

ผลกระทบของการใช้สารตัวเติมผสมต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ



นายธีระชาติ ก่อตระกูล
นางสาวปานหทัย ชื่นพุดิ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 43922
วัน, เดือน, ปี 18 ต.ค. 2545

b.....
i.....

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

Effects of Mixed Fillers on Mechanical Properties of Natural Rubber

Mr. Teerachart Kortrakul
Miss Parnhatai Chuenputhi

A Special Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าอนุมัติ

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลกระทบของการใช้สารตัวเติมผสมต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ
นักศึกษา นายธีระชาติ ก่อตระกูล รหัส 41052033
นางสาวปานหทัย ชื่นพุดมรินทร์ รหัส 41052049
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุภาวรัตน์ รักชลธี
ดร.พงษ์ธร แซ่อู๋
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต


.....
(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย) หัวหน้าภาควิชาเคมี


.....
(ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด) ประธานกรรมการ


.....
(ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์) กรรมการ


.....
(ดร.สุภาวรัตน์ รักชลธี) กรรมการ


.....
(ดร. พงษ์ธร แซ่อู๋) กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ผลกระทบของการใช้สารตัวเติมผสมต่อสมบัติเชิงกลของ ยางธรรมชาติ	
นักศึกษา	นายธีระชาติ ก่อตระกูล	รหัส 41052033
	นางสาวปานหทัย ชื่นพุดมิ	รหัส 41052049
อาจารย์ผู้ควบคุมโครงการพิเศษ	ดร. สุภวัฒน์ รักชลธี ดร. พงษ์ธร แซ่อูย	
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
สาขา	เคมีอุตสาหกรรม	
พ.ศ.	2544	

บทคัดย่อ

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของสารตัวเติมผสมระหว่างแก้วกับซิลิกาหรือเขม่าดำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ โดยได้มีการใช้อัตราส่วนของแก้วแก่ลบต่อสารตัวเติมอีกชนิดหนึ่งเป็น 0/100 25/75 50/50 75/25 และ 100/0 ทั้งนี้ปริมาณสารตัวเติมในยางคอมพาวด์คือ 40 phr โดยใช้เครื่องผสมแบบปิดในการผสมสูตรยางคอมพาวด์ จากนั้นนำมาขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปเพื่อนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า เมื่อมีอัตราส่วนของแก้วแก่ลบในสารตัวเติมผสมเพิ่มขึ้น จะทำให้ความแข็งแรงดึง มอดุลัส ความแข็งแรงฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ และcompression set ลดลง อย่างไรก็ตามในส่วนขอเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์และค่าความแข็งกดไม่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและการที่ไม่มีสารตัวเติมซิลิกาในสูตรที่ใช้ ซิลิกาเป็นสารตัวเติมโดยอาจสรุปได้ว่า อัตราส่วนของสารตัวเติมผสมที่ทำให้สมบัติเชิงกลของยางคอมพาวด์ไม่ลดลงมากนัก คือ 25% แก้วแก่ลบในสารตัวเติมผสม

Special Project Title	Effects of Mixed Fillers on Mechanical Properties of Natural Rubber
Name	Mr. Teerachart Kortrakul Miss Parnhatai Chuenputhi
Special Project Advisor	Dr. Suparat Rukchonlatee Dr. Pongdhorn Sae-Oui
Department	Chemistry
Academic Year	2001

Abstract

This research studied the effects of mixed fillers (rice husk ash and carbon black or silica) on mechanical properties of natural rubber. Ratios of rice husk ash to the other filler were 0/100, 25/75, 50/50, 75/25, and 100/0. The filler content in rubber compounds was 40 phr. All compounds were mixed using an internal mixer and then a compression moulding machine was used to prepare test specimens for examination of their mechanical properties. It was found that an increase in the rice husk ash in the mixed filler decreased tensile strength, modulus, tear strength, abrasion resistant, and compression set. However, optimum cure time and hardness of those compounds were similar due to crosslink density and an absence of silane coupling agent which is normally used with silica filler. It could be concluded that the 25% wt of rice husk ash in the mixed fillers gave slightly decreasing in mechanical properties of rubber compounds.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาโครงการพิเศษ คอยให้คำปรึกษา แนะนำตลอดการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ ดร.พงษ์ธร แซ่ฮุย ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาโครงการพิเศษ รวมถึงอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ สารเคมี รวมถึงเป็นธุระให้จนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อิทธิพล แจ่มชัด และ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่กรุณาอนุเคราะห์เครื่องมือจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ ป้าป๊า หม่าม้า ตลอดจนญาติๆ ที่กรุณาอนุเคราะห์ทุกอย่าง ให้ได้มาเย็นได้ตรงนี้

ขอขอบคุณ พี่เนร พี่ป้อม พี่บอย พี่ต๊อด และพี่ที่ไม่ได้เอ่ยนาม ณ ที่นี้ที่กรุณาเป็นธุระให้จนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมถึงกรุณาคุยกับเราตอนเราหงอยเหงา

ขอบคุณเพื่อนๆ ที่ช่วยให้เรามีคนกินข้าวด้วย รวมถึงคำปรึกษาที่ดีตอนโปรเจกต์ยังไม่เสร็จ

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ยางธรรมชาติ	4
2.2 สารตัวเติมในยาง	6
2.3 หลักการเชื่อมโยงในยาง	13
2.4 สารเคมีที่ใช้ในการเชื่อมโยงของยาง	16
บทที่ 3 การวิจัยและดำเนินงาน	17
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	17
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	17
3.3 การเตรียมสารตัวเติม	18
3.4 การเตรียมยางคอมพาวด์	18
3.5 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน	19
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	20
4.1 ความเหนียวและอุณหภูมิระหว่างผสม	21
4.2 ลักษณะการสุกตัวของยางคอมพาวด์	24
4.3 การบวมตัว	25
4.4 สมบัติเชิงกล	27

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	38
5.1 สรุปผลการทดลอง	38
5.2 ข้อเสนอแนะ	38
เอกสารอ้างอิง	39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเขม่าดำในแต่ละชั้น	9
รูปที่ 2.3 หมูไฮดรอกซีบนพื้นผิวของซิลิกา	10
รูปที่ 2.4 โครงสร้างที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการเชื่อมโยงโดยก้ำมะถันในยาง	13
รูปที่ 2.5 วัฏจักรของกระบวนการเชื่อมโยง	14
รูปที่ 4.1 ค่าความหนืดมูนิของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน	21
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิระหว่างผสมของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน	22
รูปที่ 4.3 ค่าความหนืดมูนิของยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมผสมในอัตราส่วนต่างกัน	22
รูปที่ 4.4 อุณหภูมิระหว่างผสมของยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมผสมในอัตราส่วนต่างกัน	23
รูปที่ 4.5 เวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมต่างชนิดกัน	24
รูปที่ 4.6 ค่าความต้านทานแรงดึงเมื่อเปรียบเทียบกับในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมต่างชนิดกัน	27
รูปที่ 4.7 ค่าความต้านทานแรงดึงของยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมผสมในอัตราส่วนต่างกัน	27
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเก้าเกลบ	29
รูปที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด เมื่อเปรียบเทียบกับในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมบริสุทธิ์ต่างชนิดกัน	29
รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด เมื่อเปรียบเทียบกับในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมผสมต่างชนิดกัน	30
รูปที่ 4.11 มอดุลัสที่ความเครียด 100% (M_{100}) และ 300% (M_{300}) เมื่อเปรียบเทียบกับในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมบริสุทธิ์ต่างชนิดกัน	31
รูปที่ 4.12 มอดุลัสที่ความเครียด 100% (M_{100}) เมื่อเปรียบเทียบกับในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมผสมต่างชนิดกัน	32
รูปที่ 4.13 มอดุลัสที่ความเครียด 300% (M_{300}) เมื่อเปรียบเทียบกับในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมผสมต่างชนิดกัน	32
รูปที่ 4.14 ความแข็งแรงฉีกขาด เมื่อเปรียบเทียบกับในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมบริสุทธิ์ต่างชนิดกัน	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.15 ความแข็งแรงจิกขาด เมื่อเปรียบเทียบกันในแต่ละสูตร ที่มีสารตัวเติมผสมต่างชนิดกัน	33
รูปที่ 4.16 ความต้านทานต่อการสึกหรอในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมบริสุทธิ์ต่างชนิดกัน	35
รูปที่ 4.17 ความต้านทานต่อการสึกหรอในสูตรที่มีสารตัวเติมผสมต่างชนิดกัน	36
รูปที่ 4.18 ค่า Compression set เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสูตร ที่มีสารตัวเติมบริสุทธิ์ต่างชนิดกัน	37
รูปที่ 4.19 ค่า Compression set เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสูตร ที่มีสารตัวเติมผสมต่างชนิดกัน	37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชนิดของเขม่าดำตามมาตรฐาน ASTM	7
ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของเขม่าดำ	8
ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบโดยประมาณของเถ้าแกลบ	11
ตารางที่ 2.4 ผลกระทบของความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและ ความยาวของการเชื่อมโยงต่อสมบัติเชิงกลของยาง	14
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของยางคอมพาวด์	18
ตารางที่ 4.1 ชื่อย่อต่างๆ ของสูตรยางคอมพาวด์	20
ตารางที่ 4.2 สมบัติของสารตัวเติม	21
ตารางที่ 4.3 เวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน	25
ตารางที่ 4.4 สมบัติการบวมตัวของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน	26
ตารางที่ 4.5 ความแข็งเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมต่างชนิดกัน	34
ตารางที่ 4.6 ความแข็งในสูตรที่มีสารตัวเติมผสมต่างชนิดกัน	35

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้เป็นที่ทราบกันดีว่า ทรัพยากรธรรมชาติต่าง ๆ นับวันยิ่งลดลงไปอย่างมาก สืบเนื่องมาจากความต้องการที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากรของโลกที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนทำให้มีผู้คาดการณ์ว่าทรัพยากรธรรมชาติที่เรามีอยู่กำลังจะหมดไปในไม่ช้า และนี่คือเหตุผลที่ทำให้นานาชาติหันมาให้ความสำคัญกับการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด จึงส่งผลให้เกิดความต้องการเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่จะช่วยให้การใช้ทรัพยากรเหล่านี้ ได้ประโยชน์มากกว่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน

สำหรับประเทศไทยเป็นที่ทราบกันดีว่ามีข้าวเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญ โดยในการผลิตข้าวนั้นต้องมีการผ่านกระบวนการสีข้าวเพื่อให้ได้เมล็ดข้าวสาร กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดแกลบเป็นจำนวนมาก ซึ่งแกลบถือเป็นผลพลอยได้ที่ปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณการผลิตข้าวสารที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นนำแกลบที่ได้นี้ไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ โดยในปัจจุบันมีการพัฒนานำแกลบมาเพิ่มคุณค่าโดยการนำแกลบไปเผาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงผลิตไฟฟ้า (แกลบจึงเป็นแหล่งเป็นพลังงานชีวมวลชนิดหนึ่ง) ซึ่งหลังจากการเผาแล้วจะได้เถ้าแกลบจำนวนมาก ซึ่งเถ้าแกลบที่ได้จัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูง^[1] ดังนั้นจึงมีการคิดค้นที่จะนำเอาเถ้าแกลบเหล่านี้มาใช้ในอุตสาหกรรมเดียวกับซิลิกานั้นก็คืออุตสาหกรรมยาง เนื่องจากราคาของเถ้าแกลบต่ำกว่าซิลิกา ดังนั้นหากสามารถใช้เถ้าแกลบมาแทนซิลิกาได้บางส่วน ก็จะเป็นการลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติได้

ในส่วนของอุตสาหกรรมยางนั้น นับว่าเป็นอุตสาหกรรมหลักอีกอย่างหนึ่งของประเทศไทย โดยในปัจจุบันเกษตรกรประสบปัญหาราคายางธรรมชาติตกต่ำ รัฐบาลจึงมีนโยบายส่งเสริมให้มีการนำยางธรรมชาติมาแปรรูปและใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด เพื่อช่วยพยุงราคาของยางธรรมชาติ

ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติเมื่อใช้ของผสมของเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) และเขม่าดำ (Carbon Black, CB) หรือซิลิกา (Silica, SiO_2) เป็นสารตัวเติม ซึ่งสารตัวเติมสองประเภทหลังเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงที่สำคัญในอุตสาหกรรมยาง โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อเพิ่มมูลค่าให้เถ้าแกลบโดยการนำเถ้าแกลบไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางของประเทศไทยได้ ทั้งนี้เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพสูงในการส่งออกข้าวและยางธรรมชาติ จึงเป็นการดีอย่างยิ่งหากมีการใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

แก้วเคลือบซึ่งถือเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่เหลือใช้จากการผลิตข้าวมาเป็นสารตัวเติมในยาง เพราะนอกจากจะช่วยลดต้นทุนแล้ว ยังเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมในแง่ของการนำของเหลือใช้ มาทำให้เกิดประโยชน์อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำแก้วเคลือบมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางร่วมกับ ซิลิกาหรือเขม่าดำ
- 1.2.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนการผสมระหว่างแก้วเคลือบกับซิลิกาหรือเขม่าดำที่มีต่อ สมบัติของยางธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ผสมแก้วเคลือบและซิลิกา ในอัตราส่วนต่าง ๆ คือ 100/0 75/25 50/50 25/75 0/100 แล้วใช้เป็นสารตัวเติมในยางโดยเติมในปริมาณ 40 phr
- 1.3.2 ผสมแก้วเคลือบและเขม่าดำ ในอัตราส่วนต่าง ๆ คือ 100/0 75/25 50/50 25/75 0/100 แล้วใช้เป็นสารตัวเติมในยางโดยเติมในปริมาณ 40 phr
- 1.3.3 นำยางคอมพาวด์ที่ได้มาทดสอบสมบัติต่าง ๆ เช่น ความหนืด ลักษณะการบ่ม สุก(Cure characteristics) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) โมดูลัส (Modulus) การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) ความแข็งกด (Hardness) ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) รวมถึงการ ศึกษาค่า Compression set และการกระจายตัวของสารตัวเติม (Filler dispersion)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ยาง หากแก้วเคลือบสามารถแทนที่สารตัวเติมอื่นได้บางส่วน
- 1.4.2 ลดปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการทิ้งของเสียจากโรงไฟฟ้า (แก้วเคลือบ)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อีลาสโตเมอร์ (Elastomers) คือ วัสดุที่สามารถยืดตัวออกหรือเปลี่ยนขนาดได้หลายเท่า เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก และสามารถหดกลับคืนขนาดและรูปร่างเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างเร็วเมื่อปล่อยแรง ดังนั้นยาง (Rubbers) จึงจัดเป็นอีลาสโตเมอร์ ปัจจุบันนิยมใช้คำว่า “ยาง” แทนคำว่า “อีลาสโตเมอร์”

อีลาสโตเมอร์ หรือ ยาง จัดเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่แตกต่างไปจากวัสดุชนิดอื่น ๆ (เช่น โลหะ พลาสติก แก้ว เป็นต้น) เพราะยางมีลักษณะเฉพาะตัวคือมีความยืดหยุ่นมากเป็นพิเศษ จึงสามารถนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างหลากหลาย โดยในปัจจุบันได้มีการบริโภคยางทั่วโลกในปริมาณมากกว่า 20 ล้านตัน (พ.ศ. 2543)^[2] และยังมีอัตราการบริโภคที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จึงนับได้ว่ายางเป็นวัสดุที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก

