได้ดีเท่าเดิม เนื่องจากเซลล์ของยางพองน้ำที่พองตัวออกมีความยืดหยุ่นสูง มีการคืนตัวกลับได้ดีซึ่งเป็นลักษณะเด่นของยางพองน้ำ ดังนั้นวัสดุกันกระแทกที่ผลิตมาจากยางพองน้ำจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานเป็นวัสดุกันกระแทกประเภทนำมาใช้ซ้ำหรือการป้องกันการกระแทกซ้ำแบบบ่อยครั้ง

ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างยางพองน้ำกับวัสดุสังเคราะห์โพลีสไตรีน

ต้นทุนในการผลิตยางพองน้ำขึ้นอยู่กับราคาน้ำยางข้นและสารเคมี โดยเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตรเท่ากัน โดยเปรียบเทียบจากยางพองน้ำมีความหนาแน่น 0.175 g/cm^3 และโพลีสไตรีนมีความหนาแน่น 0.026 g/cm^3 พบว่ายางพองน้ำต้องใช้ต้นทุนในการผลิต 6,520 บาทต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรขณะที่โพลีสไตรีนที่มีปริมาตรเท่ากันใช้ต้นทุนในการผลิต 1,260 บาท หรือคิดเป็น 5.2 เท่าของต้นทุนวัสดุที่ใช้ผลิตโพลีสไตรีน

การศึกษาการใช้วัสดุชีวภาพ ชี้อ้อยไม่ยางพาราในยางพองน้ำ

การใช้ชี้อ้อยไม่ยางพาราโดยการผสมเติมในยางพองน้ำตั้งแต่ปริมาณ 10-25% ส่งผลให้ความหนาแน่นและความต้านทานแรงกดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณชี้อ้อยเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่การเติมชี้อ้อยเพิ่มมากขึ้นจะลดเปอร์เซ็นต์การหดตัวของยางพองน้ำ การเติมชี้อ้อยจะส่งผลให้โพรงอากาศแทรกตัวมากขึ้นในยางพองน้ำ เนื่องจากความเป็นขนาดเส้นใยที่มีรูพรุนของชี้อ้อย ซึ่งผลดังกล่าวช่วยให้ประสิทธิภาพการดูดซับแรงกระแทกของยางพองน้ำดีขึ้น ยางพองน้ำที่พัฒนาขึ้นได้ถูกนำไปทดสอบและวิเคราะห์เพื่อพัฒนาชุดข้อมูลมาตรฐานกราฟเส้นโค้งวัสดุกันกระแทก ซึ่งกราฟที่พัฒนาขึ้นได้ถูกใช้ในการวิเคราะห์การออกแบบวัสดุกันกระแทกจากยางพองน้ำ โดยพบว่ายางพองน้ำที่เติมชี้อ้อยในปริมาณต่างๆ ที่ศึกษาสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ไม่แตกต่างกัน แต่

สามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่าวัสดุกันกระแทกสังเคราะห์ทางการค้า Expandable Polystyrene Foam ในระดับถึง 9-14% และยังช่วยให้ประหยัดพื้นที่การใช้ของวัสดุกันกระแทก 2.2-14.7%

5.2. ข้อเสนอแนะ

1. ควรเลือกใช้น้ำยางชั้นที่มีความเสถียรและเป็นน้ำยางชั้นจากแหล่งที่มาเดียวกันในการนำมาทดสอบ เนื่องจากน้ำยางชั้นจากแหล่งที่มาต่างกันนั้นจะมีปริมาณองค์ประกอบภายในแตกต่างกัน
2. ในกระบวนการให้ความร้อนแบบนึ่งควรปิดฝาเบ้าโลหะให้สนิท เพื่อป้องกันการฉีกขาดเสียหายของเซลล์ยางพองน้ำ อันเนื่องมาจากแรงดันไอน้ำ
3. ในการทดสอบการต้านทานแรงกระแทก ควรวางตำแหน่งชุดทดสอบให้มีความสมดุล เพื่อให้ผลการทดสอบมีความถูกต้องและแม่นยำ

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ข้อมูลการวิเคราะห์สมบัติของยางฟองน้ำ

Table 11. Density of latex foam as a function of potassium oleate.

Vulcanization	Potassium oleate (phr)	Density (g/cm ³)
Steam	0.75	0.236
	1.00	0.217
	1.40	0.177
Oven	0.75	0.223
	1.00	0.207
	1.40	0.175

Table 12. Density of latex foam as a function of calcium carbonate.

Vulcanization	Calcium carbonate (phr)	Density (g/cm ³)
Steam	0	0.177
	10	0.182
	20	0.185
	30	0.201
Oven	0	0.175
	10	0.237
	20	0.256
	30	0.265

Table 13. Compression resistance of latex foams as a function of potassium oleate.

Vulcanization	Thickness(Inch)	Potassium oleate (phr)		
		0.75	1.00	1.40
Steam	0.5	82.48	66.60	27.42
	1.0	102.37	78.93	44.17
	1.5	134.95	108.30	58.49
Oven	0.5	69.35	51.90	45.45
	1.0	82.96	58.10	38.10
	1.5	112.95	70.56	54.73

Table 14. Compression resistance of latex foams at 1.5 inches-thick.

Vulcanization	Calcium carbonate (phr)	Compression resistance (N)
Steam	0	51.12
	10	69.16
	20	82.61
	30	84.88
Oven	0	59.46
	10	178.33
	20	184.17
	30	211.80

Table 15. Percent shrinkage of the latex foams as a function of potassium oleate.

Vulcanization	Potassium oleate (phr)	Shrinkage (%)		
		Edges	Center	Lateral
Steam	0.75	9.7	11.5	9.6
	1.00	10.0	15.5	9.7
	1.40	10.8	17.1	10.2
Oven	0.75	7.3	8.4	5.9
	1.00	9.6	14.7	7.9
	1.40	10.4	14.8	8.0

Table 16. Percent shrinkage of the latex foams as a function of calcium carbonate.

Vulcanization	Calcium carbonate (phr)	Shrinkage (%)		
		Edges	Center	Lateral
Steam	0	10.8	17.1	10.2
	10	17.1	29.7	15.3
	20	16.0	22.4	13.8
	30	14.0	20.0	11.9
Oven	0	10.4	14.8	8.0
	10	14.4	21.9	14.2
	20	13.6	17.7	13.1
	30	11.6	15.3	11.2

Table 17. Cushioning characteristics of the latex foam as a function of potassium oleate.

Vulcanization	Potassium oleate (phr)	G Value		
		0.5 Inch	1.0 Inch	1.5 Inch
Steam	0.75	62.11	53.99	42.87
	1.00	61.86	55.59	43.06
	1.40	63.31	54.94	44.91
Oven	0.75	65.06	56.30	43.71
	1.00	62.51	52.99	42.82
	1.40	63.62	53.89	42.87

Table 18. Cushioning characteristics of the latex foam at 1.40 phr of potassium oleate.

Vulcanization	Calcium carbonate (phr)	G Value
Steam	0	44.87
	10	46.57
	20	45.37
	30	44.61
Oven	0	42.88
	10	45.31
	20	43.59
	30	43.69

Table 19. Cushioning characteristics as a function of thickness.

Vulcanization	Potassium oleate (phr)	G Value		
		0.5 Inch	1.0 Inch	1.5 Inch
Steam	0.75	62.11	54.13	42.87
	1.00	61.86	55.59	43.50
	1.40	62.69	54.94	44.87
Oven	0.75	65.06	56.30	43.77
	1.00	62.51	53.06	42.74
	1.40	63.62	53.87	42.88
Polystyrene foam		47.34	38.05	35.07

Table 20. Percent compression set as the function of potassium oleate.

