บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 สมบัติของซิลิกาจากแกลบ

ตารางที่ 4.1 สมบัติของซิลิกาจากแกลบและซิลิกาที่ใช้ในทางการค้า (Hi-sil 255) [1]

สมบัติ	Hi-sil 255	ซิลิกาจากแกลบ
ข้อมูลทางกายภาพ		
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	170 ± 15	182
pH	6.8 ± 0.4	5.7
% ความชื้น (2 ชม./ 105 องศาเซลเซียส)	7.5	0.6
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.95	2.20
bulk density (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.240 ± 0.025	0.277
ความถ่วงจำเพาะ	1.95	2.20
การดูดซึมน้ำมัน (กรัมต่อกรัม)	1.90	1.92
dustiness index	1.6	1.177
องค์ประกอบทางเคมี		
ซิลิกา (SiO_2) %	มากกว่า 88	99.6
Al_2O_3 %	น้อยกว่า 0.5	0.050
Fe_2O_3 %	น้อยกว่า 0.1	น้อยกว่า 0.001
Na_2SO_4 %	น้อยกว่า 2.0	-

จากตารางที่ 4.1 ค่าที่น่าสนใจ คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของซิลิกาซึ่งซิลิกาจากแกลบมีค่าสูงกว่าทั้งนี้เนื่องมาจากซิลิกาจากแกลบมีความเป็นรูพรุนมากกว่า สำหรับซิลิกาจากแกลบอาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่านี้ได้มากกว่า 200 ตารางเมตรต่อกรัม โดยขึ้นกับวิธีการผลิต นอกจากนี้ซิลิกาจากแกลบจะมีความเป็นกรด

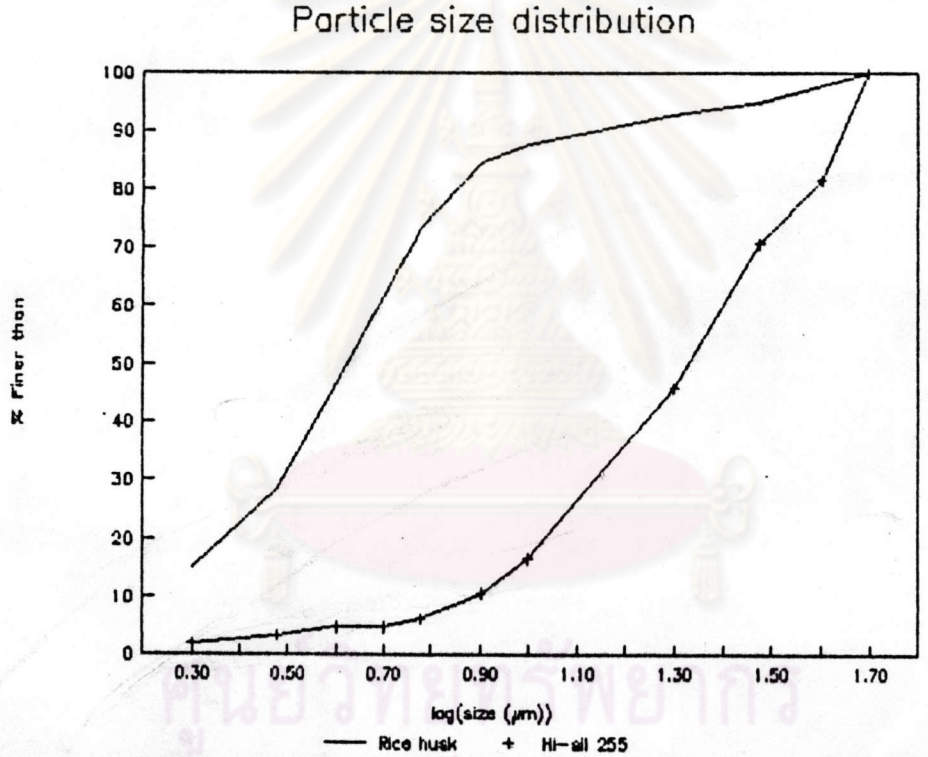
---

[1] ข้อมูลจากบริษัท พีพีจีสยามซิลิกา

สูงกว่า ส่วนการดูดซึมน้ำมันของ Hi-sil 255 จะสูงกว่า ซึ่งสมบัติในการดูดซึมน้ำมันมีส่วนเกี่ยวข้องกับการผสมเข้ากันของซิลิกากับสารประกอบยาง สำหรับองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือเปอร์เซ็นต์ของซิลิกา โดยซิลิกาจากแกลบมีเปอร์เซ็นต์ของซิลิกาสูงกว่า Hi-sil 255 มาก ซึ่งสมบัติของซิลิกาจะขึ้นกับขนาดอนุภาคมากที่สุด รองลงมา คือ ความเป็นรูพรุน ส่วนลักษณะผิวทางกายภาพและทางเคมีมีผลน้อย สำหรับการนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ

สำหรับสมบัติทางกายภาพบางอย่างของซิลิกาจากแกลบสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ ตัวอย่างเช่น การใช้สารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับยาง และการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา เป็นต้น