ในการใช้ประโยชน์จากยางนั้น ต้องนำยางมาทำการเชื่อมโยง (Crosslinking) หรือ วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) นั่นก็คือการทำให้ยางคงรูปหรือบ่มสุก (Curing) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่ทำให้ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่ตรง (Linear chain) เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-Dimensional network) หรือ เทอร์โมเซต (Thermosets) โดยยางที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้วจะมีสมบัติที่ดีขึ้น กล่าวคือ ยางจะเปลี่ยนจากวัสดุที่อ่อนนิ่ม มีความยืดหยุ่นต่ำเหนียวติด ไม่มีเสถียรภาพของรูปร่าง และสามารถไหลได้ กลายเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง มีสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ดีขึ้น และทนอุณหภูมิสูง

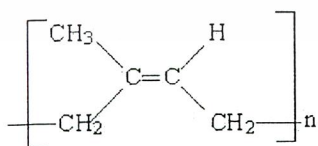
นอกจากการเชื่อมโยงยางแล้ว การผสมเคมียาง (Rubber compounding) ก็เป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตและสมบัติของผลิตภัณฑ์ของยาง เนื่องจากในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจำเป็นต้องมีการออกสูตรยาง (Rubber formulation) ซึ่งเป็นการกำหนดชนิดและปริมาณสารเติมแต่งต่าง ๆ (Additives) ที่จะผสมเข้ากับยาง โดยชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งเหล่านี้จะมีผลโดยตรงต่อสมบัติต่าง ๆ ของยาง

ยางเป็นวัสดุที่นิยมใช้และมีการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากยางมีสมบัติที่ดีคือ มีความยืดหยุ่น (Elasticity) และความเหนียว (Toughness) สูง มีการซึมผ่านของน้ำและก๊าซต่ำ สามารถรับแรงดึงและแรงกดอัดได้มาก สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้มากเมื่อได้รับแรง และกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็วเมื่อปล่อยแรง นอกจากนี้ ยางบางชนิดยังมีสมบัติพิเศษ เช่น ทนน้ำมัน ทนอุณหภูมิสูง ทนตัวทำละลาย เป็นต้น

ปัจจุบันนี้ มากกว่า 60 % ของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ผลิตได้ในโลกใช้ในการผลิตยางรถยนต์ (Tires) อันนับเป็นอุตสาหกรรมหลักที่สำคัญที่สุดของยาง ส่วนที่เหลือใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่าง ๆ ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและใช้ในครัวเรือน เช่น รองเท้า ยาง (Footware) ท่อยาง (Rubber hoses) ชิ้นส่วนรถยนต์ (Automotive parts) สายพานลำเลียง (Conveyor belts) ถุงมือยาง (Rubber gloves) ถุงยางอนามัย (Condoms) พื้นพรม (Carpet backing) ผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ (Latex foam) ยางยืด เป็นต้น^[2]

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มี isoprene (C_5H_8) มาต่อกันเป็นโมเลกุลยาว หรือ $(C_5H_8)_n$ โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15,000-20,000 โดยทั่วไป ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าใน 1 หน่วยของ isoprene จะมีพันธะคู่และมีหมู่ α -methylene ที่วงไวดต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมะถันอยู่ ดังนั้นพันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการคงรูปด้วยกัมมะถัน อย่างไรก็ตาม พันธะคู่เหล่านี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ เช่น ออกซิเจน หรือ โอโซน ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ หรืออาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน คลอรีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ เป็นต้น โดยทั่วไป ยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะ โมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด ยางจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ยางจะอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain-induced crystallization) จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือ มีความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) และความต้านทานการขัดถูสูงขึ้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (Cis-1,4-Polyisoprene)

ลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติคือความยืดหยุ่น ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติติดเยื่อมด้านการเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่ง

เป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (Assemble) ชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น

เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และ โทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูป เนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical crosslinks) ของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัว (Swell) ในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากต้นยางพาราที่มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ “ฮีเวีย-บราซิเลียนซิส” (Hevea Brasilliensis) บางครั้งจึงเรียกกยางธรรมชาติว่า “ยางฮีเวีย” (Hevea latex) หรือยางพารา ต้นยางพารานี้จัดเป็นต้นไม้ยืนต้น สูงใหญ่ อายุยืน มีมากมายหลายพันธุ์ ซึ่งจะให้น้ำยางที่มีองค์ประกอบและปริมาณแตกต่างกัน

ปัจจุบัน ประเทศไทยผลิตยางธรรมชาติได้มากที่สุดในโลกคือ ประมาณ 2.3 ล้านตันต่อปี มีพื้นที่ปลูกยางพารามากกว่า 12 ล้านไร่ (ตัวเลขในปี พ.ศ.2543)^[2] การใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติจะต้องทำการแปรรูปน้ำยางดิบให้อยู่ในรูปอื่นเพื่อความสะดวกในการใช้งาน การขนย้าย และการเก็บรักษา โดยการผลิตในรูปของยางแผ่นรมควันหรือยางแท่ง ในการผลิตยางแท่งมีหลักการง่าย ๆ คือ การทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อนแล้วตัดหรือย่อยยางให้เป็นเม็ดเล็ก ๆ จากนั้นทำการอบแห้งแล้วอัดให้เป็นแท่ง ทั้งนี้ ยางแท่งสามารถผลิตได้จากน้ำยางหรือยางที่จับตัวเป็นก้อนแล้ว โดยมีขั้นตอนต่างกันเล็กน้อยคือ การผลิตจากน้ำยางจะเริ่มจากการกรองน้ำยางให้สะอาด แล้วทำให้น้ำยางจับตัวโดยใช้กรด เช่น กรดฟอร์มิก หรือ กรดอะซิติก จากนั้นนำยางที่ได้ไปผ่านเครื่องตัด เพื่อทำให้น้ำยางเป็นเม็ดหรือชิ้นเล็ก ๆ เช่น เครื่องตัดเม็ด (Granulator) เซรดเดอร์ (Shredder) แฮมเมอร์มิล (Hammer mill) เป็นต้น จากนั้นนำยางเหล่านี้ไปทำให้แห้งโดยใช้เครื่องอบที่อุณหภูมิประมาณ 100-110 องศาเซลเซียส ประมาณ 4 ชั่วโมง ก่อนที่จะทำการอัดยางให้เป็นแท่งสี่เหลี่ยมขนาด 675 X 330 X 190 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องกดอัด (Press) แล้วห่อยางแท่งด้วยแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีน สำหรับในส่วนของ การผลิตยางแท่งจากยางแห้งนั้น จะใช้น้ำยางแห้งจากยางแผ่น ยางก้นถ้วย และเศษยางต่าง ๆ โดยจะแช่ยางเหล่านี้ในน้ำเพื่อขจัดสิ่งสกปรก แล้วผ่านยางไปยังเครื่องตัดเพื่อย่อยยางให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ถ้ายางสกปรกมากจะผ่านยางในเครื่องรีดเครพเพื่อผสมกับยางแผ่นสะอาด แล้วผ่านเครื่องตัดย่อยอีกครั้งหนึ่ง เมื่อได้ยางเม็ดแล้วจึงนำไปอบให้แห้งแล้วอัดเป็นแท่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สารตัวเติมในยาง (Fillers)

สารตัวเติมคือองค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตหรือเพื่อลดต้นทุน เป็นต้น สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกตามประสิทธิภาพของการเสริมแรงได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing fillers) และสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงหรือเรียกว่าสารตัวเติมเฉื่อย (Non-reinforcing หรือ Inert fillers)

สารตัวเติมจะมีผลโดยตรงต่อสมบัติของยาง เพราะสมบัติของยางจะขึ้นกับปริมาณและชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิว โครงสร้างของสารตัวเติม และอันตรกิริยาของสารตัวเติมกับยาง สำหรับสารตัวเติมที่มีบทบาทสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมยางคือ เขม่าดำ และซิลิกา ซึ่งจัดเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงทั้งคู่

2.2.1 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง องค์ประกอบหลักของเขม่าดำคือธาตุคาร์บอน การเติมเขม่าดำจะช่วยใหยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้การแปรรูปยางเป็นผลิตภัณฑ์ทำได้ง่ายขึ้น^[2,3] แต่อย่างไรก็ดี ผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมจะมีข้อเสียในเรื่องของรูปลักษณะภายนอก กล่าวคือยางที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมจะมีสีดำ ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่เน้นในเรื่องของรูปลักษณะภายนอก ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดที่สำคัญที่สุด เขม่าดำมีหลายชนิดขึ้นกับสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี จึงทำให้เกิดมาตรฐานในการเรียกชื่อ เช่น มาตรฐาน ASTM (American Standard for Testing and Materials) โดยให้อักษรตัวแรกแทนอัตราเร็วในการคงรูป กล่าวคือ N แทนอัตราเร็วในการคงรูปแบบปกติ (Normal curing) และ S แทนอัตราเร็วในการคงรูปแบบช้า (Slow curing) (เนื่องจากพื้นที่ผิวถูกออกซิไดซ์มากกว่า และมีความเป็นกรดมากกว่า) สำหรับตัวเลขที่ตามหลังตัวแรกแสดงถึงขนาดของอนุภาค ส่วนตัวเลขอีกสองตัวหลังไม่มีความหมายใด ๆ ยกเว้นในกรณีที่เขม่าดำมีโครงสร้างแบบมาตรฐาน ในกรณีนี้ตัวเลขที่สองจะซ้ำกับตัวเลขแรก และตัวเลขที่สามจะใช้เลขศูนย์ ชนิดของเขม่าดำอาจแสดงได้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของเขม่าดำตามมาตรฐาน ASTM^[4]

ASTM number	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)
100-199	11-19
200-299	20-25
300-399	26-30
400-499	31-39
500-599	40-48
600-699	49-60
700-799	61-100
800-899	101-200
900-999	201-500

โดยที่ N100 ถึง N400 ถือเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง ส่วนชนิดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่านี้ (N500 ถึง N700) ถือเป็นสารตัวเติมประเภทกึ่งเสริมแรง และสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง ตามขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น

อนุภาคของเขม่าดำมีโครงสร้างบางส่วนคล้ายแกรไฟต์ คืออะตอมของคาร์บอนจะจัดเรียงตัวเป็นชั้น ๆ ขนานกัน (โดยเฉพาะชั้นด้านนอก) บางส่วนก็เกิดการเชื่อมล้ำกันเล็กน้อย ทำให้อนุภาคมีโครงสร้างแบบกึ่งแกรไฟต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคผงเขม่าดำอยู่ในช่วง 10-400 นาโนเมตร นอกจากนี้สมบัติในการเสริมแรง ยังขึ้นกับส่วนประกอบของเขม่าดำ ซึ่งส่วนประกอบของเขม่าดำที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของเขม่าดำ^[3]

ส่วนประกอบ	ร้อยละ
Carbon	97.3-99.3
Hydrogen	0.2-0.4
Oxygen	0.2-1.2
Sulfur	0.2-1.2
Ash	0.1-1.0
Volatile	0.6-1.5

สมบัติของเขม่าดำ

◆ ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิว

อนุภาคของเขม่าดำมีรูปร่างเป็นทรงกลมและจะไม่อยู่อย่างเดี่ยว ๆ แต่จะถูกหลอมอยู่รวมกันเป็นกลุ่มเรียกว่า aggregate ขอบเขตการเสริมแรงของเขม่าดำจะไม่ขึ้นอยู่กับการรวมกันเป็นกลุ่มเรียกว่า aggregate แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ เขม่าดำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยางทั่วไปมีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิในช่วง 19-95 นาโนเมตร เขม่าดำที่มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็ก จะมีพื้นที่ผิวสูง จึงสามารถเสริมแรงในยางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

◆ โครงสร้าง

โครงสร้างของเขม่าดำจะบ่งบอกถึงลักษณะการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเขม่าดำ นอกจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคปฐมภูมิแล้ว แต่ละ Aggregate ยังสามารถเกาะกลุ่มกันได้อย่างหลวม ๆ ด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อน (Van der Waals Force) เกิดเป็นโครงสร้างแบบทุติยภูมิ (Secondary structure) ที่เรียกว่า agglomerate ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะถูกทำลายได้โดยง่ายในระหว่างกระบวนการผสม

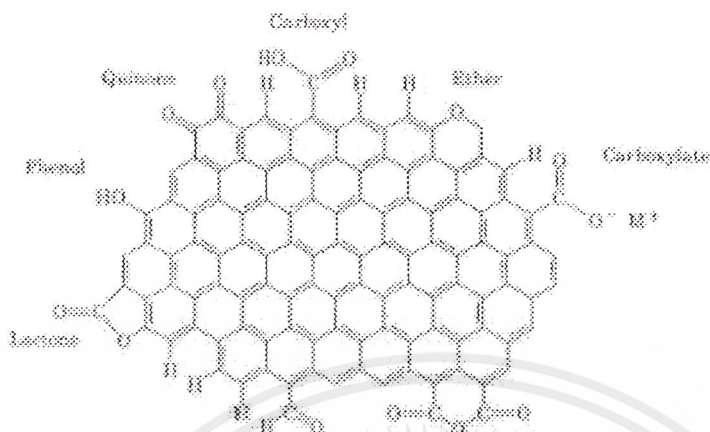
◆ สมบัติทางเคมีของพื้นผิว

เขม่าดำประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนประมาณ 90-95% ส่วนองค์ประกอบอื่น ๆ ได้แก่ ออกซิเจนและไฮโดรเจน ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำค่อนข้างแตกต่างกันมาก เพราะพื้นผิวของเขม่าดำประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันมากมาย (เช่น Carboxyl phenol

quinone และ Lactone) หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวเหล่านี้ไม่เพียงจะมีผลต่อความว่องไวทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยา (Surface activity) แต่ยังมีผลต่ออัตราเร็วของการคงรูปยางอีกด้วย ในแต่ละชั้นของเขม่าดำอาจมีส่วนประกอบ ของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเขม่าดำในแต่ละชั้น^[3]

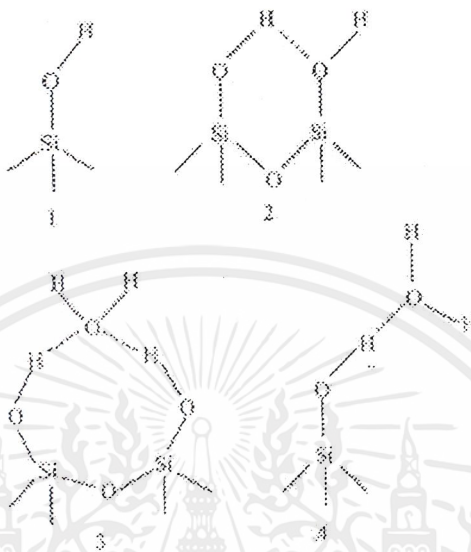
โดยปกติ เขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคเล็ก (หรือมีพื้นที่ผิวสูง) จะให้การเสริมแรงที่ดี แต่จะทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ยาก (Poor processing) เพราะความหนืดของยางคอมพาวด์จะสูงมาก ส่วนโครงสร้างของเขม่าดำจะมีผลกระทบต่อสมบัติในกระบวนการผลิต (Processing properties) มากกว่าสมบัติของยางคงรูป ถ้าโครงสร้างของเขม่าดำสูงขึ้น ยางคอมพาวด์จะมีความหนืดสูงขึ้น ส่วนยางคงรูปที่ได้แม้ว่าจะมีค่ามอดุลัสและความแข็งสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงหรือความต้านทานการฉีกขาดแต่อย่างใด

