

สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติเติมด้วยพอตเทอริสโตน

นางสาวชนิษฐา หนูมัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาพอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PHYSICAL PROPERTIES OF NATURAL RUBBER FILLED WITH POTTERY STONE

Miss Khanittha Noomun

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติเติมด้วยพอตเทอริสโตน
โดย	นางสาวชนิษฐา หนูมัน
สาขาวิชา	พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรุณา สรวารี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. ฉันทิพ คำนวนทิพย์)

ขนิษฐา หนูมัน : สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติเติมด้วยพอตเทอริสโตน
(PHYSICAL PROPERTIES OF NATURAL RUBBER FILLED WITH POTTERY STONE)
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:
อ.ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด, 88 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้พอตเทอริสโตนซึ่งประกอบด้วยซิลิกาสูงถึงร้อยละ 75.88 เป็นสารเสริมแรงสำหรับยางธรรมชาติ โดยศึกษาผลของขนาดพอตเทอริสโตนต่อลักษณะการคงรูป และสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่เติมด้วยพรีซิพิเทตซิลิกา (ซิลิกาทางการค้า) และศึกษาผลของสารคู่ควบซีเลเนตต่อสมบัติและความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติเติมด้วยพอตเทอริสโตนหรือพรีซิพิเทตซิลิกา

สารประกอบยางได้ถูกเตรียมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งและขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ จากกราฟการคงรูปยาง พบว่า การเติมพอตเทอริสโตนในสารประกอบยางมีผลต่อเวลาก่อนการบ่ม และเวลาการคงรูปที่ 90% และ 100% ไม่มากนัก นอกจากนี้ ขนาดของพอตเทอริสโตนยังไม่มีผลต่อลักษณะการคงรูป ในขณะที่การเติมพรีซิพิเทตซิลิกาส่งผลให้เวลาในการคงรูปเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ยางธรรมชาติที่เติมพอตเทอริสโตนมีความต้านแรงดึง ความต้านการฉีกขาด และความแข็งแรงสูงกว่ายางที่ไม่ใส่สารตัวเติมและใส่พรีซิพิเทตซิลิกา โดยขนาดของพอตเทอริสโตนมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของยางอย่างไม่มีระบบ อย่างไรก็ตาม พบว่า ยางที่เติมพอตเทอริสโตนที่ผ่านการบดละเอียดมีค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุด และมีค่าความต้านการฉีกขาดต่ำที่สุด แต่มากกว่ายางธรรมชาติที่ใส่พรีซิพิเทตซิลิกา นอกจากนี้ การใส่สารคู่ควบซีเลเนตไม่ได้ปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของยางที่ใส่พอตเทอริสโตน ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องใส่สารคู่ควบในยางที่เติมด้วยพอตเทอริสโตน

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ.. ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2550..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4972233723: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE THECHNOLOGY

KEY WORD: PRECIPITATED SILICA/POTTERY STONE/COUPLING/REINFORCING AGENT

KHANITTHA NOOMUN: PHYSICAL PROPERTIES OF NATURAL RUBBER FILLED WITH POTTERY STONE. THESIS PRINCIPAL ADVISOR: ASSOC.PROF. SAOWAROJ CHUAYJULJIT, THESIS COADVISOR: KANOKTIP BOONKERD, Ph.D., 88 pp.

This research studied the possibility of utilizing pottery stone consisting of silica up to 75.88% as natural reinforcing filler. The result of pottery stone size on the cure characteristic and physical properties of natural rubber was studied and compared with those of natural rubber filled with precipitated silica (or commercial silica). Finally, the effects of silane coupling agent on properties and compatibility of natural rubber filled with pottery stone or precipitated silica were studied.

The rubber compounds were prepared and shaped using two roll mill and compression molding machine, respectively. From cure curves, it was found that the incorporating pottery stone to rubber compound had slightly effect on scorch time and cure time for both at 90% and 100%. Moreover, the particle size of pottery stone had no effect on cure characteristics. In case of rubber filled with precipitated silica, cure time was significantly increased. Natural rubber filled with pottery stone showed higher tensile strength, tear strength and hardness than those of unfilled rubber and rubber filled with precipitated silica. The effect of pottery stone size on physical properties of rubber was not systematically observed. However, it was found that rubber filled with ground pottery stone showed highest tensile strength and lowest tear strength but still higher than natural rubber filled with precipitated silica. In addition, silane coupling agent did not improve the physical properties of rubber filled with pottery stone. So it is not necessary to use coupling agent for pottery stone-filled rubber.

Department.....Materials Science..... Student's signature.....

Field of study...Applied Polymer Science and Textile Technology... Principal Advisor's signature.....

Academic year.....2007..... Co - Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี เพราะได้รับคำแนะนำปรึกษาทางด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือทดสอบหน่วยงานต่างๆ และการแนะนำจากผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกเป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังมีรายนามต่อไปนี้

1. รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. กนกทิพย์ บุญเกิด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือแนะนำแนวทางในการวิจัย รวมทั้งการจัดทำวิทยานิพนธ์

2. รศ. อรุษา สรวารี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้วิทยานิพนธ์

3. อาจารย์ ดร. ฉันททิพ คำนวนทิพย์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ และแนะนำการใช้เครื่องมือในการทดสอบ รวมทั้งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้วิทยานิพนธ์

4. คุณประพันธ์ อังติชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบพอตเทอริสโตนและข้อมูลของพอตเทอริสโตนสำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

5. ดร. กฤษณา ศิริเลิศมุกด และดร. รัฐพล รัษฎพันธุ์ ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำด้านวิชาการ

6. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ เครื่องมือในการทดสอบ

7. กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ เครื่องมือในการทดสอบ และขอขอบคุณ ร.ต.ท.หญิง ชนิษฐา หมิ่นแสน และ ร.ต.ท.หญิง ยุพรัตน์ ปิ่นแก้ว ที่อำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่ เครื่องมือในการทดสอบดังกล่าว

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในทุกๆ ด้าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 มูลเหตุจูงใจและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
2 ข้อมูลเบื้องต้นทางวิชาการ.....	4
2.1 ยางธรรมชาติ.....	4
2.2 สารเติมแต่งสำหรับยาง.....	13
2.2.1 สารทำให้ยางคงรูปหรือสารวัลคาไนซ์.....	14
2.2.2 สารเร่งวัลคาไนซ์.....	18
2.2.3 สารกระตุ้นวัลคาไนซ์.....	18
2.2.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ.....	20
2.2.5 สารตัวเติม.....	25
2.3 ซิลิกา.....	27
2.4 พอตเทอริสโตน.....	31
2.5.สารคู่ควบ.....	32
3 การทดลอง.....	35
3.1 ยางและสารเคมียาง.....	35
3.2 สูตรสารประกอบยางที่ใช้ในการวิจัย.....	35

บทที่		
3	3.3 ขั้นตอนการเตรียมพอดเทอริสโตน.....	40
	3.4 การทดสอบสมบัติและวิเคราะห์พอดเทอริสโตน.....	41
	3.5 ขั้นตอนการผสมยางและขึ้นรูปยาง.....	41
	3.6 การทดสอบหาเวลาการคงรูป.....	44
	3.7 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป.....	45
	3.8 การหาดัชนีการบวมตัว.....	48
4	ผลการทดลอง.....	49
	4.1 ลักษณะทางกายภาพและหมู่ฟังก์ชันของพอดเทอริสโตนและพรีซีพิต.....	49
	4.2 สมบัติคงรูปของสารประกอบยาง.....	52
	4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน.....	54
	4.3.1 ดัชนีการบวมตัว.....	54
	4.3.2 ความต้านแรงดึง.....	55
	4.3.3 เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด.....	60
	4.3.4 มอดุลัสของยางคงรูป.....	61
	4.3.5 ความแข็ง.....	63
	4.3.6 ความต้านการฉีกขาด.....	65
	4.4 ลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในเนื้อยาง.....	67
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
	รายการอ้างอิง.....	76
	ภาคผนวก.....	77
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	88

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการผลิตยางพาราของประเทศต่างๆ ปี 2539-2543..... 2

ตารางที่ 2.1 ผลิตรubber จากยางดิบชนิดต่างๆ..... 13

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานของกำมะถันรอมบิกและกำมะถันอสังฐาน..... 15

ตารางที่ 2.3 ชนิด ตัวอย่าง และหน้าที่ของสารเร่งวัลคาไนซ์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์..... 19

ตารางที่ 2.4 สารกระตุ้นวัลคาไนซ์ปฏิกิริยาชนิดต่างๆ..... 20

ตารางที่ 2.5 สมบัติทั่วไปของพีรีซีพิเทตซิลิกา..... 28

ตารางที่ 2.6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของพอดเทอริสโตนจากแหล่งลพบุรี..... 32

ตารางที่ 2.7 ปริมาณการผลิตแร่ที่สำคัญใน พ.ศ. 2544 – 2548..... 32

ตารางที่ 3.1 สูตรสารประกอบยางที่ไม่ใส่สารตัวเติม..... 36

ตารางที่ 3.2 สูตรสารประกอบยางที่ใช้พอดเทอริสโตนเป็นสารตัวเติม..... 37

ตารางที่ 3.3 สูตรสารประกอบยางที่ใช้พีรีซีพิเทตซิลิกาเป็นสารตัวเติม..... 38

ตารางที่ 3.4 สูตรสารประกอบยางที่ใช้พอดเทอริสโตนร่วมกับสารคู่ควบ Si-69..... 39

ตารางที่ 3.5 สูตรสารประกอบยางที่ใช้พีรีซีพิเทตซิลิการ่วมกับสารคู่ควบ Si-69..... 40

ตารางที่ 4.1 ค่า t_{s2} , t_{c90} , t_{c100} , ML และ MH ของสูตรยางต่างๆ..... 53

ตารางที่ 4.2 ค่าดัชนีการบวมตัวของสารประกอบยาง..... 54

ตารางที่ 4.3 ความต้านแรงดึงของสารประกอบยางที่ไม่ใส่สารตัวเติม..... 56

ตารางที่ 4.4 ผลของการเติมพอดเทอริสโตนขนาดต่างๆ และพีรีซีพิเทตซิลิกาต่อความต้านแรงดึงของยางคงรูป..... 57

ตารางที่ 4.5 ผลการเติมสารคู่ควบ Si-69 ร่วมกับสารตัวเติมต่อความต้านแรงดึงของยางคงรูป... 59

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางคงรูปสูตรต่างๆ..... 60

ตารางที่ 4.7 มอดุลัสของยางคงรูปที่ความเครียด 100% และ 300%..... 62

ตารางที่ 4.8 ความแข็งของยางคงรูป..... 64

ตารางที่ 4.9 ความต้านการฉีกขาดของยางคงรูป..... 65

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 สูตรโมเลกุลของไอโซพรีนและพอลิไอโซพรีน.....	5
ภาพที่ 2.2 ลักษณะการเชื่อมขวาง: (1) มอนอซัลฟิดิก (2) ไดซัลฟิดิก (3) พอลิซัลฟิดิก เมื่อ $x \geq 3$ (4) สายโซ่กำมะถัน (5) โครงสร้างแบบวง และ (6) หมู่ไทออล (thiol).....	16
ภาพที่ 2.3 ผลของปริมาณกำมะถันต่อความต้านแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด.....	17
ภาพที่ 2.4 สมบัติที่เปลี่ยนไปตามปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น.....	17
ภาพที่ 2.5 สารประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของพีนีลีนไดเอมีน.....	21
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ 77PD	21
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมี (ก) IPPD และ (ข) 6PPD.....	22
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ PBN	22
ภาพที่ 2.9 โครงสร้างสารเคมีที่เป็นอนุพันธ์ของไดฟีนีลเอมีน.....	23
ภาพที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของ TMQ.....	23
ภาพที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของ SPH.....	24
ภาพที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) BHT และ (ข) BPH.....	24
ภาพที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างของซิลิกา.....	28
ภาพที่ 2.14 (ก) หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกา (ข) รูปแบบต่างๆ ของหมู่อซิลานอล.....	29
ภาพที่ 2.15 ผลของปริมาณซิลิกาต่อสมบัติ (a) ความต้านแรงดึง (b) มอดุลัส (c) ความต้าน การฉีกขาด (d) ความต้านทานการสึกหรอ และ (e) การกระดอนของยาง.....	30
ภาพที่ 2.16 ลักษณะของพอตเทอริสโตนที่อยู่ในรูปของหินผุและผ่านการบดแล้ว.....	31
ภาพที่ 2.17 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบซิลเลน (Si-69).....	33
ภาพที่ 2.18 การทำปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบซิลเลน (Silane-69) กับซิลิกา.....	33
ภาพที่ 3.1 เครื่องบด Planetary Mill.....	41
ภาพที่ 3.2 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง.....	42
ภาพที่ 3.3 เครื่องอัดแบบ Compression Molding.....	44
ภาพที่ 3.4 เครื่อง Moving Die Rheometer.....	45
ภาพที่ 3.5 เครื่อง Tensile Tester Machine (INSTRON).....	46
ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนทดสอบความต้านแรงดึง.....	46
ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนทดสอบสำหรับการวัดความต้านการฉีกขาด.....	47
ภาพที่ 3.8 เครื่องวัดความแข็งดูโรมิเตอร์ชอร์ A.....	47

ภาพที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์ที่ผ่านตะแกรงร่อน 325 เมช.....	49
ภาพที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์ที่ผ่านตะแกรงร่อน 230 เมช.....	50
ภาพที่ 4.3 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์ที่ผ่านตะแกรงร่อน 140 เมช..	50
ภาพที่ 4.4 ลักษณะรูปร่างอนุภาคของพอลิเมอร์ที่ได้จากเครื่อง SEM.....	51
ภาพที่ 4.5 ลักษณะรูปร่างอนุภาคของพรีซิพิตชันที่ได้จากเครื่อง SEM.....	51
ภาพที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของ (a) พอลิเมอร์ และ (b) พรีซิพิตชัน.....	52
ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าดัชนีการรวมตัวของยางที่เติมพอลิเมอร์ขนาดต่างๆ กันและพรีซิพิตชันในปริมาณที่เท่ากัน.....	55
ภาพที่ 4.8 ความต้านแรงดึงของยางที่ไม่ใส่สารตัวเติม.....	56
ภาพที่ 4.9 ผลของการเติมพอลิเมอร์ขนาดต่างๆ และพรีซิพิตชันต่อความต้านแรงดึงของยางคงรูป.....	58
ภาพที่ 4.10 ความต้านแรงดึงของยางคงรูปที่ใส่และไม่ใส่สารตัวเติม Si-69.....	59
ภาพที่ 4.11 เปรอริเซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางคงรูปที่ใส่และไม่ใส่สารตัวเติม Si-69.....	61
ภาพที่ 4.12 มอดูลัสที่ความเครียด 100% ของยางคงรูปที่ใส่และไม่ใส่สารตัวเติม Si-69.....	62
ภาพที่ 4.13 มอดูลัสที่ความเครียด 300% ของยางคงรูปที่ใส่และไม่ใส่สารตัวเติม Si-69.....	63
ภาพที่ 4.14 ความแข็งของยางคงรูปที่ใส่และไม่ใส่สารตัวเติม Si-69.....	64
ภาพที่ 4.15 ความต้านการฉีกขาดของยางคงรูปที่ใส่และไม่ใส่สารตัวเติม Si-69.....	66
ภาพที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของยางคงรูปที่ใส่พอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กกว่า 45 μm (NR-PS1) : (a) ไม่ใส่สารตัวเติม Si-69 และ (b) ใส่สารตัวเติม Si-69.....	68
ภาพที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของยางคงรูปที่ใส่พอลิเมอร์ที่มีขนาด 45-62 μm (NR-PS2) : (a) ไม่ใส่สารตัวเติม Si-69 และ (b) ใส่สารตัวเติม Si-69.....	69
ภาพที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของยางคงรูปที่ใส่พอลิเมอร์ที่มีขนาด 63-106 μm (NR-PS3) : (a) ไม่ใส่สารตัวเติม Si-69 และ (b) ใส่สารตัวเติม Si-69.....	70
ภาพที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของยางคงรูปที่ใส่พอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กกว่า 106 μm (NR-PS4) : (a) ไม่ใส่สารตัวเติม Si-69 และ (b) ใส่สารตัวเติม Si-69.....	71
ภาพที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของยางคงรูปที่ใส่พอลิเมอร์ที่ผ่านการบด (NR-PS5) : (a) ไม่ใส่สารตัวเติม Si-69 และ (b) ใส่สารตัวเติม Si-69.....	72
ภาพที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของยางคงรูปที่ใส่พรีซิพิตชันซิลิกา (NR-silica) : (a) ไม่ใส่สารตัวเติม Si-69 และ (b) ใส่สารตัวเติม Si-69.....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 มูลเหตุจูงใจและที่มาของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีความหลากหลายทางภูมิประเทศ ซึ่งมีทั้งลักษณะที่เป็นที่ราบ ที่ราบสูง และภูเขา จากความหลากหลายทางภูมิประเทศนี้ทำให้มีแหล่งทรัพยากรทางธรรมชาติที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะลักษณะภูมิประเทศแบบภูเขานั้น จากการสำรวจทางธรณีวิทยาได้พบว่าประเทศไทยเคยมีการระเบิดของภูเขาไฟมาก่อน ซึ่งมีหลักฐานจากหินภูเขาไฟมากมายหลายชนิดที่กระจายอยู่ทั่วไปในหลายจังหวัด เช่น ลพบุรี กาญจนบุรี สระบุรี ลำปาง และสุรินทร์ เป็นต้น โดยในจำนวนหินภูเขาไฟเหล่านี้ มีแร่ไรโอไลต์ (rhyolite) หรือพอตเทอริสโตน (pottery stone) รวมอยู่ด้วย ซึ่งพอตเทอริสโตนเป็นหินอัคนีภูเขาไฟชนิดที่เรียกว่า หินอัคนีสีจาง (Felsic Igneous Rock) เกิดจากการที่หินละลายที่พุ่งออกมาจากภูเขาไฟ (lava) เย็นตัวอย่างรวดเร็วกลายเป็นหินที่มีผลึกขนาดเล็กมีเนื้อละเอียด (fine grained) และเมื่อสลายตัวจะให้ดินที่มีสีจาง เนื้อค่อนข้างหยาบ มีปริมาณซิลิกามากกว่าร้อยละ 66 [1] นอกจากนี้ พอตเทอริสโตนยังเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีราคาถูก ปัจจุบันจึงนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก เพื่อช่วยในการลดต้นทุนการผลิต โดยปริมาณการผลิตของพอตเทอริสโตนในแต่ละปีนั้นมีหลายแสนตัน

จากปริมาณการผลิตที่มีหลายแสนตันต่อปีนั้น แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของพอตเทอริสโตนในการนำไปใช้งานด้านต่างๆ ซึ่งการนำไปใช้ในด้านใดนั้นขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ และส่วนประกอบของพอตเทอริสโตน โดยพอตเทอริสโตนมีส่วนประกอบโดยทั่วไปเป็นออกไซด์ของโลหะ และมีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกา

เมื่อคำนึงถึงปริมาณของซิลิกาที่มีในพอตเทอริสโตนแล้ว ทำให้สามารถนำพอตเทอริสโตนมาเพิ่มมูลค่าได้ โดยการใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ ที่ต้องการส่วนผสมที่มีซิลิกาเป็นส่วนประกอบเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์รวมทั้งยังลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

นอกจากความหลากหลายทางภูมิประเทศที่ทำให้ประเทศไทยมีทรัพยากรมากมายแล้ว ประเทศไทยยังเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีสินค้าเกษตรเป็นสินค้าส่งออกหลัก ซึ่งหนึ่งในนั้น คือ ยางพารา เพราะประเทศไทยมีการทำสวนยางพาราเป็นจำนวนมาก โดยแหล่งเพาะปลูกที่สำคัญของไทยอยู่ที่ภาคใต้ 14 จังหวัด ได้แก่ สงขลา นครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี ตรัง นราธิวาส ยะลา กระบี่ พังงา พัทลุง ปัตตานี สตูล ชุมพร ภูเก็ต และระนอง ส่วนในภาคตะวันออกมี 7 จังหวัด ได้แก่ ระยอง จันทบุรี ตราด ชลบุรี ฉะเชิงเทรา ปราจีนบุรี และสระแก้ว นอกจากนี้ ยังมีการปลูกในบาง

จังหวัดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันตก และภาคเหนือ เป็นต้น ส่งผลให้ปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตยางพาราได้เป็นอันดับหนึ่งของโลก ดังแสดงการเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการผลิตยางพาราของประเทศต่างๆ ปี 2539-2543 (หน่วย :1,000 ตัน)

ประเทศ	2539	2540	2541	2542	2543
ไทย	1,970.40	2,032.70	2,075.90	2,154.60	2,346.40
อินโดนีเซีย	1,527.00	1,504.80	1,714.00	1,599.20	1,501.10
มาเลเซีย	1,082.50	971.1	885.7	768.9	927.6
จีน	430	444	450	460	445
อินเดีย	540.1	580.3	591.1	620.1	629
ศรีลังกา	112.5	105.8	95.7	96.6	87.6
ไลบีเรีย	30	67.2	75	100	105
ไนจีเรีย	63.8	65	92.5	58	55
อื่นๆ	2,210.70	699.1	840.1	1,005.60	667.3
รวม	6,440.00	6,470.00	6,820.00	6,863.00	6,764.00