Vulcanization	Potassium oleate (phr)	t_0	t_1	Compression set (%)	Average
Steam	0.75	17.7	15.6	11.9	12.7
		18.1	15.5	14.4	
		17.8	15.7	11.8	
	1.00	17.0	15.2	10.6	9.9
		16.9	15.1	10.7	
		16.7	15.3	8.4	
		16.5	15.0	9.1	
		17.0	16.0	5.9	
	1.40	16.5	14.8	10.3	8.4
Oven	0.75	18.1	16.3	9.9	8.7
		18.0	16.6	7.8	
		18.0	16.5	8.3	
	1.00	17.0	15.5	8.8	7.8
		16.7	15.4	7.8	
		16.3	15.2	6.7	
		16.6	15.5	6.6	
		16.5	15.5	6.1	
	1.40	16.5	15.5	6.1	6.8
		16.8	15.5	7.7	

Table 21. Percent compression set as the function of calcium carbonate.

Vulcanization	Calcium carbonate (phr)	t_0	t_1	Compression set (%)	Average		
Steam	10	17.2	14.0	18.6	18.6		
		17.2	14.0	18.6			
		17.2	14.0	18.6			
		17.4	14.5	16.7			
	20	17.4	14.5	16.7	16.7		
		17.4	14.5	16.7			
		16.6	14.0	15.7			
		30	16.6	14.0		15.7	15.7
			16.6	14.0		15.7	
			16.6	14.0		15.7	
Oven	10	11.5	12.8	12.8	12.8		
		11.4	12.9	12.9			
		11.4	12.7	12.7			
		12.5	12.5	12.5			
	20	12.7	12.7	12.7	12.6		
		12.6	12.6	12.6			
		12.2	12.2	12.2			
		30	12.2	12.2		12.2	12.2
			12.2	12.2		12.2	
			12.2	12.2		12.2	

Table 22. Percent volume ratio of latex foam and polystyrene foam at 0.5 inch-thick.

Vulcanization	Potassium oleate (phr)	Volume (cm³)	Volume ratio (%)	G Value
Steam	0.75	432.6	2.0	62.11
		432.6	2.1	62.07
		432.6	2.2	61.81
		481.5	2.2	61.86
	1.00	481.5	2.3	61.74
		481.5	2.4	61.52
		485.3	2.2	63.31
	1.40	485.3	2.3	63.19
		485.3	2.4	63.09
		Oven	0.75	475.0
475.0	2.3			64.95
475.0	2.4			64.90
494.7	2.2			62.51
1.00	494.7		2.4	62.39
	494.7		2.5	62.08
	472.6		2.1	63.62
1.40	472.6		2.3	63.52
	472.6		2.4	63.44
	Polystyrene foam		691.6	2.2
691.6		2.2	45.54	
691.6		2.3	44.09	

Table 23. Percent volume ratio of latex faom and polystyrene foam at 1.0 inch-thick.

Vulcanization	Potassium oleate (phr)	Volume (cm³)	Volume ratio (%)	G Value
Steam	0.75	955.5	4.3	53.99
		955.5	4.6	53.72
		955.5	4.8	53.59
	1.00	961.1	4.4	55.59
		961.1	4.6	55.11
		961.1	4.8	54.83
		955.5	4.3	53.99
	1.40	955.5	4.6	53.72
		955.5	4.8	53.59
		957.4	4.3	56.30
Oven	0.75	957.4	4.6	56.07
		957.4	4.8	55.32
		983.8	4.5	52.99
	1.00	983.8	4.7	52.88
		983.8	4.9	52.69
		981.9	4.4	53.89
	1.40	981.9	4.7	53.71
		981.9	4.9	53.52
Polystyrene foam		1330.0	4.2	38.05
		1330.0	4.3	37.68
		1330.0	4.4	36.85

Table 24. Percent volume ratio of latex foam and polystyrene foam at 1.5 inch-thick.

Vulcanization	Potassium oleate (phr)	Volume (cm ³)	Volume ratio (%)	G Value
Steam	0.75	1455.8	6.6	42.87
		1455.8	6.9	42.42
		1455.8	7.3	42.36
	1.00	1441.7	6.5	43.06
		1441.7	6.9	42.95
		1441.7	7.2	42.67
		1455.8	6.6	42.87
	1.40	1455.8	6.9	42.42
		1455.8	7.3	42.36
Oven	0.75	1413.7	6.4	43.71
		1413.7	6.7	43.56
		1413.7	7.1	43.33
	1.00	1508.8	6.8	42.82
		1508.8	7.2	42.65
		1508.8	7.5	42.38
		1491.2	6.8	42.87
	1.40	1491.2	7.1	42.63
		1491.2	7.5	42.49
Polystyrene foam		2128.0	6.7	35.07
		2128.0	6.9	34.83
		2128.0	7.1	33.23

Table 25. Definitions of latex foam formulation.

Formulation	Vulcanization	Potassium oleate (phr)	Calcium carbonate (phr)
Oven 0.75 K-O	Oven	0.75	-
Oven 1.00 K-O	Oven	1.00	-
Oven 1.40 K-O	Oven	1.40	-
Steam 0.75 K-O	Steam	0.75	-
Steam 1.00 K-O	Steam	1.00	-
Steam 1.40 K-O	Steam	1.40	-
Oven 1.40 K-O 10 CaCO ₃	Oven	1.40	10
Oven 1.40 K-O 20 CaCO ₃	Oven	1.40	20
Oven 1.40 K-O 30 CaCO ₃	Oven	1.40	30
Steam 1.40 K-O 10 CaCO ₃	Steam	1.40	10
Steam 1.40 K-O 20 CaCO ₃	Steam	1.40	20
Steam 1.40 K-O 30 CaCO ₃	Steam	1.40	30

ตารางสถิติ ของยางฟองน้ำที่เตรียมจากสูตรที่เติมโพแทสเซียมโอเลอีนปริมาณที่แตกต่างกัน

Tables 26. Test no. Used for analyze of variation of latex foam.

Test no.	Potassium oleate (phr)	Vulcanization
1	1.40	Steam
2	1.00	Steam
3	0.75	Steam
4	1.40	Oven
5	1.00	Oven
6	0.75	Oven

Table 27. ANOVA of density of latex foam as a function of potassium oleate.

ANOVA

Density

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.006	5	.001	231.726	.000
Within Groups	.000	12	.000		
Total	.006	17			

Table 28. ANOVA of percent shrinkage at center direction as a function of potassium oleate.

ANOVA

%Shrinkage (center)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	148.978	5	29.796	6.230	.005
Within Groups	57.387	12	4.782		
Total	206.364	17			

Table 29. ANOVA variation of percent shrinkage at edges direction on potassium oleate.

ANOVA

%Shrinkage (edges)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	22.444	5	4.489	25.250	.000
Within Groups	2.133	12	.178		
Total	24.578	17			

Table 30. ANOVA of percent shrinkage at lateral direction as a function of potassium oleate.

ANOVA

%Shrinkage (lateral)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	39.324	5	7.865	73.733	.000
Within Groups	1.280	12	.107		
Total	40.604	17			

Table 31. ANOVA of percent compression set as a function of potassium oleate.

ANOVA

%Compression set

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	64.363	5	12.873	7.889	.002
Within Groups	19.580	12	1.632		
Total	83.943	17			

Table 32. Test no. used for analyze of variation of G value as a function of potassium oleate.

Test no.	Potassium oleate (phr)	Thickness (Inch)	Vulcanization	G Value
1	1.4	1.5	Oven	42.8764 ^a
2	1.4	1.5	Steam	44.8739 ^b
3	1.4	1.0	Oven	53.8747 ^{cd}
4	1.4	1.0	Steam	54.9387 ^{def}
5	1.4	0.5	Oven	63.6207 ^{hi}
6	1.4	0.5	Steam	62.6914 ^{gh}
7	1.0	1.5	Oven	42.7433 ^a
8	1.0	1.5	Steam	43.0505 ^a
9	1.0	1.0	Oven	53.0645 ^c
10	1.0	1.0	Steam	55.5900 ^{ef}
11	1.0	0.5	Oven	62.5067 ^{gh}
12	1.0	0.5	Steam	61.8573 ^g
13	0.75	1.5	Oven	43.7695 ^{ab}
14	0.75	1.5	Steam	42.8679 ^a
15	0.75	1.0	Oven	56.2958 ^f
16	0.75	1.0	Steam	54.1274 ^{cde}
17	0.75	0.5	Oven	65.0587 ^j
18	0.75	0.5	Steam	62.1080 ^{gh}

Table 33. ANOVA of G value as a function of potassium oleate.