2.2.2 ซิลิกา (Silica, Silicon dioxide)

ซิลิกาคือสารตัวเติมที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในการเสริมแรงให้กับยาง แม้เมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำแล้ว ซิลิกามีราคาแพงกว่า แต่เนื่องจากสีของซิลิกาเป็นสีขาว จึงสามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีที่สนที่ น่าสนใจมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่เขม่าดำ ซิลิกาถือเป็นสารตัวเติมที่มีความสามารถในการเสริมแรงในยางมากที่สุด^[3] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของความสามารถในการทนต่อการขัดถูและความต้านทานการฉีกขาด อีกทั้งซิลิกายังมีความสามารถในการช่วยลดความร้อน (Heat build-up) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน โดยที่ประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกาจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของซิลิกา (ขึ้นกับประเภทของซิลิกา) โดยทั่วไปซิลิกาที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางจะมีลักษณะโครงสร้างแบบอสัณฐาน

ซิลิกาจะประกอบด้วย ซิลิกอนและออกซิเจน จัดตัวอยู่ในรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มีขนาดอนุภาคประมาณ 1-30 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวประมาณ 20-300 ตารางเมตรต่อกรัม ไม่มีการเติม ฟังก์ชัน ฟังก์ชันที่มีเม็ดแบดลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

โดยที่พื้นผิวของซิลิกาที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (ไฮดรอกซี) ซึ่งนอกจากจะมีผลต่อโมเลกุลของน้ำที่มากเกาะบนพื้นผิว แล้ว ความเป็นกรดของซิลิกายังถูกกำหนดโดยหมู่ไฮดรอกซีที่อยู่บนพื้นผิวอีกด้วย หมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวซิลิกาอาจมีโครงสร้างเป็นดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกา โดยที่ (1) isolated silanols (2) vicinal silanol (3) hydrogen bonding vicinal silanol with water (4) hydrogen bonding isolated silanol with water^[5]

2.2.3 เถ้าแกลบ (Rice husk ash)

เถ้าแกลบคือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแกลบไปเผา ดังนั้น เถ้าแกลบจึงถือเป็นวัสดุเหลือใช้ซึ่งมีจำนวนมากขึ้นตามปริมาณความต้องการบริโภคข้าวที่เพิ่มขึ้นโดยที่ส่วนประกอบของเถ้าแกลบจะขึ้นกับสภาวะที่ใช้ในการเผาและสายพันธุ์ของข้าว^[5] ตารางที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบโดยประมาณของเถ้าแกลบในกรณีที่แกลบได้รับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม สำหรับแกลบที่เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สีของเถ้าแกลบที่ได้จะมีสีดำเนื่องจากมีคาร์บอนหลงเหลืออยู่จากการเผาไหม้ ในกรณีนี้องค์ประกอบหลักของเถ้าแกลบคือซิลิกาและคาร์บอน

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบโดยประมาณของเถ้าแกลบ^[6]

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์
SiO ₂	86.0-97.3
K ₂ O	0.58-2.50
Na ₂ O	0.60-1.75
CaO	0.20-1.15
MgO	0.12-1.96
Fe ₂ O ₃	0.00-0.54
P ₂ O ₅	0.20-2.85
SO ₃	0.10-1.13
Cl	0.00-0.42

การใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมในยางนั้นเป็นผลเนื่องมาจากเถ้าแกลบมีส่วนประกอบที่ใกล้เคียงกับสารตัวเติมที่สำคัญในยางนั้นคือซิลิกาและเขม่าดำ ทำให้สามารถเรียกเถ้าแกลบว่าเป็น Carbonaceous siliceous material และจากการที่เถ้าแกลบมีราคาถูกเมื่อเทียบกับสารตัวเติมประเภทอื่นและยังมีข้อดีอีกหลายด้านที่ค่อนข้างเหมาะสมที่จะใช้เป็นสารตัวเติมในยาง กล่าวคือเมื่อใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมในยาง จะช่วยลดเวลาการคงรูปของยางและไม่ทำให้ความเหนียวของยางเพิ่มขึ้นมากนัก จึงช่วยให้กระบวนการการแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางเป็นไปได้ง่ายขึ้น

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความพยายามนำเถ้าแกลบมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางมากมาย เช่น

Goodwin และ John^[1] ได้ทำการศึกษาหาค่าองค์ประกอบของเถ้าแกลบ พบว่าเถ้าแกลบส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยซิลิกาซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักและมีเขม่าดำและออกไซด์ของโลหะหมู่ 1 บางชนิดปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งปริมาณของแต่ละองค์ประกอบนั้น จะขึ้นอยู่กับกระบวนการให้ความร้อนหรือสภาวะในการเผาแกลบ

Costa^[5] ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานการฉีกขาดจะมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้ปริมาณเถ้าแกลบเท่ากับ 20 phr จึงถือเป็นปริมาณสารตัวเติมที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ กับสารตัวเติมชนิดอื่น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อใช้เถ้าแกลบที่มีพื้นที่ผิวสูงเป็นสารตัวเติม สมบัติเชิงกลต่าง ๆ จะแย่กว่าการใช้ซิลิกา (Zeosil-175) หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขม่าดำ (N774) เป็นสารตัวเติมไม่มากนัก แต่เมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวทางเคมีของเถ้า
 แกลบ พบว่ายางที่ได้มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าสารตัวเติมทั้งสองชนิดที่ได้กล่าวมาแล้ว

Haxo และ Mehta^[6] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางสไตรีนบิวตะไดอีน (SBR)
 เมื่อใช้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาไหม้ในสถานะพิเศษ เปรียบเทียบกับ MT carbon black และ
 Finely ground mineral silica ซึ่งมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันเป็นสารตัวเติม พบว่าการใช้เถ้า
 แกลบเป็นสารตัวเติมจะให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าการใช้ Finely ground mineral silica
 และให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลอื่น ๆ ใกล้เคียงกับการใช้ MT carbon black เป็นสารตัวเติม นอก
 จากนี้ยังทำการศึกษเกี่ยวกับปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม
 สมบัติเชิงกลของยางสไตรีนบิวตะไดอีน (SBR) จะดีขึ้นด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเถ้าแกลบ
 สามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยางธรรมชาติ

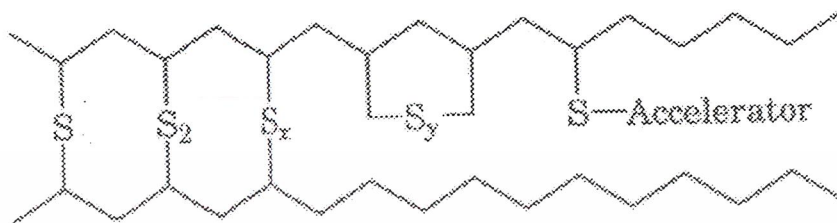
P.Sae-Oui, C.Rakdee and P.Thanmathorn^[7] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ
 ยางธรรมชาติเมื่อใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติม โดยได้มีการเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น
 ๆ พบว่าเถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมไม่เสริมแรงในยาง และไม่สามารถเติมลงไปปริมาณมาก
 ๆ ได้เนื่องจากโครงสร้างของเถ้าแกลบเป็นรูพรุนและอันตรกิริยาระหว่างเถ้าแกลบและยางมี
 ค่าต่ำมาก ดังนั้นเมื่อเติมเถ้าแกลบลงไปปริมาณมาก ๆ จะทำให้เกิดรูพรุนในยาง เมื่อยางได้รับ
 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอันเนื่องจากแรงภายนอก รูพรุนเหล่านี้จะเปรียบเสมือนจุดสะสมความ
 เค้น (Stress concentrator) ทำให้ง่ายขาดได้ง่าย ดังนั้นการเติมเถ้าแกลบลงไปปริมาณ
 มาก ๆ จึงทำให้ง่ายมีค่าความต้านทานแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาดลดลง นอกจากนี้
 ยังได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของการใช้ Silane coupling agent พบว่าการใส่ Silane
 coupling agent ไม่มีส่วนช่วยให้ง่ายมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากบนผิวของเถ้าแกลบไม่
 มีหมู่ไฮดรอกซิล

Ishak และ Bakar^[8] ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัว
 เติมในยาง Epoxidized natural rubber (ENR) โดยทำการทดลองที่ปริมาณสารตัวเติมต่าง ๆ
 พบว่า สมบัติเชิงกลจะมีค่ามากที่สุดเมื่อปริมาณสารตัวเติมเป็น 20 phr ยกเว้นค่าความแข็ง
 กด (hardness) ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติม และเมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล
 ของยาง Epoxidized natural rubber (ENR) กับสารตัวเติมอื่น ๆ ที่ใช้อยู่ทั่วไป พบว่า การใช้
 เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมนั้น ทำให้เวลาในการคงรูปของยางลดลงและให้สมบัติในการเสริม
 แรงไม่แตกต่างจากการใช้ซิลิกา (Vulcasil-S) หรือเขม่าดำ (N330) เป็นสารตัวเติมมากนัก

Ismail^[11] ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสารที่เรียกว่า Multifunctional additive
 (MFA) ต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติม พบว่าการใช้ MFA ช่วยให้
 เวลาในการคงรูปเร็วขึ้นและทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นด้วย เนื่องจากการกระจายตัวของสารตัว
 เติมดีขึ้นและความหนาแน่นในการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นด้วย

2.3 หลักการเชื่อมโยงในยาง (Overview of Vulcanization Chemistry)

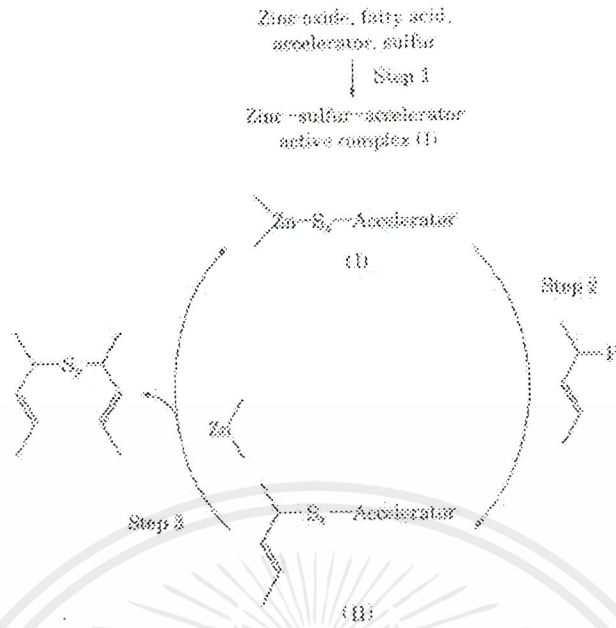
เนื่องจากการนำยางมาใช้งานจำเป็นต้องทำให้เกิดการเชื่อมโยงเพื่อให้สมบัติของยางดีขึ้น การเติมกำมะถันจะช่วยให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยง โดยอาจเกิดการเชื่อมโยงได้หลายแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการเชื่อมโยงโดยกำมะถันในยาง^[4]

กำมะถันจะทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงขึ้นในยาง โดยที่กำมะถันบางส่วนอาจไม่ได้มีส่วนในการเชื่อมโยง ปฏิริยาที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงเรียกว่าปฏิริยาควบรูป หรือ ปฏิริยาวัลคาไนซ์ ซึ่งอัตราเร็วของการเกิดปฏิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิ ด้วยเหตุนี้ จึงนิยมอบควบรูปยางที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 150-170 องศาเซลเซียส) สำหรับการทำให้ยางควบรูปนั้น นอกจากจะเติมกำมะถันลงไปในยางแล้วยังพบว่าการเติมสารที่ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นสารเร่ง (Activator) และสารที่ทำหน้าที่เป็นสารเร่งให้ควบรูป (Accelerator) จะช่วยให้ปฏิริยาการเชื่อมโยงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

สำหรับกระบวนการเชื่อมโยงนั้น เมื่อมีการเติมซิงค์ออกไซด์กับกรดไขมันลงในยาง สารทั้งสองจะทำปฏิริยากันเกิดเป็นเกลือของซิงค์ซึ่งถือเป็นตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดปฏิริยาเชื่อมโยง จากนั้นเมื่อมีการเติมกำมะถันและตัวเร่ง สารทั้งสามจะทำปฏิริยากันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของเกลือของซิงค์กับกำมะถันและตัวเร่ง โดยสารประกอบเชิงซ้อนนี้เองที่จะช่วยให้ปฏิริยาการเชื่อมโยงเกิดได้เร็วมากขึ้น หลังจากการเกิดปฏิริยาเชื่อมโยง เกลือของซิงค์ก็จะหลุดออกไปช่วยเร่งปฏิริยาอีก โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับกำมะถันที่เหลือ จนกว่ากำมะถันจะหมด^[9] แสดงตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วิถีจักรของกระบวนการเชื่อมโยง [4]

ผลกระทบของการเชื่อมโยงต่อสมบัติเชิงกลของยาง

การเชื่อมโยงในยางจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางเปลี่ยนแปลงไป โดยขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (จำนวนการเชื่อมโยง) และชนิดของการเชื่อมโยง (ความยาวของการเชื่อมโยง) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลกระทบของความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและความยาวของการเชื่อมโยงต่อสมบัติเชิงกลของยาง [4]

สมบัติ	ความหนาแน่นการเชื่อมโยง	ความยาวของการเชื่อมโยง
ความต้านทานแรงดึง	เพิ่มขึ้น จนถึงจุดหนึ่งแล้วลดลง	เพิ่มขึ้น
ความสามารถในการดึงยืด	ลดลง	-
มอดุลัส	เพิ่มขึ้น	-
Hysteresis	ลดลง	เพิ่มขึ้น
Compression set	ลดลง	เพิ่มขึ้น
ความทนต่อความร้อน	-	ลดลง
ความทนทานต่อการถูกออกซิไดซ์	-	ลดลง
ความต้านทานการฉีกขาด	เพิ่มขึ้น จนถึงจุดหนึ่งแล้วลดลง	เพิ่มขึ้น
ความต้านทานต่อการกัดกร่อน	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น

2.4 สารเคมีที่ใช้ในการเชื่อมโยงของยาง

2.4.1 สารเชื่อมโยง (Crosslink agents)

สารเชื่อมโยงหรือสารทำให้ยางคงรูปตัวแรกที่ค้นพบโดย Goodyear ในปี ค.ศ. 1839 คือ กำมะถัน ธาตุอื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่มเดียวกับกำมะถัน เช่น ซีลีเนียม (Se) เทลลูเรียม (Te) และอนุพันธ์ของธาตุเหล่านี้ก็สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาของยางคงรูปได้เช่นเดียวกับกำมะถัน สำหรับธาตุที่กล่าวถึงเหล่านี้จะใช้เมื่อมีความต้องการพิเศษเท่านั้น เช่น ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีความทนทานต่อความร้อน เป็นต้น

ปฏิกิริยาของยางหรือปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ เป็นศัพท์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่ออธิบายถึงกระบวนการที่ยางมีปฏิกิริยากับสารเคมีโดยมีความร้อนร่วมด้วย^[4,10] ทำให้ยางเปลี่ยนจากสถานะที่ไม่คงรูปไปเป็นสถานะที่คงรูปซึ่งอยู่ในสถานะที่เรียกว่าคล้ายยาง “Rubbery or elastic state” คือมีความยืดหยุ่น ยางที่มีพันธะคู่ส่วนใหญ่ เช่น ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ ไออาร์ ยางเอสปีอาร์ และยางไนไตรล์ สามารถทำปฏิกิริยากับกำมะถันหรือสารประกอบที่ให้กำมะถันและเกิดเป็นยางคงรูปได้ แต่ยางนีโอพรีนสามารถทำให้ยางคงรูปโดยใช้พวกโลหะออกไซด์ เช่น ซิงค์ออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น

2.4.2 สารเร่งให้คงรูป (Accelerator)

ในระหว่างการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันในยาง สารเร่งให้คงรูปจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมเวลาในการเชื่อมโยง อัตราการเชื่อมโยง จำนวนและรูปแบบในการเชื่อมโยง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญต่อสมบัติของยางที่ได้จากการเชื่อมโยง

สารเร่งให้คงรูปมีหลายประเภท ซึ่งการนำไปใช้นั้นขึ้นกับสมบัติของยางที่ต้องการ การเลือกใช้สารเร่งให้คงรูปให้มีระบบในการคงรูปที่ดีที่สุด จะขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีของยาง สมบัติของสารเร่งให้คงรูปแต่ละชนิด และการนำไปประยุกต์ใช้งาน ความแตกต่างของโครงสร้างโมเลกุลของสารเร่งให้คงรูปจะนำไปสู่ลักษณะการคงรูปที่แตกต่างกัน นอกจากการใช้สารเร่งให้ยางคงรูปจะช่วยลดเวลาที่ทำให้ยางคงรูปโดยการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้เร็วขึ้นแล้ว สารเร่งปฏิกิริยา ดังกล่าวยังสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของยางคงรูปด้วย โดยทั่วไป ยางสังเคราะห์ต้องการปริมาณสารเร่งให้คงรูปมากและต้องการกำมะถันน้อยกว่ายางธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากในยางธรรมชาติมีสารที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber content) ที่สามารถเร่งปฏิกิริยา คงรูปได้

2.4.3 สารกระตุ้นสารเร่ง (Activators)

สารกระตุ้นสารเร่งทำหน้าที่เร่งอัตราการเชื่อมโยง โดยตอนแรกจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารเร่งให้ยางคงรูปเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถละลายได้ในยาง หลังจากนั้น สารประกอบเชิงซ้อนนี้จะไปทำปฏิกิริยากับกำมะถันและโมเลกุลของยาง ทำให้เกิดการเชื่อมโยงและยังสามารถปรับปรุงสมบัติของยางคงรูปให้ดียิ่งขึ้นด้วย โดยทั่วไปสารกระตุ้นสารเร่ง ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก หรือ กรดไขมันอื่น ๆ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การวิจัยและดำเนินงาน

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1.ยางธรรมชาติ (STR 5L) จากบริษัท Union Rubber product Corporation Co. Ltd.
- 2.เถ้าแกลบ (Rice husk ash - High carbon content) จากโรงสีข้าวธัญญกิจ นครปฐมจำกัด
- 3.เขม่าดำ (Carbon black) เกรด N330 จากบริษัท ไทยคาร์บอน จำกัด
- 4.ซิลิกา (Silicon dioxide) Hisil 233 จากบริษัท พีพีจี สยามซิลิกา จำกัด
- 5.ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) จากบริษัท เคมีมิน จำกัด
- 6.กรดสเตียริก (Stearic acid) จากบริษัท เคมีมิน จำกัด
- 7.CBS (N-cyclohexyl-2-benzothiazolesulfenamide) จาก Flexsys Co., Ltd (Belgium)
- 8.TMTM (Tetramethylthiuram monosulfide) จากบริษัท กิจไพบูล เคมีคอล จำกัด
- 9.กำมะถัน (Sulfur) จากบริษัท เคมีมิน จำกัด

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1.เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer รุ่น Haake Rheomix 3000p)
- 2.เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll Mill)
- 3.เครื่องอัดไฮดรอลิก (Labtech Hydraulic Press)
- 4.เครื่องวัดความต้านทานแรงดึง (Instron Universal Testing Machine)
- 5.อุปกรณ์ทดสอบหาค่า Compression set ตามมาตรฐาน ASTM D395-2
- 6.เครื่องวัดความต้านทานการขัดถู (DIN Abrasion Tester)
- 7.เครื่องวัดความหนืดยาง (Mooney Viscometer รุ่น Monsanto-1500)
- 8.เครื่องวัดความแข็งกด (Instron Shore A Durometer)
- 9.เครื่องวัดลักษณะการคงรูป (TechPro Moving Die Rheometer, MDR)
- 10.กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL Scanning electron microscope, SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมเก้าแกลบ

เตรียมโดยการนำเก้าแกลบมาบดละเอียดใน ball mill เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดผ่าน sieve ที่ 200 mesh แล้วนำไปอบให้แห้งในเตาอบสูญญากาศ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.4 การเตรียมยางคอมพาวด์

เตรียมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ซึ่งมีสภาวะในการผสมคือ Fill factor เท่ากับ 0.7 อุณหภูมิของห้องผสม (Chamber temperature) ที่ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์เท่ากับ 40 รอบต่อนาที และเวลาในการผสมนาน 12 นาที โดยมีลำดับการผสมดังนี้ เริ่มต้นด้วยการผสมยางธรรมชาติ ซิงค์ออกไซด์ และกรด สเตียริกในเครื่องผสมแบบปิด เมื่อเวลาในการผสมผ่านไป 2 นาที จึงใส่สารตัวเติม และเมื่อเวลาในการผสมผ่านไปเท่ากับ 10 นาที จึงทำการใส่กำมะถันและCBS ซึ่งสูตรการผสมแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของยางคอมพาวด์

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
Natural rubber	100
Filler	0,40
ZnO	5
Stearic acid	1
CBS	1
Sulfur	2

หลังจากการผสม นำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปทำการรีดเป็นแผ่นหนาประมาณ 3 มิลลิเมตรด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll Mill) ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นแบ่งยางคอมพาวด์ออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกนำไปวัดหาค่าความเหนียว Mooney ในสภาวะ (ML 1+4 @ 100 องศาเซลเซียส) แล้วนำยางคอมพาวด์ส่วนที่ 2 ไปหาเวลาการคงรูป (tc_{90}) และ Scorch time (ts_2) ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ส่วนยางคอมพาวด์ส่วนที่เหลือนำไปทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ตามเวลาการคงรูปของยาง (tc_{90}) โดยขึ้นรูปให้เป็นชิ้นงานที่ต้องการนำไปทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบสมบัติของยาง

3.5.1 ความหนืดมูนนี่และอุณหภูมิระหว่างผสม (Mooney viscosity and Mixing temperature)

ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางคอมพาวด์ วัดได้โดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM D1646-87 ด้วยเครื่อง Mooney viscometer ที่ใช้โรเตอร์ขนาดใหญ่และทำการวัดที่ 100 องศาเซลเซียส โดยให้ความร้อนกับตัวอย่างยางก่อนเป็นเวลา 1 นาทีก่อนที่โรเตอร์จะเริ่มหมุน หลังจากนั้นจึงทำการวัดค่าความหนืดที่เวลา 4 นาทีหลังจากที่โรเตอร์เริ่มหมุน (ML 1+4 @ 100 องศาเซลเซียส)

3.5.2 ลักษณะการบ่มสุกของยางคอมพาวด์ (Cure characteristics)

ทำการวัดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสด้วยเครื่อง Rheotech MD⁺ โดยใช้ตัวอย่างยางคอมพาวด์ประมาณ 3.5 กรัม และบันทึกค่า Scorch time (t_{s_2}) และ Optimum curing time ($t_{c_{90}}$)

3.5.3 การบวมตัว (Swelling)

ทำโดยนำชิ้นงานยางคงรูปขนาดประมาณ 5*10*4 มิลลิเมตร แช่ในสารละลายเฮกเซน ภายในภาชนะปิดเป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วศึกษาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง โดยคิดให้อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์การบวมตัว

3.5.4 สมบัติเชิงกล (Mechanical testing)

ตัวอย่างยางคอมพาวด์ได้รับการขึ้นรูปโดยการบ่มสุก (Curing or Vulcanisation) ด้วยการอัดเข้าแม่พิมพ์ (Compression moulding) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา t_{90} หลังจากนั้นทำการทดสอบและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ดังนี้

- ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) และค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของยาง (Elongation at break) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412
- ความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D624-91 Die C
- ความแข็งกด (Hardness) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240
- ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) โดยทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53516
- Compression set โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D395-2 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการดำเนินงานโครงการวิจัยการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมผสมระหว่างแก้ว
 แกลบกับซิลิกาหรือแก้วแกลบกับเขม่าดำต่อสมบัติของยางธรรมชาติ โดยได้ศึกษาถึงสมบัติ
 เชิงกลและสัณฐานวิทยา เพื่อความเข้าใจตรงกันจึงขอใช้ชื่อย่อต่าง ๆ แทนการเรียกชื่อเต็มใน
 แต่ละสูตรดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงชื่อย่อต่าง ๆ ของสูตรยางคอมพาวด์

ชื่อย่อ	อัตราส่วนของปริมาณสารตัวเติมที่ใช้		
	แก้วแกลบ	เขม่าดำ	ซิลิกา
GUM	-	-	-
RHA	100	-	-
CB	-	100	-
Si	-	-	100
RC25	25	75	-
RC50	50	50	-
RC75	75	25	-
RS25	25	-	75
RS50	50	-	50
RS75	75	-	25

- หมายเหตุ - RC แสดงแทนสูตรที่ใช้แก้วแกลบและเขม่าดำเป็นสารตัวเติม
 - RS แสดงแทนสูตรที่ใช้แก้วแกลบและซิลิกาเป็นสารตัวเติม
 - ทุกสูตรที่มีการใช้สารตัวเติม ใช้ในปริมาณ 40 phr

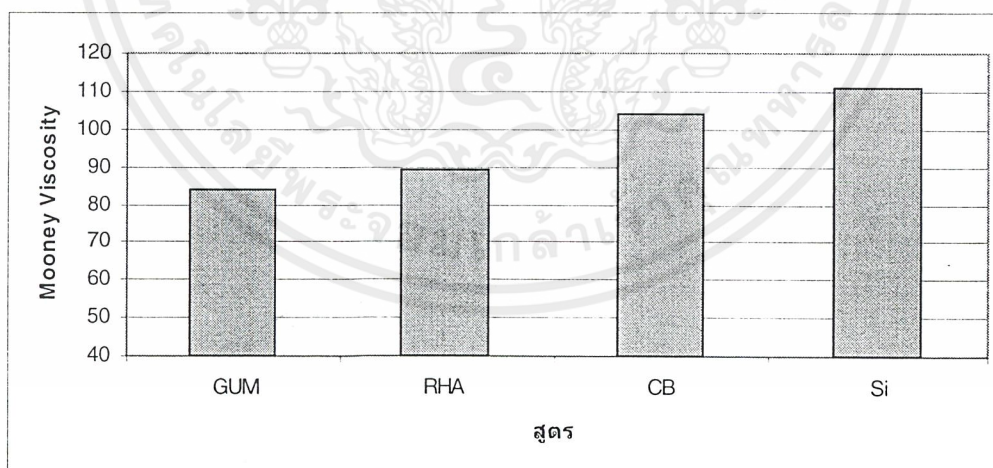
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 สมบัติของสารตัวเติมที่ใช้ในการทดลอง^[7]

สารตัวเติม	พื้นที่ผิว (m^2/g)	pH	ความหนาแน่น (g/cm^3)
เถ้าแกลบ	22	10.5	1.7
เขม่าดำ	84	7.1	1.8
ซิลิกา	140	6.8	1.8

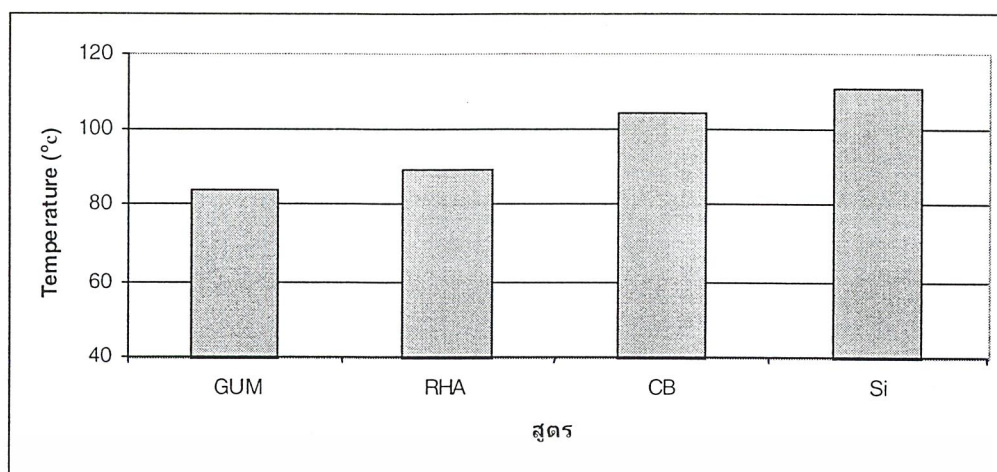
4.1 ความหนืดมูนนี่และอุณหภูมิระหว่างผสม (Mooney Viscosity and Mixing Temperature)

เนื่องจากสารตัวเติมเป็นของแข็งที่มีขนาดอนุภาคเล็ก การเติมลงไปปริมาณมากจะทำให้ยางมีความหนืด (Viscosity) สูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มความหนืดของยางทำให้แรงเฉือน (Shearing force) ในระหว่างการผสมสูงขึ้น ค่าความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน (Frictional heat) ระหว่างโรเตอร์ ยาง และผนังของเครื่องผสมจึงมีค่าสูง ทำให้อุณหภูมิของยางสูงขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดจากผลของการวัดค่าความหนืดมูนนี่ (ML1+4@100°C) และการวัดอุณหภูมิของการผสม