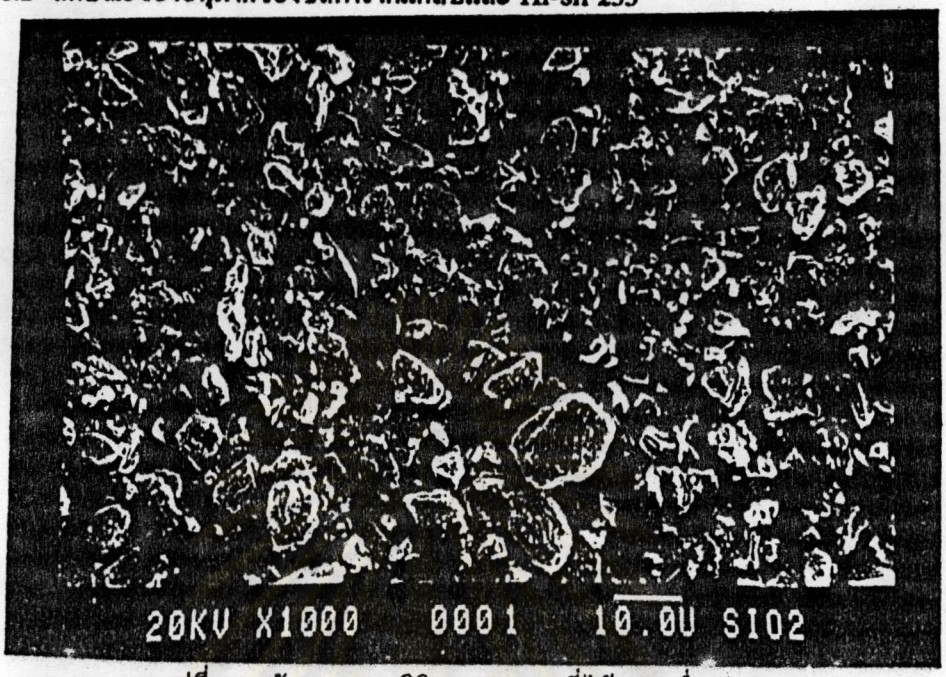
4.1.1 การกระจายขนาดอนุภาค



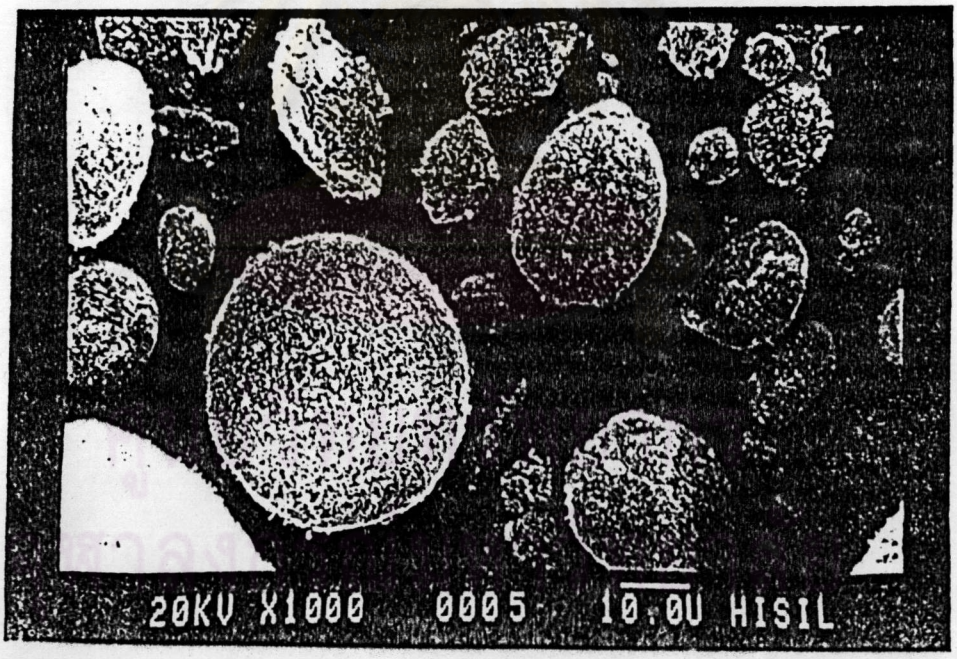
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกาจากแกลบและ Hi-sil 255

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าซิลิกาทั้งสองชนิดมีการกระจายขนาดอนุภาคกว้างมาก ตั้งแต่ประมาณ 50 ไมครอนลงมา แต่ซิลิกาจากแกลบมีอนุภาคขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมากกว่า Hi-sil 255

4.1.2 ลักษณะของอนุภาคของซิลิกาจากแกลบและ Hi-sil 255



รูปที่ 4.2 ลักษณะของซิลิกาจากแกลบที่ได้จากเครื่อง SEM



รูปที่ 4.3 ลักษณะของ Hi-sil 255 จากเครื่อง SEM

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า Hi-sil 255 มีอนุภาคที่มีลักษณะค่อนข้างกลม ส่วนซิลิกาจากแกลบอนุภาคจะไม่กลม ซึ่งการที่มีลักษณะอนุภาคต่างกันนี้เนื่องจากการสังเคราะห์ที่ต่างกัน ซึ่ง Hi-sil 255 จะได้มาจากวิธีการตกตะกอน ทำให้มีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างกลม

4.2 ความหนืดและเวลาในการคงรูปของสารประกอบยาง

4.2.1 ความหนืดของสารประกอบยาง

ค่าความหนืดของสารประกอบยางที่ได้จากเครื่อง Mooney viscometer นี้ เมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ใส่สารเสริมแรง พบว่าการที่ใส่สารเสริมแรงไม่ว่าชนิดใดก็ตามจะทำให้สารประกอบยางมีความหนืดสูงขึ้น ซึ่งค่าความหนืดนี้มีความเกี่ยวพันกับแนวโน้มของความแข็ง คือ ถ้าสารประกอบยางใดมีค่าความหนืดสูง มักมีแนวโน้มที่จะมีความแข็งสูงด้วย