ที่มา : สถาบันวิจัยยาง (2549)

สำหรับโครงการวิจัยนี้มีแนวคิดในการนำทรัพยากรที่มีเป็นจำนวนมากภายในประเทศทั้ง 2 ชนิด มาเพิ่มมูลค่าและพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ รวมทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย นอกจากนี้ ยังเป็นการส่งเสริมการใช้วัตถุดิบเหล่านี้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งโดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีต่างกันที่ไม่ใช่สีดำนั้น จำเป็นต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing fillers) ประเภทที่ไม่ทำให้เกิดสีดำ เช่น ซิลิกา แทนการใช้สารเสริมแรงที่มีสีดำ เช่น คาร์บอนแบล็ก (carbon black) หรือเขม่าดำ แต่เนื่องด้วยซิลิกาที่ใช้ในทางการค้ามีราคาสูง ปัจจุบันจึงมีความพยายามในการนำซิลิกาที่ได้จากธรรมชาติมาใช้ทดแทน โดยพอดเทอริสโตนซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาตั้งที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ

โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยพอดเทอริสโตนเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยพรีซิพิเทตซิลิกา (precipitated silica) ซึ่งเป็นซิลิกาที่ใช้กันเ็นทางการค้า นอกจากนี้ ยังศึกษาผลของการใช้สารคู่ควบ (coupling agent)

เพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างพอดเทอริสโตนกับยางธรรมชาติต่อสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์แล้ว โดยสมบัติทางกายภาพที่ทำการทดสอบ ได้แก่ ความต้านแรงดึง (tensile strength) ความต้านการฉีกขาด (tear strength) และความแข็ง (hardness) เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสมบัติของยางธรรมชาติที่เติมแต่งด้วยพอดเทอริสโตน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนและปริมาณซีลีกาจากพอดเทอริสโตนต่อสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ
2. ศึกษาผลของซีลีกาจากพอดเทอริสโตนเปรียบเทียบกับซีลีกาทางการค้าต่อสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ
3. ศึกษาผลของซีลีกาจากพอดเทอริสโตนและสารคู่ควบต่อสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- เตรียมพอดเทอริสโตนที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ กัน ดังนี้
 1. พอดเทอริสโตนที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า $45 \mu\text{m}$
 2. พอดเทอริสโตนที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง $45-62 \mu\text{m}$
 3. พอดเทอริสโตนที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง $63-106 \mu\text{m}$
 4. พอดเทอริสโตนที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า $106 \mu\text{m}$
 5. พอดเทอริสโตนที่ผ่านการบดและมีขนาดอนุภาคต่ำกว่า $45 \mu\text{m}$
- เตรียมสารประกอบยางทั้งหมด 5 สูตร
 1. สูตรที่ 1: ไม่ใส่สารเติมแต่ง
 2. สูตรที่ 2: ใช้พอดเทอริสโตนเป็นสารเติมแต่ง
 3. สูตรที่ 3: ใช้พีซีพีเทตซีลีกาเป็นสารเติมแต่ง
 4. สูตรที่ 4: ใช้พอดเทอริสโตนร่วมกับสารคู่ควบซีลีเลน 69
 5. สูตรที่ 5: ใช้พีซีพีเทตซีลีการ่วมกับสารคู่ควบซีลีเลน 69
- ทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว
 1. ทดสอบความต้านแรงดึง (tensile strength)
 2. ทดสอบความต้านทานการฉีกขาด (tear strength)
 3. ทดสอบความแข็ง (hardness)
 4. ทดสอบดัชนีการบวมตัว (swelling index)

บทที่ 2

ข้อมูลเบื้องต้นทางวิชาการ

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) [2,3]

ยางเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเป็นเอกลักษณ์ คือ ความยืดหยุ่น (elasticity) เมื่อให้แรงดึงหรือแรงกด ยางจะยืดหรือยุบตัวได้ และกลับสู่สภาพเดิมเมื่อปล่อยให้ยางเป็นอิสระ จึงเรียกว่า อีลาสโตเมอร์ (elastomer) จากสมบัติดังกล่าว ยางจึงเป็นวัสดุที่สำคัญในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางในรูปแบบต่างๆ ซึ่งยางที่ได้จากต้นพืชเรียกว่า “ยางธรรมชาติ” (natural rubber)

ยางธรรมชาติที่ใช้ในทางการค้าได้จากต้นไม้ใหญ่ชนิดหนึ่งที่มีชื่อเรียกว่า “ต้นยางพารา” ซึ่งมีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า “*Hevea Brasiliensis*” เดิมมีอยู่เฉพาะในทวีปอเมริกาใต้เท่านั้น และได้มีผู้นำมาปลูกในทวีปเอเชียและแอฟริกา พืชชนิดนี้นิยมปลูกกันในประเทศที่มีอากาศร้อนชื้น เช่น ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งมีอากาศเหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของต้นยางพารา และมากกว่าร้อยละ 90 ของยางธรรมชาติที่ใช้ในโลกได้มาจากภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ที่เหลือมาจากแอฟริกากลาง สำหรับประเทศไทยสามารถปลูกยางพาราได้งอกงามดีทางภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียง

เมื่อต้นยางโตเต็มที่แล้วจะทำการเก็บน้ำยางโดยการกรีดลำต้น (tapping) ให้น้ำยางไหลซึมออกมา น้ำยางที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นข้นคล้ายนม มีกลิ่นหอมเล็กน้อย ประกอบด้วยอนุภาคยางเล็กๆ แขนงลอยในตัวกลางที่เป็นน้ำในลักษณะของอิมัลชัน (emulsion) โดยมีปริมาณเนื้อของแข็ง (solid content) ร้อยละ 30-40 ขึ้นกับพันธุ์ของต้นยาง อายุของต้นยาง และฤดูกาล น้ำยางที่ได้มีความหนาแน่นประมาณ 0.98 และมี pH ประมาณ 6.8

น้ำยางที่ได้เมื่อตั้งวางทิ้งไว้จะเกิดการบวมตัว จึงต้องแปรรูปให้เป็นยางดิบในลักษณะต่างๆ ได้แก่ น้ำยางข้น (concentrated latex) ยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheet, RSS) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (air-dried sheet, ADS) ยางเครพ (crepe) หรือยางแท่ง (block rubber) เป็นต้น เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบป้อนโรงงานผลิตภัณฑ์ยางประเภทต่างๆ เช่น ยางรถยนต์ ยางล้อเครื่องบิน ยางรัดของ ท่อยาง ที่นอนฟองน้ำ และรองเท้ายาง เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากยางมีสมบัติพิเศษแตกต่างจากวัสดุอื่นๆ คือ มีความยืดหยุ่นดี นอกจากนี้ ยังมีเนื้อที่บวม สามารถกั้นน้ำและอากาศไม่ให้ผ่านได้โดยง่าย อีกทั้งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้น ยางจึงเป็นวัสดุที่มีประโยชน์และมีคุณค่ามาก

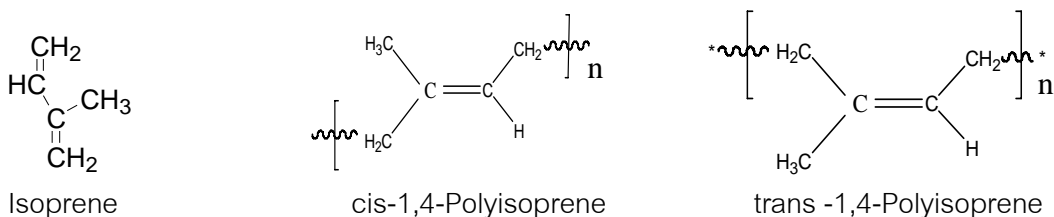
ยางธรรมชาติเป็นยางที่เหมาะสมสำหรับทำผลิตภัณฑ์สำเร็จภาพที่ไม่ต้องการสมบัติพิเศษ เช่น ความทนน้ำมัน หรือความร้อน ถึงแม้ว่าปัจจุบันจะมีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นหลายชนิด แต่ความ

ต้องการใช้ยางธรรมชาติเพื่อทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปยังสูงอยู่ เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีความต้านแรงดึง และความสามารถในการกระดอน (resilience) สูง มีสมบัติเหนียวติดกันเอง (tackiness) ดีมาก มีความต้านทานการสึกหรอ (abrasion resistance) ดีมาก แต่ด้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย การเกิดความร้อนสะสมต่ำ

2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ พอลิไอโซพรีน [polyisoprene, $(C_5H_8)_n$] ซึ่งได้จากการต่อกันแบบหัวต่อหาง (head to tail) ของหน่วยไอโซพรีน

ยางฮีเวีย (Hevea Rubber) มีโครงสร้างเป็น cis-1,4-polyisoprene ส่วนยางกัตตาเปอร์ชา (Gutta-Percha) และยางบาลาตา (Balata) มีโครงสร้างเป็น trans-1,4-polyisoprene (ภาพที่ 2.1) ซึ่งไม่มีความสำคัญในทางการค้ามากนัก โดยมีการใช้งานน้อย แต่เดิมใช้ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิลใต้น้ำ ปัจจุบันใช้หุ้มลูกกอล์ฟและกาวยางพิเศษบางชนิดเท่านั้น ทั้งนี้เพราะน้ำยางเกิดการแข็งตัวเร็วมากในอากาศ



ภาพที่ 2.1 สูตรโมเลกุลของไอโซพรีนและพอลิไอโซพรีน

2.1.2 น้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางจากต้นยางพาราขณะที่ยังสดจะมีสีขาวหรือสีครีม มีความหนืด 12-15 เซนติพอยด์ ความหนาแน่น 0.975-0.980 กรัม/ลบ. ซม. และความเป็นกรดต่าง 6.5-7.0 รูปร่างของอนุภาคยางเป็นรูปกลมหรือรูปลูกแพร์ขนาด 0.05-5 ไมโครเมตร เป็นสารแขวนลอยของอนุภาคยางในของเหลวที่เรียกว่า “ซีรัม” (serum) ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางสดจะมีส่วนที่เป็นเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณร้อยละ 33 และส่วนที่ไม่ใช่ยาง (non rubber) ร้อยละ 3 แต่เมื่อปั่นน้ำยางสดเป็นน้ำยางข้นแล้ว ส่วนที่ไม่ใช่ยางจะลดเหลือประมาณร้อยละ 1-2 ขึ้นกับประสิทธิภาพและการปรับเครื่องปั่น ความแปรปรวนของสารต่างๆ ในน้ำยางจะขึ้นกับพันธุ์ยาง อายุยาง ฤดูกาลกรีดยาง และวิธีการกรีดยาง

2.1.3 ชนิดของยางธรรมชาติแปรรูป

น้ำยางสดที่ได้จากต้นยางพาราสามารถนำไปแปรรูปเป็นยางดิบได้ 2 แบบ คือ น้ำยางข้น (concentrated latex) กับยางแห้ง (dry rubber)

2.1.3.1. น้ำยางข้น

น้ำยางสดจากต้นยางพารามีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ เนื้อยางแห้งซึ่งมีประมาณร้อยละ 25-45 และส่วนที่เป็นของแข็งที่ไม่ใช่ยางประมาณร้อยละ 5 ส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นน้ำ เมื่อมีการนำน้ำยางสดไปใช้งานในการทำผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ ในโรงงานซึ่งอยู่ไกลจากสวนยางจะทำให้เกิดความไม่สะดวก และเสียค่าใช้จ่ายสูงในการขนส่งน้ำยางสดไปยังโรงงาน นอกจากนี้ สารบางอย่างที่มีอยู่ในน้ำยางอาจมีผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางไม่ดี ดังนั้นจึงมีการผลิตน้ำยางข้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณร้อยละ 60 ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการนำไปทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ

2.1.3.2. ยางแห้ง

กรรมวิธีการผลิตยางแห้งโดยส่วนใหญ่ มี 2 ประเภท คือ

1. การผลิตยางแบบธรรมดา (conventional rubber process) ได้แก่ การผลิตยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพ และยางสีกิม
2. การผลิตยางแบบระบุคุณภาพมาตรฐาน (technically specified rubber process) ได้แก่ ยางแท่ง

ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS)

ยางแผ่นรมควันเป็นยางที่ทำให้แห้งโดยการให้ความร้อน และปล่อยให้ควันเข้าไปเคลือบผิวของแผ่นยาง การจัดชั้นยางแผ่นรมควันด้วยวิธีการตรวจสอบด้วยสายตา (visual grading) นั้น ต้องอาศัยความชำนาญมาก โดยพิจารณาการขึ้นรา การรมควัน ฟองอากาศ สิ่งสกปรก และสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งยางแผ่นรมควันได้ 5 ชั้น ดังนี้

ยางแผ่นรมควันชั้น 1 (RSS 1)

แผ่นยางต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดดำหรือริ้วรอยของยางรมควันมากหรือน้อยเกินไป ยางต้องแห้งดี สะอาด รมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรกตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

ยางแผ่นรมควันชั้น 2 (RSS 2)

แผ่นยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ไม่เกินร้อยละ 5 (สำหรับแผ่นยางแต่ละแผ่น) แผ่นยางมีฟองอากาศบ้าง แต่ปราศจากร่องรอยของการถูรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีจุดต่างของสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอม

ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (RSS 3)

แผ่นยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ไม่เกินร้อยละ 10 (สำหรับแผ่นยางแต่ละแผ่น) แผ่นยางมีจุดต่างและฟองอากาศบ้าง แต่ไม่มีร่องรอยของยางถูรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

ยางแผ่นรมควันชั้น 4 (RSS 4)

แผ่นยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ไม่เกินร้อยละ 10 (สำหรับแผ่นยางแต่ละแผ่น) แผ่นยางมีจุดต่าง ฟองอากาศบ้าง และร่องรอยของการรมควันไม่ถูกต้องปานกลาง ยางต้องแห้งดี ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

ยางแผ่นรมควันชั้น 5 (RSS 5)

แผ่นยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ไม่เกินร้อยละ 10 (สำหรับแผ่นยางแต่ละแผ่น) แผ่นยางมีจุดต่าง ฟองอากาศ และร่องรอยของการรมควันไม่ถูกต้องขนาดใหญ่

ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air-Dried Sheet, ADS)

เป็นยางแผ่นที่ทำให้แห้งโดยไม่จำกัดว่าจะเป็นการอากาศร้อนหรืออากาศธรรมดา สำหรับหนังสือมาตรฐานสากลว่าด้วยการจัดชั้นคุณภาพและการห่ออย่างธรรมชาติ (International Standards of Quality and Packing for Natural Grade The Green Book) หมายถึง “แผ่นยางที่มีสีใส ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตเช่นเดียวกับยางแผ่นรมควันทุกประการ เพียงแต่จะต้องมีการควบคุมแต่ละขั้นตอนอย่างพิถีพิถัน และทำให้แห้งโดยไม่ต้องรมควัน” ตามปกติจะผึ่งลมไว้ในที่ร่มหรือในโรงอบที่ปราศจากควันและต้องไม่มีการเติมสารอื่นนอกเหนือไปจากสารที่ได้รับการยกเว้น เช่น สารฟอกสีโซเดียมไบซัลไฟท์ (sodium bisulphate) และสารกันเชื้อราพาราไนโตรฟินอล (paranitrophenol, PNP) ซึ่งสาเหตุที่ต้องใส่สารกันเชื้อรา เนื่องจากยางที่ไม่ได้ถูรมควัน จึงไม่มีน้ำมันดิน (tar) และสารบางชนิดที่อยู่ในควันไม้ที่ช่วยในการฆ่าเชื้อโรค จึงอาจขึ้นราได้ง่าย ดังนั้นเมื่อทำเป็นแผ่นแล้วจึงจุ่มลงในน้ำยาป้องกันเชื้อราพวก PNP เสียก่อน แล้วจึงนำไปผึ่งให้แห้ง

การปล่อยให้ยางแห้งเองจะใช้เวลานาน สีอาจขุ่นหรือขึ้นร่าก่อน จึงควรอบด้วยความร้อน (ไม่ใช่การรมควัน) ในห้องอบความร้อน โดยใช้ท่อไอน้ำผ่านรอบห้องประมาณ 3 วัน จะได้ยางแผ่นแห้งที่มีสีใสสวยงามตามต้องการ

เนื่องจากยางแผ่นแห้งมีสีจาง บาง และสะอาด ดังนั้น จึงมักมองเห็นตำหนิหรือสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ได้ง่าย สิ่งที่ทำให้ยางแผ่นแห้งมีคุณภาพต่ำ ได้แก่ ฟองอากาศ ยางสีคล้ำ การเกิดรา และสิ่งสกปรกที่ปนอยู่

ยางเครพ (Crepe Rubber)

ยางเครพสามารถผลิตได้จากน้ำยางสดและยางแห้ง ทำให้ได้ยางเครพที่มีคุณภาพต่างกัน ในประเทศไทยมีการผลิตยางเครพ 2 ชนิด คือ

1. เครพคุณภาพดี เรียกว่า เครพสีจาง (pale crepe) และเครพขาว ผลิตจากน้ำยางที่จับตัวภายใต้การควบคุมและระมัดระวังในกระบวนการผลิต สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงในการผลิตคือ สีของน้ำยาง การควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่จะทำให้ยางมีสีคล้ำ

2. เครพคุณภาพต่ำ เรียกว่า เครพสีน้ำตาล (brown crepe) ผลิตจากเศษยางที่จับตัวแล้ว

ยางskim (Skim Rubber)

การผลิตน้ำยางชั้นโดยวิธีการปั่นเป็นการแยกส่วนของน้ำออกจากน้ำยางทำให้ได้น้ำยางชั้นกับส่วนที่เป็นของเหลวซึ่งยังมีเนื้อยางอยู่ประมาณร้อยละ 4-8 ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและการปรับเครื่องปั่นน้ำยาง ส่วนที่เป็นของเหลวนี้นี้ เรียกว่า “หางน้ำยาง” (skim latex) สามารถนำหางน้ำยางมาแปรรูปเป็นยางแห้งได้แบบskimบล็อก (skim block) หรือแบบskimเครพ (skim crepe)

ยางแท่ง (Block Rubber)

ยางแท่งเป็นยางที่ผลิตโดยมีวิธีการระบุคุณภาพมาตรฐาน เพื่อปรับปรุงรูปแบบการผลิตยางธรรมชาติ ลดเวลาการผลิต ปรับปรุงวิธีการหีบห่อให้ทันสมัยเหมาะกับการขนส่งและการใช้งาน และมีวิธีการตรวจสอบสมบัติที่จำเป็นของยางตามวิธีมาตรฐานสากล (technically grading) และจัดชั้นของยางโดยวิธีการในห้องปฏิบัติการ

ประเทศมาเลเซียได้ริเริ่มการผลิตยางแท่งเมื่อปี พ.ศ. 2508 สำหรับประเทศไทยเริ่มผลิตยางแท่งมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2511 โดยใช้ชื่อว่า Thai Tested Rubber, TTR ต่อมาในปี พ.ศ. 2539 ได้มีการเรียกชื่อให้เป็นสากลว่า Standard Thai Rubber, STR

การเรียกชื่อยางแห่งของแต่ละประเทศ จะมีชื่อเรียกต่างๆ กัน เช่น

SMR – Standard Malaysian Rubber

SIR – Standard Indonesian Rubber

แม้จะเรียกชื่อยางแห่งต่างกัน แต่คุณภาพยางแห่งชั้นเดียวกัน จะมีสมบัติเหมือนกัน เพราะทุกประเทศใช้มาตรฐานการจำแนกชั้นและวิธีการเดียวกัน

ยางแห่งถูกผลิตมาจากวัตถุดิบที่เป็นน้ำยางสด และยางแห่งที่จับตัวแล้ว หลักการสำคัญของการผลิตยางแห่ง คือ การตัดย่อยก้อนยางให้เป็นเม็ดหรือชิ้นเล็กๆ อย่างรวดเร็ว การล้าง การอบแห้ง และการอัดเป็นก้อนหรือแท่งสี่เหลี่ยม

ยางดิบชนิดพิเศษ

ยางธรรมชาติที่กล่าวมาแล้วมีสมบัติบางประการที่เป็นจุดอ่อนในการนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ความทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียม ความหนืดของยางไม่คงที่ และความไม่ทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและต่ำ จึงได้มีการผลิตยางชนิดพิเศษให้มีสมบัติบางอย่างที่ง่ายและสะดวกในการผลิต และมีสมบัติทางกายภาพคงเดิมหรือดีขึ้น เช่น ยางความหนืดคงตัว (constant viscosity rubber, CV) ยางผสมน้ำมัน (oil extended natural rubber, OENR) ยางโปรตีนต่ำ (deprotenized natural rubber, DPNR) เป็นต้น

1. ยางความหนืดคงตัว (Viscosity Stabilized Rubber)