ANOVA

G Value					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	23697.917	17	1393.995	257.346	.000
Within Groups	1868.801	345	5.417		
Total	25566.718	362			

ตารางสถิติ ของยางฟองน้ำที่เตรียมจากสูตรที่เติมโพแทสเซียมโอเลต และแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่แตกต่างกัน

Table 34. Test no. Used for analyze of variation of latex foam as a function of calcium carbonate.

Test no.	Potassium oleate (phr)	Calcium carbonate (phr)	Vulcanization
1	1.40	0	Steam
2	1.40	10	Steam
3	1.40	20	Steam
4	1.40	30	Steam
5	1.40	0	Oven
6	1.40	10	Oven
7	1.40	20	Oven
8	1.40	30	Oven

Table 35. ANOVA of density of latex foam as a function of calcium carbonate.

ANOVA

Density					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.029	7	.004	104.718	.000
Within Groups	.001	16	.000		
Total	.030	23			

Table 36. ANOVA of percent compression set as a function of calcium carbonate.

ANOVA

% Compression set

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	337.413	7	48.202	65.767	.000
Within Groups	11.727	16	.733		
Total	349.140	23			

Table 37. ANOVA of percent shrinkage at center direction as a function of calcium carbonate.

ANOVA

% Shrinkage (center)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	499.200	7	71.314	26.676	.000
Within Groups	42.773	16	2.673		
Total	541.973	23			

Table 38. ANOVA of percent shrinkage at edges direction as a function of calcium carbonate.

ANOVA

% Shrinkage (edges)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	121.647	7	17.378	21.022	.000
Within Groups	13.227	16	.827		
Total	134.873	23			

Table 39. ANOVA of percent shrinkage at lateral direction as a function of calcium carbonate.

ANOVA

% Shrinkage (lateral)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	119.638	7	17.091	155.374	.000
Within Groups	1.760	16	.110		
Total	121.398	23			

Table 40. Test no. Used for analyze variation of G value.

Test no.	Potassium oleate (phr)	Calcium carbonate (phr)	Vulcanization
1	1.40	10	Oven
2	1.40	20	Oven
3	1.40	30	Oven
4	1.40	10	Steam
5	1.40	20	Steam
6	1.40	30	Steam

Table 41. ANOVA of G value as a function of calcium carbonate

ANOVA

G Value					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	134.061	5	26.812	10.157	.000
Within Groups	322.050	122	2.640		
Total	456.110	127			

ภาคผนวก ข ภาพถ่ายโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำ

1. ภาพถ่าย SEM ของยางฟองน้ำความหนาแน่นแตกต่างกันที่กำลังขยาย 60 เท่า

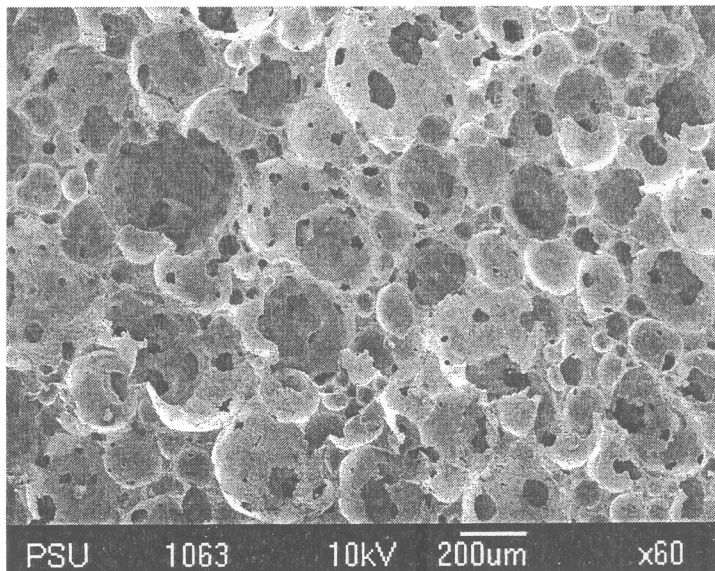


Figure 94. SEM of latex foam density of 0.223 g/cm³.

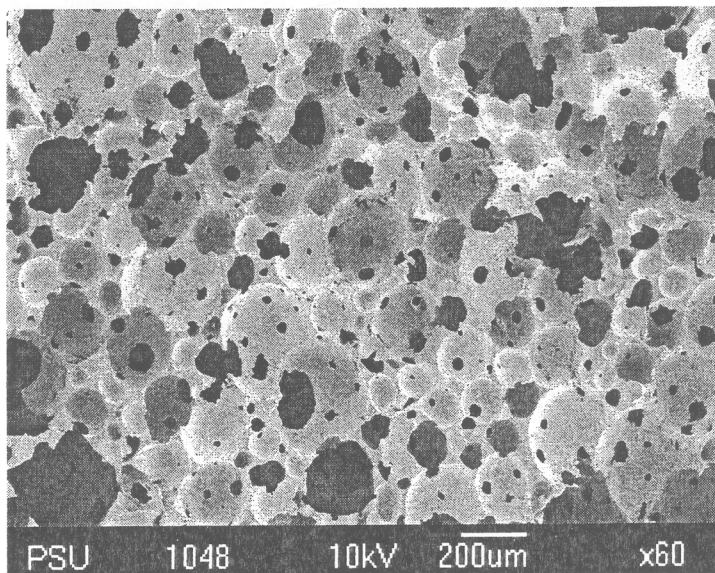


Figure 95. SEM of latex foam density of 0.207 g/cm³.

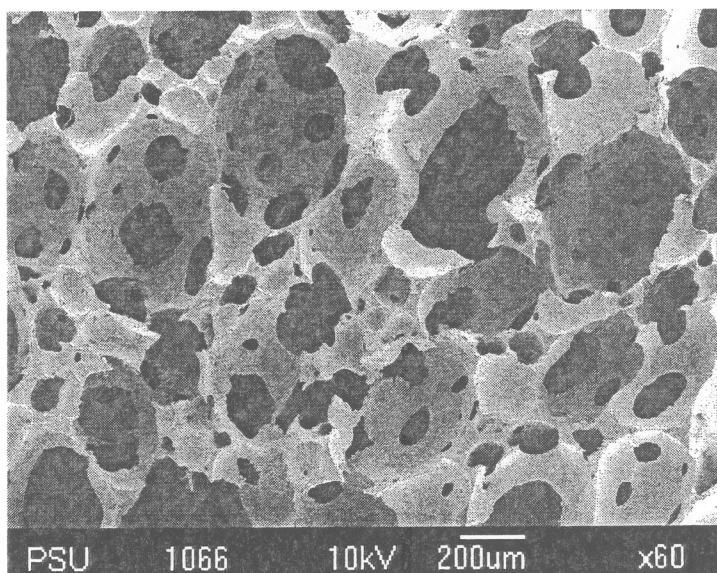


Figure 96. SEM of latex foam density of 0.175 g/cm^3 .