จากตารางที่ 4.2 พบว่าสูตรที่มี Hi-sil 255 ความหนืดมีค่าสูงที่สุด ตามมาด้วยซิลิกาจากแกลบ และ เขม่าดำ ตามลำดับ สำหรับสูตรที่ไม่ใส่สารเสริมแรงจะมีความหนืดน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.2 ค่า Mooney viscosity ของสารประกอบยาง

สูตร สารประกอบยาง	Mooney viscosity	
	ค่าเฉลี่ย	SD
ไม่ใส่สารเสริมแรง	39.4	1.79
ซิลิกาจากแกลบ	63.4	1.27
Hi-sil 255	104.93	2.69
เขม่าดำ	49.57	0.91

4.2.2 เวลาคงรูปก่อนกำหนดของสารประกอบยาง

จากตารางที่ 4.3 ความเร็วในการคงรูปก่อนกำหนดสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้

เขม่าดำ > ไม่ใส่สารเสริมแรง > ซิลิกาจากแกลบ > Hi-sil 255

โดยสูตรที่มี Hi-sil 255 จะมีเวลาในการคงรูปก่อนกำหนดช้าที่สุด เนื่องจาก Hi-sil 255 สามารถดูดสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปที่ใช้ในสารประกอบยางได้ จึงทำให้มีเวลาในการคงรูปก่อนกำหนดช้า ซึ่งการที่มีเวลาในการคงรูปก่อนกำหนดที่ช้านี้เป็นข้อดีสำหรับสารประกอบยาง

ตารางที่ 4.3 เวลาคงรูปก่อนกำหนดของสารประกอบยาง

สูตร สารประกอบยาง	t_5		t_{35}	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ไม่ใส่สารเสริมแรง	11.95	0.85	15.18	1.06
ซิลิกาจากแกลบ	18.61	1.45	24.82	1.07
Hi-sil 255	23.20	1.73	28.73	1.57
เขม่าดำ	8.69	0.26	10.71	0.24

4.2.3 เวลาการคงรูปของสารประกอบยาง

จากการนำสารประกอบยางที่บดผสมแล้วมาทดสอบโดยเครื่อง Rheometer จากกราฟที่ได้สามารถหาค่า t_c (90) และ t_c (98) ได้ ซึ่งเป็นเวลาที่ต้องการ ในการทำให้สารประกอบยางเกิดการคงรูป ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4 (ภาคผนวก ข แสดงกราฟที่ได้จากเครื่อง Rheometer)

ตารางที่ 4.4 เวลาในการคงรูปโดยเฉลี่ยของสารประกอบยาง

สูตร สารประกอบยาง	t_c (90) (นาที)		t_c (98) (นาที)	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ไม่ใส่สารเสริมแรง	5	0.33	7.98	0.50
ซิลิกาจากแกลบ	9.89	0.46	15.50	0.38
Hi-sil 255	28.81	2.30	45.46	1.96
เขม่าดำ	5.22	0.01	7.47	0.08

เวลาในการคงรูปของสูตรที่ไม่ใส่สารเสริมแรงและสูตรที่ใส่เขม่าดำมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนสูตรที่ใส่ซิลิกาจากแกลบจะมีเวลาในการคงรูปสูงกว่า แต่สูตรที่ใส่ Hi-sil 255 จะมีเวลาในการคงรูปสูงที่สุด ซึ่งเป็นเวลาที่สูงมากเกินไป ไม่เหมาะสำหรับกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม จะทำให้เสียเวลาและสิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตมาก โดยสมบัตินี้เองเป็นข้อเสียที่ควรระวังของ Hi-sil 255 คือ ซิลิกาที่เตรียมจากการตกตะกอนและการเผาไหม้นี้ เมื่อใช้กับยางจะก่อให้เกิดการชะลอการคงรูป เนื่องจากผิวหน้าที่ไวต่อปฏิกิริยาของอนุภาคซิลิกา จะดูดซึมสารเร่งปฏิกิริยาคงรูป ทางแก้ไขสามารถทำได้โดยเพิ่มปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาคงรูป หรือใช้สารเคมีช่วยเร่งปฏิกิริยาคงรูป ได้แก่ พวกไกลคอล เช่น

DEG และ PEG เป็นต้น หรือพวกอะมีน เช่น triethanolamine เป็นต้น โดยจะใช้ประมาณ 6% ของปริมาณซิลิกาในยาง แต่อาจทำให้สมบัติยางอย่างเปลี่ยนแปลงไปได้

4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน

4.3.1 ความต้านทานแรงดึง

สูตรที่ใส่สารเสริมแรงจะมีความต้านทานแรงดึงใกล้เคียงกัน แต่สูตรที่ไม่ใส่สารเสริมแรงมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยมาก เมื่อนำไปบ่มเร่งในตู้อบแล้วนำมาทดสอบจะพบว่าสูตรที่ใส่เขม่าดำจะมีค่าลดลงมากที่สุด ส่วนสูตรที่ใส่ซิลิกาทั้งสองสูตรนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้ก่อนอบ