รูปที่ 4.1 ค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน

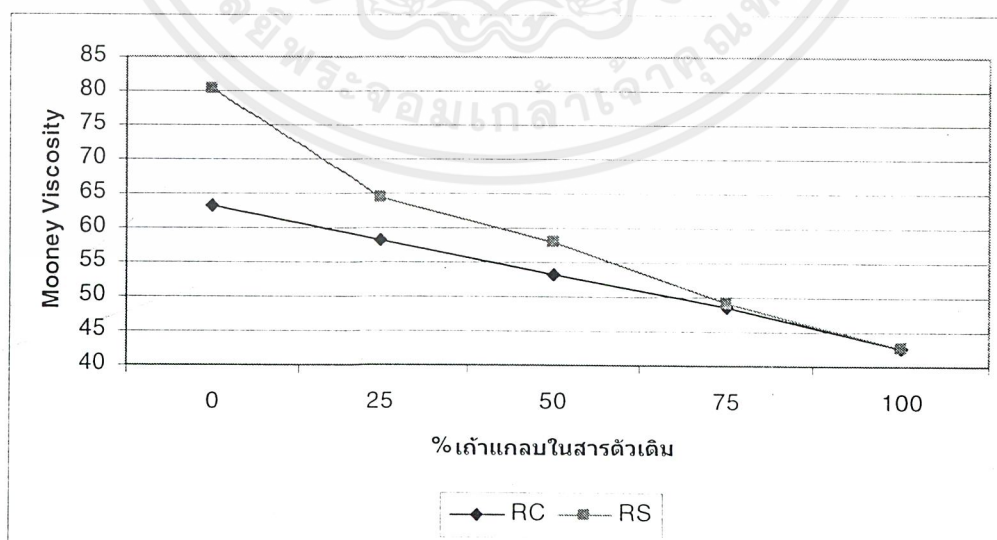
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 อุณหภูมิระหว่างผสมของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน

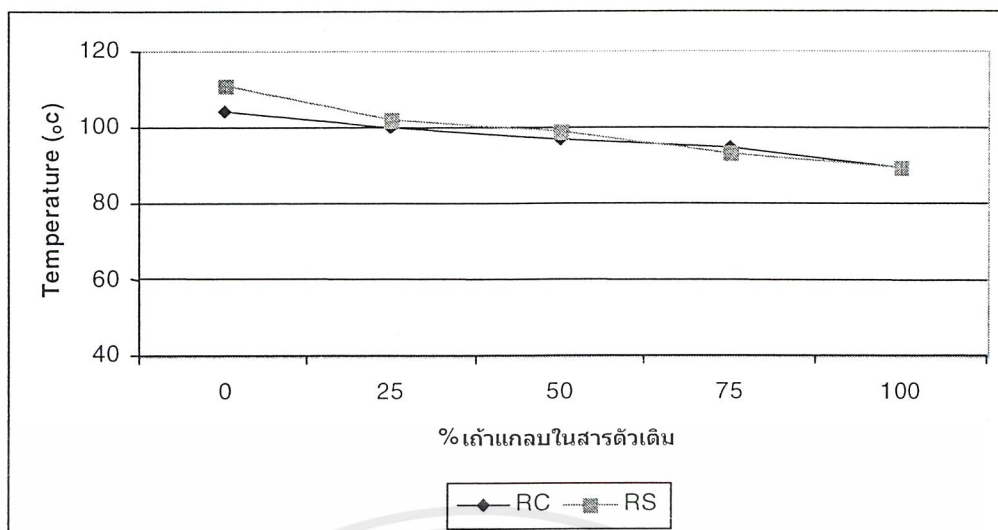
จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่มีสารตัวเติม (GUM) แล้วพบว่า ค่าความหนืดมูนนี้ และอุณหภูมิระหว่างผสมของสูตรที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด โดยมีเขม่าดำ และถ่านแกลบรองลงมา ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกามีขนาดอนุภาคปฐมภูมิที่เล็กที่สุด จึงส่งผลต่อค่าความหนืดและอุณหภูมิในระหว่างการผสมสูงที่สุด

ในส่วนของสูตรที่ใช้สารตัวเติมผสมระหว่างถ่านแกลบกับซิลิกาหรือเขม่าดำ พบว่าความหนืดมูนนี้และอุณหภูมิในการผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนของสารตัวเติมเสริมแรง (ซิลิกาหรือเขม่าดำ) เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของการผสม โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ค่าความหนืดมูนนี้ของยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมผสมในอัตราส่วนต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 อุณหภูมิระหว่างผสมของยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมผสมในอัตราส่วนต่างกัน

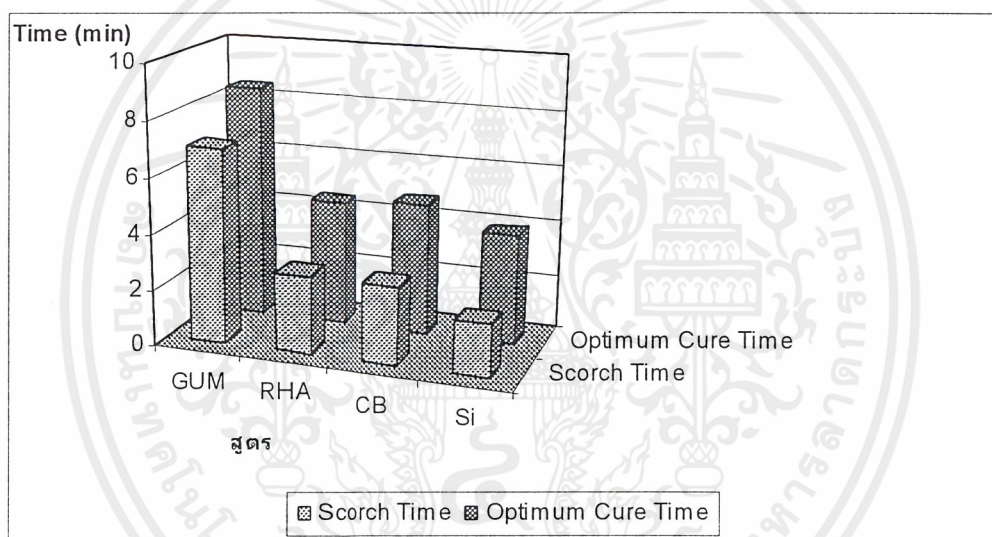
จากการที่ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมากทำให้มีพื้นที่ผิวสูง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และมีหมู่ Hydroxyl หรือ Silanol Groups ที่สามารถเกิดพันธะเคมีหรือแรงกระทำ (Interaction) กับสายโซ่โมเลกุลของยาง โดยปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าโมเลกุลของยางที่ถูกจับอยู่บนผิวซิลิกาและส่วนของยางที่แทรกเข้าไปในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซิลิกาจะถือว่าเป็นยางที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Immobilised rubber) หรือยางที่ถูกบดบังจากการเปลี่ยนรูปร่าง (Shielded from deformation) ซึ่งยางส่วนนี้เรียกว่า Occluded rubber และถูกพิจารณาว่าเป็นส่วนหนึ่งของซิลิกา ดังนั้นยางที่เป็นส่วนที่ไหลหรือเปลี่ยนรูปร่างได้ (Mobilised rubber) จึงลดลง ส่งผลให้ความหนืดและอุณหภูมิของยางคอมพาวด์ขณะผสมมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงทำให้ในสูตรที่ใช้สารตัวเติมผสม เมื่อมีอัตราส่วนของซิลิกามากขึ้น จะทำให้ค่าความหนืดและอุณหภูมิระหว่างผสมสูงขึ้น

สำหรับในสูตรที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมนั้น มีความหนืดและอุณหภูมิขณะผสมอยู่ระหว่างซิลิกาและแก้วเคลือบ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคของเขม่าดำมีขนาดใหญ่กว่าซิลิกาแต่เล็กกว่าแก้วเคลือบ รวมทั้งสมบัติของพื้นผิวของเขม่าดำซึ่งมีความเป็นขั้วน้อยกว่าซิลิกาจึงเอื้ออำนวยให้เกิด Occluded rubber ได้ดีกว่า ทำให้ Mobilised rubber ลดลง แต่เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าซิลิกาจึงทำให้มีความหนืดมีค่าต่ำกว่าซิลิกา แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับแก้วเคลือบแล้ว เขม่าดำมีความหนืดมีค่ามากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากแก้วเคลือบมีพื้นที่ผิวด้านที่ไม่มีหมู่ ฟังก์ชันเคมี (เช่น Hydroxyl หรือ Silanol) อยู่บนผิว^[5] แรงกระทำระหว่างยางกับแก้วเคลือบจึงน้อยมาก ปริมาณ Occluded rubber จึงน้อย ทำให้ยางสูตรที่ใช้แก้วเคลือบเป็นสารตัวเติมนั้นมีความหนืดและอุณหภูมิขณะผสมต่ำที่สุด ดังนั้นจึงส่งผลถึงสูตร

ยางกับเถ้าแกลบจึงน้อยมาก ปริมาณ Occluded rubber จึงน้อย ทำให้อย่างสูตรที่ใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมนั้นมีค่าความหนืดและอุณหภูมิขณะผสมต่ำที่สุด ดังนั้นจึงส่งผลถึงสูตรที่ใช้สารตัวเติมผสม กล่าวคือเมื่ออัตราส่วนของเถ้าแกลบมากขึ้น ค่าความหนืดและอุณหภูมิขณะผสมจะลดลง (ดูรูปที่ 4.3 และ 4.4 ประกอบ)

4.2 ลักษณะการบ่มสุกของยางคอมพาวด์ (Cure characteristics)

การนำยางคอมพาวด์มาทดสอบหาเวลายางคงรูป (Cure time) พบว่าในสูตรที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ใช้เวลาในการคงรูปน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่น โดยที่ในสูตรของเถ้าแกลบ เขม่าดำ และสูตรที่ไม่ใส่สารตัวเติมใช้เวลาในการคงรูปมากขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 เวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมต่างชนิดกัน

จากการผสมซิลิกาซึ่งมีขนาดเล็กมาก ๆ ลงไปในยาง ทำให้อย่างมีความหนืดและอุณหภูมิระหว่างการผสมเพิ่มขึ้นมาก (ดูรูปที่ 4.2 ประกอบ) ส่งผลให้สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชันเริ่มแตกตัวในระหว่างการผสม ดังนั้นยางจึงมีค่า Scorch time (ts_2) และ Optimum cure time (tc_{90}) ต่ำกว่ายางสูตรอื่น ๆ สำหรับในการใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติม พบว่ายางคอมพาวด์มีการบ่มสุกเร็วขึ้นมาก (เมื่อเทียบกับยางสูตรที่ไม่ใส่สารตัวเติม) แม้ว่ายางจะมีอุณหภูมิขณะผสมต่ำ เห็นได้ชัดจากการลดลงของค่า Scorch time และ Optimum cure time ทั้งนี้เนื่องจากในผงเถ้าแกลบมีสิ่งเจือปนที่สามารถกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน โดยเฉพาะออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์ต่าง ๆ ^[3] ด้วยเหตุนี้ การเติมผงเถ้าแกลบจึงส่งผลให้ยางคอม

เอกสารนี้ พาวด์มีการบ่มสุกได้เร็ว สำหรับบางสูตรที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม ถึงแม้ว่าเขม่าดำจะทำให้การค่าความหนืดและอุณหภูมิขณะผสมของยางสูงขึ้นมาก แต่เนื่องจากในเขม่าดำไม่มีสารกระตุ้น

ปฏิกิริยาคัลคาไนซ์เซชัน ดังนั้นยางสูตรที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมจึงมีการบวมสูงกว่าที่ใช้
 ถ้ำแคลบเป็นสารตัวเติมเล็กน้อย

ในส่วนของสารตัวเติมผสมระหว่างถ้ำแคลบกับเขม่าดำนั้น พบว่าการเติมถ้ำแคลบ
 ในปริมาณที่สูงขึ้นไม่มีผลมากนักต่อเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์ (ทั้ง ts_2 และ tc_{90})
 ทั้งนี้ เนื่องจากแม้ว่าการเติมถ้ำแคลบลงไปจะเป็นการเพิ่มปริมาณของออกไซด์ของโลหะอัล
 คาไลน์ ซึ่งเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปก็ตาม แต่ในเวลาเดียวกันการเติมถ้ำแคลบลงไปก็
 ส่งผลต่ออุณหภูมิในระหว่างการผสมเช่นกัน (ทำให้อุณหภูมิการผสมลดลง) ซึ่งผลทั้งสองนี้จะ
 หักล้างกัน ทำให้สัดส่วนของถ้ำแคลบเป็นสารตัวเติมผสมนี้ ไม่มีผลมากนักต่อลักษณะการคง
 รูปของยาง

อย่างไรก็ตาม การผสมถ้ำแคลบกับซิลิกาในปริมาณ (สัดส่วน) ที่สูงขึ้น กลับมีผลต่อ
 ลักษณะการคงรูปของยางดังแสดงในรูปที่ 4.7 สัดส่วนของถ้ำแคลบที่เพิ่มขึ้นทำให้ยางคงรูป
 ช้าลง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ลดลงในระหว่างกระบวนการผสม (ซึ่งมีอิทธิพลมาก
 กว่าผลของการเพิ่มขึ้นของออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์)

ตารางที่ 4.3 เวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน

สูตร	Scorch Time (ts_2)	Optimum Cure Time (tc_{90})
GUM	7.00	8.50
RHA	2.80	4.50
CB	2.80	4.75
Si	1.90	3.95
RC25	2.67	4.37
RC50	2.50	4.25
RC75	3.25	4.75
RS25	2.75	4.75
RS50	3.25	5.00
RS75	3.73	5.30

4.3 การบวมตัว (Swelling)

จากการทดสอบสมบัติของการบวมตัวของยางคงรูป ได้ผลการทดลองดังแสดงในตา
 เอกสารนี้ รางที่ 4.4 โดยนำเส้นใยรูปของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวอย่าง ซึ่งคำนวณได้จากสมการด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100$$

- โดยที่ S = เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยางคงรูป
 W_0 = น้ำหนักของยางคงรูปก่อนแช่ในสารละลายเฮกเซน
 W_i = น้ำหนักของยางคงรูปหลังแช่ในสารละลายเฮกเซน

การนำยางคงรูปมาทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ในการบวมตัว (%Swelling) พบว่าสูตรที่ไม่มีสารตัวเติมจะเกิดการบวมตัวมากที่สุด โดยยางสูตรที่มีซิลิกา ถั่วแกลบ และเขม่าดำ มีการบวมตัวน้อยลงตามลำดับ จากสมบัติการบวมตัวที่ได้จะทำให้เราทราบว่า ยางคงรูปสูตรใดมีความหนาแน่นในการเชื่อมโยงมากน้อยเพียงใด หากการบวมตัวมีมาก ก็จะแสดงให้เห็นว่ามีความหนาแน่นในการเชื่อมโยงน้อย ซึ่งพบว่าในสูตรที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม มีความหนาแน่นในการเชื่อมโยงค่อนข้างต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากในงานวิจัยนี้เติมสารตัวเติมที่ 40 phr ซึ่งที่ปริมาณนี้จะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของซิลิกา ทำให้การกระจายตัวลดลง และมีการดูดซับสารกระตุ้นสารเร่งบางส่วนมาบนพื้นผิวเนื่องจากความมีขี้ของซิลิกา [12] ทำให้สารกระตุ้นสารเร่งมีการกระจายตัวไม่ดี อีกทั้งในโครงงาน วิจัยนี้ต้องการหลีกเลี่ยงตัวแปรที่จะส่งผลในการเปรียบเทียบผลกระทบบของสารตัวเติม จึงไม่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันได้ (silane coupling agent) จึงทำให้อันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยางไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงทำให้สมบัติต่าง ๆ ของสูตรที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