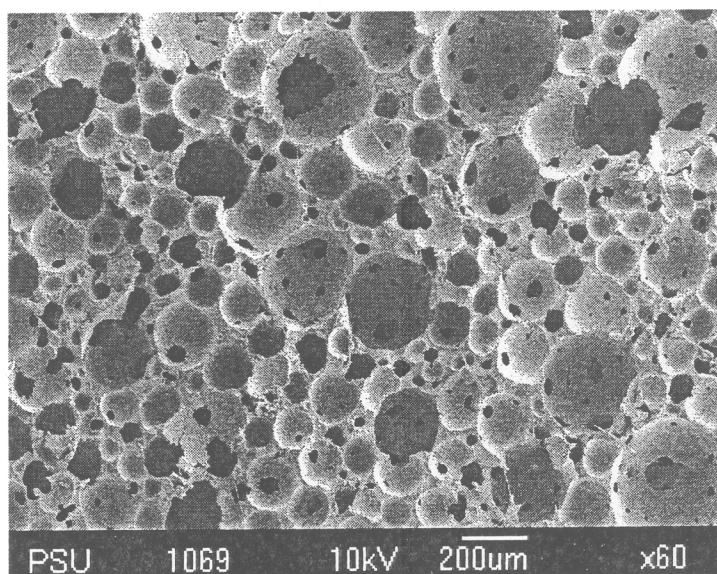


Figure 97. SEM of latex foam density of 0.236 g/cm^3 .

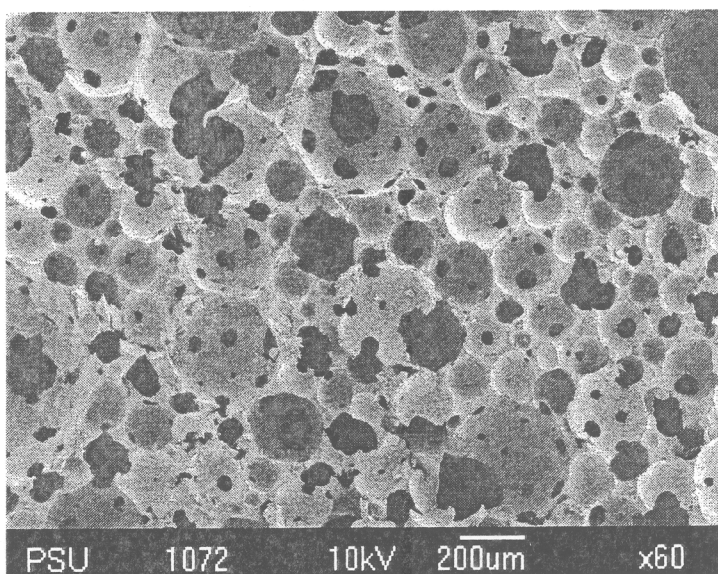


Figure 98. SEM of latex foam density of 0.217 g/cm^3 .

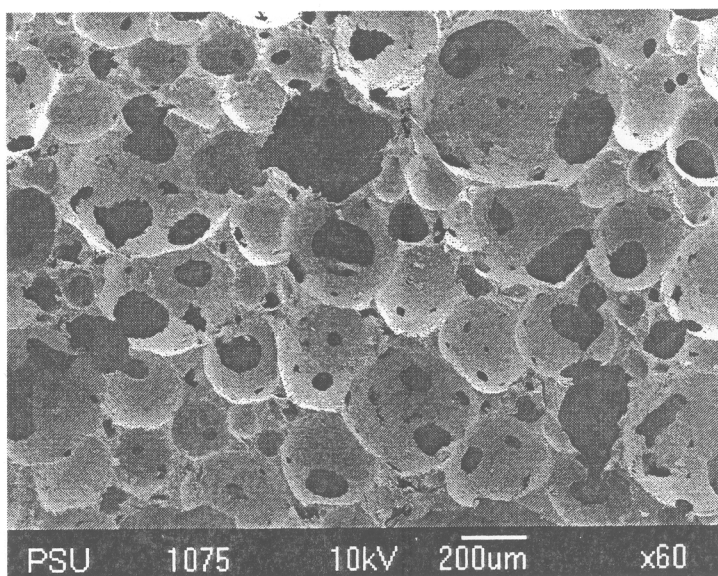


Figure 99. SEM of latex foam density of 0.177 g/cm^3 .

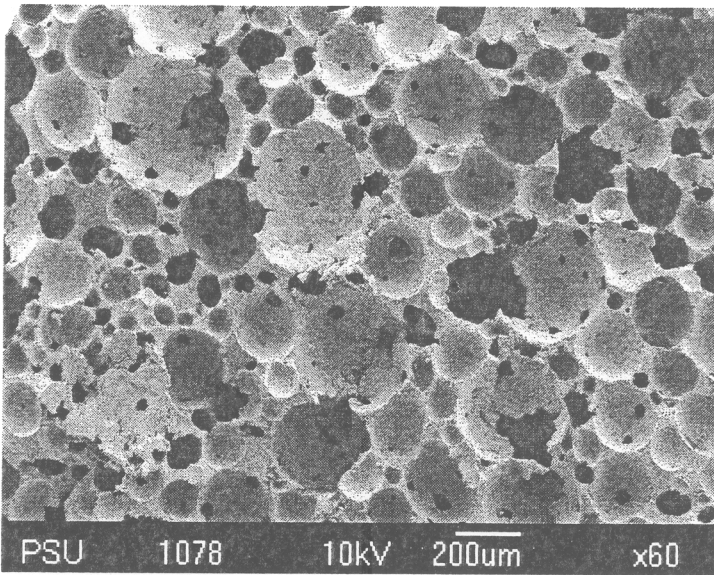


Figure 100. SEM of latex foam density of 0.237 g/cm^3 .

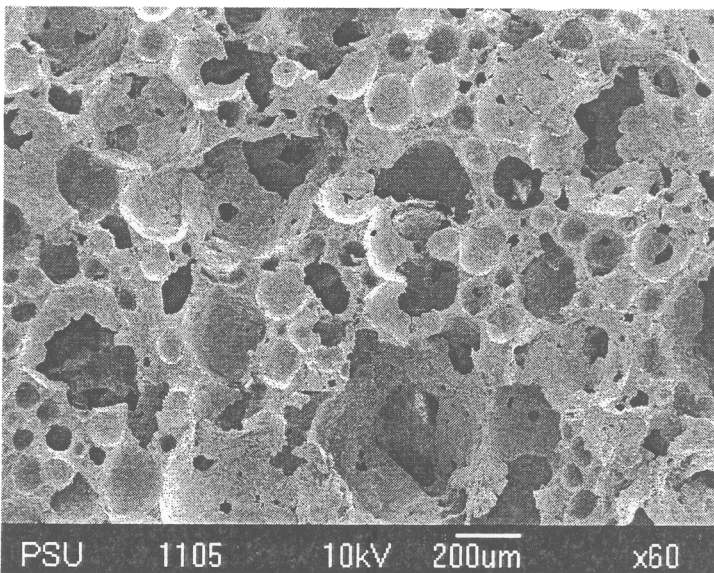


Figure 101. SEM of latex foam density of 0.256 g/cm^3 .

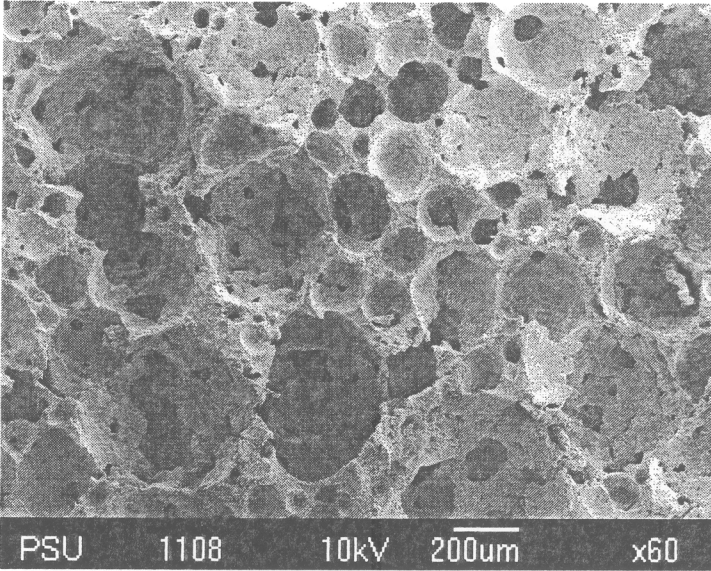


Figure 102. SEM of latex foam density of 0.265 g/cm^3 .