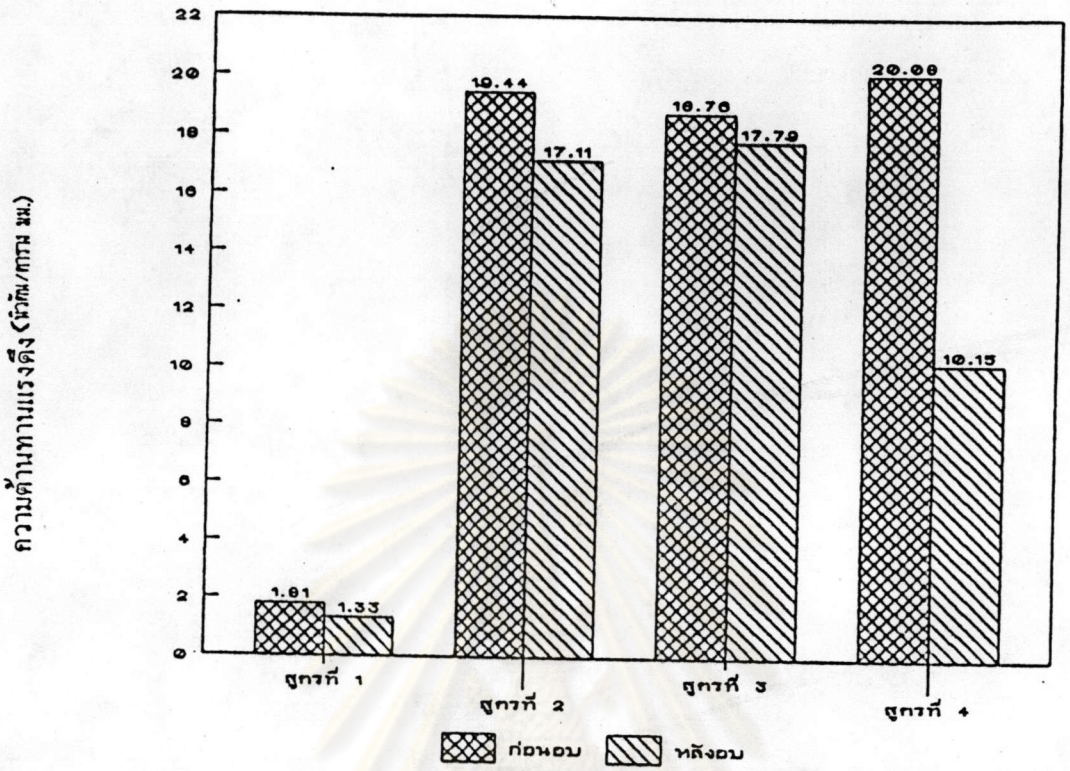
ตารางที่ 4.5 ความต้านทานแรงดึงของสารประกอบยาง

สูตร สารประกอบยาง	ความต้านทานแรงดึง (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)			
	ก่อนอบ		หลังอบ	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ไม่ใส่สารเสริมแรง	1.87	0.06	1.33	0.18
ซิลิกาจากแกลบ	19.44	0.79	17.11	0.57
Hi-sil 255	18.76	0.38	17.79	0.32
เขม่าดำ	20.08	1.50	10.15	1.06

ตารางที่ 4.6 Elongation at break

สูตร สารประกอบยาง	Elongation at break (%)			
	ก่อนอบ		หลังอบ	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ไม่ใส่สารเสริมแรง	231.44	7.68	151.60	9.54
ซิลิกาจากแกลบ	640.74	3.27	578.25	5.32
Hi-sil 255	561.77	6.12	413.58	6.76
เขม่าดำ	570.63	5.59	398.65	7.62

เปอร์เซ็นต์ที่ยืดออกจนขาดของสารประกอบยางที่มีซิลิกาเป็นสารเสริมแรงนั้นสูงที่สุดทั้งก่อนอบและหลังอบ ส่วนสูตรที่ใส่เขม่าดำนั้น หลังการบ่มเร่งในตู้อบแล้วจะมีค่าลดลงมาก