ยางแต่ละพันธุ์มีความแข็งและความหนืดแตกต่างกันตามธรรมชาติ เกิดจากการเชื่อมขวางระหว่างอนุภาคยางในท่อน้ำยาง และเกิดจากการเชื่อมขวางโมเลกุลระหว่างการอบยางให้แห้ง และระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระไฮโดรอกซีโมเลกุลยางกับอนุมูลอิสระที่กลั่นตัว ดังนั้น จึงมีการผลิตยางความหนืดคงตัวขึ้นมา โดยการใส่สารป้องกันการแข็งตัวระหว่างเก็บรักษา ซึ่งมี 3 ชนิด คือ ไฮดรอกซิลามีน (hydroxylamine) เซมิคาร์ไบด์ (semicarbide) และไฮดราซีน (hydrazine)

ยางความหนืดคงตัวเป็นยางที่มีความหนืดต่ำและคงที่ จะช่วยลดขั้นตอนการบดยางให้นิ่ม (mastication) ขั้นตอนในการบดผสมยางกับสารเคมีให้เป็นเนื้อเดียวกันจึงเร็วขึ้น ทำให้ลดต้นทุนและประหยัดพลังงาน สามารถบดผสมยางกับสารเคมีได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยสมบัติทางกายภาพไม่เปลี่ยนแปลง ยางธรรมชาติความหนืดคงตัว คือ ยางความหนืดคงที่ (constant viscosity rubber, CV) และยางความหนืดต่ำ (low viscosity rubber, LV)

ยางความหนืดคงที่จะมีวิธีการผลิตเหมือนกับการผลิตยางแห่งจากน้ำยาง แต่มีการเติมไฮดรอกซิลามีนประมาณร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนักเนื้อยางแห่ง ลงในน้ำยางก่อนนำไปผลิตตามวิธี

การผลิตยางแท่ง สำหรับน้ำยางที่ใช้เป็นวัตถุดิบไม่ควรรักษาสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ เพราะจะทำให้ปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลามีน ทำให้ไฮดรอกซิลามีนเสื่อมสภาพ

ยางความหนืดต่ำเป็นยางที่มีส่วนผสมของน้ำมันร้อยละ 4 และเป็นส่วนของยางร้อยละ 96 ผลิตโดยการเติมน้ำมันผสมลงในน้ำยาง แล้วกวนด้วยใบพัดช้าๆ ใ้ยางจับตัว ตัดย่อยก่อนยางที่ได้ให้เป็นเม็ดเล็กๆ อบยางให้แห้ง แล้วบรรจุหีบห่อ เช่นเดียวกับการผลิตยางแท่งจากน้ำยาง

การเตรียมน้ำมันผสมในรูปอิมัลชัน มีส่วนผสม ดังนี้

	<u>สาร</u>	<u>ส่วนโดยน้ำหนัก</u>
ส่วนผสม ก	น้ำมันแนฟทานิก	100
	กรดโอเลอิก	1.2 – 2.0
ส่วนผสม ข	น้ำ	30
	แอมโมเนีย	0.1 – 0.2

เติมน้ำมันผสม ข ลงในส่วนผสม ก แล้วคนด้วยความเร็วสูงนาน 10 นาที ก่อนเติมลงในน้ำยาง

2. ยางธรรมชาติผสมน้ำมัน (Oil Extended Natural Rubber, OENR)

น้ำมันที่ผสมกับยางธรรมชาติมี 2 ชนิด คือ น้ำมันแนฟทานิก (naphthanic oil) และน้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil) ทำให้สามารถนำยางไปผสมได้สะดวกและง่ายขึ้น ยังเป็นการลดต้นทุนด้วย สามารถผลิตได้ทั้งในรูปน้ำยางข้นและยางแท่ง

ข้อดีของยางผสมน้ำมัน คือ

- ลดขั้นตอนการบดยาง ก่อนนำไปทำผลิตภัณฑ์ยาง
- ในภาวะที่เย็นจัด ยางผสมน้ำมันจะไม่ตกผลึก ดังนั้น จึงลดขั้นตอนการอุ่นยางก่อนนำไปใช้
- ในการผสมยางบิวตะไดอีนกับยางธรรมชาติผสมน้ำมัน จะเกิดความร้อนสะสมต่ำกว่าการผสมยางบิวตะไดอีนกับยาง SBR
- เหมาะสำหรับผลิตยางล้อรถยนต์เพื่อใช้ในฤดูหนาว เพราะมีความทนทานต่อการลื่นบนผิวที่เป็นน้ำได้ดีกว่า

3. ยางธรรมชาติโปรตีนต่ำ (Deproteinized Natural Rubber, DPNR)

เป็นยางธรรมชาติที่แยกโปรตีนออกมาเพื่อลดปริมาณไนโตรเจน ผลิตได้จากทั้งน้ำยางสดและน้ำยางข้น โดยการเติมเอนไซม์สำหรับย่อยโปรตีน เช่น ปาเปน (papain) ทริปซิน (trypsin) ลงในน้ำยาง โปรตีนจะถูกย่อยและสามารถละลายน้ำได้มาอยู่ในส่วนของซีรัม แล้วแยกโปรตีนที่ย่อยสลายออกมา

ยางโปรตีนต่ำมีสมบัติพิเศษ คือ มีปริมาณไนโตรเจนและเถ้าต่ำกว่ายางธรรมชาติโดยทั่วไป ปริมาณไนโตรเจนเป็นตัวที่บ่งถึงปริมาณโปรตีน ถ้ามีปริมาณไนโตรเจนสูงแสดงว่ามีปริมาณโปรตีนสูง ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางไดนามิกส์ของยาง นอกจากนี้ ยางโปรตีนต่ำยังมีสมบัติการกระดอนสูง และขณะเดียวกันความร้อนสะสมต่ำ ดังนั้น ยางโปรตีนต่ำเหมาะสำหรับงานวิศวกรรมที่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงๆ และอุตสาหกรรมยางล้อ

2.1.4 สมบัติของยางธรรมชาติ

สมบัติของยางดิบ

1. ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติก นั่นคือ ยางสามารถแบนและไหลได้เมื่อได้รับแรงกด ซึ่งเป็นสมบัติของพลาสติก เมื่อเอาแรงออกยางสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ ซึ่งสมบัติของอีลาสติก ดังนั้น เมื่อยางมีสมบัติทั้งพลาสติกและอีลาสติก ทำให้ยางแบนหรือยืดเมื่อได้รับแรงกดหรือแรงดึง แต่เมื่อคลายแรงยางจะกลับคืนรูปแต่ไม่เท่าเดิม

2. ยางเป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) เมื่ออยู่ในภาวะที่อุณหภูมิต่ำ ยางจะแข็งกระด้าง ถ้าภาวะที่อุณหภูมิสูง ยางจะนิ่ม ลักษณะเช่นนี้ทำให้ยางใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด

3. ยางมีความแข็งแรงต่ำ ความต้านแรงดึงต่ำ และความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ

4. ยางไม่ทนต่อตัวทำละลายหลายชนิด สามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลาย

สมบัติของยางคงรูป

1. มีความยืดหยุ่นสูง
2. มีความต้านแรงดึงสูง โดยสามารถทนแรงดึงได้มากกว่า 20 เมกะปาสคาล
3. มีการยืดตัวก่อนขาดได้มาก โดยสามารถยืดได้ร้อยละ 500-1000
4. มีความต้านการฉีกขาด และการสึกหรอได้ดี
5. การคืนตัว (compression set) และการกระดอน (resilience) ดี
6. ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี

7. มีแรงยึด หรือติดกันระหว่างยางกับเส้นใย และโลหะได้ดี
8. มีความทนทานต่อการบ่มด้วยความร้อน (heat ageing) ไม่ดี
9. ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจน และโอโซน ได้น้อย
10. ไม่ทนต่อตัวทำละลายประเภทไฮโดรคาร์บอน และน้ำมันปิโตรเลียม
11. อุณหภูมิการใช้งาน อยู่ระหว่าง -40 ถึง 70 องศาเซลเซียส

2.1.5 การใช้งานของยางธรรมชาติ

น้ำยางชั้น

1. ผลิตภัณฑ์ประเภทจุ่ม เช่น ถุงมือผ่าตัด ถุงมือตรวจโรค ถุงมือแม่บ้าน ถุงมืออุตสาหกรรม ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง จุกนมยาง และท่อสวนปัสสาวะ เป็นต้น
2. ผลิตภัณฑ์น้ำยางในอุตสาหกรรมพรม เช่น พรม (tufted carpet) มีการใช้น้ำยางอาบหลังพรมเพื่อยึดพรมไว้ เรียกชั้นยางที่ยึดว่า anchor coat
3. ผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ ใช้ทำที่นอน หมอน และเบาะรองนั่ง เป็นต้น
4. สายยางยึด เช่น ยางยึดขอบกางเกงใน ถุงเท้า และเสื้อชั้นใน และยางรัดป้ายติดกระเป๋า เป็นต้น
5. ใช้น้ำยางเป็นตัวยึดฟูกโยขนสัตว์ และกาบมะพร้าว

ยางแห้ง

1. ยางล้อรถยนต์ (ยางรถบรรทุก และยางรถยนต์นั่ง)
2. ยางล้อเครื่องบิน
3. ยางรองคอสะพาน ยางรองรับแรงสะเทือนหรือแผ่นดินไหว
4. ยางชิ้นส่วนรถยนต์ และเฟอร์นิเจอร์
5. พื้นรองเท้า
6. กาวยาง
7. ยางรัดของ
8. รองเท้ายาง
9. ยางปูพื้น

ตารางที่ 2.1 ผลิตรubber จากยางดิบชนิดต่างๆ

ชนิดยางดิบ	ผลิตรubber ยาง	หมายเหตุ
ยางแท่ง STR XL, STR 5L ADS, RSS 1	ผลิตรubber ทางกายภาพ เกษตรกรรม และ การสัมผัสอาหาร ผลิตรubber ที่ต้องการสี เส้นด้ายยืดแบบเหลี่ยม กาวยาง เทปติด พื้นรองเท้าและส่วนประกอบ เป็นต้น	ยางชนิดนี้สะอาด และมีสีจาง โดยเฉพาะยาง STR XL และ ยาง STR 5L กับ RSS ค่อนข้าง แข็งมาก มีความเหนียวสูง
ยาง STR 20 RSS 2, 3, 4, 5	ผลิตรubber ยางรถยนต์ ยางล้อดอก รวมทั้ง ผลิตรubber ยางอะไหล่ ยางใช้ในงาน วิศวกรรม และในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป	ยางมีสีคล้ำ ส่วนใหญ่ผสมกับ สารตัวเติม เขม่าดำ เพื่อเสริม ความแข็งแรง
ยางสีกิม	ผสมยางสีกิมกับยางชนิดอื่นๆ สำหรับ ผลิตรubber ยางที่ไม่ระบุข้อจำกัด เช่น ยางปู พื้น ยางล้อรถเข็น ยางกันกระแทก เป็นต้น	เนื่องจากยางสีกิมมีสีอ่อน และ มีสารที่ไม่ใช่ยางมากกว่าปกติ จึงใช้ผลิตรubber ยางสีจางหรือ ต้องการแต่งเติมสี
น้ำยางข้น	ผลิตรubber ที่นุ่มแบบ เช่น ถุงมือ ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย และจุกนม เป็นต้น ผลิตรubber ฟองน้ำ เช่น ที่นอน และหมอน เป็นต้น ผลิตรubber เส้นด้ายยืดแบบกลม เช่น ท่อยาง และกาวน้ำยาง เป็นต้น	การออกสูตรผลิตรubber น้ำยาง ไม่ต้องเติมสารเสริมความ แข็งแรง ก็ได้ผลิตรubber ที่มี ความเหนียวและแข็งแรงมาก

2.2 สารเติมแต่งสำหรับยาง (Additive for Rubber) [4-6]

สารเติมแต่งสำหรับยางเป็นสารเคมีที่ผสมลงในยางเพื่อให้ได้ผลิตรubber ยางที่มีสมบัติตามที่ต้องการและเพื่อช่วยในกระบวนการผลิตให้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตรubber ตามที่ต้องการได้ ซึ่งสารเติมแต่งของยางมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีหน้าที่หรือสมบัติที่แตกต่างกัน ทั้งชนิดและปริมาณการใส่สารเติมแต่งในยางแต่ละสูตรจะแตกต่างกันขึ้นกับความต้องการของผู้ผลิตและสมบัติของยางผสมสูตรที่ต้องการ

สารตัวเติมหรือฟิลเลอร์ (fillers) เป็นหนึ่งในสารเติมแต่งที่สำคัญสำหรับยาง เนื่องจากสารตัวเติมมีราคาถูกเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ จึงนิยมนำสารตัวเติมมาใช้ผสมในยางเพื่อเพิ่มปริมาณของยาง ซึ่งจะช่วยการลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ สารตัวเติมบางชนิดยังสามารถเสริมแรง (reinforce) ให้กับยาง ส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยสารตัวเติมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิต และยังช่วยทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สารตัวเติมชนิดนี้ที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอนแบล็ก (carbon Black, CB) หรือเขม่าดำ และซิลิกา (silica) เป็นต้น

2. สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (non-reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว ไม่ช่วยในการเสริมแรง สารตัวเติมชนิดนี้ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และดินขาว (kaolin, clay) เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมยางสารตัวเติมที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ คาร์บอนแบล็ก เนื่องจากมีราคาถูกและสามารถเสริมแรงให้กับยางได้ดี แต่ข้อจำกัดของการใช้เขม่าดำ คือ ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีดำเท่านั้น จึงมีการใช้สารตัวเติมชนิดอื่น เช่น ซิลิกา ในการทำผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการสี ดังนั้น จึงสามารถแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามลักษณะสีของสารตัวเติมออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. สารตัวเติมสีดำ (black fillers) คือ คาร์บอนแบล็ก
2. สารตัวเติมสีไม่ดำ (non-black fillers) เช่น ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต และดินขาว เป็นต้น

2.2.1 สารทำให้ยางคงรูปหรือสารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing Agents)

สารทำให้ยางคงรูปหรือสารวัลคาไนซ์เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องผสมลงไปในยางเพื่อทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (crosslinking) ระหว่างโมเลกุลของยาง ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน

การคงรูปด้วยกำมะถัน

ปัจจุบันระบบการคงสภาพที่นิยมใช้มากที่สุด คือ การคงรูปด้วยกำมะถัน โดยยางแทบทุกชนิดที่มีพันธะคู่จะใช้การคงรูประบบนี้เพราะต้นทุนต่ำ การคงรูปเกิดขึ้นได้เร็ว (เมื่อใช้กำมะถันร่วมกับ สารเร่งวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม) และยางคงสภาพที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี นอกจากนี้ใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์โดยตรงแล้ว สารที่ให้กำมะถัน (sulfur donor) ที่อุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ ก็ใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ได้เช่นกัน

ชนิดของกำมะถันที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. กำมะถันรูปผลึก (rhombic sulfur) เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนที่มีกำมะถันต่อกัน 8 อะตอม (S_8) และสามารถตกผลึกได้ แต่เนื่องจากกำมะถันชนิดนี้สามารถละลายเข้าไปในยางได้ในระดับหนึ่ง บางครั้งจึงเรียกกำมะถันชนิดนี้ว่า กำมะถันละลายได้ (soluble sulfur) ซึ่งระดับความสามารถในการละลายของกำมะถันชนิดนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาการบลูม (bloom) ได้

2. กำมะถันอสัณฐาน (amorphous sulfur) กำมะถันอสัณฐานเกิดจากอะตอมของกำมะถันจำนวนมากเรียงต่อกัน แต่เนื่องจากกำมะถันชนิดนี้ไม่ละลายในยางและตัวทำละลายส่วนใหญ่ จึงมีชื่อเรียกว่า กำมะถันไม่ละลาย (insoluble sulfur) โดยกำมะถันชนิดนี้นิยมใช้ป้องกันการบวมของกำมะถันมาที่พื้นผิวของยางคอมพาวด์ ทำให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเหนียวติดกันได้ดี แต่ถ้าอุณหภูมิในกระบวนการผลิตสูงกว่า 99-105 องศาเซลเซียส กำมะถันนี้จะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นกำมะถันรวมบิกได้

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานของกำมะถันรวมบิกและกำมะถันอสัณฐาน

สมบัติ	กำมะถัน	
	รวมบิก	อสัณฐาน
น้ำหนักอะตอม	32.06	32.06
ลักษณะภายนอก	ผงสีเหลือง	ผงสีเหลือง
ความถ่วงจำเพาะ	2.07	1.92*
จุดหลอมเหลว °C	112.8 – 119	> 110
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (mm)	< 30	< 30

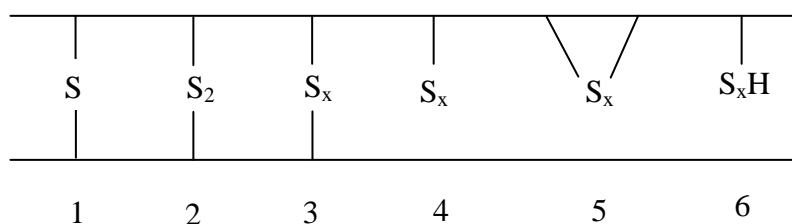
*ความถ่วงจำเพาะลดลงตามปริมาณน้ำมันที่มีอยู่ในกำมะถัน

ลักษณะการเชื่อมขวาง

ในระบบการคงรูปด้วยกำมะถันนั้น การเชื่อมขวางอาจเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบดังแสดงในภาพที่ 2.2 จากรูปจะเห็นว่า การเชื่อมขวางอาจเกิดผ่านพันธะมอนอซัลฟิดิก (monosulfidic) ไดซัลฟิดิก (disulfidic) หรือพอลิซัลฟิดิก (polysulfidic) ทั้งนี้ขึ้นกับอัตราส่วนของกำมะถันต่อสารเร่งวัลคาไนซ์ที่ใช้ โดยในระบบที่มีปริมาณกำมะถันสูงหรือระบบที่มีอัตราส่วนของปริมาณกำมะถันต่อสารเร่งวัลคาไนซ์สูง การเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิซัลฟิดิก ยางคงสภาพที่ได้มีความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติเชิงกลที่ดี และสมบัติเชิงพลวัต รวมถึงความต้านทานการล้า (fatigue resistance) ที่ดี ซึ่งเรียกการคงรูปแบบนี้ว่า conventional vulcanization, CV แต่ในระบบที่มีกำมะถันอยู่น้อยมาก หรือมีอัตราส่วนของกำมะถันต่อสารเร่งวัลคาไนซ์ต่ำ หรือบางครั้งอาจไม่จำเป็นต้องใส่กำมะถันลงไปในระบบเลย แต่ใช้สารเร่งวัลคาไนซ์ที่สามารถให้กำมะถันออกมาในระหว่างกระบวนการคงรูป (sulfur donor accelerator) ซึ่งการเชื่อมขวางส่วนใหญ่เป็นแบบมอนอซัลฟิดิกหรือไดซัลฟิดิก และเรียกการคงรูปแบบนี้ว่า efficient vulcanization, EV ซึ่งยางที่คงรูปด้วยระบบ EV นี้ มีความทนทานต่อความร้อนที่ดีกว่าระบบ CV มีค่าการเสียรูปหลังกดอัด (compression set) ต่ำกว่าระบบ CV (โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงๆ) และมีความต้านทาน

การเชื่อมสภาพเมื่ออบคงรูปได้ดีกว่าระบบ CV แต่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัตที่ด้อยกว่าระบบการคงรูปแบบ CV

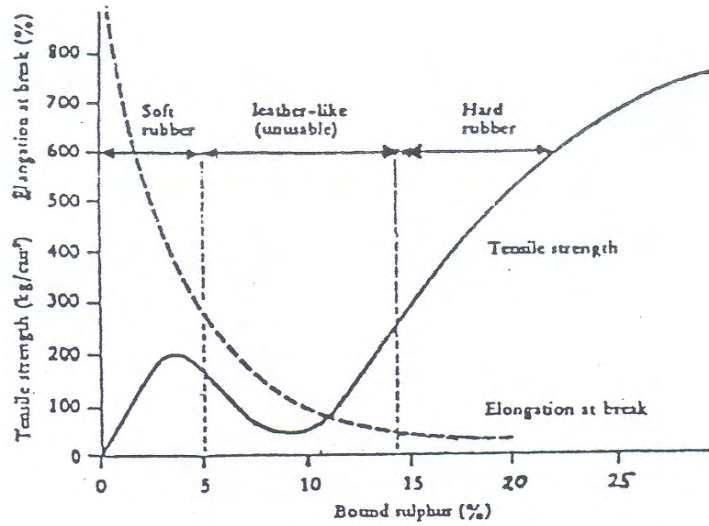
ยางที่คงรูปด้วยระบบ EV มีความทนทานความร้อนสูงกว่ายางที่คงรูปด้วยระบบ CV เนื่องจากพลังงานพันธะของ C-S (~279 kJ/mol) มีค่าสูงกว่าพลังงานพันธะของ S-S (~206 kJ/mol) พันธะแบบมอนอซัลไฟดิกจึงทนต่อการเชื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีกว่าพันธะแบบพอลิซัลไฟดิก