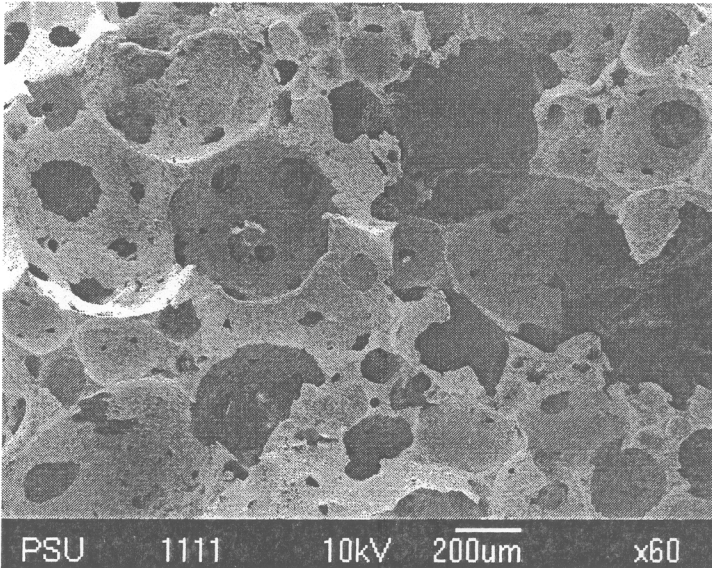


Figure 103. SEM of latex foam density of 0.182 g/cm^3 .

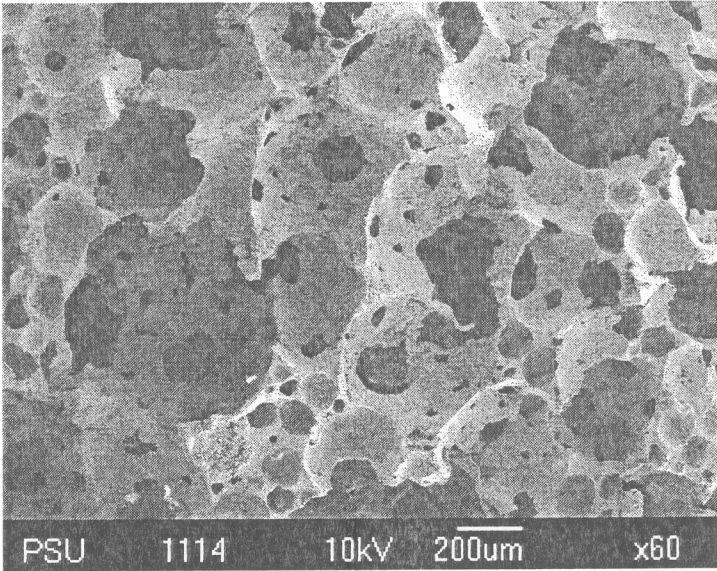


Figure 104. SEM of latex foam density of 0.185 g/cm³.

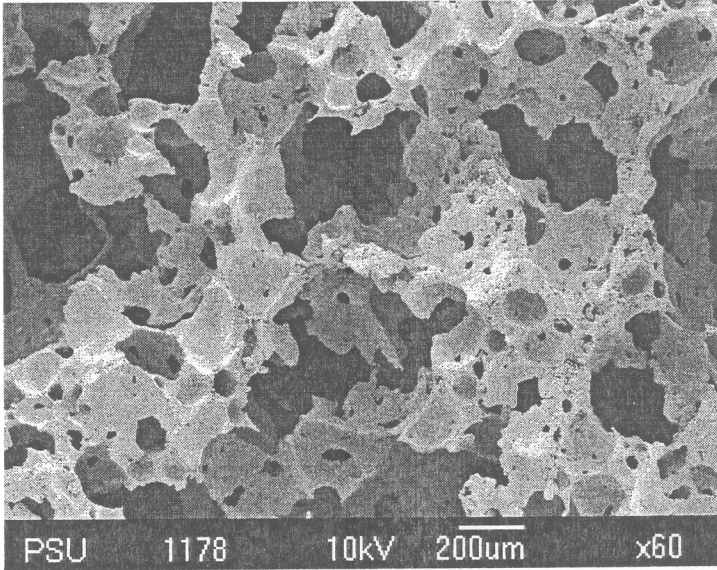


Figure 105. SEM of latex foam density of 0.201 g/cm³.

2. ภาพถ่าย SEM ของยางฟองน้ำความหนาแน่นแตกต่างกันที่กำลังขยาย 100 เท่า

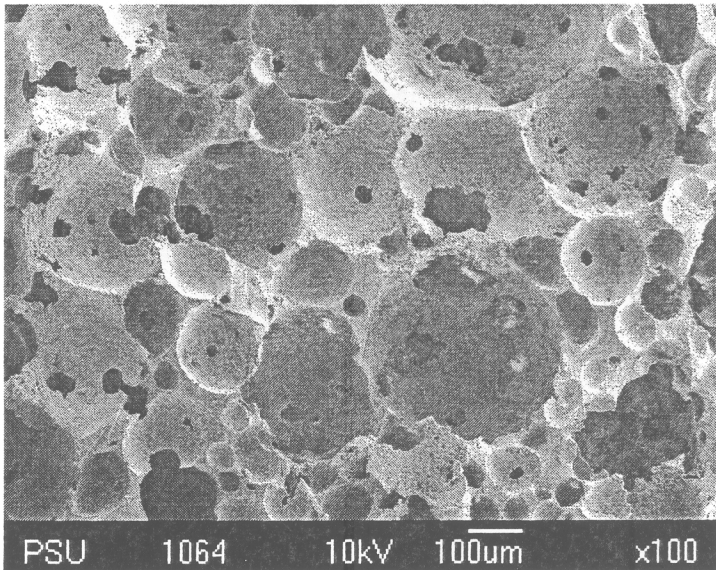


Figure 106. SEM of latex foam density of 0.223 g/cm³.

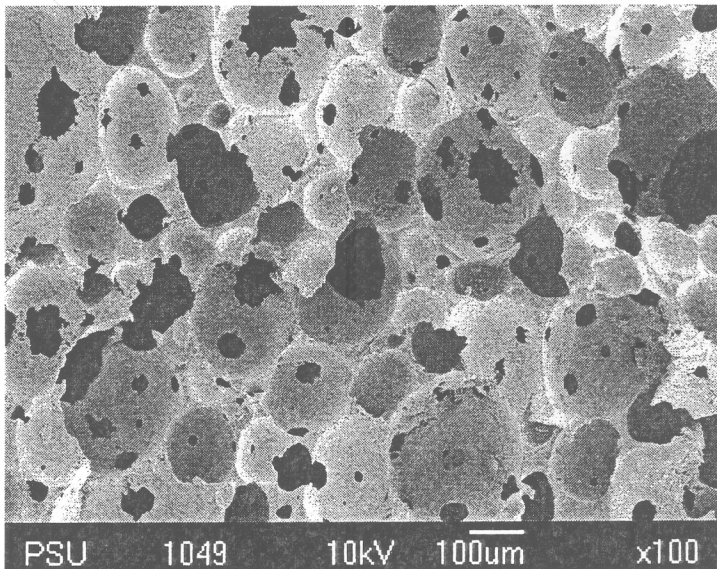


Figure 107. SEM of latex foam density of 0.207 g/cm³.