รูปที่ 4.4 ความต้านทานแรงดึงของสารประกอบยาง

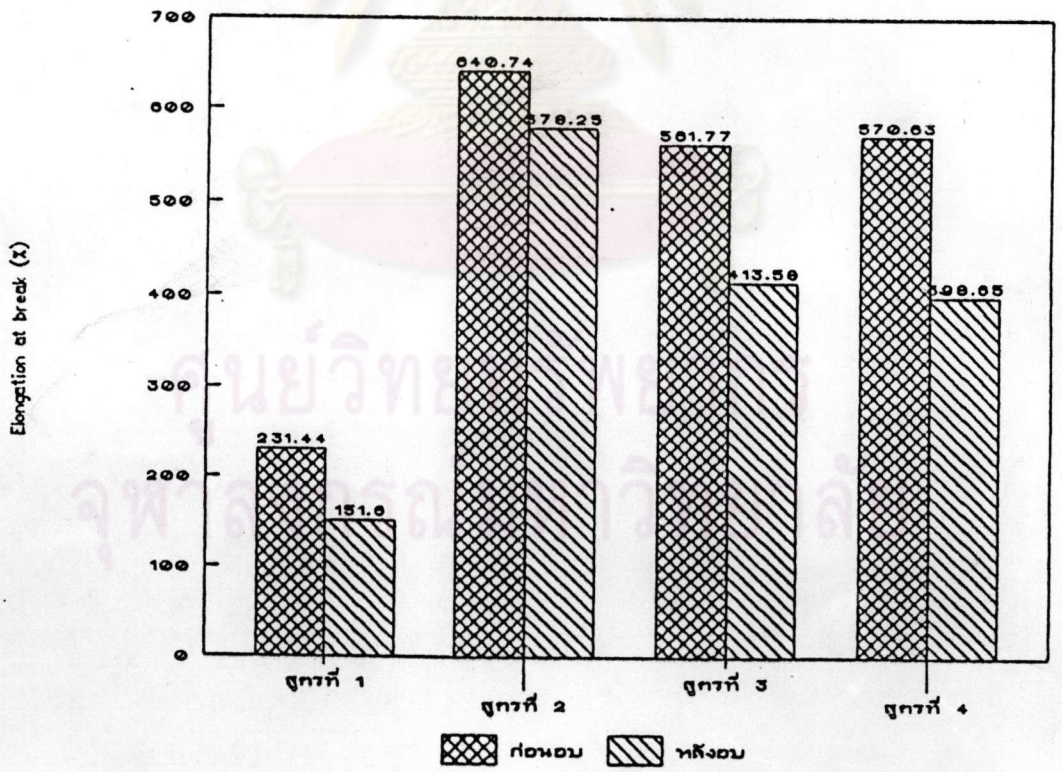
ตารางที่ 4.7 ค่ามอดุลัสของสารประกอบยาง

สูตรสารประกอบยาง	มอดุลัส (นิวตันต่อตารางเมตร)					
	100 %		300%		500%	
	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ
ไม่ใส่สารเสริมแรง	0.75	0.86	-	-	-	-
ซิลิกาจากแกลบ	0.91	1.36	3.22	4.14	10.13	11.69
Hi-sil 255	1.85	3.17	6.10	11.93	14.67	-
เขม่าดำ	2.44	3.73	8.87	13.61	15.19	-

ตารางที่ 4.8 ค่า SD ของมอดุลัสของสารประกอบยาง

สูตรสารประกอบยาง	SD ของมอดุลัส (นิวตันต่อตารางเมตร)					
	100 %		300%		500%	
	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ
ไม่ใส่สารเสริมแรง	0.04	0.03	-	-	-	-
ซิลิกาจากแกลบ	0.06	0.11	0.16	0.27	0.60	0.90
Hi-sil 255	0.06	0.17	0.14	0.45	0.23	-
เขม่าดำ	0.12	0.20	0.23	0.31	0.20	-

สำหรับค่ามอดุลัสของสารประกอบยางในตอนแรกที่ทำการยืดออก สูตรที่ใส่เขม่าดำจะใช้แรงมากที่สุด ส่วนสูตรที่ใส่ซิลิกาจากแกลบจะใช้แรงน้อยกว่าสูตรที่ใส่สารเสริมแรงสูตรอื่นๆ แต่สามารถดึงยืดได้มากกว่า สำหรับ Hi-sil 255 นั้น โดยปกติแล้วสารประกอบยางที่ใส่ Hi-sil 255 ซึ่งเป็นซิลิกาที่ได้จากการตกตะกอน จะมีมอดุลัสต่ำกว่าสารประกอบยางที่ใส่เขม่าดำประมาณ 25 %



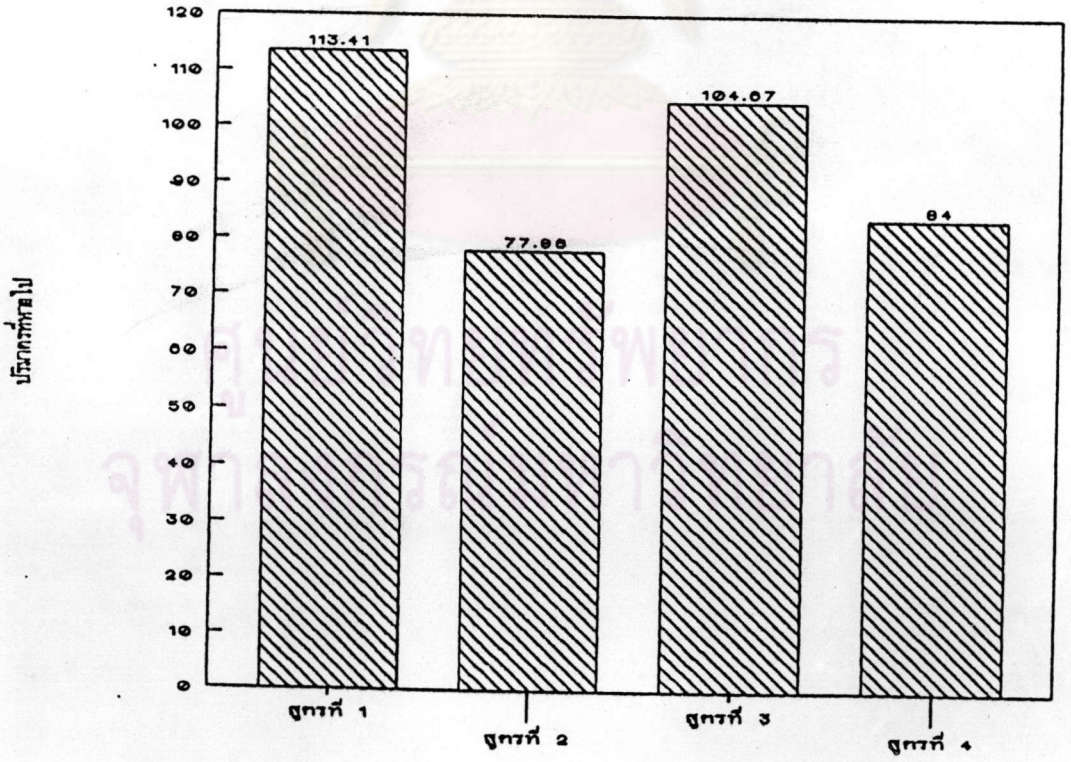
รูปที่ 4.5 Elongation at break

4.3.2 ความต้านทานต่อสึกหรอ

ตารางที่ 4.9 ปริมาตรที่หายไปของสารประกอบยางหลังการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ