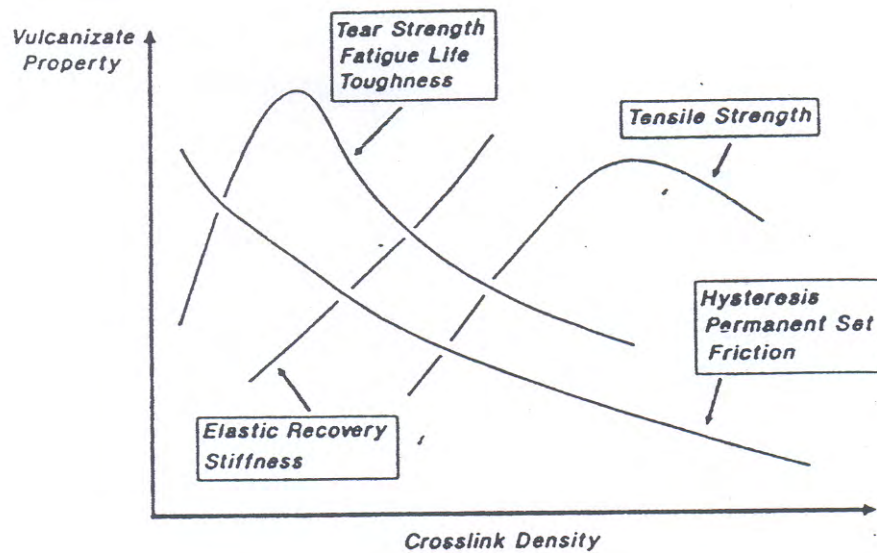
ภาพที่ 2.2 ลักษณะการเชื่อมขวาง: (1) มอนอซัลไฟดิก (2) ไดซัลไฟดิก (3) พอลิซัลไฟดิก เมื่อ $x \geq 3$ (4) สายโซ่กำมะถัน (5) โครงสร้างแบบวง และ (6) หมู่ไทออล (thiol)

เนื่องจากระบบการคงรูปแบบ CV และแบบ EV ต่างมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ดังนั้นบางครั้งการเลือกใช้ระบบคงรูปแบบ semi-efficient vulcanization, semi-EV ซึ่งมีอัตราส่วนของปริมาณกำมะถันต่อสารเร่งวัลคาไนซัน้อยู่ระหว่าง 2 ระบบ ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ทำให้ได้ยางคงภาพที่มีสมบัติอยู่ระหว่างกลางของทั้ง 2 ระบบ

นอกจากนี้ ปริมาณกำมะถันที่ใช้จะมีผลต่อสมบัติของยาง โดยภาพที่ 2.3 แสดงผลของปริมาณกำมะถันต่อความต้านแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) และภาพที่ 2.4 แสดงสมบัติที่เปลี่ยนไปเมื่อปริมาณของการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.3 ผลของปริมาณกำมะถันต่อความต้านแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด



ภาพที่ 2.4 สมบัติที่เปลี่ยนไปตามปริมาณการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น

จากรูป 2.3 จะเห็นว่าถ้าต้องการให้ยางคงสภาพความยืดหยุ่นได้ดี ปริมาณกำมะถันในยางไม่ควรเกิน 5 phr

2.2.2 สารเร่งวัลคาไนซ์ (Accelerators)

การใช้สารเร่งวัลคาไนซ์เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับระบบการคงรูปยางด้วยกำมะถัน เพราะจะช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูป และลดปริมาณกำมะถันที่ใช้ในกระบวนการคงรูป เนื่องจากถ้าไม่มีการเติมสารเร่งวัลคาไนซ์แล้ว จะทำให้ปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันและยาง (ปฏิกิริยาคงรูป) เกิดได้ช้ามากแม้ที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปใช้เวลาในการคงรูปนานเป็นชั่วโมง และต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงมาก อีกทั้งยางคงสภาพที่ได้มีสมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้น การเติมสารเร่งวัลคาไนซ์ลงไป ปริมาณเพียงเล็กน้อย จะช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างยางและกำมะถันเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น ยางคงสภาพที่ได้มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

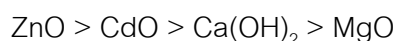
การแบ่งกลุ่มสารเร่งวัลคาไนซ์

สารเร่งวัลคาไนซ์ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่มีทั้งไนโตรเจนและกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ปัจจุบันแบ่งสารเร่งวัลคาไนซ์ได้เป็นหลายกลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.4

2.2.3 สารกระตุ้นวัลคาไนซ์ (Activators)

สารกระตุ้นวัลคาไนซ์ถูกเติมเข้าไปในยางเพื่อกระตุ้นการทำงานของสารเร่งวัลคาไนซ์ ในปฏิกิริยาการคงรูป โดยเข้าทำปฏิกิริยากับสารเร่งวัลคาไนซ์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่เสถียร และสารประกอบเชิงซ้อนนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถันที่อยู่ในยางอย่างรวดเร็ว ทำให้ยางมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปสูงขึ้น โดยทั่วไปสารกระตุ้นวัลคาไนซ์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1. สารอินทรีย์ ที่ใช้เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของโลหะ เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และตะกั่วออกไซด์ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังสามารถใช้สารประกอบไฮดรอกไซด์ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $[Ca(OH)_2]$ เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ได้อีกด้วย โดยลำดับความว่องไวของการช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้



การใช้ ซิงค์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวจะสามารถเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้ แต่ประสิทธิภาพในการกระตุ้นปฏิกิริยาจะสูงขึ้นถ้าใช้ร่วมกับกรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก (stearic acid) เพราะเมื่อสารทั้งสองทำปฏิกิริยากันจะเกิดเป็นสารประกอบที่สามารถละลายในยางได้ง่าย จึงทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

ตารางที่ 2.3 ชนิด ตัวอย่าง และหน้าที่ของสารเร่งวัลคาไนซ์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์

ชนิด	ตัวอย่าง	การใช้งานทั่วไป
อัลดีไฮด์-เอมีน (Aldehyde-Amine)	สารที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง บิวทิลอัลดีไฮด์ (butylaldehyde) และ แอนิลีน (aniline)	สารเร่งวัลคาไนซ์แบบเร็ว ใช้ใน ยางรีคอมและยางแข็ง
เอมีน (Amines)	เฮกซะเมทิลีนเททระมีน (hexamethylene tetramine, HEXA)	สารเร่งปฏิกิริยาแบบช้าและมีผล delayed action ในยางธรรมชาติ
กวานิดีน (Guanidines)	ไดฟีนิลกวานิดีน (diphenyl guanidine, DPG)	สารเร่งวัลคาไนซ์ที่ยุติขุมใช้ร่วมกับสาร เร่งวัลคาไนซ์ในกลุ่มไทอะโซล
ไทโอยูเรีย (Thioureas)	เอทีลีนไทโอยูเรีย (ethylene thiourea, ETU)	สารเร่งวัลคาไนซ์แบบเร็ว ใช้ในยาง CR, EPDM, CSM และ ECO
ไทอะโซล (Thiazoles)	เบนโซไทอะซิลไดซัลไฟด์ (benzothiazyl disulfide, MBTS)	สารเร่งวัลคาไนซ์แบบเร็วปานกลาง ใช้ ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ชนิด ต่างๆ เช่น SBR, IR, NBR และ EPDM เป็นต้น
ไทยูแรม (Thiurams)	เททระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (tetramethylthiuramdisulfide, TMTD)	สารเร่งวัลคาไนซ์แบบเร็วที่สามารถแตก ตัวให้กำมะถันได้ ใช้ในยางธรรมชาติและ ยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ เช่น SBR IIR และ EPDM เป็นต้น
ซัลฟิनाไมด์ (Sulfenamides)	ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซิล ซัลฟิनाไมด์ (N-cyclohexyl - 2- benzothiazyl-sulfenamide, CBS)	สารเร่งวัลคาไนซ์แบบเร็วที่มีผล delayed action ใช้ในยางธรรมชาติและยาง สังเคราะห์ เช่น SBR, IR, NBR และ EPDM เป็นต้น
ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates)	ซิงค์ไดเมทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc dimethyl dithiocarbamate, ZDMC)	สารเร่งวัลคาไนซ์แบบเร็วมาก ใช้ในยาง SBR และ IIR
แซนเทต (Xanthates)	ไดบิวทิลแซนโทเจนไดซัลไฟด์ (dibutylxanthogendisulfide)	สารเร่งวัลคาไนซ์แบบเร็วมากที่สามารถ ทำให้อย่างคงรูปได้ที่อุณหภูมิต่ำ ใช้ใน ยางธรรมชาติและยาง SBR

2. กรดอินทรีย์ ที่สำคัญ คือ กรดไขมัน ได้แก่ กรดสเตียริก กรดลอริก (lauric acid) และกรดปาล์มิติก (palmitic acid) ซึ่งกรดอินทรีย์เหล่านี้จะช่วยให้ซิงค์ออกไซด์สามารถทำหน้าที่ได้เต็มประสิทธิภาพ แม้ยางดิบบางชนิดอาจมีกรดไขมันอยู่เล็กน้อย แต่กรดไขมันที่เกิดตามธรรมชาติจะมีปริมาณที่ไม่แน่นอน ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น สายพันธุ์ ชนิด และฤดูกาลกรีดยาง ดังนั้น ในการออกสูตรเคมียางจึงจำเป็นต้องเติมกรดไขมันลงไป นอกจากนี้ กรดอินทรีย์ยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (lubricant) ทำให้ยางมีความเหนียวลดลงอีกด้วย

ตารางที่ 2.4 สารกระตุ้นวัลคาไนซ์ปฏิกิริยาชนิดต่างๆ

กลุ่ม	ชื่อสารเคมี	ความถ่วงจำเพาะ
โลหะออกไซด์	ซิงค์ออกไซด์	5.6
	ตะกั่วแดง (98% Pb_3O_4)	9.0
	แมกนีเซียมออกไซด์	3.38
	ลิทาร์จ (PbO)	9.5
กรดอินทรีย์	กรดลอริก	0.87
	กรดสเตียริก	1.02
	กรดโอเลอิก	0.89
เอมีน	ไดเอทานอลเอมีน	1.09
	ไตรเอทานอลเอมีน	1.12

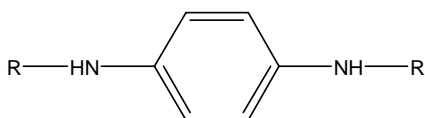
2.2.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants)

โมเลกุลของยางธรรมชาติจะมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางธรรมชาติเสื่อมสภาพได้ง่าย โดยเฉพาะในภาวะการใช้งานที่ต้องสัมผัสกับแสงแดด ออกซิเจน โอโซน ความร้อน หรือโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (metal catalysis) รวมทั้งการใช้งานที่ต้องมีการหักงอเชิงกลตลอดเวลา (mechanical flexing) ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกันยางเสื่อมสภาพและเพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้น จึงต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไปนยางเพื่อยืดอายุการใช้งาน เพราะเมื่อยางเกิดการเสื่อมสภาพ สมบัติต่างๆ จะลดลง การเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นอาจสังเกตได้จากการแข็งตัว (embrittlement) การอ่อนตัว (softening) รวมถึงการล้าตัวหรือการขยายตัวของรอยแตก (fatigue process) โดยทั่วไปการเสื่อมสภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงหรือในภาวะที่มีการปนเปื้อนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น โลหะทองแดง (Cu) และแมงกานีส (Mn) เป็นต้น

สารป้องกันการเสื่อมสภาพแต่ละชนิดมีหน้าที่และประสิทธิภาพการป้องกันแตกต่างกัน โดยทั่วไปสารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดเปลี่ยนสีอย่างรุนแรง (strong discoloring) จะมีประสิทธิภาพในการป้องกันสูงกว่าสารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดไม่เปลี่ยนสี (non-discoloring) ซึ่งสารป้องกันการเสื่อมสภาพจะมีมากมายหลายชนิดและสามารถแบ่งตามหมู่ฟังก์ชันเคมีได้เป็นหลายกลุ่มดังนี้

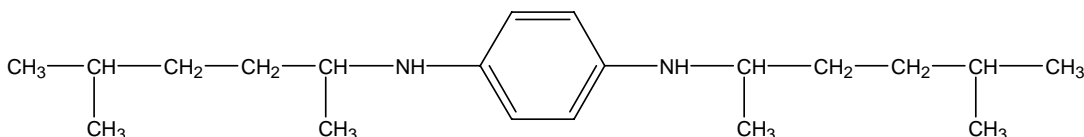
สารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดเปลี่ยนสี

1. กลุ่มที่ป้องกันทั้งออกซิเจนและโอโซน เป็นสารประกอบกลุ่มที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการปกป้องจากการล้าตัวและโอโซนทั้งภายใต้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสถิตและแบบพลวัต ได้แก่ สารประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของพีนีลีนไดเอมีน (p-phenylenediamine) (ภาพที่ 2.5) นอกจากนี้ สารประกอบเหล่านี้ยังช่วยลดอัตราเร็วในการขยายตัวของรอยแตกได้อีกด้วย



ภาพที่ 2.5 สารประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของพีนีลีนไดเอมีน

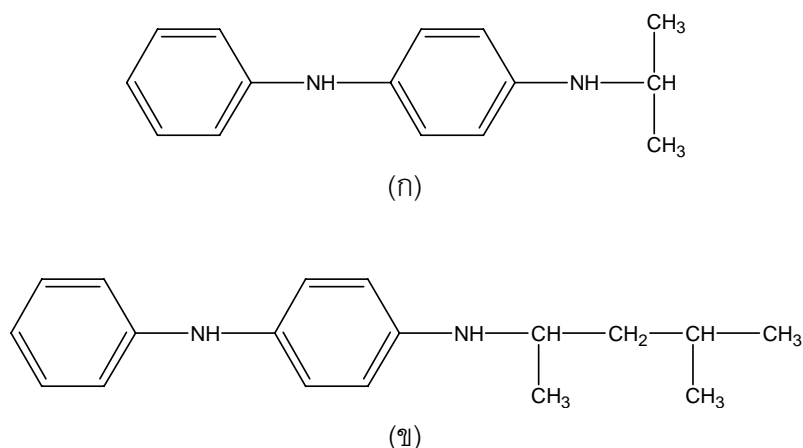
ประสิทธิภาพของสารประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของพีนีลีนไดเอมีนขึ้นกับชนิดและขนาดของหมู่แทนที่ (หมู่ R และ R') เป็นหมู่เดียวกัน เช่น N,N'-dinaphthyl-p-phenylenediamine (DNPD) โดยการลดขนาดของหมู่แทนที่ลงจึงส่งผลทำให้สารประกอบในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพในการป้องกันโอโซนสูงขึ้น ดังนั้น ประสิทธิภาพในการป้องกันโอโซนจึงเพิ่มขึ้นมาก เช่น N,N'-dinaphthyl-p-phenylenediamine (DNPD), N,N'-xylyl-phenylene diamine (DTPD) และ N,N'-bis-(1,4-dimethylpentyl)-p-phenylene diamine (77PD) (ภาพที่ 2.6) เป็นต้น



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ 77PD

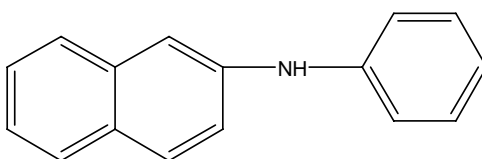
สำหรับสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่มีหมู่ R และ R' ไม่เหมือนกัน เช่น N-isopropyl-n'-phenyl-p-phenyl (IPPD) [ภาพที่ 2.7(ก)] และ N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-

phenylenediamine (6PPD) [ภาพที่ 2.7(ข)] พบว่า IPPD มีประสิทธิภาพการปกป้องยางจากโอโซนสูงกว่า 6PPD เพราะ 6PPD มีหมู่แทนที่ที่มีขนาดใหญ่กว่าจึงเคลื่อนตัวไปที่พื้นผิวยางได้ยากกว่า IPPD เล็กน้อย แต่เนื่องจาก 6PPD มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าจึงทำให้ระเหยได้ยากกว่าและถูกน้ำชะออกไปได้ยากกว่า ดังนั้น 6PPD จึงปกป้องยางได้ยาวนานกว่า IPPD



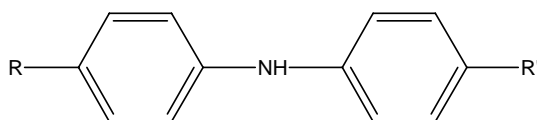
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมี (ก) IPPD และ (ข) 6PPD

2. กลุ่มที่ป้องกันเฉพาะออกซิเจนและการล้าตัว ได้แก่ อนุพันธ์ของแนฟทิลเอมีน เช่น phenyl- α -naphthyl amine (PAN) และ Phenyl- β -naphthyl amine (PBN) (ภาพที่ 2.8) ซึ่งสารเคมีในกลุ่มนี้จะช่วยปกป้องยางจากออกซิเจนและการล้าตัวได้เป็นอย่างดี แต่สารเคมีเหล่านี้มีความเป็นพิษสูงจึงมีใช้กันน้อยมาก โดยส่วนใหญ่นิยมนำสารเคมีที่เป็นอนุพันธ์ของไดฟีนิลเอมีนมาใช้แทน



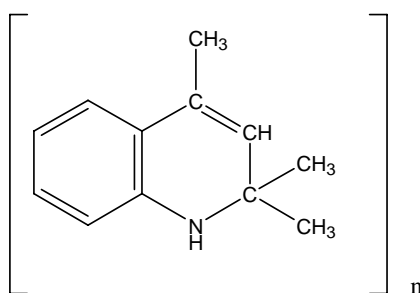
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ PBN

สารเคมีที่เป็นอนุพันธ์ของไดฟีนิลเอมีน (ภาพที่ 2.9) เช่น octylated diphenylamine (ODPA), styrenated diphenyl amine (SDPA) และ acetone-diphenylamine (ADPA) สามารถปกป้องยางจากออกซิเจนและความร้อนได้เป็นอย่างดี แต่ประสิทธิภาพในการปกป้องยางจากการล้าตัวยังค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ PAN และ PBN



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของอนุพันธ์ของไดฟีนิลเอมีน

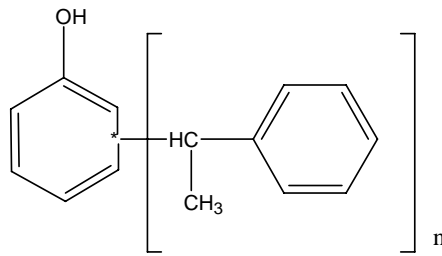
3. กลุ่มที่ป้องกันเฉพาะออกซิเจน เป็นสารเคมีกลุ่มที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง หรือมีโครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่มาก เช่น 2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline (TMQ) (ภาพที่ 2.10) ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนตัวในยางต่ำมาก ดังนั้น สารเคมีชนิดนี้จึงไม่สามารถปกป้องยางจากโอโซนและการล้าตัวได้ แต่มีประสิทธิภาพในการปกป้องยางจากออกซิเจนและความร้อนได้สูงมาก นอกจากนี้ TMQ ยังมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก จึงทำให้ระเหยได้ยากและสามารถปกป้องยางได้ยาวนานกว่าสารเคมีชนิดอื่นๆ



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของ TMQ

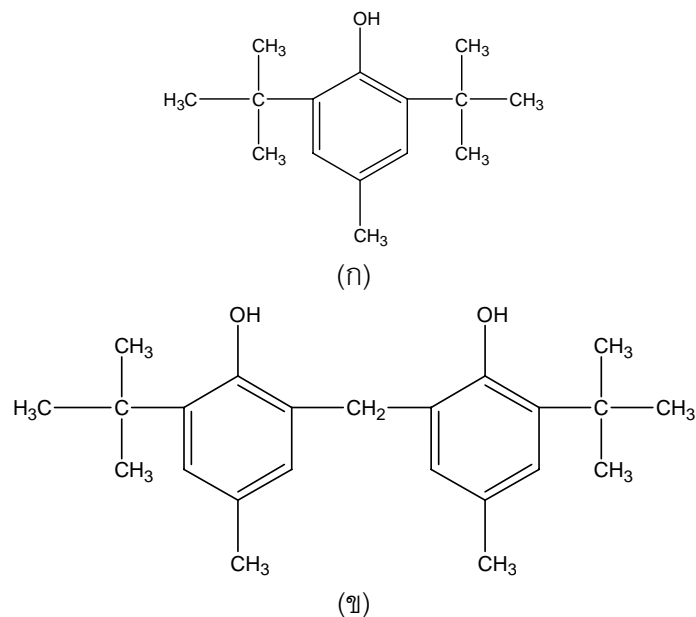
สารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดไม่เปลี่ยนสียาง

1. กลุ่มที่ป้องกันทั้งออกซิเจน โอโซน และการล้าตัว ได้แก่ styrenated phenol (SPH) (ภาพที่ 2.11) และ benzofuran derivative (BD) โดยทั่วไป BD มีประสิทธิภาพปกป้องยางจากออกซิเจนสูงกว่า SPH ซึ่งสารเคมีในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพในการป้องกันยางจากโอโซนค่อนข้างสูง (เมื่อเปรียบเทียบกับสารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดไม่เปลี่ยนสียางในกลุ่มอื่นๆ) แต่ประสิทธิภาพในการปกป้องยางจากโอโซนและการล้าตัวของสารเคมีในกลุ่มนี้ยังต่ำกว่าสารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดเปลี่ยนสียางมาก เช่น อนุพันธ์ของฟีนิลไดเอมีน