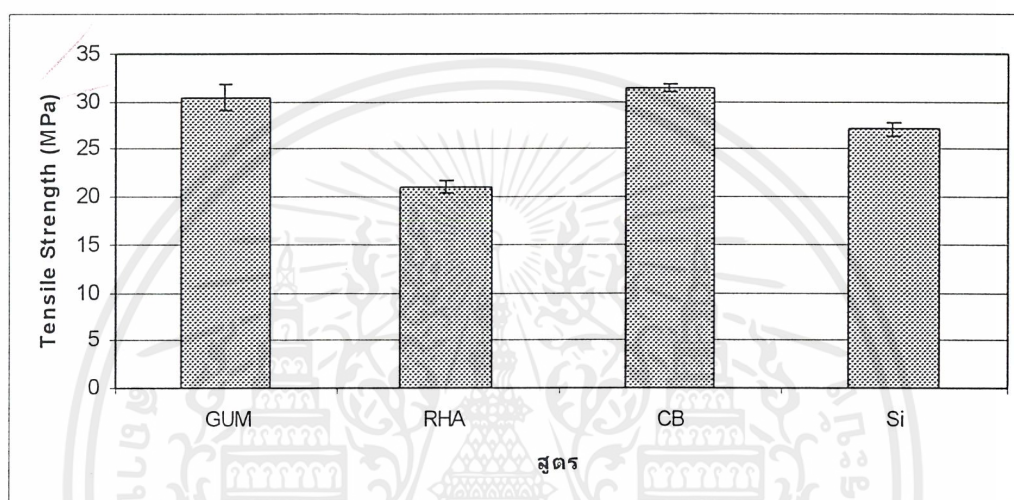
ตารางที่ 4.4 สมบัติการบวมตัวของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน

สูตร	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว
GUM	120.7
RHA	92.1
CB	79.1
Si	113.8
RC25	41.5
RC50	99.2
RC75	46.7
RS25	168.7
RS50	100.6
RS75	151.6

4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

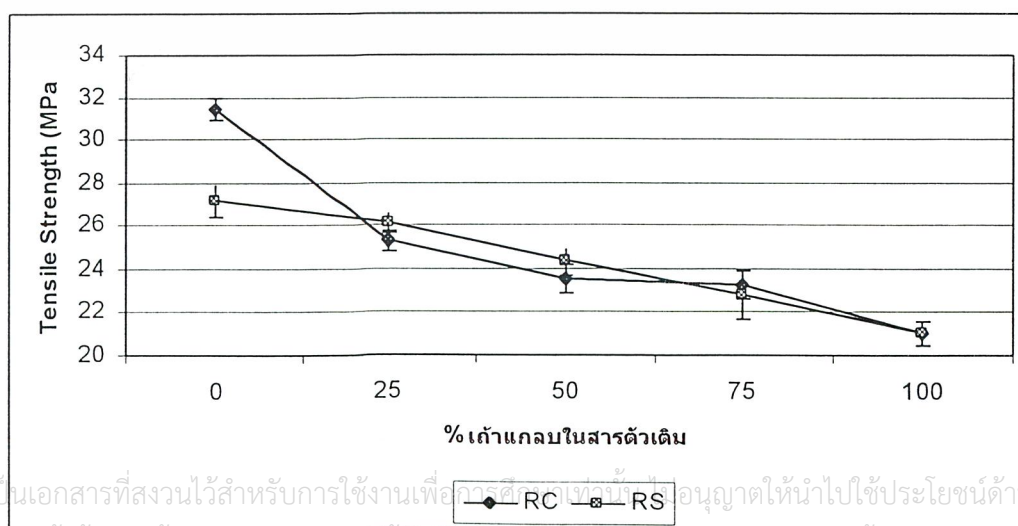
4.4.1 ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)

สมบัติเชิงกลของยางคงรูปที่จัดว่าเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือความต้านทานแรงดึง ซึ่งจากการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่าความต้านทานแรงดึงเมื่อเปรียบเทียบกับกันในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมต่างชนิดกัน

เมื่อทดลองในส่วนของสารตัวเติมผสม เพื่อหาแนวโน้มที่สารตัวเติมผสมจะส่งผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึงของยางธรรมชาติ พบผลการทดลองดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ค่าความต้านทานแรงดึงของยางที่มีสารตัวเติมผสมในอัตราส่วนต่างกัน

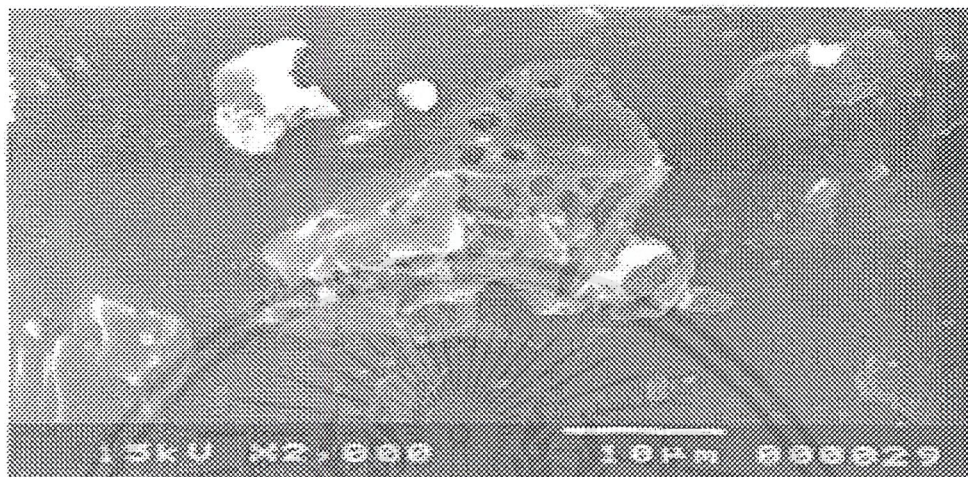
จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงจะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ ค่าความต้านทานแรงดึงของยางเมื่อใช้สารตัวเติมผสมจะอยู่ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงของยางเมื่อใช้สารตัวเติมบริสุทธิ์ทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกัน โดยที่ค่าความต้านทานแรงดึงจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของสารตัวเติมบริสุทธิ์ในสารตัวเติมผสมชนิดนั้น ๆ ซึ่งเป็นไปตามกฎของการผสม

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม ยางจะมีค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเขม่าดำจัดเป็นสารตัวเติมที่มีขั้วดำ ซึ่งเมื่อเติมลงในยางธรรมชาติ ซึ่งจัดว่าเป็นยางที่ไม่มีขั้ว เขม่าดำจึงเข้ากับยางได้ดีมากที่สุด ประกอบกับขนาดอนุภาคที่เล็กของเขม่าดำ จึงทำให้เขม่าดำเสริมแรงในยางได้ดี และเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่มีสารตัวเติม (GUM) ค่าความต้านทานแรงดึงของยางผสมเขม่าดำจะมากขึ้นเนื่องจากเขม่าดำทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรง ดังนั้นเมื่อได้รับแรงกระทำยางจึงมีสมบัติที่ดีขึ้น

เมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมนั้น ความต้านทานแรงดึงจะมีค่ารองลงมา แม้ว่าขนาดอนุภาคของซิลิกาจะเล็กกว่าเขม่าดำ แต่ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีขั้วค่อนข้างสูงเนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในปริมาณมาก ดังนั้น ซิลิกาจึงเข้ากันกับยางธรรมชาติซึ่งเป็นยางที่ไม่มีขั้วได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับเขม่าดำ จึงทำให้ความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าเขม่าดำ และเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่มีสารตัวเติม (GUM) ค่าความต้านทานแรงดึงของยางผสมซิลิกาจะต่ำกว่าเนื่องจากยางที่ผสมซิลิกามีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำ และผลของการเจือจาง (Dilution effect) เพราะการเติมสารตัวเติมลงไป ในยางมากเกินไป จะทำให้สัดส่วนโดยปริมาตรของยางลดลง และถ้าสัดส่วนของยางต่ำจนถึงระดับที่ไม่เพียงพอที่จะรับสารตัวเติมได้ ก็จะทำให้ความต้านทานแรงดึงของยางเสียไป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของยางคอมพาวด์เมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมนั้นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซิลิกาจนถึงจุดสูงสุดที่ประมาณ 30 phr หลังจากนั้นค่าความต้านทานแรงดึงก็จะเริ่มลดลง^[7]

เมื่อใช้ถ้ำแกลบเป็นสารตัวเติม จะมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากถ้ำแกลบมีพื้นที่ผิว และมีแรงกระทำกับยางน้อยกว่าสารตัวเติมทั้งสองชนิดมาก และเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่มีสารตัวเติม (GUM) ค่าความต้านทานแรงดึงของยางผสมถ้ำแกลบจะลดลง เนื่องจากการเติมผงถ้ำแกลบลงไป ในปริมาณต่ำ ๆ ไม่มีผลมากนักต่อค่าความแข็งแรงดึง แต่เมื่อเติมในปริมาณที่สูงขึ้น จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของยางต่ำลงอย่างรวดเร็ว อาจเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของถ้ำแกลบ ซึ่งเห็นได้ชัดจากภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยที่ช่องว่างขนาดเล็ก (Microvoids) ในยางเหล่านี้

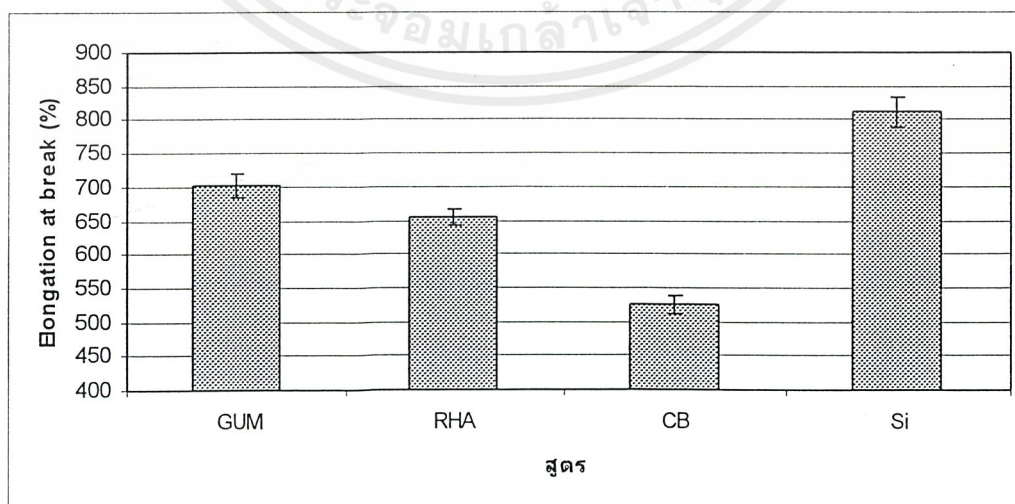
จะเป็นจุดที่เมื่อยางได้รับแรงดึง ค่าความเค้นบริเวณช่องว่างนี้จะสูงกว่าค่าความเค้น ณ จุดอื่น ๆ หรือที่เรียกกันว่าเกิด Stress concentration ทำให้โมเลกุลของยางเกิดการฉีกขาดได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเง้าแกลบ^[7]

4.4.2 เปรอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break)

จากการทดลองศึกษาเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของยางที่ใช้สารตัวเติมบริสุทธิ์ต่างชนิดกัน พบว่ายางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมจะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุดตามด้วยยางที่ไม่ใส่สารตัวเติม ยางที่ใส่เง้าแกลบและเขม่าดำเป็นสารตัวเติมตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

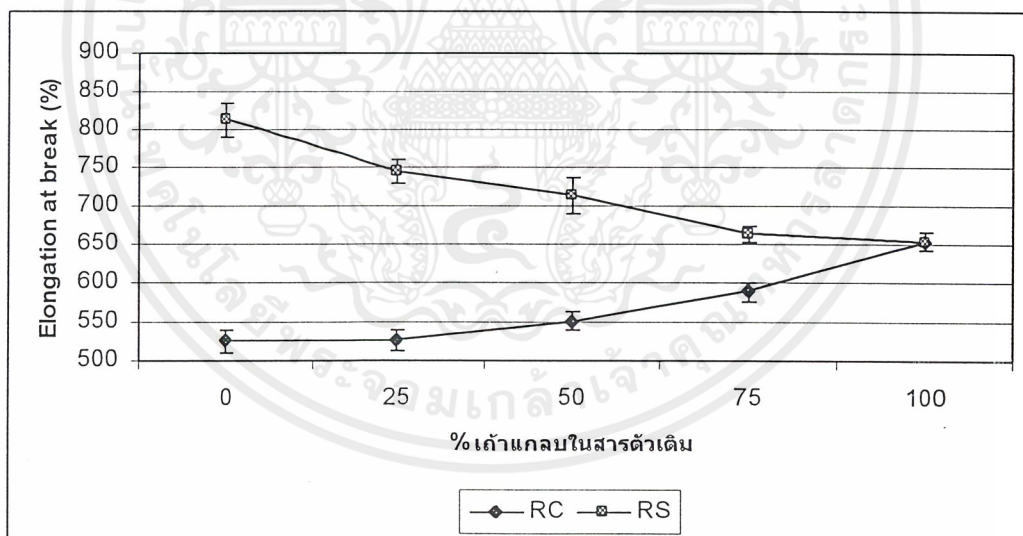


รูปที่ 4.9 เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมบริสุทธิ์

เอกสารนี้เสื่หุ่กัต่างชนิดกันไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ใส่สารตัวเติมพบว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางที่ใช้เถ้าแกลบและเขม่าดำเป็นสารตัวเติมลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยผลของการเจือจาง (Dilution effect) ^[13] นั่นคือการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ทำให้ปริมาณยางที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Mobilised rubber) มีสัดส่วนน้อยลง จึงทำให้ค่าการยืดตัวของยางลดลง ยกเว้นในกรณีของยางผสมซิลิกาพบว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดจะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากซิลิกาสามารถดูดซับสารกระตุ้นสารเร่งไวบนพื้นผิว ซึ่งสารกระตุ้นสารเร่งที่ถูกดูดซับนี้จะไม่มีส่วนร่วมในปฏิกิริยาของรูป ส่งผลให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของยางลดลง ดังที่แสดงในผลการทดลองในสมบัติการบวมตัวของยาง (รูปที่ 4.8)

สำหรับยางที่ใส่สารตัวเติมผสมนั้น พบว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของยางเมื่อใช้สารตัวเติมบริสุทธิ์ทั้งสองชนิดที่ผสมกัน โดยที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด จะเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของสารตัวเติมบริสุทธิ์ ในสารตัวเติมผสมชนิดนั้น ๆ ซึ่งเป็นไปตามกฎของการผสม โดยที่ผลดังกล่าวเป็นไปในแนวโน้มเดียวกันกับสมบัติด้านอื่น ๆ ของยางที่ใช้สารตัวเติมผสม โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด เมื่อเปรียบเทียบกับในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมผสมต่างชนิดกัน