สูตร สารประกอบยาง	ปริมาตรที่หายไป (mm^3)	
	ค่าเฉลี่ย	SD
ไม่ใส่สารเสริมแรง	113.41	6.10
ซิลิกาจากแกลบ	77.86	2.41
Hi-sil 255	104.67	3.25
เขม่าดำ	84.00	2.97

สูตรที่ใส่ซิลิกาจากแกลบจะมีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงที่สุด ส่วนสูตรที่ใส่ Hi-sil 255 มีความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำที่สุด โดยปกติสารประกอบยางที่ใส่เขม่าดำจะมีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง ส่วนสารประกอบยางที่ใส่ Hi-sil 255 จะมีความต้านทานต่อการสึกหรอน้อยกว่าเขม่าดำ คือ มีความต้านทานการสึกหรอประมาณ 60 % ของสารประกอบยางที่ใส่เขม่าดำ



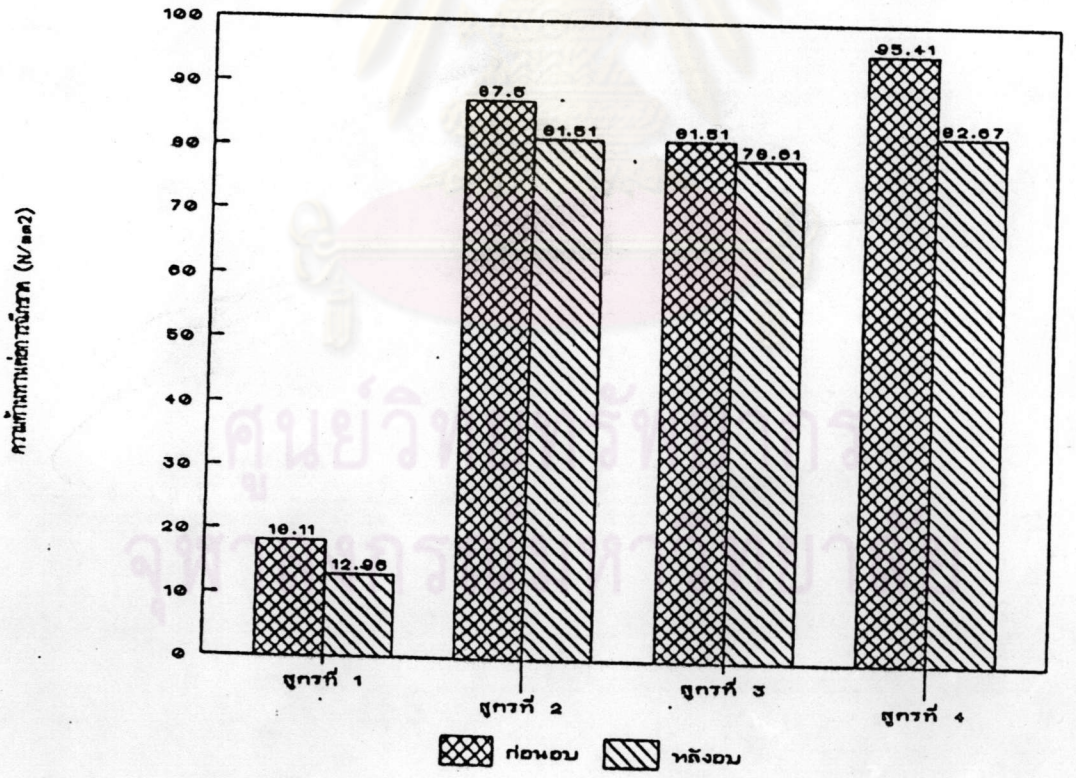
รูปที่ 4.6 ความต้านทานต่อการสึกหรอของสารประกอบยาง

4.3.3 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

สำหรับความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านทานแรงดึง คือ เขม่าดำ > ซิลิกาจากแกลบ > Hi-sil 255 > ไม่ใส่สารตัวเติม

ตารางที่ 4.10 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดโดยเฉลี่ยของสารประกอบยาง

สูตร สารประกอบยาง	ความต้านทานต่อการฉีกขาด (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)			
	ก่อนอบ		หลังอบ	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ไม่ใส่สารเสริมแรง	18.11	1.24	12.96	0.75
ซิลิกาจากแกลบ	87.50	1.92	82.08	2.70
Hi-sil 255	81.51	2.43	78.61	3.73
เขม่าดำ	95.41	5.65	82.67	3.60