ภาพที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของ SPH

2. กลุ่มที่ป้องกันเฉพาะออกซิเจน ส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของฟินอล เช่น 2,6-di-tert-butyl-p-cresol (BHT) [ภาพที่ 2.12(ก)], 2,2'-methylene-bis-(4-methyl-6-tert.butyl phenol) (BPH) [ภาพที่ 2.12(ข)], 2,2'-methylene-bis-(4-methyl-6-cyclohexylphenol) (CPH) และ 2,2'-isobutyl idene-bis-(4-methyl-6-tert.butylphenol) (IBPH) เป็นต้น ซึ่งสารเคมีในกลุ่มนี้นอกจากช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพจากออกซิเจนแล้ว ยังมีประสิทธิภาพในการป้องกัน การเกิด crazing ได้ดีอีกด้วย โดยเฉพาะ BHT และ BPH แต่ถ้าหากยางได้รับแสงแดดเป็นเวลานาน อาจทำให้ยางเปลี่ยนเป็นสีชมพูได้



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) BHT และ (ข) BPH

3. กลุ่มที่ป้องกันเฉพาะโอโซน การใช้สารป้องกันโอโซนที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น อนุพันธ์ของฟีนิลไดเอมีนไม่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีสีอ่อน เพราะสารเคมีเหล่านี้ทำให้สีของยางเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น จึงมีการเติมไข (wax) ลงไปแทนเพื่อช่วยป้องกันยางจากโอโซน เพราะไขจะบวม ออกมาและเกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางเคลือบอยู่ที่

บริเวณพื้นผิวของยางจึงป้องกันไม่ให้ไอโซนเข้าไปทำปฏิกิริยากับยางได้ แต่ถ้าหากแผ่นฟิล์มนี้ถูกทำลาย ประสิทธิภาพในการป้องกันยางจากไอโซนจะลดลงด้วย ดังนั้น การใช้ไซโซเพียงอย่างเดียวจึงไม่มีประสิทธิภาพสูงเพียงพอในการป้องกันผลิตภัณฑ์ยางที่จะถูกนำไปใช้งานในเชิงพลวัต

2.2.5 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติม หมายถึง สารที่ใส่ลงไปผสมกับยางเพื่อลดต้นทุนการผลิต หรือปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น คาร์บอนแบล็ก แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา เป็นต้น

สารตัวเติมที่ใส่ลงไปนยาง เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ดังนี้

- เพื่อลดต้นทุนการผลิต
- เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง
- เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต
- ลดการบวมตัวของยางในน้ำมัน
- เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง

การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามการผลิต แบ่งได้ 5 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมที่มีตามธรรมชาติ หรือจากผลพลอยได้จากธรรมชาติ แล้วนำมาบดให้ละเอียด ได้แก่

- แคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูน เปลือกหอย และ ซอล์ก
- แคลเซียมและแมกนีเซียมซิลิเกตจากแป้งทัลคัม
- ซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica)

2. สารตัวเติมตามธรรมชาติที่ร่อนแยกความละเอียด เช่น คาโอลิน

3. สารตัวเติมที่ได้จากวิธีการตกตะกอน เช่น ฟริซีพิเทตซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนตไฮเดรตอะลูมิเนียมซิลิเกต อะลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และไฮเดรตอะลูมิเนียมออกไซด์

4. สารตัวเติมในรูปของเขม่า หรือผงฝุ่น เช่น คาร์บอนแบล็ก ซิงค์ออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์

5. สารตัวเติมประเภทที่มีการดัดแปรผิว (surface modified products) เป็นผลิตภัณฑ์ที่นำสารตัวเติมมาดัดแปรผิว เพื่อให้สารตัวเติมเกาะติดแน่นกับยาง ซึ่งทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลคัม และซิลิกาที่ทำปฏิกิริยาที่ผิวหรือฉาบผิว

การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามลักษณะ แบ่งได้ 3 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (particulate filler) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต และคาร์บอนแบล็ก เป็นต้น
2. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous filler) ได้แก่ แอสเบสตอส และผงไม้
3. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (resinous filler) ได้แก่ ฟีนอลิกเรซิน เป็นต้น

สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด

1. สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing fillers) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น เช่น มีความต้านแรงดึง ความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานการฉีกขาดสูง เป็นต้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมมากขึ้นจะส่งผลให้ยางมีการกระดองลดลง สารตัวเติมพวกนี้ส่วนใหญ่มีอนุภาคเล็กประมาณ 180–600 Angstrom ได้แก่ คาร์บอนแบล็ก และซิลิกา เป็นต้น
2. สารตัวเติมกึ่งเสริมแรง (semi-reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมความแข็งแรงของยางได้บ้าง สารตัวเติมเหล่านี้มีขนาดอนุภาคปานกลาง เช่น อะลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และคาโอลิน เป็นต้น
3. สารตัวเติมที่ช่วยลดต้นทุนการผลิต (diluent filler) สารตัวเติมประเภทนี้ไม่เสริมแรงให้กับยาง มีราคาถูก มีอนุภาคขนาดใหญ่ตั้งแต่ 10,000 Angstrom ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลคัม และแบเรียมซัลเฟต เป็นต้น สารตัวเติมประเภทนี้จะทำให้สมบัติทางกายภาพบางอย่างลดลง เช่น ความต้านแรงดึง ความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานการฉีกขาด แต่ปรับปรุงสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้น เช่น ทำให้ความแข็งและมอดุลัสสูง ทำให้กระบวนการแปรรูปง่ายขึ้น ลดการบวมของยาง และช่วยลดต้นทุนการผลิตเพราะมีราคาถูก

สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย

1. แอสเบสตอส (asbestos) เป็นเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ ช่วยเพิ่มสมบัติในด้านความทนทานต่อเปลวไฟ หรือความร้อนของยาง
2. ผงไม้ (wood flour) ได้จากการบดไม้ให้มีขนาดเล็ก มักใช้เป็นสารตัวเติมในยางประเภทเกรดต่ำ สารตัวเติมประเภทนี้ไม่มีผลต่อการคงรูปของยาง ถ้าใช้ในปริมาณมากจะทำให้ยางแข็งขึ้น และช่วยลดอัตราการหดตัวของยาง

สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน

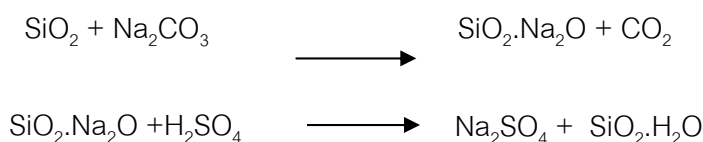
เรซินที่ใส่เข้าไปในยางทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปการทำให้ยางแข็งขึ้นมักใช้สารตัวเติมที่เป็นผง เช่น คาร์บอนแบล็ก และซิลิกา แต่สารเคมีที่เป็นผงสามารถผสมเข้าไปใน

ยางได้ในปริมาณจำกัด ถ้ามากเกินไปจะทำให้ผสมเข้ากับยางแห้งได้ยาก และมีความร้อนเกิดขึ้น ในขณะที่ผสม จึงมีการเลือกที่จะใช้เรซินเติมลงไป ในยาง สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน ได้แก่ สไตรีนเรซิน และฟีนอลิกเรซิน เป็นต้น

2.3 ซิลิกา (Silica)

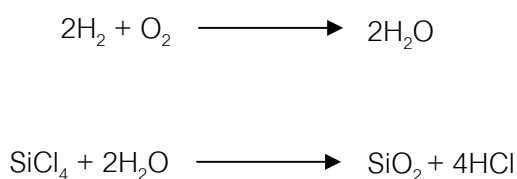
ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีสีอ่อน มีชื่อทางเคมีว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO₂) มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางที่มีสี เพราะไม่อาจใช้คาร์บอนแบล็กหรือเขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงได้ การผลิตซิลิกาในทางการค้าทำได้ 2 วิธี คือ

1. วิธีการตกตะกอน (precipitation) โดยนำทรายมาละลายในสารละลายต่าง ซึ่งจะทำให้กลายเป็นสารประกอบซิลิเกต จากนั้นทำการตกตะกอนด้วยกรดซัลฟิวริกของสารละลายอัลคาไลซิลิเกต (alkali-silicate) เช่น โซเดียมซิลิเกต จะได้ซิลิกาออกมดั่งสมการต่อไปนี้



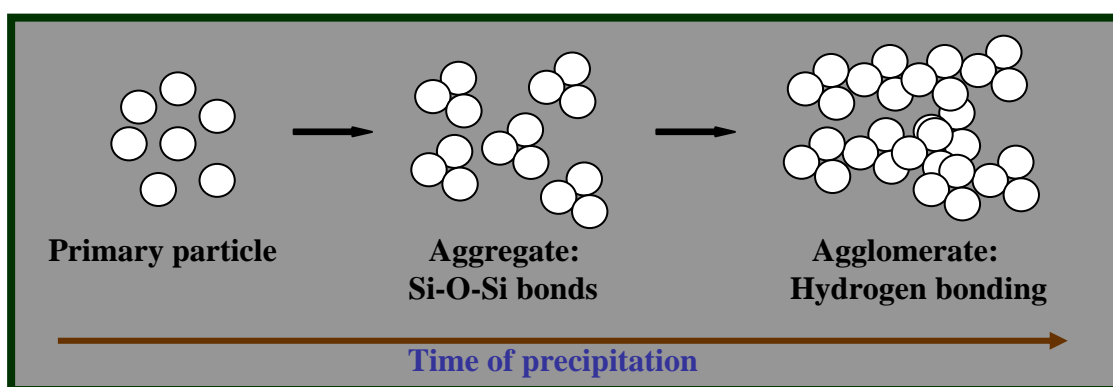
หลังจากที่ได้ซิลิกาที่อิ่มตัวด้วยน้ำแล้วก็จะนำซิลิกานี้ไปกรองและล้างเพื่อกำจัดโซเดียมซัลเฟตก่อนที่จะนำไปทำให้แห้งและเก็บลงภาชนะบรรจุ ซิลิกาที่ผลิตได้จากวิธีนี้เรียกว่า ปริซิพิเทตซิลิกา (Precipitated Silica) ซึ่งเป็นซิลิกาชนิดที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง

2. วิธีการเผา (pyrogenic) โดยนำซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (silicon tetrachloride, SiCl₄) มาทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1400 องศาเซลเซียส ในห้องเผาไหม้จะเกิดการสลายตัวให้ซิลิกาออกมดั่งปฏิกิริยาในสมการต่อไปนี้



การผลิตด้วยวิธีนี้ทำให้ได้ซิลิกาที่มีอนุภาคปฐมภูมิเล็กมาก เรียกว่า ฟูมซิลิกา (fumed silica) หรือไพโรจีนิกซิลิกา (pyrogenic silica) และซิลิกาชนิดนี้มีฤทธิ์เป็นกรด สามารถเสริมแรงได้ดีมาก โดยทั่วไปซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก (มากกว่า 99%) จะมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 7-15 นาโนเมตร และมีปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับน้อยมาก (น้อยกว่า 2%) ดังนั้น บางครั้งจึงเรียกซิลิกาชนิดนี้ว่า แอนไฮดรัสซิลิกา (anhydrous silica)

โครงสร้างของซิลิกาที่ใช้กันมากมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิล้อมอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร แต่เนื่องจากซิลิกาจะไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ ในรูปของอนุภาคปฐมภูมิ หากแต่จะรวมกันอยู่เป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่า แอกริเกต เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ ซึ่งโครงสร้างปฐมภูมินี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสมเพราะเกิดจากแรงดึงดูดทางเคมีที่แข็งแรง (พันธะโควาเลนต์) และนอกจากนี้ แอกริเกตซิลิกายังชอบอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ และเรียกกลุ่มก้อนขนาดใหญ่นี้ว่า แอกลอเมอเรต ดังแสดงในภาพที่ 2.13 โดยโครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกามีความแข็งแรงสูงมาก เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของซิลิกาเกิดจากแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจน (H-bond)

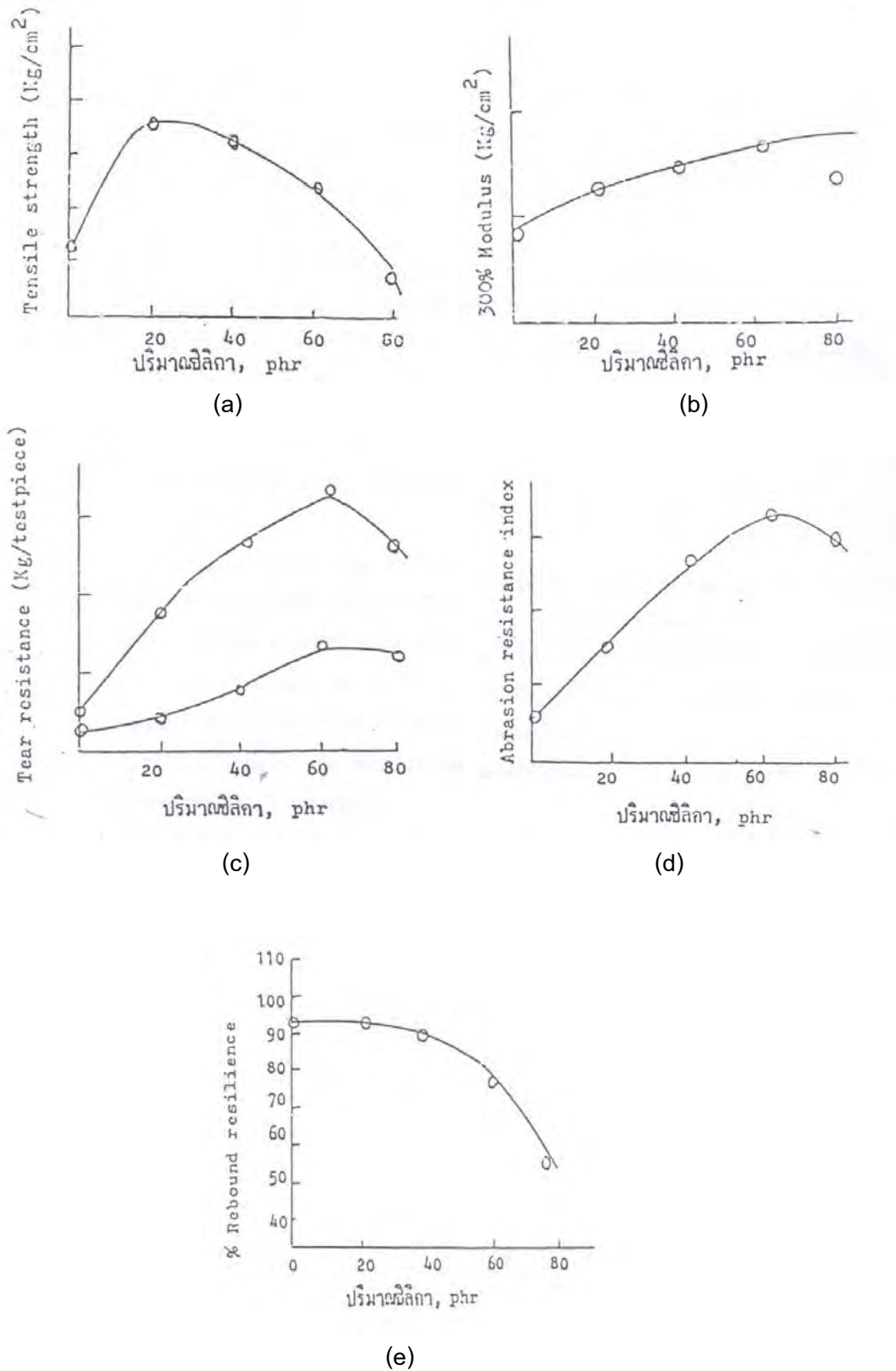


ภาพที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างของซิลิกา

พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นปัจจัยสำคัญในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการเสริมแรงในยาง โดยซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และให้การเสริมแรงที่ดี โดยเทคนิคที่นิยมใช้ในการวัดขนาดของพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติม คือ เทคนิคการดูดซับไนโตรเจนที่เรียกว่า เทคนิค BET

ตารางที่ 2.5 สมบัติทั่วไปของพรีซิพิตีเตดซิลิกา

สมบัติ	ปริมาณ
การสูญเสียน้ำหนักที่ 105°C, %	4-7
การสูญเสียน้ำหนักที่ 1,000°C, %	8-12
พื้นที่ผิว BET, m ² /g	45-100
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, μm (ขนาดของแอกลอเมอเรต)	10-100
ดัชนีหักเห	1.45
ความหนาแน่น g/cm ³	2.0



ภาพที่ 2.15 ผลของปริมาณซีลีกาต่อสมบัติ (a) ความต้านแรงดึง (b) มอดุลัส (c) ความต้านการฉีกขาด (d) ความต้านทานการสึกหรอ และ (e) การกระดอนของยาง [6]

2.4 พอตเทอริสโตน (Pottery stone)

โดยทั่วไปในทางธรรมชาติจะใช้สารตัวเติมเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นผง เช่น คาร์บอนแบล็ก หรือซิลิกา ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีส้มจะใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม แต่เนื่องจากซิลิกาที่ใช้ในทางการค้าหรือพิธีพิเทตซิลิกามีราคาสูง ในปัจจุบันจึงมีความพยายามนำซิลิกาที่ได้จากแหล่งธรรมชาติมาใช้ทดแทน ทั้งยังช่วยลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย และซิลิกาจากพอตเทอริสโตน ซึ่งเป็นซิลิกาจากแหล่งธรรมชาติก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

พอตเทอริสโตนเป็นแร่ที่อยู่ในกลุ่มหินอัคนีภูเขาไฟ (volcanic rock) ชนิดที่เรียกว่า หินอัคนีสีจาง (felsic igneous rock) ซึ่งเกิดจากการปะทุขึ้นมาของแมกมาจากใต้โลกขึ้นสู่ผิวโลกเป็นหินหนืดหรือลาวา (lava) ไหลออกมา ซึ่งการปะทุขึ้นมาของแมกมาเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ เช่น การปะทุแบบไม่รุนแรง เป็นการปะทุตามปล่องหรือรอยแตก รอยแยกของแผ่นเปลือกโลก โดยลาวาจะไหลไปตามลักษณะภูมิประเทศ และลาวาจะถ่ายโอนความร้อนให้กับบรรยากาศภายนอกอย่างรวดเร็ว ทำให้อะตอมของธาตุต่างๆ มีเวลาน้อยในการจัดตัวเป็นผลึก หินลาวาจึงประกอบด้วย แร่ที่มีผลึกขนาดเล็กหรือเล็กมาก ไม่สามารถมองเห็นและจำแนกผลึกได้ด้วยตาเปล่า เช่น

- หินบะซอลต์ เป็นหินที่เกิดจากการเย็นตัวของลาวาที่มีความหนืดน้อย มีปริมาณซิลิกาอยู่ในช่วงร้อยละ 45-52
- หินแอนดีไซต์ เป็นหินที่เกิดจากการเย็นตัวของลาวาที่มีความหนืดปานกลาง มีปริมาณซิลิกาอยู่ในช่วงร้อยละ 52-66
- หินไรโอไรต์ เป็นหินที่เกิดจากการเย็นตัวของลาวาที่มีความหนืดมาก มีปริมาณซิลิกามากกว่าร้อยละ 66

หินไรโอไรต์ (rhyolite) หรือพอตเทอริสโตน (ภาพที่ 2.16) เมื่อสลายตัวมักให้ดินสีจาง เนื้อค่อนข้างหยาบ องค์ประกอบทางเคมีของพอตเทอริสโตนขึ้นกับแหล่งที่มา ซึ่งในประเทศไทยจะมาจากหลายแหล่ง เช่น ลำปาง กาญจนบุรี และลพบุรี เป็นต้น โดยทั่วไปพอตเทอริสโตนจะมีส่วนประกอบของออกไซด์ของโลหะ และมีองค์ประกอบหลักเหมือนกัน คือ มีซิลิกามากกว่าร้อยละ 70 [1]



ภาพที่ 2.16 ลักษณะของพอตเทอริสโตนที่อยู่ในรูปของหินผุและผ่านการบดแล้ว

ตารางที่ 2.6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของพอตเทอริสโตนจากแหล่งลพบุรี

Chemical	%Content	Chemical	%Content
SiO ₂	75.88	K ₂ O	4.74
Al ₂ O ₃	11.69	TiO ₂	0.13
Fe ₂ O ₃	0.81	P ₂ O ₅	< 0.01
MgO	< 0.01	MnO ₂	0.01
CaO	0.2	Cr ₂ O ₂	< 0.01
Na ₂ O	3.67	LOI	3.67

ปริมาณการผลิตพอตเทอริสโตนในประเทศไทยแสดงไว้ในตารางที่ 2.8

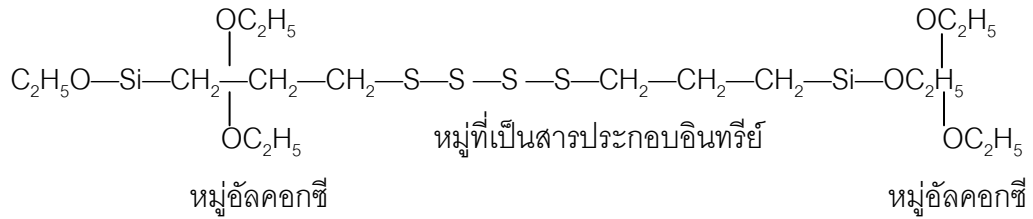
ตาราง 2.7 ปริมาณการผลิตแร่ชนิดต่างๆ ในประเทศไทย พ.ศ. 2544–2548