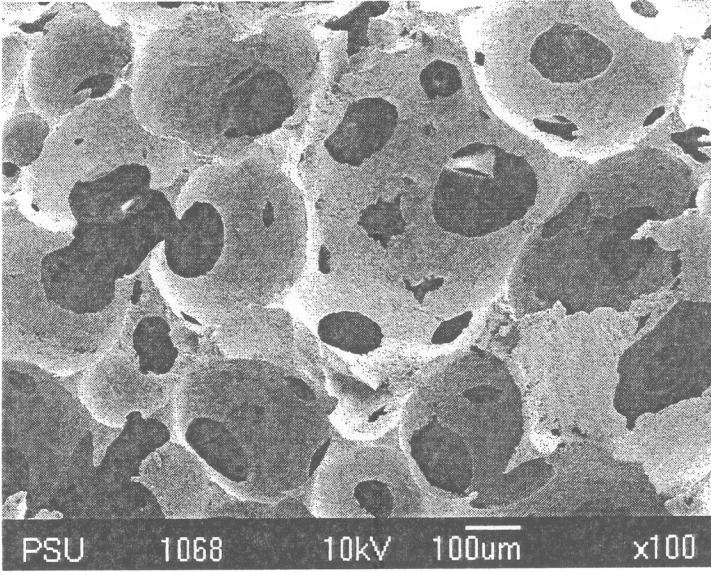


Figure 108. SEM of latex foam density of 0.175 g/cm^3 .

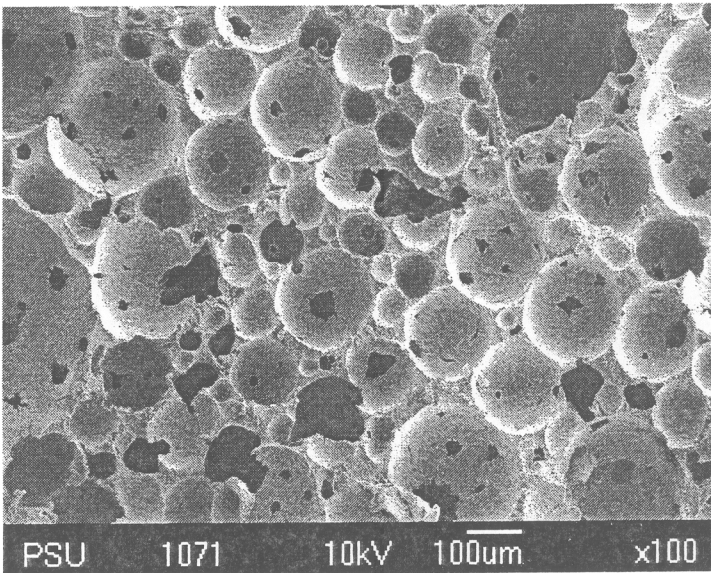


Figure 109. SEM of latex foam density of 0.236 g/cm^3 .

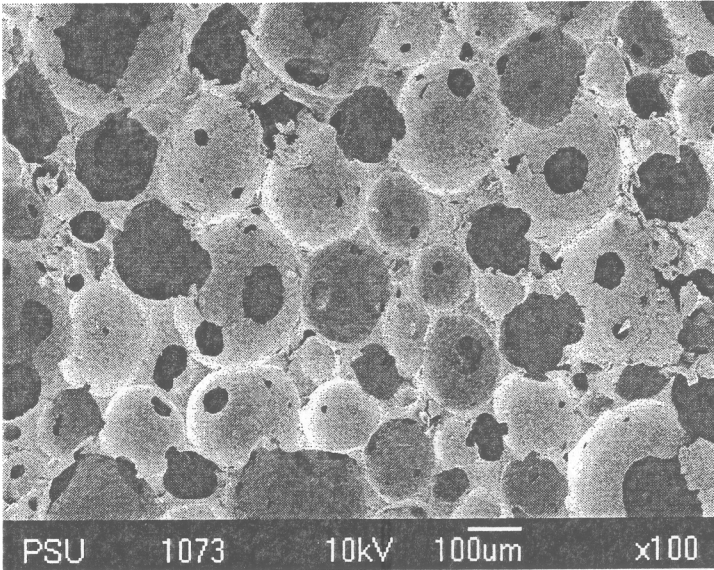


Figure 110. SEM of latex foam density of 0.217 g/cm³.

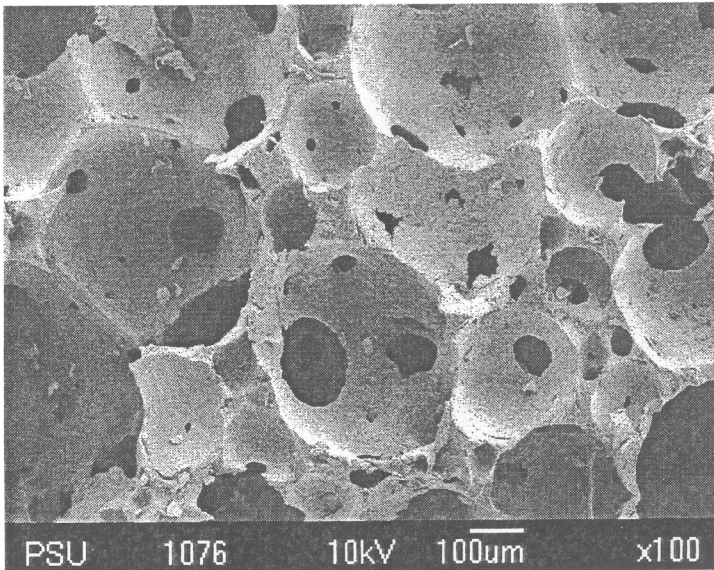


Figure 111. SEM of latex foam density of 0.177 g/cm³.

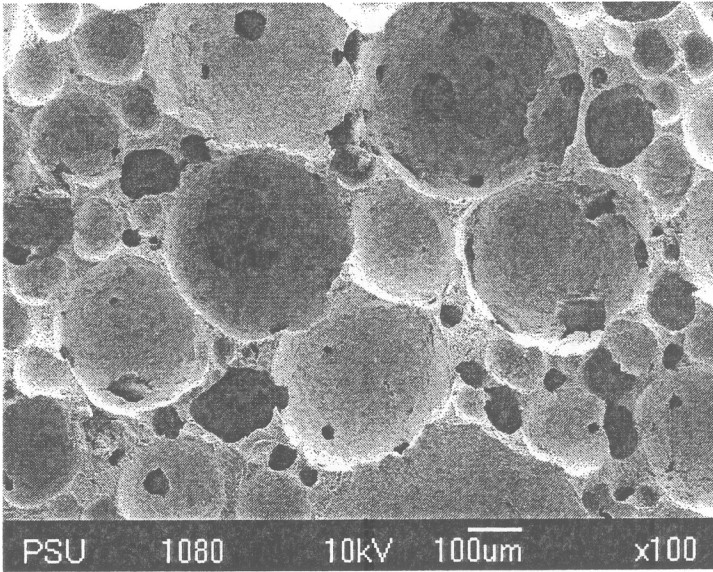


Figure 112. SEM of latex foam density of 0.237 g/cm^3 .

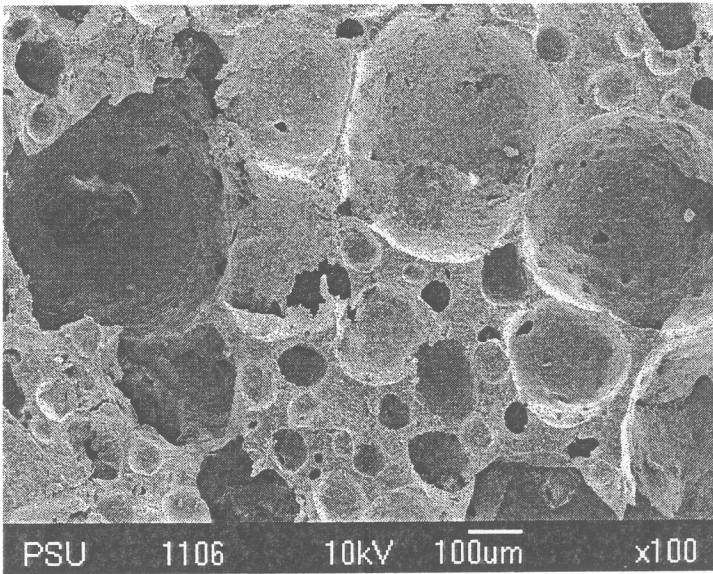


Figure 113. SEM of latex foam density of 0.256 g/cm^3 .