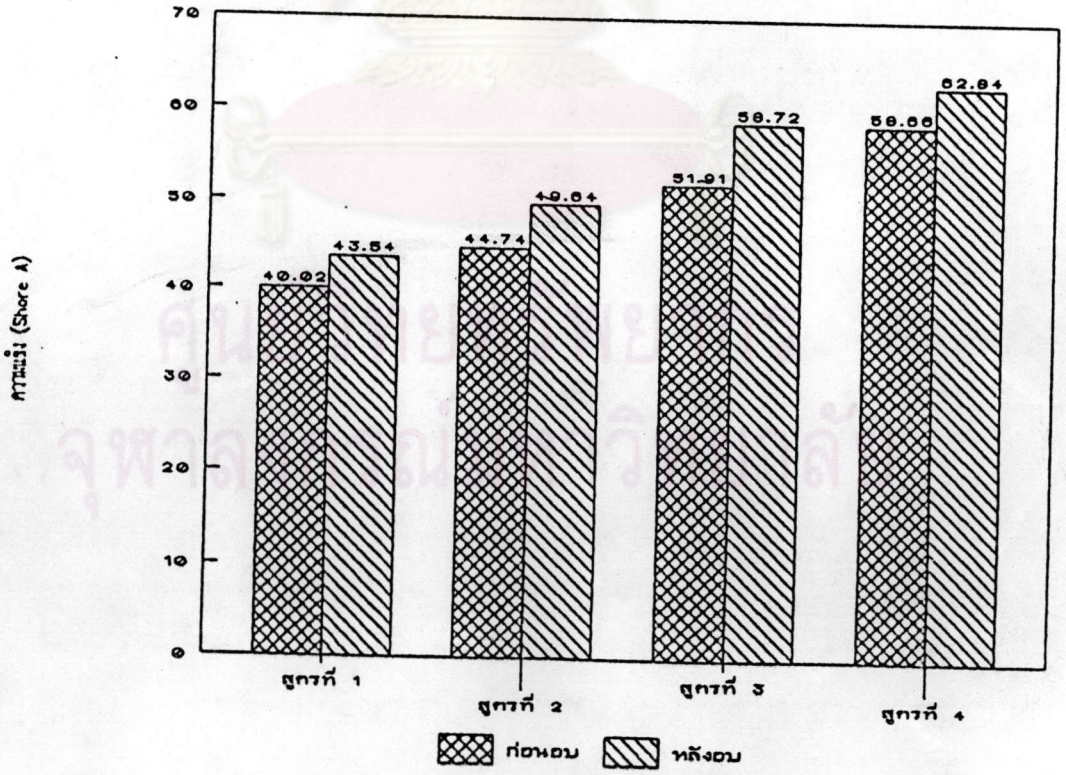
รูปที่ 4.7 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของสารประกอบยาง

4.2.4 ความแข็ง

ส่วนสมบัติในด้านความแข็งของสารประกอบยางนั้นสูตรที่ใส่เขม่าดำมีความแข็งมากที่สุด ส่วนสูตรที่ใส่ซิลิกาจากแกลบมีความแข็งน้อยที่สุดในพวกที่ใส่สารเสริมแรง แต่ยังมีความแข็งมากกว่าสูตรที่ไม่ใส่สารตัวเติมเลย ซึ่งการที่สารประกอบยางที่ใส่ซิลิกาจากแกลบมีความแข็งน้อยอาจเนื่องมาจากซิลิกาจากแกลบมีขนาดอนุภาคเล็กมาก

ตารางที่ 4.11 ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของสารประกอบยาง (Shore A)

สูตร สารประกอบยาง	ความแข็ง (Shore A)			
	ก่อนอบ		หลังอบ	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ไม่ใส่สารเสริมแรง	40.02	0.85	43.54	1.33
ซิลิกาจากแกลบ	44.74	1.01	49.64	1.26
Hi-sil 255	51.91	0.76	58.72	1.67
เขม่าดำ	58.66	0.60	62.84	0.47