ชนิดแร่	2544 (ตัน)	2545 (ตัน)	2546 (ตัน)	2547 (ตัน)	2548 (ตัน)
ไรโอไลต์ หรือ พอตเทอริสโตน	422,604	335,845	282,835	569,599	830,455

ที่มา: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม (Department of Primary Industry and Mines, Ministry of Industry)

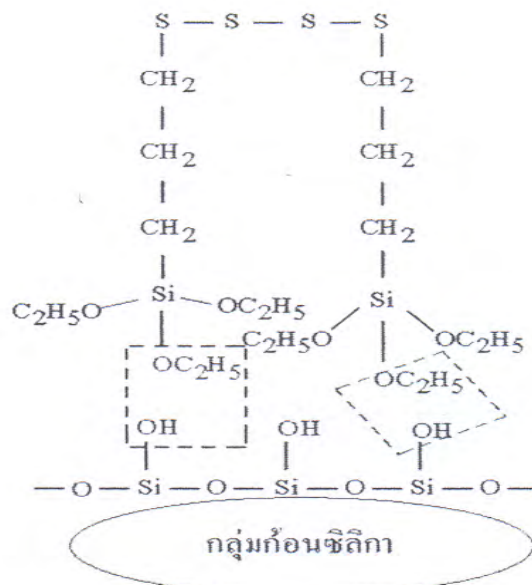
2.5 สารคู่ควบ (Coupling agent)

ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) เป็นสารตัวเติมประเภทสีไม่ดำ (non-black fillers) ที่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงยางธรรมชาติได้ดีที่สุด ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) สูง และให้การเสริมแรงที่ดี ข้อดีของซิลิกา คือ ช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่น เพิ่มความต้านการฉีกขาด ลดความร้อนสะสม (heat build up) และเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ เป็นต้น แต่เมื่อเทียบกับคาร์บอนแบล็กที่มีพื้นที่ผิวเท่ากันแล้ว ซิลิกาจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเชิงกลด้อยกว่า โดยเฉพาะมอดูลัส และความต้านทานการสึกหรอ เนื่องจากซิลิกามีอันตรกิริยากับยางต่ำกว่าคาร์บอนแบล็ก ดังนั้น ในการใช้ซิลิกาจึงนิยมเติมสารคู่ควบซิลิโคน (silane coupling agents) ปริมาณเล็กน้อย (5-15% โดยน้ำหนักของซิลิกา) เคลือบผิวอนุภาคซิลิกา เพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะกับวัฏภาคยาง ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น โดยทั่วไป สารคู่ควบซิลิโคนประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน 2 ชนิด คือ หมู่อัลคอกซี (alkoxy) และหมู่ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ (organo functional groups) ดังแสดงในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบซิลเลน (Si-69)

เมื่อเติมสารคู่ควบซิลเลนเข้าไปในระบบ หมู่อัลคอกซีจะทำปฏิกิริยากับหมู่อซิลานอล (silanol group, -Si-OH) ที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาในระหว่างกระบวนการผสมเกิดเป็นพันธะซิลอกเซน (siloxane, Si-O-Si) (ภาพที่ 2.18) ซึ่งทำให้หมู่อซิลานอลบนพื้นผิวของซิลิกาตกลง ดังนั้น การเติมสารคู่ควบยังมีผลทำให้อัตราการระหว่างอนุภาคของซิลิกาตกลง ซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดลดลง และทำให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น สำหรับหมู่ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบจะมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ โดยทำให้เกิดการเชื่อมขวางกับยางด้วยพันธะเคมี สารคู่ควบซิลเลนจึงทำหน้าที่เสมือนสะพานเชื่อมระหว่างยางกับซิลิกา ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น ตัวอย่างสารคู่ควบซิลเลนที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ไทโรเททอกซิลิลโพรพิลเททระซัลไฟด์ (bis-(3-triethoxysilyl propyl)-tetrasulfide, Si-69), เมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกซีซิลเลน (mercaptopropyl-trimethoxysilane, A-189) และไทโอไซยาเนโตโพรพิลไตรเอทอกซีซิลเลน (3-thiocyanato-propyl-triethoxysilane, Si-264) เป็นต้น



ภาพที่ 2.18 การทำปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบซิลเลน (Silane-69) กับซิลิกา

งานวิจัยของ Rattanasom และคณะ [7] ได้ทดลองเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยสารผสมระหว่างซิลิกาและคาร์บอนแบล็กเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical properties) ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่ประกอบด้วยซิลิกา 20 และ 30 phr ในฟิลเลอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดี

งานวิจัยของ Ansarifar และคณะ [8] เกี่ยวกับการใช้ซิลิกาที่เคลือบผิวด้วยสารคู่ควบซิลีนประเภท bis(3-triethoxysilylpropyl)tetrasulphane (TESPT) เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันในระบบที่ใช้สารเร่งวัลคาไนซ์ประเภทซัลฟีนามิด (sulphenamide) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่ได้มีสมบัติเชิงกลด้านความแข็ง (hardness) ความล้า (fatigue) ความต้านการฉีกขาด ความต้านแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาด สูงที่สุดเมื่อใส่ TESPT ปริมาณ 7 phr นอกจากนี้ ยังพบว่าซิลิกาสามารถกระจายตัวได้อย่างสมบูรณ์ในยาง

Sombatsompop และคณะ [9] ได้ทดลองใช้เถ้าลอย (fly ash) เป็นสารเติมแต่งในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ/ยางเอสปีอาร์ โดยศึกษาผลของซิลิกาในเถ้าลอยเปรียบเทียบกับซิลิกาทางการค้า โดยใช้สารคู่ควบซิลีน Si-69 ปรับปรุงผิวของเถ้าลอย ผลการทดลอง พบว่า ซิลิกาจากเถ้าลอยปริมาณ 20 phr และผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบซิลีน 2% โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมที่จะนำมาเติมลงในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ/ยางเอสปีอาร์ และสามารถนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งทดแทนซิลิกาทางการค้าได้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 ยางและสารเคมียาง

1. ยางธรรมชาติ : ยาง STR 5L ของบริษัท เอส เอ็ม พี รับเบอร์ จำกัด
2. สารกระตุ้นวัลคาไนซ์ : ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ของบริษัท เอส เอ็ม อาร์ (2000) เคมิคอลส์ จำกัด และกรดสเตียริก (stearic acid) ของบริษัท เอส เอ็ม อาร์ (2000) เคมิคอลส์ จำกัด
3. สารเร่งวัลคาไนซ์ : N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide (CBS) ของบริษัท เคมีมิน จำกัด
4. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ : dimethylbutyl-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD) ของบริษัท เอส เอ็ม อาร์ (2000) เคมิคอลส์ จำกัด และ trimethyl-dihydroquinoline (TMQ) ของบริษัท เอส เอ็ม อาร์ (2000) เคมิคอลส์ จำกัด
5. สารวัลคาไนซ์ : กำมะถัน (sulfur) ของบริษัท เคมีมิน จำกัด
6. สารตัวเติม : ฟรีซีพิเทตซิลิกา (ซิลิกาเกรดการค้ำ) ของบริษัท เคมีมิน จำกัด และ พอดเทอริสโตนจากแหล่งลพบุรี
7. สารคู่ควบ: ซิเลน 69 (Si-69) ของบริษัท J. J. Degusa จำกัด

3.2 สูตรสารประกอบยางที่ใช้ในการวิจัย

สูตรสารประกอบยางที่ใช้มีด้วยกัน 5 สูตร ดังนี้

สูตรที่ 1: ไม่ใส่สารตัวเติม (ตารางที่ 3.1)

สูตรที่ 2: ใช้พอดเทอริสโตนเป็นสารตัวเติม (ตารางที่ 3.2)

สูตรที่ 3: ใช้ฟรีซีพิเทตซิลิกาเป็นสารตัวเติม (ตารางที่ 3.3)

สูตรที่ 4: ใช้พอดเทอริสโตนเป็นสารตัวเติมร่วมกับสารคู่ควบ Si-69 (ตารางที่ 3.4)

สูตรที่ 5: ใช้ฟรีซีพิเทตซิลิกาเป็นสารตัวเติมร่วมกับสารคู่ควบ Si-69 (ตารางที่ 3.5)

ตารางที่ 3.1 สูตรสารประกอบยางที่ไม่ใส่สารตัวเติม

ส่วนผสม (Ingredient)	ปริมาณโดยน้ำหนัก (phr)						
	สูตรที่ 1.1 (Gum1)	สูตรที่ 1.2 (Gum2)	สูตรที่ 1.3 (Gum3)	สูตรที่ 1.4 (Gum4)	สูตรที่ 1.5 (Gum5)	สูตรที่ 1.6 (Gum6)	สูตรที่ 1.7 (Gum7)
STR 5L	100	100	100	100	100	100	100
ZnO	8	8	8	8	8	8	8
Stearic acid	1	1	1	1	1	1	1
6PPD	1	1	1	1	1	1	1
TMQ	1	1	1	1	1	1	1
Sulfur	0.41	0.69	1.39	2.08	2.77	3.47	4.16
CBS	0.27	0.45	0.90	1.35	1.80	2.25	2.70

ตารางที่ 3.2 สูตรสารประกอบยางที่ใช้พอดเทอริสโตนเป็นสารตัวเติม

ส่วนผสม (Ingredient)	ปริมาณโดยน้ำหนัก (phr)				
	สูตรที่ 2.1 (NR-PS1) ^a	สูตรที่ 2.2 (NR-PS2) ^b	สูตรที่ 2.3 (NR-PS3) ^c	สูตรที่ 2.4 (NR-PS4) ^d	สูตรที่ 2.5 (NR-PS5) ^e
STR 5L	100	100	100	100	100
ZnO	8	8	8	8	8
Stearic acid	1	1	1	1	1
6PPD	1	1	1	1	1
TMQ	1	1	1	1	1
Pottery stone	30	30	30	30	30
Sulfur	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39
CBS	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

^a คือ ยางสูตรที่เติมพอดเทอริสโตนที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 μm

^b คือ ยางสูตรที่เติมพอดเทอริสโตนที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 45-62 μm

^c คือ ยางสูตรที่เติมพอดเทอริสโตนที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 63-106 μm

^d คือ ยางสูตรที่เติมพอดเทอริสโตนที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 106 μm

^e คือ ยางสูตรที่เติมพอดเทอริสโตนที่ผ่านการบดและมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 μm

ตารางที่ 3.3 สูตรสารประกอบยางที่ใช้พรีซิลิกาเป็นสารตัวเติม

ส่วนผสม (Ingredient)	ปริมาณโดยน้ำหนัก (phr)
	สูตรที่ 3 (NR-Silica)
STR 5L	100
ZnO	8
Stearic Acid	1
6PPD	1
TMQ	1
Precipitated silica	30
Sulfur	1.39
CBS	0.90

ตารางที่ 3.4 สูตรสารประกอบยางที่ใช้พอลิเอทเธอริสโตนร่วมกับสารคู่ควบ Si-69

ส่วนผสม (Ingredient)	ปริมาณโดยน้ำหนัก (phr)				
	สูตรที่ 4.1 (NR-PS1-CG)	สูตรที่ 4.2 (NR-PS2-CG)	สูตรที่ 4.3 (NR-PS3-CG)	สูตรที่ 4.4 (NR-PS4-CG)	สูตรที่ 4.5 (NR-PS5-CG)
STR 5L	100	100	100	100	100
ZnO	8	8	8	8	8
Stearic acid	1	1	1	1	1
6 PPD	1	1	1	1	1
TMQ	1	1	1	1	1
Pottery stone	30	30	30	30	30
Si-69 (CG)	3	3	3	3	3
Sulfur	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39
CBS	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

ตารางที่ 3.5 สูตรสารประกอบยางที่ใช้ฟรีซิลิกาเทตซิลิการ่วมกับสารคู่ควบ Si-69

ส่วนผสม (Ingredient)	ปริมาณโดยน้ำหนัก (phr)
	สูตรที่ 5 (NR-Silica-CG)
STR 5L	100
ZnO	8
Stearic acid	1
6PPD	1
TMQ	1
Precipitated silica	30
Si-69 (CG)	3
Sulfur	1.39
CBS	0.90

3.3 ขั้นตอนการเตรียมพอดเทอริสโตน

3.3.1 การแยกพอดเทอริสโตนตามขนาดของอนุภาค

พอดเทอริสโตนถูกคัดแยกตามขนาดด้วยตะแกรงร่อนก่อนนำไปผสมกับยางธรรมชาติ STR 5L โดยตะแกรงร่อนที่ใช้ในการแยกอนุภาคพอดเทอริสโตนมีความละเอียดต่างๆ กัน ดังต่อไปนี้ 140, 230 และ 325 เมช (mesh) เมื่อผ่านการร่อนจะได้พอดเทอริสโตนซึ่งมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงต่างๆ ดังต่อไปนี้ 63-106 μm , 45-62 μm และอนุภาคเล็กกว่า 45 μm ตามลำดับ

3.3.2 การบดพอตเทอริสโตน

พอตเทอริสโตนได้ถูกทำให้มีขนาดละเอียดขึ้นโดยการบดด้วยเครื่องบด planetary mill (Retsch รุ่น SR2 ดังแสดงในภาพที่ 3.1) หลังผ่านการบด พอตเทอริสโตนที่ได้ทั้งหมดสามารถผ่านตะแกรงร่อน 325 mesh ได้



ภาพที่ 3.1 เครื่องบด Planetary mill

3.4 การทดสอบและการวิเคราะห์พอตเทอริสโตน

3.4.1 การกระจายขนาดอนุภาค โดยเครื่อง Mastersizer 2000 ของ Malvern

3.4.2 ลักษณะอนุภาคโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope ของ Philips รุ่น XL 30 CP

3.4.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอตเทอริสโตนด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer ของ Bruker รุ่น Vector 22

3.5 ขั้นตอนการผสมยางและขึ้นรูปยาง

3.5.1 ขั้นตอนการผสมยาง

นำยางและสารเคมีต่างๆ ตามตารางข้างต้นผสมกันด้วยเครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill, ภาพที่ 3.2) ของ Lab Tech Engineering โดยมีขั้นตอนการบดผสมยาง 2 ขั้น ดังนี้



ภาพที่ 3.2 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง

3.5.1.1 การผสมยางกับสารเคมียางทั้งหมดยกเว้นสารวัลคาไนซ์ (ขั้นที่ 1)

1. ปรับความกว้างของลูกกลิ้งไว้ที่ขนาดความกว้าง 5 mm โดยกำหนดความเร็วของลูกกลิ้งลูกหน้าไว้ที่ 30 รอบต่อวินาที (rpm) และลูกหลังไว้ที่ 40 รอบต่อวินาที (rpm) โดยในระหว่างการบดผสมยางทำการควบคุมอุณหภูมิของลูกกลิ้งไม่ให้เกิน 70 องศาเซลเซียส

2. เริ่มบดยางด้วยการใส่ชิ้นยางเข้าไปในช่องระหว่างสองลูกกลิ้งที่กำลังหมุนอยู่ในตอนแรกเมื่อยางผ่านระหว่างสองลูกกลิ้ง ยางจะร่วงตกลงบนถาดรองรับใต้ลูกกลิ้ง เมื่อบดยางไป 3 ถึง 4 ครั้ง ยางเริ่มอ่อนนุ่มพอที่จะจับพันรอบลูกกลิ้งได้ จึงปรับความกว้างระหว่างลูกกลิ้งลงมาที่ 3 mm ทำการบดยางอีกครั้ง และสุดท้ายปรับความกว้างระหว่างลูกกลิ้งไว้ที่ 2 mm และเมื่อยางพันรอบลูกกลิ้งได้ ในตอนแรกจะมีลักษณะไม่เรียบทั่วผิวลูกกลิ้ง คือ ยางที่พันรอบลูกกลิ้งมีช่องที่ขาดเป็นรูอยู่ทั่วไป เมื่อบดต่อไปยางที่พันรอบลูกกลิ้งจะเริ่มเรียบขึ้น ขณะเดียวกันจะมียางกองอยู่เหนือช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง และต้องให้ยางผ่านลูกกลิ้งซ้ำไปมาหลายครั้งเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอทั่วเนื้อยาง ซึ่งทำได้โดยใช้มีดตัดยาง (mill knife) ตัดยางที่พันรอบลูกกลิ้งลูกหน้าไปตามยาวประมาณ 3 ใน 4 ของความยาวลูกกลิ้ง ขณะเดียวกันใช้มีดอีกข้างหนึ่งม้วนยางที่ถูกตัดเข้ามา โดยม้วนยางให้ยังคงทาบอยู่บนผิวลูกกลิ้งจนกว่ากองยางที่ค้างอยู่บนช่องว่างลูกกลิ้งจะลงมาเมื่อยางพันรอบลูกกลิ้งอีกครั้งให้ตัดยางที่พันรอบลูกกลิ้งอีกครั้งโดยให้ตัดยางที่พันรอบลูกกลิ้งซ้ายขวาสลับกันโดยใช้เวลาในการบดยางประมาณ 2 นาที

3. เติมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ลงไปในยางที่บดอยู่อย่างช้าๆ โดยกรีดยางและพับยางไปมาเพื่อให้ซิงค์ออกไซด์กระจายตัวเข้าไปในยางจนทั่วและเป็นเนื้อเดียวกัน (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที)

4. เติมสารเติมแต่ง และสารคู่ควบ Si-69 อย่างช้าๆ โดยกรีดยางและพับบางจนสารเคมียางกระจายตัวเข้าไปในเนื้อยางจนทั่วและเป็นเนื้อเดียวกัน (ใช้เวลาประมาณ 5-7 นาที)

5. เติมกรดสเตียริก (stearic acid), 6 PPD และ TMQ ลงไปอย่างช้าๆ โดยกรีดยางและพับบางจนสารกระจายตัวเข้าไปในเนื้อยางจนทั่วและเป็นเนื้อเดียวกัน (ใช้เวลาประมาณ 2-3 นาที)

6. กรีดยางผ่านลูกกลิ้งพร้อมๆ กับม้วนยางให้เป็นโรล ทำซ้ำประมาณ 10 รอบ เพื่อให้สารต่างๆ กระจายในยางได้ดีขึ้น

7. กรีดยางออกจากเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งให้เป็นแผ่นตามความหนาที่ต้องการ และพักยางทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง

3.5.1.2 การผสมยางคอมพาวด์กับสารคงรูป (ขั้นที่ 2)

1. ใส่ยางที่ได้จากขั้นที่ 1 ลงไปในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งที่กำลังหมุน (ใช้เวลาประมาณ 1 นาที)

2. เติมกำมะถันลงไปอย่างช้าๆ พร้อมกับกรีดยางและพับบางจนกำมะถันกระจายตัวทั่วในเนื้อยาง (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที)

3. เติม CBS ลงไปอย่างช้าๆ กรีดยางและพับบางจน CBS กระจายตัวทั่วในเนื้อยาง (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที)

4. กรีดยางผ่านลูกกลิ้งพร้อมๆ กับม้วนยางให้เป็นโรล ทำซ้ำประมาณ 10 รอบ เพื่อให้สารต่างๆ ในยางกระจายได้ดีขึ้น

5. ในขั้นสุดท้ายกรีดยางออกมาเป็นแผ่น แล้วพักยางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำแผ่นยางไปขึ้นรูปต่อไป

3.5.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปยาง

ทำการขึ้นรูปยางด้วยเครื่องอัดแบบ (compression molding) (ภาพที่ 3.3) ของ Lab Tech Engineering ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเพื่อให้เกิดการคงรูป 100% (t_c100) หาได้จากเครื่อง Moving Die Rheometer (หัวข้อ 3.6) ขนาดของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปมี 2 ขนาด คือ

1. สีเหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 18 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร หนา 1 มิลลิเมตร จำนวน 1 แผ่น สำหรับหาค่าดัชนีการบวมตัว (Swelling Index) ของยางในทูลออื่น

2. สี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 18 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น สำหรับทดสอบความต้านแรงดึง (tensile strength) ความต้านการฉีกขาด (tear strength) และทดสอบความแข็ง (hardness)



ภาพที่ 3.3 เครื่องอัดแบบ (compression molding)

3.6 การทดสอบหาเวลาการคงรูป (Cure time)

นำยางที่ได้บดผสมแล้วมาตัดเป็นชิ้นวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 เซนติเมตร และหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร เพื่อใช้ทดสอบหาเวลาที่ใช้ในการคงรูปด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) (ภาพที่ 3.4) ของ Techpro รุ่น Rheotech MD⁺ ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.4 เครื่อง Moving Die Rheometer (MDR)