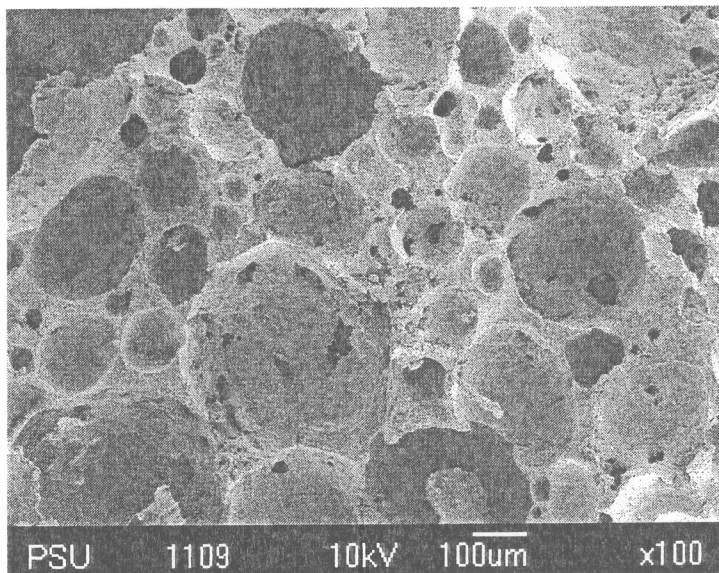


Figure 114. SEM of latex foam density of 0.265 g/cm³.

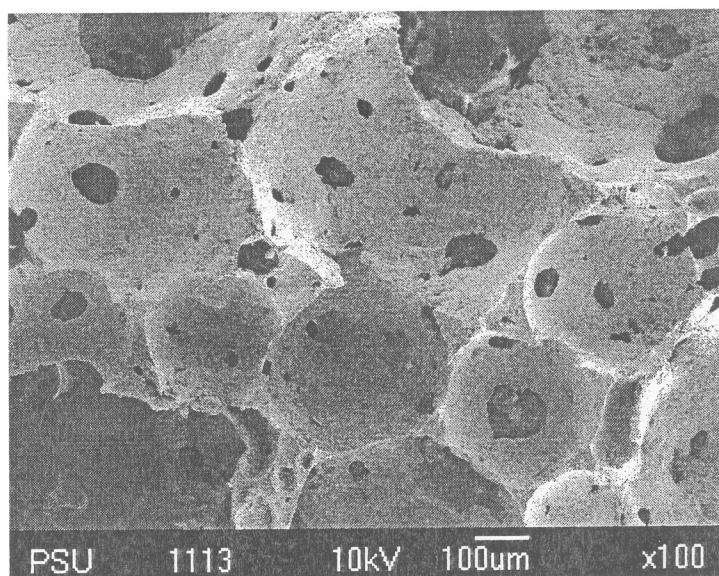


Figure 115. SEM of latex foam density of 0.182 g/cm³.

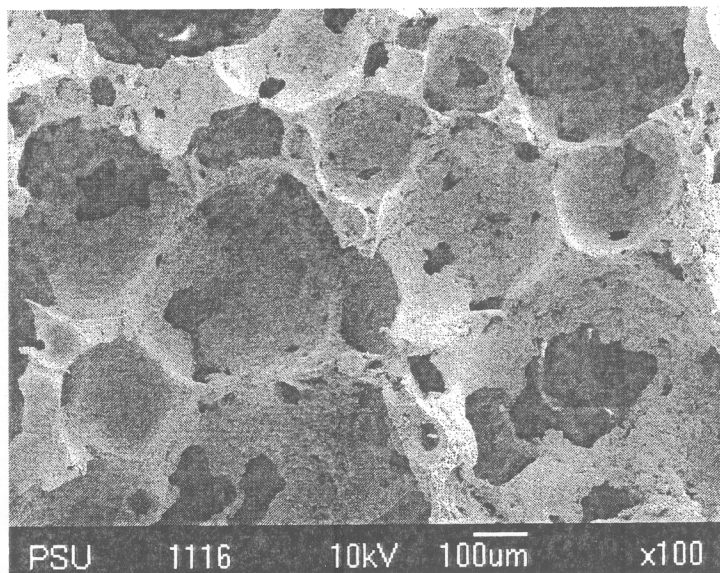


Figure 116. SEM of latex foam density of 0.185 g/cm^3 .

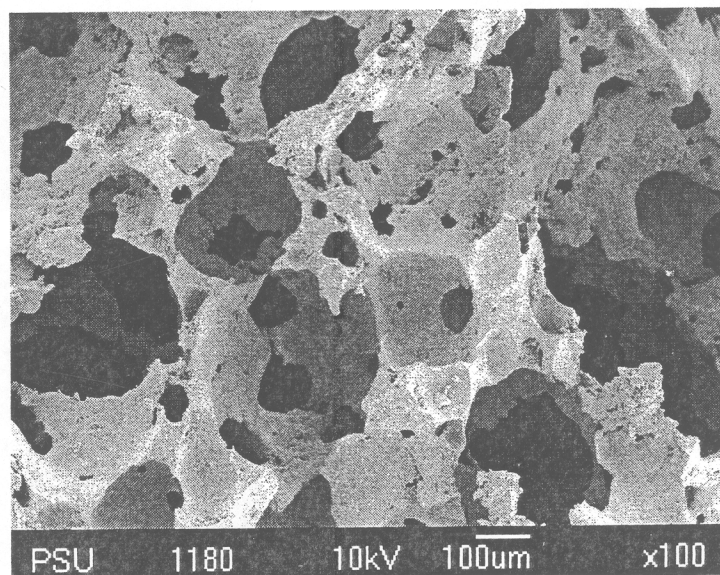


Figure 117. SEM of latex foam density of 0.201 g/cm^3 .

ภาคผนวก ค ภาพถ่ายยางฟองน้ำที่เตรียมขึ้น

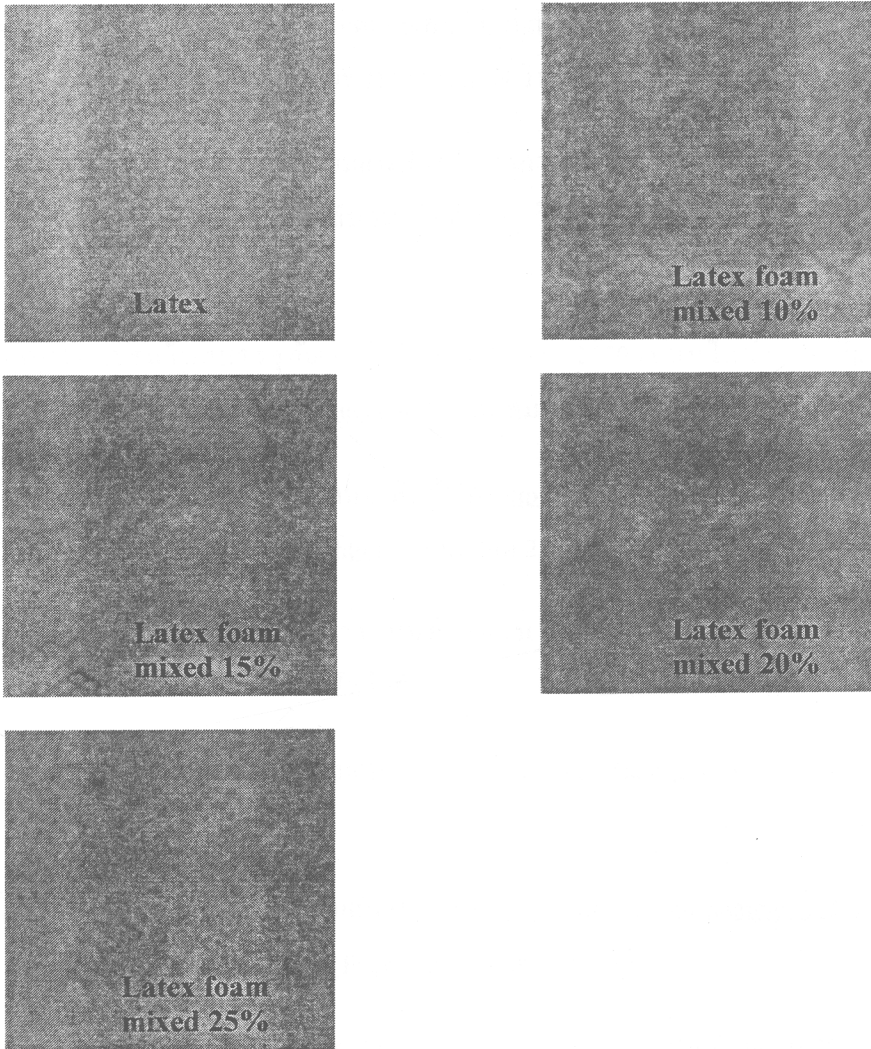


Figure 118. Latex foam mixed sawdust.