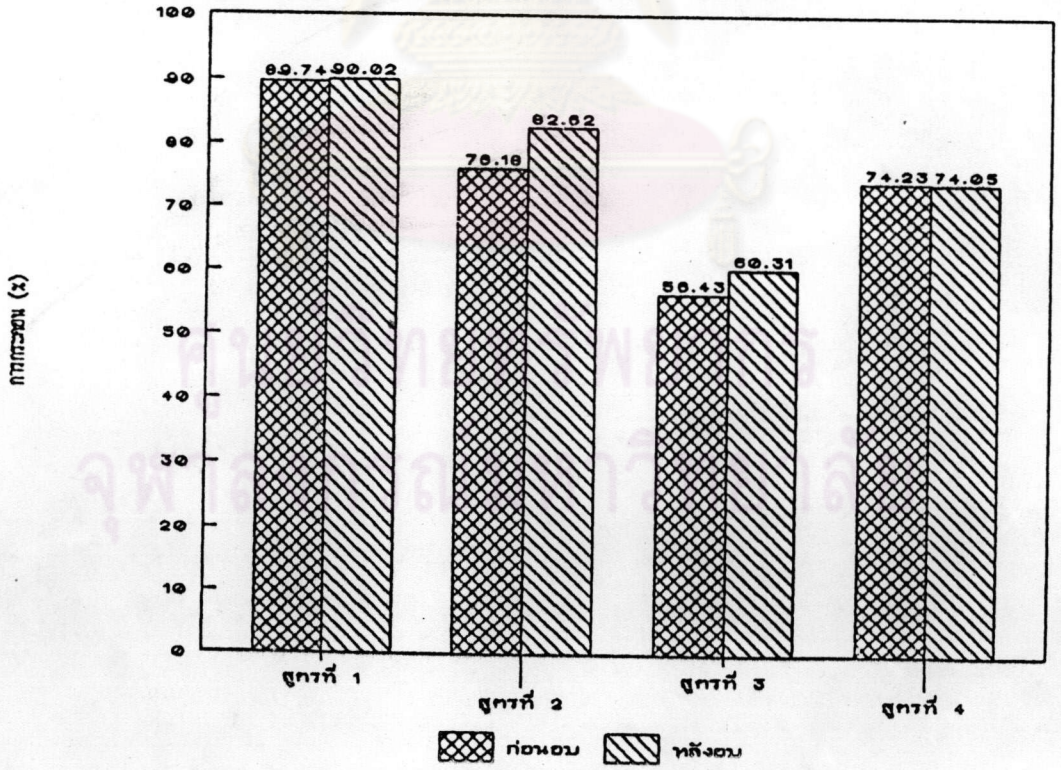
รูปที่ 4.8 ความแข็งของสารประกอบยาง

4.2.5 การกระดอน

สำหรับการกระดอนก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านทานแรงดึง และความต้านทานการฉีกขาด คือ สูตรที่ใส่เขม่าดำจะมีค่าสูงที่สุด ตามด้วยสูตรที่ใส่ซิลิกาจากแกลบและสูตรที่ใส่ Hi-sil 255 ตามลำดับ แต่มีข้อแตกต่างจากความต้านทานแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาด คือ สูตรที่ไม่ใส่สารตัวเติมจะมีการกระดอนสูงที่สุด เนื่องจากสารเสริมแรงจะลดความสามารถในการกระดอนของสารประกอบยาง

ตารางที่ 4.12 การกระดอนเฉลี่ยของสารประกอบยาง

สูตรสารประกอบยาง	การกระดอน (%)			
	ก่อนอบ		หลังอบ	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ไม่ใส่สารเสริมแรง	89.74	1.23	90.02	0.92
ซิลิกาจากแกลบ	76.18	0.84	82.62	0.91
Hi-sil 255	56.43	1.01	60.31	0.50
เขม่าดำ	74.23	1.57	74.05	0.74



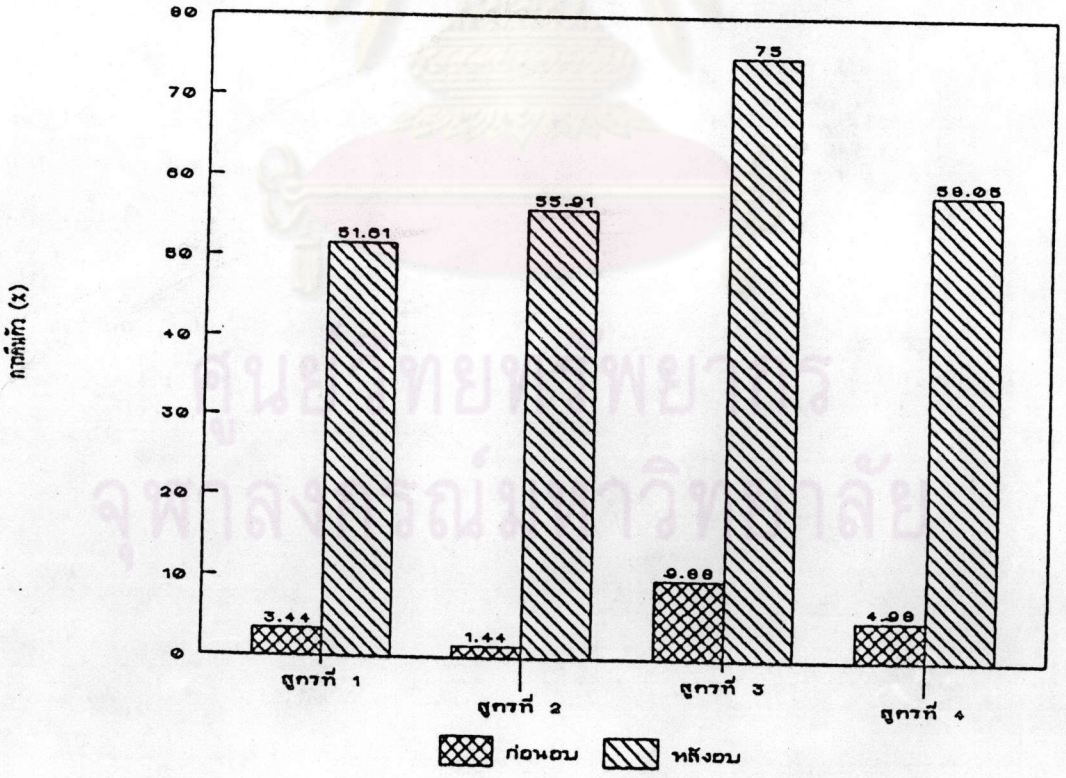
รูปที่ 4.9 การกระดอนของสารประกอบยาง

4.2.6 การคืนตัว

ค่าการคืนตัวของสารประกอบยางที่ใส่ซิลิกาก่อนอบจะมีการคืนตัวดีกว่าสารประกอบยางสูตรอื่นๆ รวมทั้งสูตรที่ไม่ใส่สารเสริมแรงด้วย สำหรับการคืนตัวหลังทำการบ่มเร่งในตู้อบแล้ว สูตรที่ไม่ใส่สารเสริมแรงจะมีการคืนตัวดีที่สุด แต่สูตรที่ใส่ซิลิกาจากแกลบก็ยังเป็นสารเสริมแรงที่มีการคืนตัวดีที่สุดในการวิจัยนี้ (ค่าเปอร์เซ็นต์การคืนตัวที่ดีจะต้องมีค่าน้อย)

ตารางที่ 4.13 การคืนตัวของสารประกอบยาง

สูตร สารประกอบยาง	การคืนตัว (%)			
	ก่อนอบ		หลังอบ	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ไม่ใส่สารเสริมแรง	3.44	1.08	51.61	2.43
ซิลิกาจากแกลบ	1.44	0.04	55.91	2.36
Hi-sil 255	9.88	0.49	75.00	2.82
เขม่าดำ	4.98	0.21	58.05	2.47



รูปที่ 4.10 การคืนตัวของสารประกอบยาง