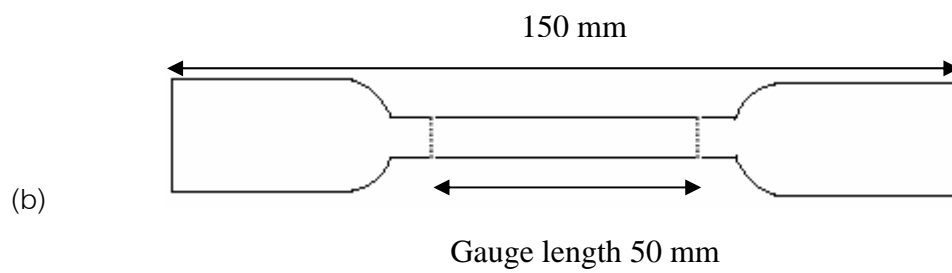
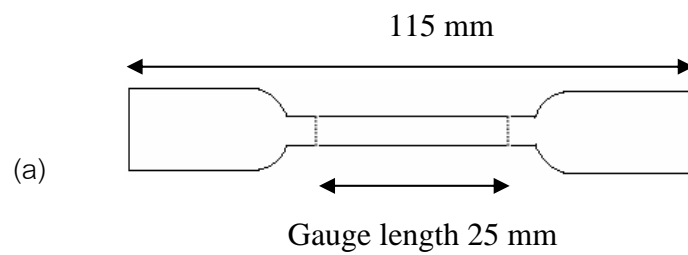
3.7 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป

3.7.1 ความต้านแรงดึง (Tensile strength)

สมบัติความต้านแรงดึงถูกทดสอบตามมาตรฐาน ISO 37 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (INSTRON) รุ่น 5566 ดังแสดงในภาพที่ 3.5 อัตราเร็วที่ใช้ในการดึงคือ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบล Type 2 (ภาพที่ 3.6) วัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่ง คือ ตรงกลางและบริเวณหัวท้ายภายในความยาว guage ของชิ้นทดสอบ ใช้ค่าเฉลี่ยเป็นค่าความหนาสำหรับการคำนวณ ค่าความต้านแรงดึงที่รายงานมาจากค่าเฉลี่ยของ 5 ชิ้นทดสอบ



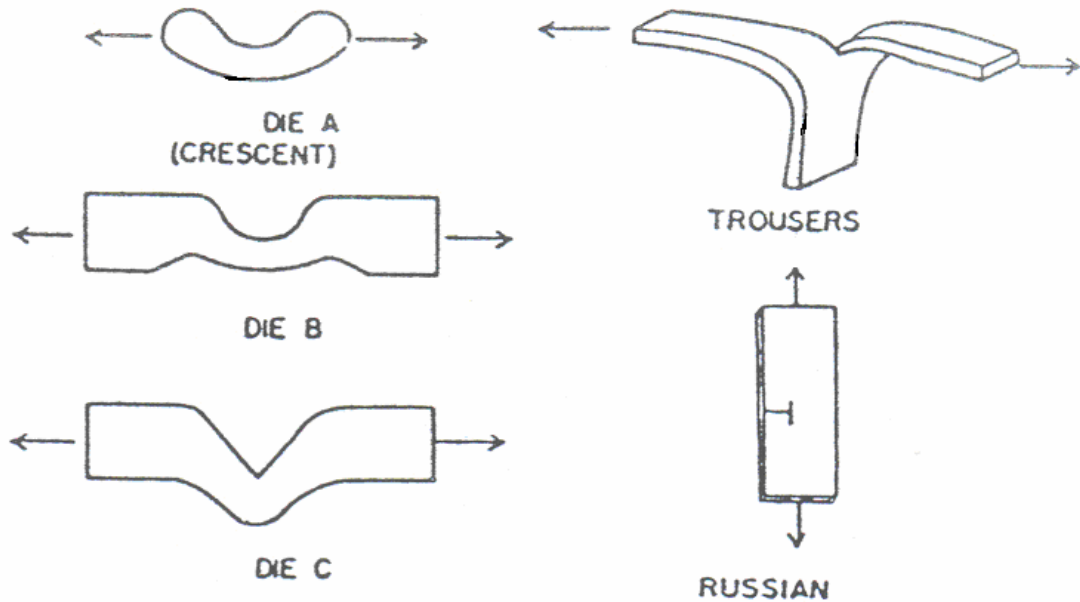
ภาพที่ 3.5 เครื่อง Universal Testing Machine (INSTRON)



ภาพที่ 3.6 ชั้นทดสอบความต้านแรงดึง (a) ดั้มเบลเล็ก และ (b) ดั้มเบลใหญ่

3.7.2 ความต้านการฉีกขาด

ขั้นตอนทดสอบสำหรับการวัดความต้านการฉีกขาดมีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน ISO 34 Die B (ภาพที่ 3.7) และทำการวัดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (INSTRON) รุ่น 5566



ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนทดสอบสำหรับวัดความต้านการฉีกขาด

3.7.3 ความแข็งดูโรมิเตอร์ (Durometer Hardness)

ความแข็งของยางคงรูปวัดตามมาตรฐาน ASTM D2240 ด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ชอร์ A (Durometer Shore A) รุ่น 716 ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่องวัดความแข็งดูโรมิเตอร์ชอร์ A (Durometer Shore A)

3.8 การหาดัชนีการบวมตัว (Swelling Index) [8]

นำชิ้นทดสอบที่มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีน้ำหนักประมาณ 0.7 กรัม แช่ลงในทูลอีนเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำชิ้นทดสอบมาชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปผึ่งลมเป็นเวลา 3 วัน ทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้ง จากนั้นนำค่าที่ได้มาแทนค่าลงในสมการที่ 3.1 เพื่อหาค่าดัชนีการบวมตัวของยาง

$$Q = (W_s - W_u) / W_u \quad (3.1)$$

Q คือ ดัชนีการบวมตัว (Swelling Index)

W_s คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบที่บวมตัว

W_u คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบยางที่แห้งแล้วหลังการบวมตัว

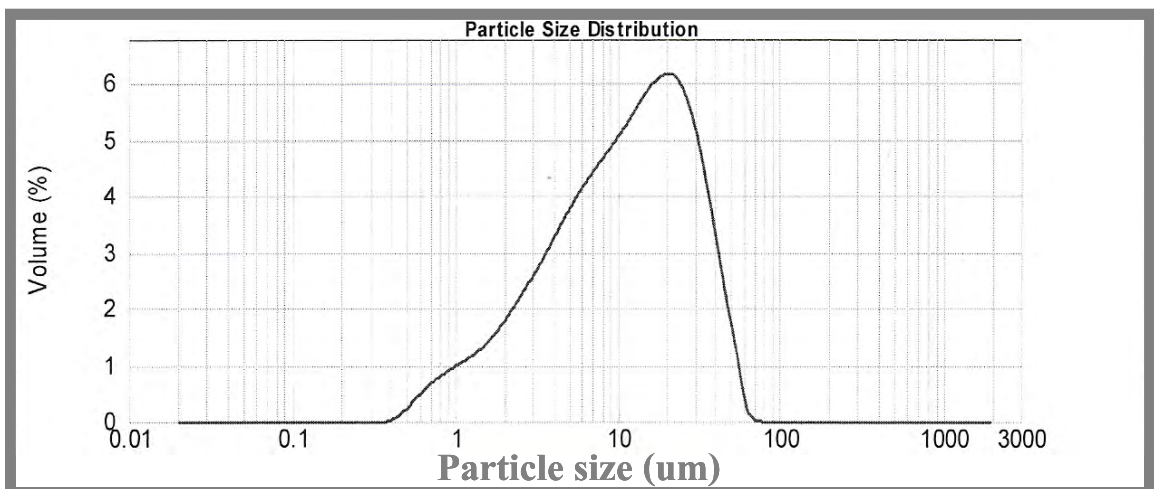
บทที่ 4

ผลการทดลอง

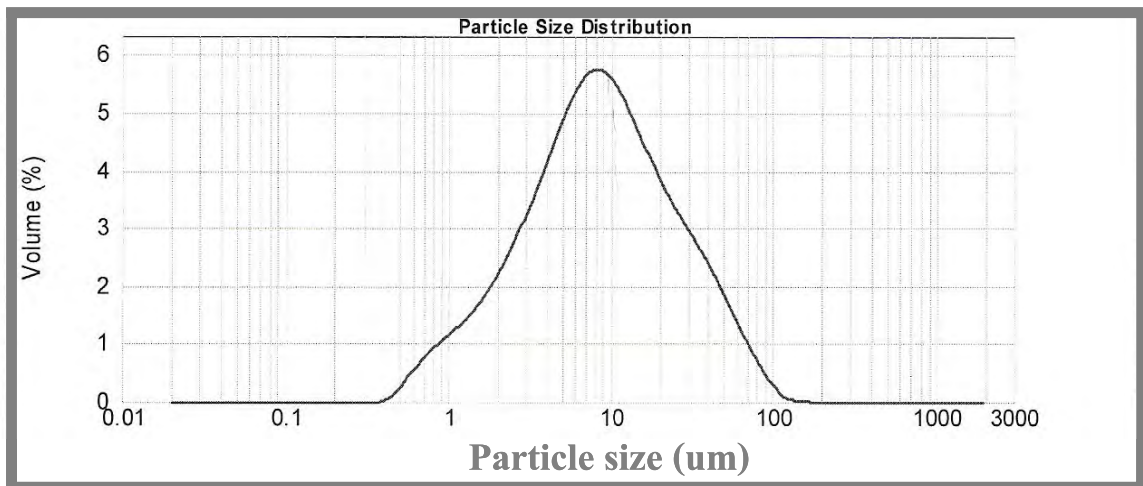
4.1 ลักษณะทางกายภาพและหมู่ฟังก์ชันของพอดเทอริสโตนและพรีซิพิเตชันซิลิกา

4.1.1 ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค

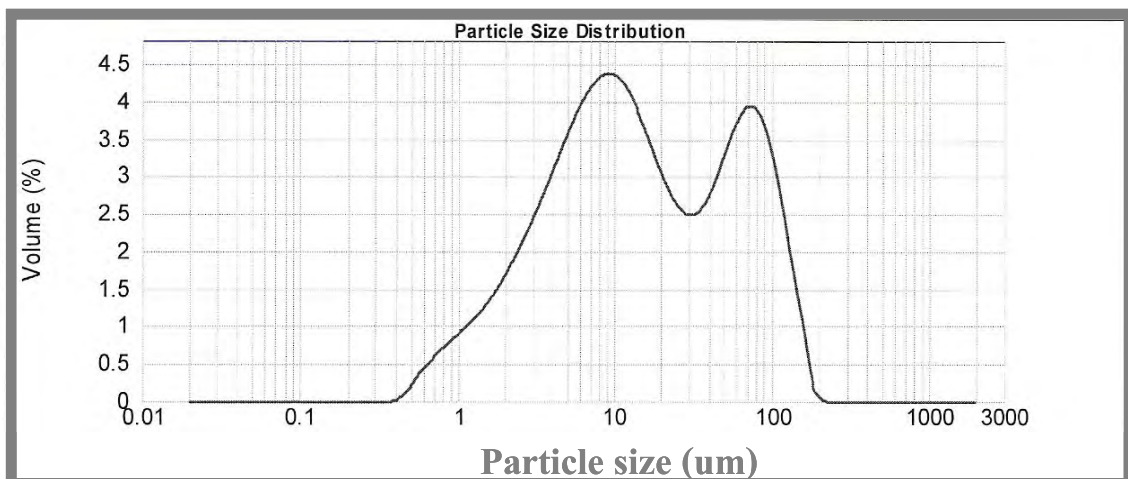
ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนที่ผ่านตะแกรงร่อนที่มีจำนวนเมชต่างๆ กัน ถูกศึกษาด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 โดยภาพที่ 4.1-4.3 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนที่ได้จากการร่อน ภาพที่ 4.1 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนที่ผ่านตะแกรงร่อน 325 เมช ($< 45 \mu\text{m}$) ซึ่งพบว่าพอดเทอริสโตนในส่วนนี้มีการกระจายขนาดตั้งแต่ $0.4-60 \mu\text{m}$ ภาพที่ 4.2 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนที่ผ่านตะแกรงร่อน 230 เมช แต่ไม่ผ่านตะแกรงร่อน 325 เมช ($45-62 \mu\text{m}$) จากกราฟการกระจายขนาดที่ได้ พบว่า พอดเทอริสโตนในส่วนนี้มีการกระจายขนาดตั้งแต่ $0.4-120 \mu\text{m}$ และภาพที่ 4.3 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนที่ผ่านตะแกรงร่อน 140 เมช แต่ไม่ผ่านตะแกรงร่อน 230 เมช ($63-106 \mu\text{m}$) พบว่า กราฟที่ได้มีลักษณะเป็น bimodal มีขนาดตั้งแต่ $0.4-158 \mu\text{m}$ โดยกลุ่มแรกมีขนาดอยู่ในช่วง $1-20 \mu\text{m}$ สำหรับกลุ่มที่สองอนุภาคมีขนาดอยู่ในช่วง $20-158 \mu\text{m}$ และกลุ่มหลังนี้มีสัดส่วนที่น้อยกว่ากลุ่มแรก จากการพิจารณากราฟการกระจายในภาพที่ 4.1-4.3 สรุปได้ว่าขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนมีการกระจายขนาดที่กว้างมาก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการคัดพอดเทอริสโตนที่ไม่ผ่านตะแกรงร่อน 140 เมช ทิ้งไป เนื่องจากเกรงว่าจะเป็นอันตรายกับเครื่องมือที่ใช้บัดผลสมยาง



ภาพที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนที่ผ่านตะแกรงร่อน 325 เมช



ภาพที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์ที่ผ่านตะแกรงร่อน 230 เมช
แต่ไม่ผ่านตะแกรงร่อน 325 เมช

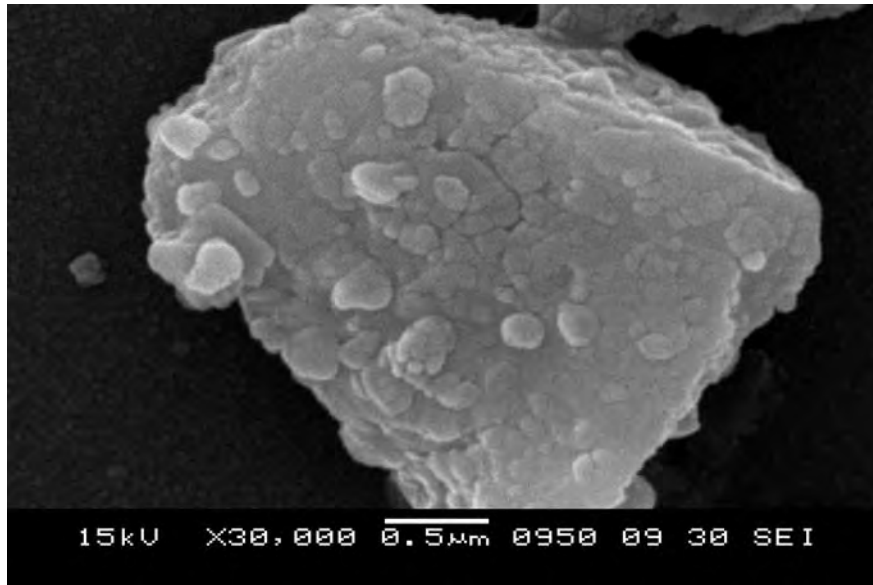


ภาพที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์ที่ผ่านตะแกรงร่อน 140 เมช
แต่ไม่ผ่านตะแกรงร่อน 230 เมช

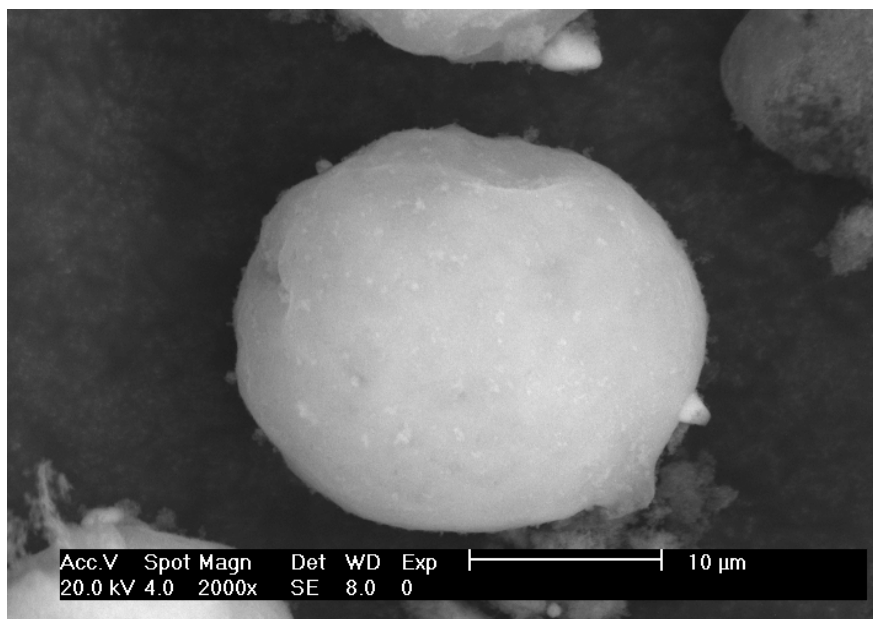
4.1.2 ลักษณะรูปร่างอนุภาคของพอลิเมอร์และพรีซิพิตชัน

เนื่องจากลักษณะรูปร่างของอนุภาคเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่กำหนดความสามารถในการเสริมแรง ดังนั้นลักษณะรูปร่างอนุภาคของพอลิเมอร์และพรีซิพิตชันจึงถูกศึกษาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยภาพที่ 4.4 และ 4.5 แสดงลักษณะรูปร่างอนุภาคของพอลิเมอร์และพรีซิพิตชัน ตามลำดับ พบว่า อนุภาคของพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมและพื้นผิวมีความขรุขระซึ่งจะส่งผลทำให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่าง

พอลิเมอร์สโตนกับยางดีซีขึ้น ขณะที่อนุภาคของพรีซิพิตีเทชันซิลิกาที่มีลักษณะค่อนข้างกลม ซึ่งสาเหตุที่ทำให้อนุภาคทั้งมีลักษณะต่างกันทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์สโตนเป็นซิลิกาที่ได้จากธรรมชาติโดยตรง ซึ่งกระบวนการต่างๆ ก่อนนำมาใช้เป็นกระบวนการเชิงกล เช่น การบดเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่พรีซิพิตีเทชันซิลิกาได้มาจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนไฮเดียมซิลิกเกตในกรดเข้มข้น จึงทำให้ลักษณะของอนุภาคที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม



ภาพที่ 4.4 ลักษณะรูปร่างอนุภาคของพอลิเมอร์สโตนที่ได้จากเครื่อง SEM



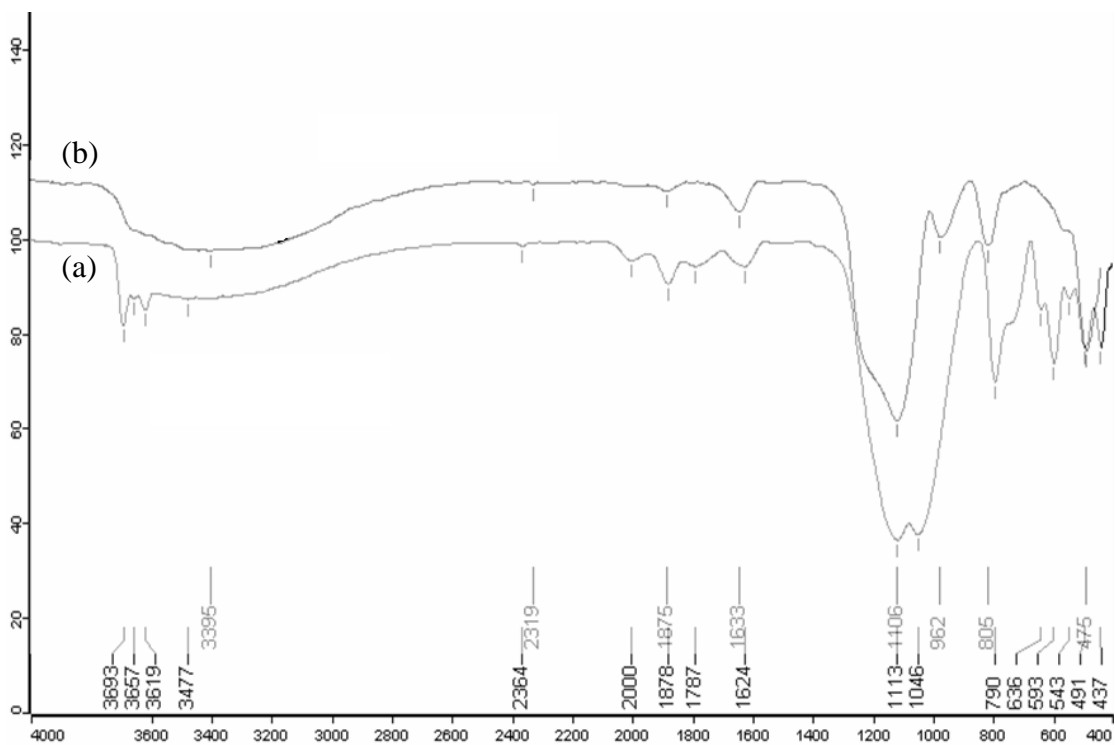
ภาพที่ 4.5 ลักษณะรูปร่างอนุภาคของพรีซิพิตีเทชันซิลิกาที่ได้จากเครื่อง SEM