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2550. (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://www.doa.go.th> (25 มิถุนายน 2550)

นนทศักดิ์ สมเกื้อ. 2523. ผลของสารเคมีต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยางพองน้ำ. วิทยานิพนธ์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เบญจ ทองนวลจันทร์. 2546. การเตรียมยางพองน้ำจากการเบรนค้ำระหว่างน้ำยางธรรมชาติกับน้ำ
ยางสังเคราะห์อะครีโนไตรลบีวทาไอดีน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต.
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

บริษัท อุตสาหกรรมไทยบรรจุภัณฑ์ จำกัด (มหาชน). 2550 (ออนไลน์). สืบค้นจาก:
<http://www.tipack.com/th/product.php> (15 มีนาคม 2550)

แผ่นพลาสติกอัดอากาศ. 2550. (ออนไลน์). สืบค้นจาก: [http://www.alibaba.com/catalog/11419314/
Air_Bubble_Paded_Envelope.html](http://www.alibaba.com/catalog/11419314/Air_Bubble_Paded_Envelope.html) (15 มีนาคม 2550)

พงษ์ธร แซ่อู๋. 2548. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

โพลีโอสไตรีน. 2550 (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene>
(15 มีนาคม 2550)

โพลีเอทิลีน. 2550 (ออนไลน์). สืบค้นจาก: [http://www.alibaba.com/catalog/10953710/
Expanded_Polyethylene_EPE_Foam.html](http://www.alibaba.com/catalog/10953710/Expanded_Polyethylene_EPE_Foam.html) (15 มีนาคม 2550)

ยางพารา. 2550 (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://www.rubberthai.com> (25 มิถุนายน 2550)

วารกรณ์ ขจรไชยกูล. 2548. อุตสาหกรรมการผลิตยางธรรมชาติ. ศูนย์วิจัยยางสงขลา สถาบันวิจัย
ยาง กรมวิชาการเกษตร.

สุจิตรา คำป้อก. 2549. การศึกษากระบวนการขึ้นรูปและสมบัติของโพลียางธรรมชาติความ
หนาแน่นต่ำ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- สุรศักดิ์ เทพทอง. 2545. อิทธิพลของสารก่อเจลเสริมต่อการหดตัวและสมบัติของฟองน้ำยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศุภชัย ภัสซัพเพชญ์ และคณะ. 2549. คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง. ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศูนย์วิจัยยางสงขลา. 2546. การทำเบาะยางฟองน้ำ. ศูนย์วิจัยยางสงขลา สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- Arif, S., Burgess, G., Narayan, R. and Harte, B. 2007. Evaluation of Biodegradable Foam for Protective Packaging Application. *Packag. Technol. Sci.* DOI: 10. 1002/pts.770.
- ASTM D 1055-90. 1994. Standard Specifications for Flexible Cellular Materials Latex Foam.
- ASTM D 3574-95. 1997. Standard Methods of testing Flexible Cellular Materials-Slab, Bonded, And Moulded Urethane Foams.
- ASTM D 4168. 1998. Standard Test Methods For Transmitted Characteristics of Foam- in- Place Cushioning Materials.
- ASTM D4169. 1998. Standard Practice for Performance Testing Shipping Containers and Systems.
- Beg, M. D. H. 2007. The improvement of interfacial bonding, weathering and recycling of wood fibre reinforced polypropylene composites, The University of Waikato. Hamilton.
- Blackley, D.C. 1997. Polymer Latices Science and Technology. *In Latex Foam Rubber*. Vol. III. 2nd ed. P. 283. Chapman & Hall. London.
- Bledzki, A. K., and Gassan, J. 1999. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*. 24: 221–274.
- Burgess, G. 2002. Course Pack of Shock and Vibration. School of Packaging, Michigan State University. USA.

- Calvert, K. O. 1982. Polymer Latices and Their Application. App Sci: P. 207-209
- El-Eraki, M.H., El-Lawindy, A.M.Y., Hassan, H.H. and Mahmoud, W.E. 2006. The physical properties of pressure sensitive rubber composites. *In* Polymer Degradation and Stability 91: P. 1417-1423.
- El-Lawindy, A.M.Y., Eikade, K.A., Mahmoud, W.E. and Hassan, H.H. 2002. Physical studies of foamed reinforced rubber composites. Part 1. *In* Mechanical properties of foamed ethylene-propylene-diene terpolymer and nitrile-butadiene rubber composites. Polym Int.51: P. 601-605.
- Hanlon, J.F., Kelsey, R.J. and Forcinio, H.E. 1998. Cushioning. *In* Handbook of Package. Technomic publication. Pennsylvania: P.513-536
- Klumpner, D. and Frisch, K. 1991. Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology. Hanser Publishers. New York: P. 317-318
- Lin, G., Zhang, X.J., Liu., Zhang, J.C., Chen, Q.M. and Zhang, L.Q. 2004. Study on microstructure and mechanical properties relationship of short fibers/rubber foam composites. J. European Polymer. 40: P. 1733-1742.
- McKeever, D. B., and FALK, R. H. 2004. Woody residues and solid waste wood available for recovery in the United States, 2002. In Proceeding of Management of recovered wood recycling, bioenergy and other options, C. Gallis, (Ed.) Thessaloniki. 22-24 April 2004. P. 307-316.
- Morton, M. 1995. Rubber Technology. 3rd ed. Van Nostrand Reinhold. New York: P. 547-549.
- Nasner, A.I. and Meinecke, E.A. 1996. Porosity in rubber (review). Rubber Chem Technol. 68(3): P. 425-431.
- Nayak, N.C. and Tripathy, D.K. 2002. Effect of aluminium silicate filler on morphology and physical properties of closed-cell microcellular ethylene-octene copolymer. J. Mater Sci. 37: P. 1347-54.

- NR Technical Bulletin. 1996. An Introduction to Latex Foam Manufacture. Natural Rubber Producers Research Association: P. 3-4.
- Paine, A.F. 1991. The Packaging User's Handbook. Blackie and Son Ltd: P. 565-570.
- Shey, J., Imam, S.H., Glenn, G.M. and Orts, W.J. 2006. Properties of baked starch foam with natural rubber latex. Industrial Crops and products. 24: P. 34-40.
- Sombatsompop, N., and Chaochanchaikul, K. 2004. Effect of moisture content on mechanical properties, thermal and structural stability and extrudate texture of poly(vinyl chloride)/wood sawdust composites. J. Polym Int. 53: 1210-1218.
- Vinatoru, M.A., Radziewicz, C.J. and Morrow, D.R. 1979. A test method for the performance of foam-in-place packaging. Packaging Science and Engineering Program Rutgers. The State University of New Jersey Piscataway. New Jersey.
- Zamora, A. 2008. Carbohydrates - Chemical structure (Online). Available: <http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates2.html>. (5 January 2008).