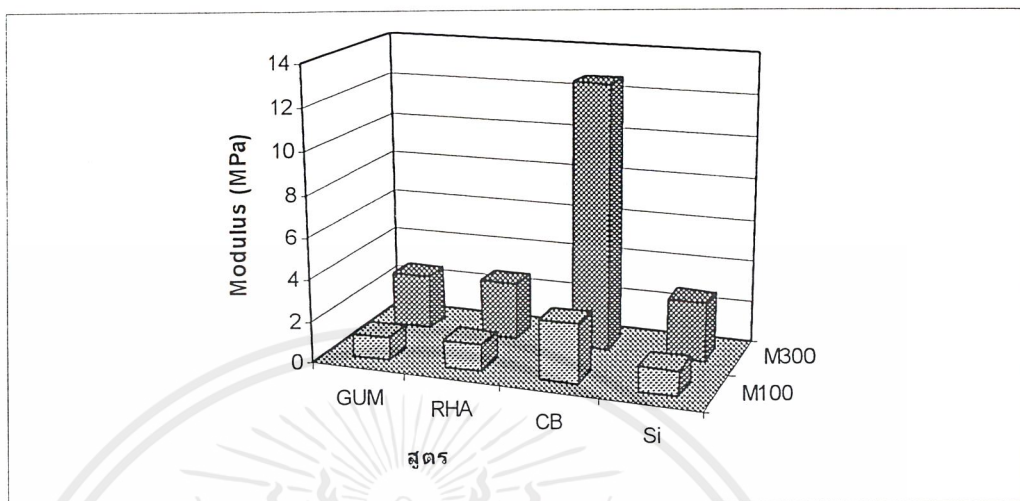
4.4.3 มอดุลัส (Modulus)

มอดุลัสเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงแรง (Stiffness) ของพอลิเมอร์ โดยทั่วไป ค่ามอด

ลัสของพอลิเมอร์สามารถหาได้จากค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียด แต่สำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

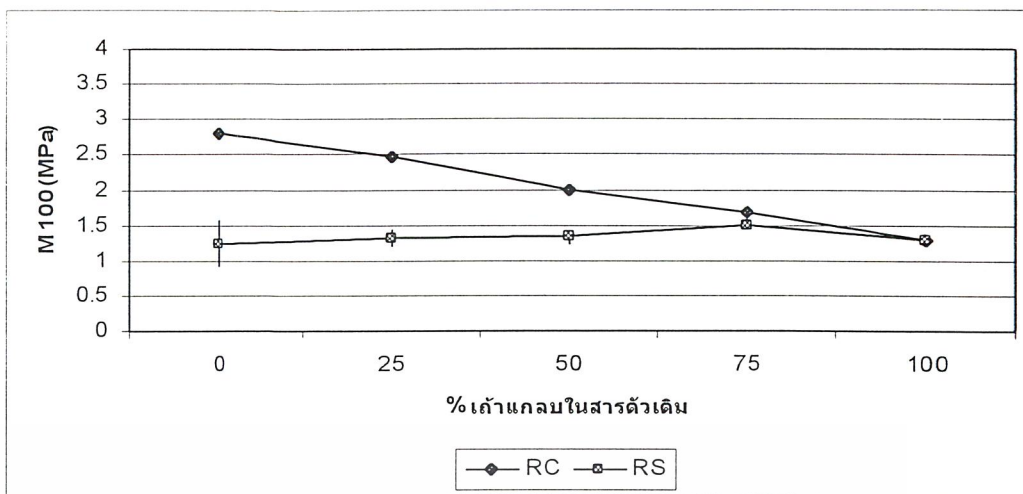
ยางแล้ว ค่ามอดุลัสก็คือค่าความเค้นที่ความเครียดใด ๆ เช่น 100% มอดุลัส หมายถึงค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นที่ความเครียดเท่ากับ 100% รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดลองสำหรับสูตรที่ใช้สารตัวเติมบริสุทธิ์

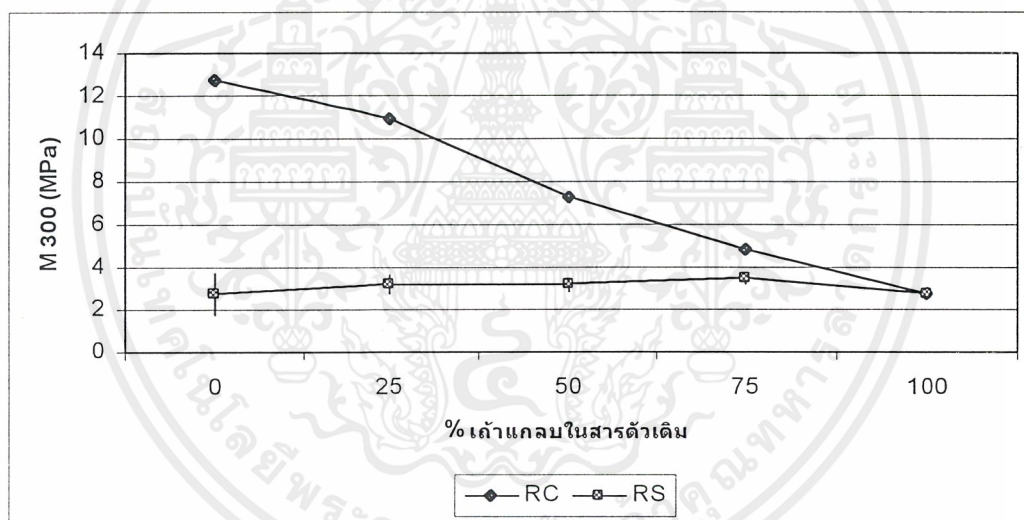


รูปที่ 4.11 มอดุลัสที่ความเครียด 100% (M₁₀₀) และ 300% (M₃₀₀) เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมบริสุทธิ์ต่างชนิดกัน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมจะให้ยางที่มีค่ามอดุลัสมากที่สุด โดยถ้าแคลบ ซิลิกา และ สูตรที่ไม่มีสารตัวเติม มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากเขม่าดำมีอันตรกิริยาที่ดีกับยาง อีกทั้งมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้ช่วยเสริมแรงได้ดี ดังนั้นจึงทำให้ค่ามอดุลัสสูงมาก ในส่วนของสูตรที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมนั้น น่าจะมีค่ามอดุลัสมากเนื่องจากซิลิกามีพื้นที่ผิวสูงที่สุด แต่ผลที่ได้กลับมามีค่ามอดุลัสไม่ต่างจากสารตัวเติมไม่เสริมแรงอย่างถ้าแคลบ ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำ ซึ่งแสดงจากการทดลองของการบวมตัวของยางและรวมถึงอันตรกิริยาที่ไม่ดีระหว่างยางกับซิลิกาเนื่องจากการไม่ใช้สารคู่ควบด้วย จึงทำให้ค่ามอดุลัสที่ได้ค่อนข้างต่ำ สำหรับในส่วนของสารตัวเติมผสมพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของถ้าแคลบในสารตัวเติมผสม จะทำให้ค่ามอดุลัสที่ได้เปลี่ยนแปลงตามสมบัติของถ้าแคลบ



รูปที่ 4.12 มอดุลัสที่ความเครียด 100% (M_{100}) เมื่อเปรียบเทียบกันในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมผสมต่างชนิดกัน



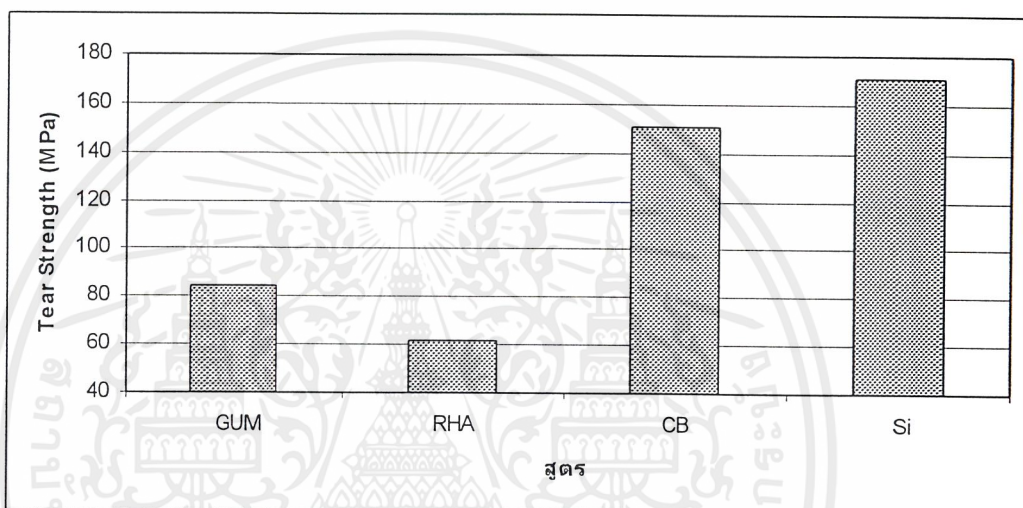
รูปที่ 4.13 มอดุลัสที่ความเครียด 300% (M_{300}) เมื่อเปรียบเทียบกันในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมผสมต่างชนิดกัน

4.4.4 ความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength)

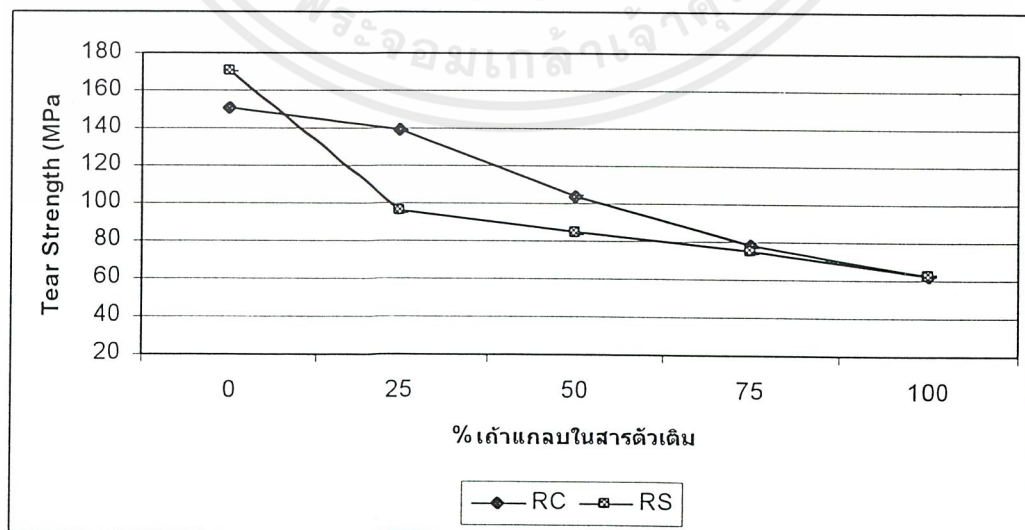
ผลการทดลองหาสมบัติในด้านความแข็งแรงฉีกขาด ในส่วนของสารตัวเติมบริสุทธิ์ทั้งสามชนิดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ใส่สารตัวเติม พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ซิลิกากับเขม่าดำเป็นสารตัวเติมนั้น ทรายผสมซิลิกาจะมีค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงที่สุด (รูปที่ 4.14) เนื่องจากซิลิกามีพื้นที่ผิวสูงกว่าเขม่าดำจึงช่วยเสริมแรงในยางได้ดีกว่า โดยทั่วไป

การเติมสารตัวเติมเสริมแรง เช่น ซิลิกาและเขม่าดำ ลงไปในยางจะช่วยลดการเกิด Stress concentration ที่ Crack tip^[12,13] เนื่องจากสารตัวเติมเสริมแรงเหล่านี้ ทำให้พลังงานภายนอกไม่อาจรณเต้า พังสน ยกพังกามีเม็ดเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้ององงองลงเงาของเอกสรวิทุกคร้งหมักกรณาไปเซ

ที่มากกระทำกับยางถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนมากยิ่งขึ้น โมเลกุลของยางจึงสามารถทนต่อแรงภายนอกที่มากกระทำได้มากขึ้นและความเค้นที่มากกระทำต่อยางก็สามารถกระจายตัวได้สม่ำเสมอและง่ายยิ่งขึ้น ทำให้โมเลกุลของยางมีความต้านทานการฉีกขาดสูงขึ้น ส่วนการเติมเถ้าแกลบลงไปนอยางจะทำให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางลดลง เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของผงเถ้าแกลบ ก่อให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กในตัวอย่างยางดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ทำให้เกิด Stress Concentration ในบริเวณรอบ ๆ ช่องว่างเหล่านี้ ค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางจึงลดลง



รูปที่ 4.14 ความต้านทานการฉีกขาด เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมบริสุทธิ์ต่างชนิดกัน



รูปที่ 4.15 ความต้านทานการฉีกขาด เมื่อเปรียบเทียบกันในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมและการค้าไม่ว่าการผสมต่างชนิดกัน ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 พบว่าความต้านทานการฉีกขาดของยางเมื่อใช้สารตัวเติมผสม จะอยู่ระหว่างความต้านทานการฉีกขาดของยางเมื่อใช้สารตัวเติมบริสุทธิ์ทั้งสองชนิดที่ผสมกัน โดยที่ความต้านทานการฉีกขาดจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของสารตัวเติมบริสุทธิ์ ในสารตัวเติมผสมชนิดนั้น ๆ ซึ่งเป็นไปตามกฎของการผสม

4.4.5 ความแข็งกต (Hardness)

ค่าความแข็งกตเป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของยาง โดยจากการทดลองวัดค่าความแข็งกต (Hardness) ของยางที่ได้จากการผสมเถ้าแกลบ ซิลิกา และเขม่าดำ พบว่าได้ผลการทดลองคล้ายกับผลของค่าความหนืดมูนนี่ คือความแข็งกตของยางจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเติมเถ้าแกลบ เขม่าดำ หรือซิลิกา ดังแสดงในตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 ความแข็งกตเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมต่างชนิดกัน

สูตร	ค่าความแข็งกต (Shore A)
GUM	54.6
RHA	60.0
CB	72.4
Si	59.3

เนื่องจากสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ จัดเป็นอนุภาคของแข็ง เมื่อเติมลงไปนยางจะทำให้ความยืดหยุ่น (Elasticity) ของยางลดลง ทำให้ยางมีความแข็งกตเพิ่มขึ้น ยางที่ผสมกับผงเถ้าแกลบมีค่าความแข็งกตสูงกว่ายางที่ผสมกับซิลิกา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยางที่ผสมกับผงเถ้าแกลบมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density) สูงกว่ายางที่ผสมกับซิลิกา เพราะในผงเถ้าแกลบมีสารกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชันดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น อย่างไรก็ตาม พบว่าเขม่าดำทำให้ยางมีความแข็งกตสูงกว่ายางที่ผสมกับผงเถ้าแกลบมาก เนื่องจากเขม่าดำมีขนาดอนุภาคที่เล็กมากหรือมีพื้นที่ผิวสูงกว่าผงเถ้าแกลบมากและมีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อปฏิกิริยาอยู่ที่ผิว ทำให้เขม่าดำนอกจากจะมีปริมาณ Occluded rubber สูงแล้ว ยังก่อให้เกิดแรงกระทำระหว่างกัน (Filler-filler interaction) สูง เขม่าดำจึงอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Aggregate) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อเติมลงไปนยางในปริมาณมาก ๆ ระยะห่างระหว่างแต่ละกลุ่มก้อนของเขม่าดำ (Interaggregate distance) ในยางก็จะลดลง ทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างกลุ่มก้อนเขม่าดำเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ (Carbon black

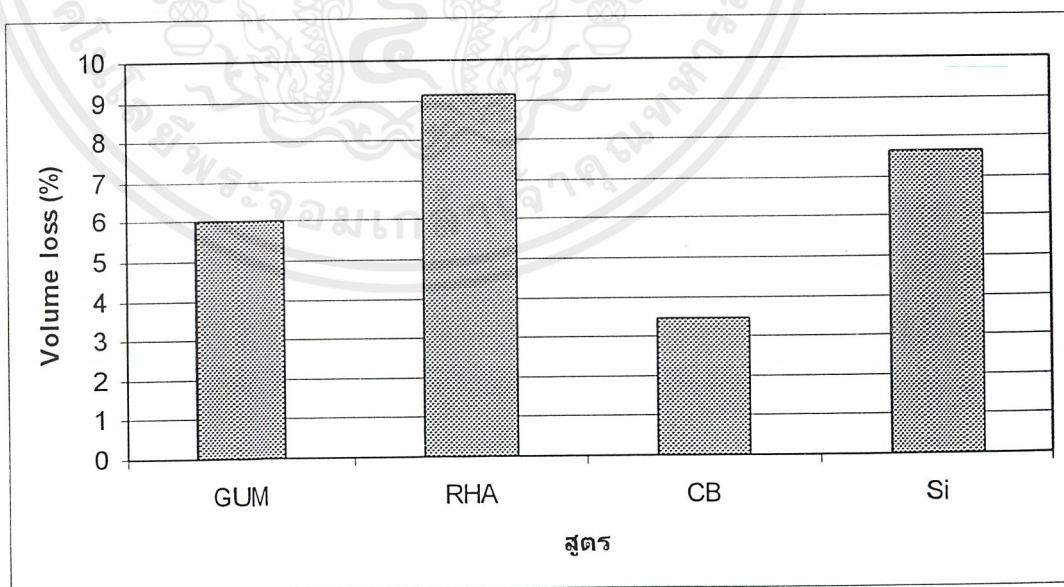
network) แทรกอยู่ในโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของยาง การเกิดโครงสร้าง 3 มิติของสารตัวเติมไม่ว่าการฉีกขาดได้ ในซิลิกาเช่นเดียวกับเขม่าดำ ซึ่งโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของซิลิกานี้ค่อนข้าง

เสถียรและแข็งแรง เพราะแรงดึงดูดระหว่างกลุ่มก้อนของซิลิกานั้นเป็นแรงที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bridge) ^[14] การเกิดโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของซิลิกาทำให้ยางมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างสูงขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือ ยางจะมีความแข็งกตสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ยางที่ผสมซิลิกามีความแข็งกตไม่สูงตามที่ควรจะเป็น ทั้งนี้อาจเป็นผลจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยง

ตารางที่ 4.6 ความแข็งกตในสูตรที่มีสารตัวเติมผสมต่างชนิดกัน

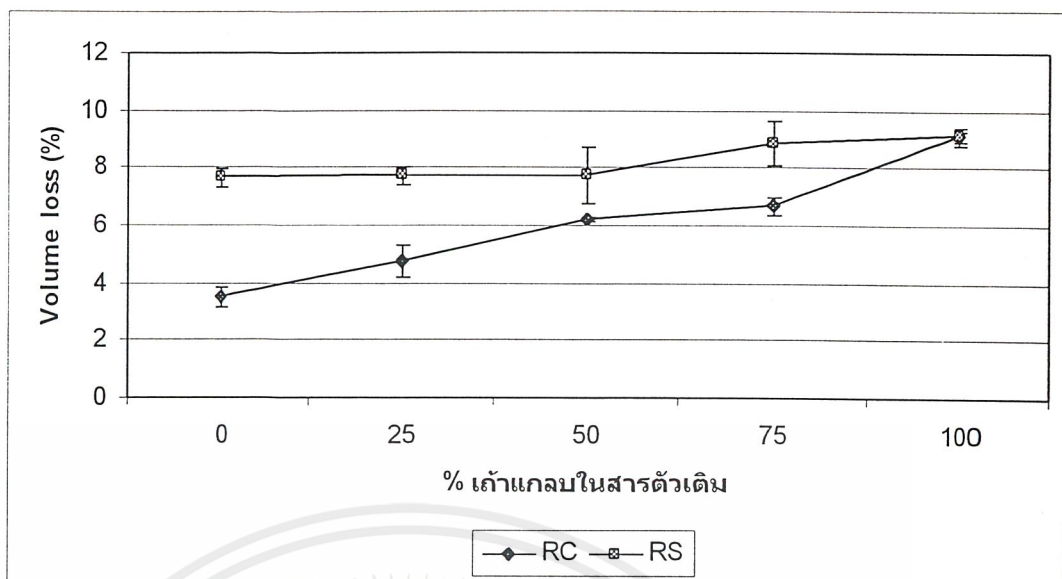
สูตร	ค่าความแข็งกต (Shore A)
RC25	65.00
RC50	64.00
RC75	62.40
RS25	59.30
RS50	58.00
RS75	61.60

4.4.6 ความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance)



รูปที่ 4.16 ความต้านทานการขัดถูในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมบริสุทธิ์ต่างชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



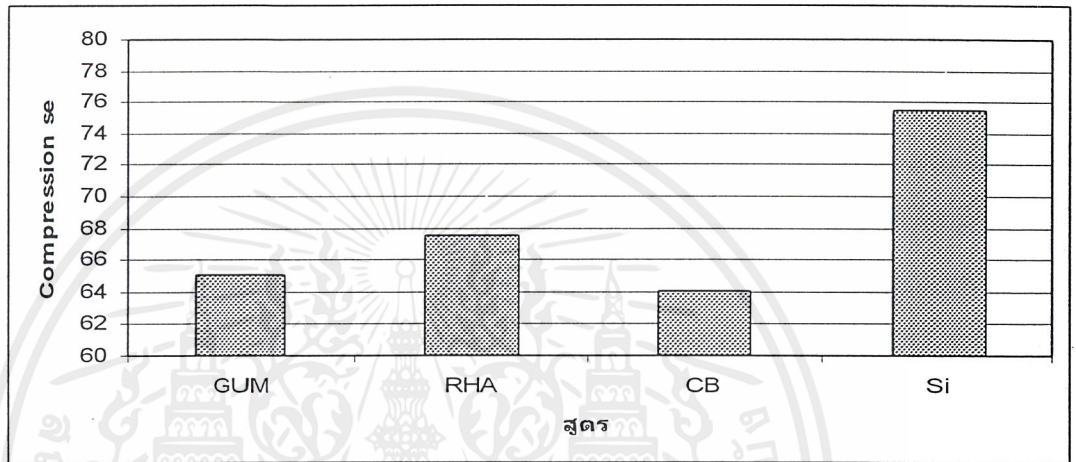
รูปที่ 4.17 ความต้านทานการขีดถูในสูตรที่มีสารตัวเติมผสมต่างชนิดกัน

จากรูปที่ 4.16 แสดงความต้านทานการขีดถูในรูปของปริมาตรที่สูญเสียไป (Volume loss) ในระหว่างการทดสอบของยางที่มีสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า การเติมเขม่าดำทำให้สมบัติความต้านทานการขีดถูของยางดีขึ้น เนื่องจากเขม่าดำมีความเป็นขั้วต่ำ จึงเข้ากับยางธรรมชาติได้ดี จึงสามารถเกิดแรงกระทำกับยางได้สูง ทำให้ผสมกับยางได้ง่าย ส่วนการเติมซิลิกาจะทำให้ค่าความต้านทานการขีดถูของยางลดลง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการกระจายตัวที่ไม่ดีของซิลิกาในยาง (Poor filler dispersion) เพราะซิลิกามีความเป็นขั้วสูง ในขณะที่ยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นซิลิกาจึงผสมกับยางได้ยาก โดยเฉพาะในกรณีที่มีการเติมซิลิกาลงไปในปริมาณมาก⁽¹²⁾ เพราะซิลิกาชอบที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่มากกว่าที่จะกระจายตัวในยาง ส่วนการเติมผงเถ้าแกลบลงไป ในยางจะส่งผลให้สมบัติความต้านทานการขีดถูของยางลดลง เนื่องจากผงเถ้าแกลบมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่มากและไม่มีความแข็งแรงกับยาง (Poor rubber-filler interaction) ดังนั้น ความต้านทานการขีดถูของยางจะลดลงตามปริมาณของผงเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 4.17 พบว่าความต้านทานการขีดถูของยางเมื่อใช้สารตัวเติมผสมจะอยู่ระหว่างความต้านทานการขีดถูของยางเมื่อใช้สารตัวเติมบริสุทธิ์ทั้งสองชนิดที่ผสมกัน โดยที่ความต้านทานการขีดถูจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของสารตัวเติมบริสุทธิ์ ในสารตัวเติมผสมชนิดนั้น ๆ ซึ่งเป็นไปตามกฎของการผสม

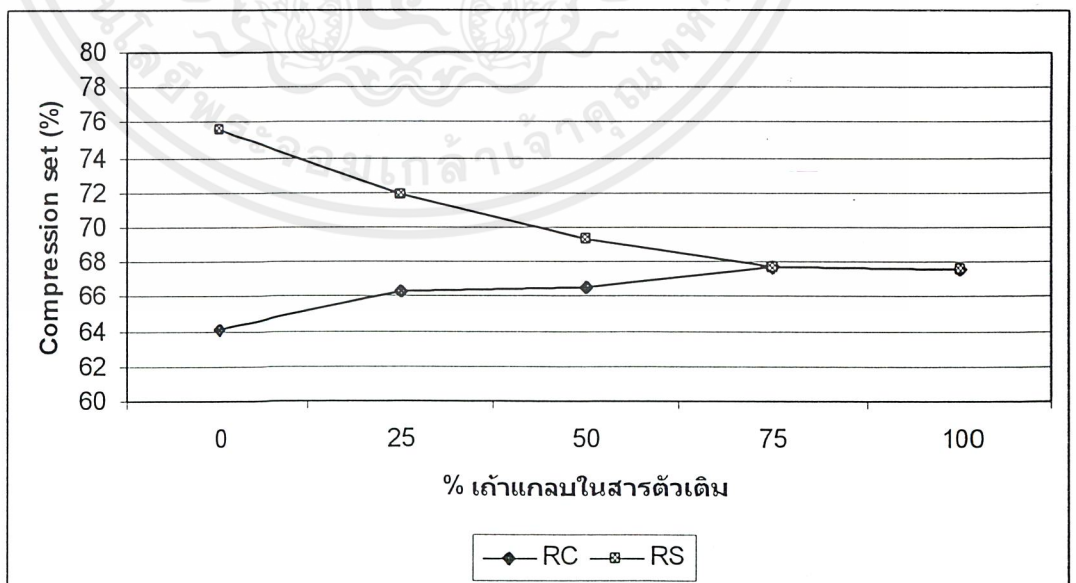
4.4.7 Compression set

ค่า Compression set แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกลับคืนสู่รูปร่างเดิมหลังจากปล่อยแรง โดยผลการทดลองในส่วนของสารตัวเติมบริสุทธิ์และสารตัวเติมผสมแสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ โดยจะพบว่าในสูตรที่มีการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมจะมีสมบัติ

ไม่ดีนัก ทั้งนี้จะเป็นผลมาจากความหนาแน่นในการเชื่อมโยงในสูตรที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงทำให้สมบัติไม่ดีเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องจากในโครงการวิจัยนี้ไม่มีการเติมสารช่วยให้เข้ากันได้ เพื่อช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยาง ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการทดลองหาสมบัติการบวมตัวของยางและค่าความแข็งกด ซึ่งได้กล่าวมาแล้ว สำหรับในสูตรที่มีเขม่าดำเป็นสารตัวเติมนั้นมีสมบัติที่ดีที่สุด เนื่องจากอันตรกิริยาที่ดีระหว่างยางกับเขม่าดำ และรวมถึงความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในเขม่าดำด้วย



รูปที่ 4.18 ค่า Compression set เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมบริสุทธิ์ต่างชนิดกัน



รูปที่ 4.19 ค่า Compression set เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสูตรที่มีสารตัวเติมผสม

เอกสารนี้ต่างชนิดกัน สรรวไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของสารตัวเติมผสมระหว่างแก้วกับซิลิกา หรือเขม่าดำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ โดยปริมาณสารตัวเติมในยางคอมพาวด์คือ 40 phr จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณแก้วในสารตัวเติมผสมมากขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง ประกอบด้วยค่า ความต้านทานแรงดึง โมดูลัส ความต้านทานการฉีกขาด ความต้านทานการขูดฉุด Compression set อย่างไรก็ตามในส่วนของการคงรูปของยางคอมพาวด์และค่าความแข็งกดไม่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงมากนัก

สมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าปกติของสูตรที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม และการที่ค่าความแข็งกด และเวลาในการคงรูปไม่แสดงความเปลี่ยนแปลงมากนัก เป็นผลเนื่องมาจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ซึ่งในสูตรที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมไม่ได้มีการเติมสารคู่ควบไซเลนทำให้อันตรกิริยา ระหว่างยางกับซิลิกาไม่ดี และทำให้ซิลิกาบางส่วนดูดซับสารกระตุ้นสารเร่งไว้บนพื้นผิว ซึ่งเป็นผลให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงลดลง ซึ่งพิสูจน์ได้จากค่าการบวมตัวในสารละลายเฮกเซน

สำหรับสมบัติเชิงกลที่ใช้สารตัวเติมผสม พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของแก้วในสารตัวเติมผสมคือ 25% ของแก้ว เนื่องจากสมบัติเชิงกลลดลงน้อยที่สุด ทั้งนี้ขึ้นกับความเหมาะสมและการนำไปใช้งาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เปรียบเทียบการใช้สารคู่ควบไซเลน
2. เปรียบเทียบการคัดขนาดอนุภาคของแก้ว

เอกสารอ้างอิง

1. Goodwin; John, d.; Mulkey, I.I.I.; Forest, W. "Rice hull ash composition", US patenes no. 4571389
2. ผศ.ดร. อธิธิพล แจ้ซัด,เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีการยาง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. Encyclopedia of Chemical Technology vol.4, 4th Edition 1997, 1039-1047
4. Encyclopedia of Chemical Technology vol.21, 4th Edition 1997, 427-588, 1012-1025
5. Costa, H. M. D.; Visconte L. L. Y.; Nunes R. C. R.; Furtado C. R. G. *J Appl Polym Sci*, 2000, 76, 1019-1027
6. Haxo, H. E.; Metha, P. K. *Rubb Chem Technol*, 1975, 48, 271-288
7. P. Sae-oui, C. Rakdee and P. Thanmathorn, *J Appl Polym Sci*, 2002, 83, 2485-2493
8. Isahak, Z. A. M.; Bakar, A. A. *Eur Polym J*, 1995, 31 (3), 259-267
9. Nicholas P., Chemisinoff, *Elastomer technology handbook*, 1993
10. วราภรณ์ ขจรไชยกุล, กระบวนการผลิตภัณฑ์ยาง กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากยาง ศูนย์วิจัยยางสงขลา กรมวิชาการเกษตร, 2530
11. Ismail, H.; Nasaruddin, M. N.; Ishiaku, U. S. *Polymer testing*, 1999, 18, 287-298
12. Sung-Seen Choi, *J Appl Polym Sci*, 2001, 39, 439-445
13. Boonstra, B. B. in "Reinforcement by Filler", Blow C.M. Ed, Butterworths for the Institution of the Rubber Industry, 1971
14. Wolff, S. *Rubber Chem. Technol.*, 69, 325 (1996)