4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์โพรพิลีนและพีซีพีเทตซิลิกา

FT-IR สเปกตรัมของพอลิเมอร์โพรพิลีนและพีซีพีเทตซิลิกาแสดงไว้ในภาพที่ 4.6

โดย

ปรากฏพีคที่สำคัญของพีซีพีเทตซิลิกา คือ พีคที่เลขคลื่น (wave number) 1100 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคแสดงลักษณะเฉพาะของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ส่วนพีคที่เลขคลื่น 795 และ 475 cm^{-1} เป็นลักษณะเฉพาะของซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) และสุดท้าย คือ พีคที่อยู่ในช่วง $3200\text{--}3750\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นลักษณะของหมู่ซิลานอล (silanol group) ที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ [10] สำหรับ FT-IR สเปกตรัมของพอลิเมอร์โพรพิลีนมีลักษณะคล้ายกับของพีซีพีเทตซิลิกา ยกเว้นพีคในช่วงเลขคลื่น $3200\text{--}3750\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งมีความกว้างของพีคน้อยกว่าของพีซีพีเทตซิลิกา แสดงว่าที่ผิวของพอลิเมอร์โพรพิลีนมีความหนาแน่นของหมู่ซิลานอลล้นน้อยกว่า ดังนั้น ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจน จึงน้อยกว่าของพีซีพีเทตซิลิกา [11]



ภาพที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของ (a) พอลิเมอร์โพรพิลีน และ (b) พีซีพีเทตซิลิกา

4.2 สมบัติการคงรูปของสารประกอบยาง

การคงรูปของสารประกอบยางสามารถหาได้จากเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) จากกราฟที่ได้สามารถสรุปเวลาก่อนการบ่ม (t_{s2}) เวลาในการขึ้นรูปสำหรับการคงรูป 90% และ

100% (t_{c90} และ t_{c100}) ค่ามอดุลัสต่ำสุดและสูงสุดของยางระหว่างการคงรูป (ML และ MH) ไว้ในตารางที่ 4.1

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เวลาก่อนการบ่ม (t_{s2}) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมสารเติมแต่งซิลิกา จากพอตเทอริสโตนและพรีซีพีเทตซิลิกา และลดลงอีกเล็กน้อยเมื่อเติมสารคู่ควบ Si-69 ลงไป สำหรับเวลาในการคงรูปของยางทั้งที่ 90% และ 100% สูตรที่เติมพอตเทอริสโตนนั้นไม่แตกต่างจากยางที่ไม่ใส่สารเติมแต่งมากนัก ทั้งที่ใส่หรือไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69 แต่เวลาในการคงรูปของยางที่เติมพรีซีพีเทตซิลิกาและใส่สารคู่ควบร่วมกับพรีซีพีเทตซิลิกานั้นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากพรีซีพีเทตซิลิกามีหมู่ซิลานอลที่ผิวมากกว่าพอตเทอริสโตนมาก จึงทำให้ว่องไวต่อสารเคมี ดังนั้นหมู่ซิลานอลของพรีซีพีเทตซิลิกาจะทำปฏิกิริยากับไอออนของสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ (Zn^{+2} จาก ZnO) จึงทำให้เวลาในการคงรูปเพิ่มขึ้นมาก แต่เมื่อเติมสารคู่ควบซิลเลนในสูตรยางที่เติมพรีซีพีเทตซิลิกา เวลาในการคงรูปของยางลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ซิลานอลส่วนหนึ่ง ทำให้การดูดซึมสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ลดลง ส่งผลให้เวลาในการคงรูปลดลง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า t_{s2} , t_{c90} , t_{c100} , ML และ MH ของยางสูตรต่างๆ

สูตรสารประกอบยาง	t_{s2}	t_{c90}	t_{c100}	ML (lb-in)	MH (lb-in)
สูตรที่ 1.3 (Gum3)	3.06	5.01	5.39	3.35	22.23
สูตรที่ 2.1 (NR-PS1)	3.08	5.08	5.54	1.32	16.94
สูตรที่ 2.2 (NR-PS2)	2.48	4.44	5.30	1.52	18.56
สูตรที่ 2.3 (NR-PS3)	2.58	4.51	5.51	0.81	13.92
สูตรที่ 2.4 (NR-PS4)	2.31	3.57	4.57	3.52	29.00
สูตรที่ 2.5 (NR-PS5)	2.52	4.3	5.36	3.82	29.87
สูตรที่ 3 (NR-Silica)	2.00	7.26	17.33	4.79	14.25
สูตรที่ 4.1 (NR-PS1-CG)	2.31	4.10	6.55	3.29	22.06
สูตรที่ 4.2 (NR-PS2-CG)	2.44	4.17	6.00	2.45	16.24
สูตรที่ 4.3 (NR-PS3-CG)	2.28	4.01	6.24	2.99	19.77
สูตรที่ 4.4 (NR-PS4-CG)	2.36	4.17	6.06	3.05	21.05
สูตรที่ 4.5 (NR-PS5-CG)	2.30	4.13	5.36	4.18	24.95
สูตรที่ 5 (NR-Silica-CG)	1.82	6.33	9.37	3.94	27.57

4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน

4.3.1 ดัชนีการบวมตัว

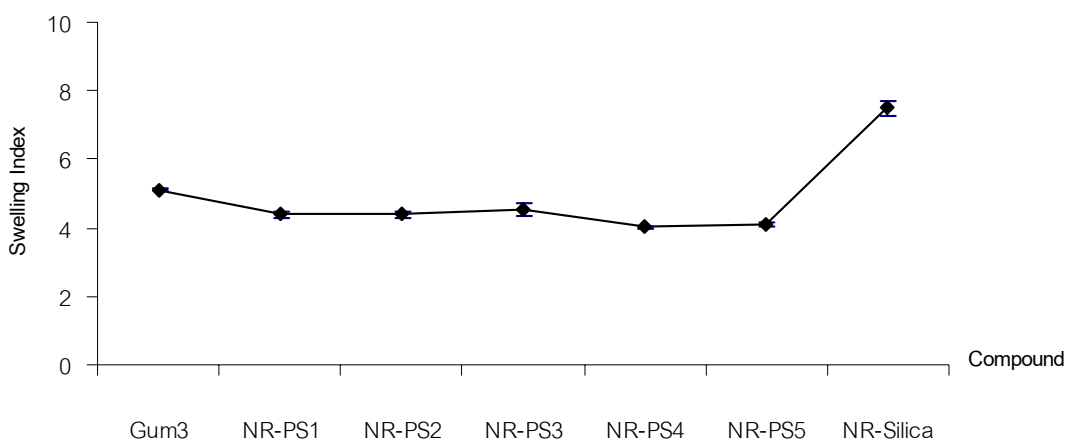
เนื่องจากค่าการบวมตัวของยางในโทลูอีนสามารถบอกถึงปริมาณการเชื่อมขวาง (crosslink density) ได้ โดยถ้าค่าการบวมตัวในโทลูอีนสูง แสดงว่ามีปริมาณการเชื่อมขวางต่ำ และถ้าค่าการบวมตัวในโทลูอีนต่ำ แสดงว่ามีปริมาณการเชื่อมขวางสูง ค่าดัชนีการบวมตัวของสูตรยางทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าดัชนีการบวมตัวของสารประกอบยาง

สูตรสารประกอบยาง	ดัชนีการบวมตัว	
	ค่าเฉลี่ย	SD
สูตรที่ 1.3 (Gum3)	5.11	0.04
สูตรที่ 2.1 (NR-PS1)	4.38	0.07
สูตรที่ 2.2 (NR-PS2)	4.38	0.07
สูตรที่ 2.3 (NR-PS3)	4.55	0.2
สูตรที่ 2.4 (NR-PS4)	4.02	0.04
สูตรที่ 2.5 (NR-PS5)	4.12	0.07
สูตรที่ 3 (NR-Silica)	7.5	0.23
สูตรที่ 4.1 (NR-PS1-CG)	4.23	0.07
สูตรที่ 4.2 (NR-PS2-CG)	4.06	0.05
สูตรที่ 4.3 (NR-PS3-CG)	4.02	0.18
สูตรที่ 4.4 (NR-PS4-CG)	3.95	0.03
สูตรที่ 4.5 (NR-PS5-CG)	4.19	0.14
สูตรที่ 5 (NR-Silica-CG)	5.83	0.33

ภาพที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีการบวมตัวของยางที่ไม่ใส่สารตัวเติมกับยางที่เติมพอดเทอริสโตนที่มีขนาดต่างๆ กัน และกับยางที่เติมพรีซิพิเตชันซิลิกาในปริมาณที่เท่ากัน โดยปกติแล้วเมื่อมีการเติมสารตัวเติมลงในยาง ดัชนีการบวมตัวของยางมีค่าลดลง ซึ่งจากภาพที่ 4.7 พบว่าเมื่อเติมพอดเทอริสโตน 30 phr ค่าดัชนีการบวมตัวของยางคงรูปลดลง เนื่องจากปริมาณเนื้อยางซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการบวมตัวถูกแทนที่ด้วยสารตัวเติมซึ่งไม่มีการบวมตัว ดังนั้น การ

คำนวณจะได้ค่าดัชนีการบวมตัวลดลง ขณะที่ยางคงภาพที่เติมพรีซีพิตเทซิลิกา 30 phr มีดัชนีการบวมตัวสูงขึ้น และมีค่าดัชนีการบวมตัวมากที่สุด ซึ่งผลที่ได้ทำให้สรุปได้ว่า สุตระยางที่มีการเติมพรีซีพิตเทซิลิกามีปริมาณการเชื่อมขวางต่ำกว่าสุตระยางที่เติมพอดเทอริสโตน ซึ่งปริมาณการเชื่อมขวางเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมสมบัติทางกายของยางคงรูป ส่วนสาเหตุที่การเชื่อมขวางของยางที่เติมพรีซีพิตเทซิลิกามีค่าน้อยกว่ายางที่เติมพอดเทอริสโตนเนื่องจากหมู่ซิลานอลที่มีอยู่มากบนผิวของพรีซีพิตเทซิลิกาได้ดูดซับไอออนของสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ (Zn^{+2} ที่เกิดจาก ZnO) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน การดูดซับดังกล่าวทำให้สารกระตุ้นวัลคาไนซ์มีปริมาณลดลง ซึ่งส่งผลทำให้ยางมีการเชื่อมขวางลดลง การเติมสารคู่ควบ Si-69 จะลดการดูดซับสารกระตุ้นวัลคาไนซ์บนผิวของพรีซีพิตเทซิลิกาทำให้การเชื่อมขวางมากขึ้นโดยเห็นได้จากค่าดัชนีการบวมตัวที่ลดลง



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าดัชนีการบวมตัวของยางที่เติมพอดเทอริสโตนขนาดต่างๆ กัน และพรีซีพิตเทซิลิกาในปริมาณที่เท่ากัน

4.3.2 ความต้านแรงดึง

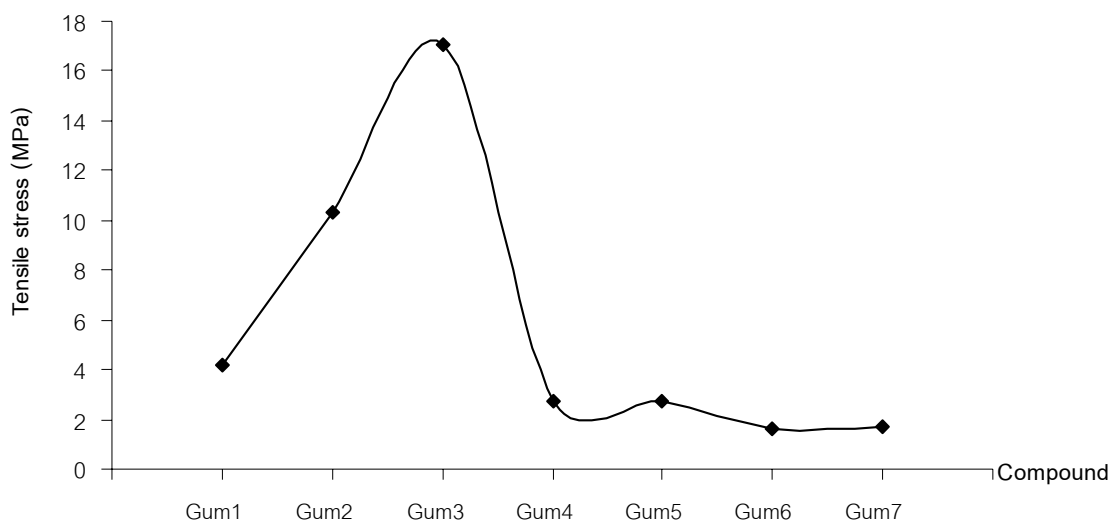
1. ผลของปริมาณการเชื่อมขวางต่อความต้านแรงดึงของยางที่ไม่ใส่สารตัวเติม

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าปริมาณการเชื่อมขวางเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเริ่มจากการหาปริมาณสารคงภาพที่ให้ปริมาณการเชื่อมขวางที่เหมาะสมก่อน โดยตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.8 แสดงค่าความต้านแรงดึงของยางคงภาพที่ไม่ใส่สารตัวเติมใดๆ (พอดเทอริสโตนและพรีซีพิตเทซิลิกา) แต่มีปริมาณการเชื่อม

ขวางต่างๆ กันไป โดยปริมาณการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นจากสูตร 1.1 (Gum1) เป็นลำดับจนกระทั่ง ปริมาณการเชื่อมขวางสูงสุดที่สูตร 1.7 (Gum7)

ตารางที่ 4.3 ความต้านแรงดึงของยางคงภาพที่ไม่ใส่สารตัวเติม

สูตร สารประกอบยาง	ความต้านแรงดึง (MPa)	
	ค่าเฉลี่ย	SD
สูตรที่ 1.1 (Gum1)	4.2	1.16
สูตรที่ 1.2 (Gum2)	10.4	1.10
สูตรที่ 1.3 (Gum3)	17.1	1.21
สูตรที่ 1.4 (Gum4)	2.8	0.49
สูตรที่ 1.5 (Gum5)	2.8	0.96
สูตรที่ 1.6 (Gum6)	1.7	0.25
สูตรที่ 1.7 (Gum7)	1.7	0.28



ภาพที่ 4.8 ความต้านแรงดึงของยางที่ไม่ใส่สารตัวเติม

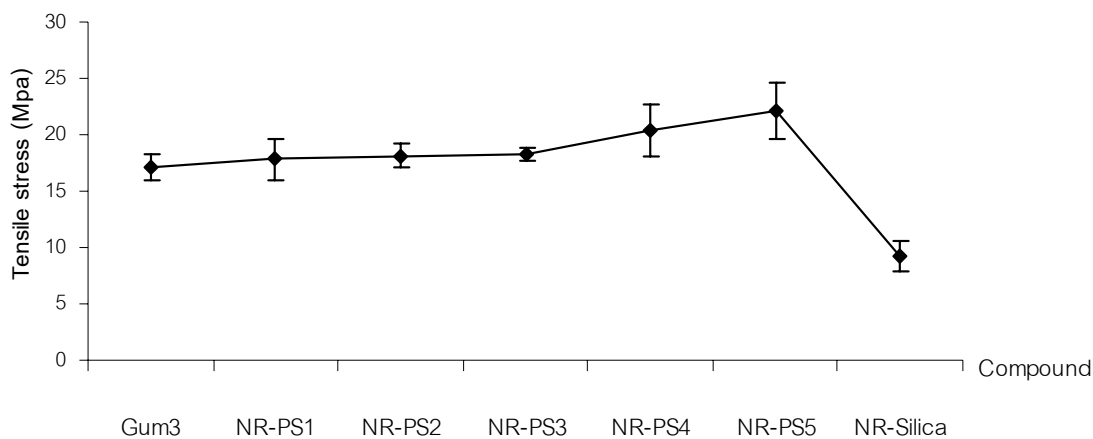
จากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่ายางสูตรที่ 1.3 (Gum3) ให้ปริมาณการเชื่อมขวางเหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นสูตรยางที่ให้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด ซึ่งหลังจากนี้ได้ใช้ยางสูตรนี้ในการศึกษาขั้นต่อไป โดยยางสูตรที่ 1.3 (Gum3) มีการใช้กำมะถัน 1.39 phr และสารเร่งวัลคาไนซ์ (CBS) 0.9 phr

2. ผลของการเติมพอดเทอริสโตนและพรีซิพิเตชันซิลิกาต่อความต้านแรงดึงของยาง

พอดเทอริสโตนที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 5 กลุ่ม ตามขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค โดย 3 กลุ่มแรก เป็นพอดเทอริสโตนที่คัดให้มีขนาดในช่วงต่างๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 (สูตร 2.1-2.3) ด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง ในขณะที่กลุ่ม 4 เป็นพอดเทอริสโตนที่คัดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $106 \mu\text{m}$ ทิ้งไปเท่านั้น ดังนั้น พอดเทอริสโตนกลุ่มนี้จะมีลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคที่กว้างมาก คล้ายกับการนำพอดเทอริสโตนกลุ่ม 1-3 มารวมเข้าด้วยกัน สำหรับกลุ่มสุดท้ายเป็นพอดเทอริสโตนที่ผ่านการบดละเอียดด้วยเครื่อง Planetary Mill ซึ่งเมื่อนำพอดเทอริสโตนที่บดแล้วไปผ่านตะแกรงร่อน พบว่าพอดเทอริสโตนสามารถผ่านตะแกรงร่อนที่มีขนาด 325 เมช ได้ทั้งหมด โดยเทียบเป็นพอดเทอริสโตนที่มีขนาดเล็กกว่า $45 \mu\text{m}$ ซึ่งผลของความต้านแรงดึงของยางคงภาพที่เติมพอดเทอริสโตนขนาดต่างๆ กัน และที่เติมพรีซิพิเตชันซิลิกาแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.9

ตารางที่ 4.4 ผลของการเติมพอดเทอริสโตนขนาดต่างๆ และพรีซิพิเตชันซิลิกาต่อความต้านแรงดึงของยางคงรูป

สูตรสารประกอบยาง	ขนาดอนุภาคของสารตัวเติม	ความต้านแรงดึง (MPa)	
		ค่าเฉลี่ย	SD
สูตรที่ 1.3 (Gum3)	-	17.1	1.21
สูตรที่ 2.1 (NR-PS1)	เล็กกว่า $45 \mu\text{m}$	17.8	1.81
สูตรที่ 2.2 (NR-PS2)	$45-62 \mu\text{m}$	18.2	1.12
สูตรที่ 2.3 (NR-PS3)	$63-106 \mu\text{m}$	18.4	0.58
สูตรที่ 2.4 (NR-PS4)	เล็กกว่า $106 \mu\text{m}$	20.4	2.36
สูตรที่ 2.5 (NR-PS5)	เล็กกว่า $45 \mu\text{m}$ (ผ่านการบด)	22.1	2.53
สูตรที่ 3 (NR-Silica)	-	9.2	1.28



ภาพที่ 4.9 ผลของการเติมพอดเทอริสโตนขนาดต่างๆ และพรีซีพีเทตซิลิกาต่อความต้านแรงดึงของยางคงรูป

จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.9 พบว่า ยางที่เติมพอดเทอริสโตนมีความต้านแรงดึงสูงกว่ายางที่ไม่ใส่สารตัวเติมใดๆ (Gum 3) สำหรับยางที่มีการเติมพอดเทอริสโตนกลุ่ม 1-4 (ที่ผ่านการคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน สูตร 2.1-2.4) พบว่า ค่าความต้านแรงดึงสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยและใกล้เคียงกันไม่ว่าจะเติมพอดเทอริสโตนที่มีขนาดอยู่ในช่วงใดก็ตาม ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากพอดเทอริสโตนแต่ละกลุ่มมีลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคในช่วงที่กว้างและขนาดของอนุภาคในแต่ละกลุ่มมีการเหลื่อมล้ำกันอยู่ ส่งผลให้ผลของขนาดอนุภาคของสารตัวเติมต่อความต้านทานต่อแรงดึงไม่ชัดเจนมากนัก อย่างไรก็ตาม ยางที่เติมพอดเทอริสโตนที่ผ่านการบดด้วยเครื่อง Planetary Mill มีความต้านแรงดึงสูงขึ้นถึงประมาณ 5 MPa เมื่อเทียบกับยางที่ไม่ใส่สารตัวเติมใดๆ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากอนุภาคของพอดเทอริสโตนที่ผ่านการบดมีขนาดลดลงอย่างมากและลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงที่แคบขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพอดเทอริสโตน (filler) กับเนื้อยาง (matrix) มีมากขึ้น ทำให้มีความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

สำหรับสูตรยางที่เติมพรีซีพีเทตซิลิกา พบว่า ยางที่ได้มีค่าความต้านแรงดึงต่ำกว่ายางที่ไม่ใส่สารตัวเติมใดๆ ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากจำนวนการเชื่อมขวางที่ต่ำกว่าดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.5.1 นอกจากนี้ ยังอาจมีสาเหตุมาจากการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนของพรีซีพีเทตซิลิกาด้วยพันธะไฮโดรเจนผ่านหมู่ซิลานอลที่มีอยู่เป็นจำนวนมากบนผิว ทำให้ความสามารถในการกระจายตัวของพรีซีพีเทตซิลิกาลดลง

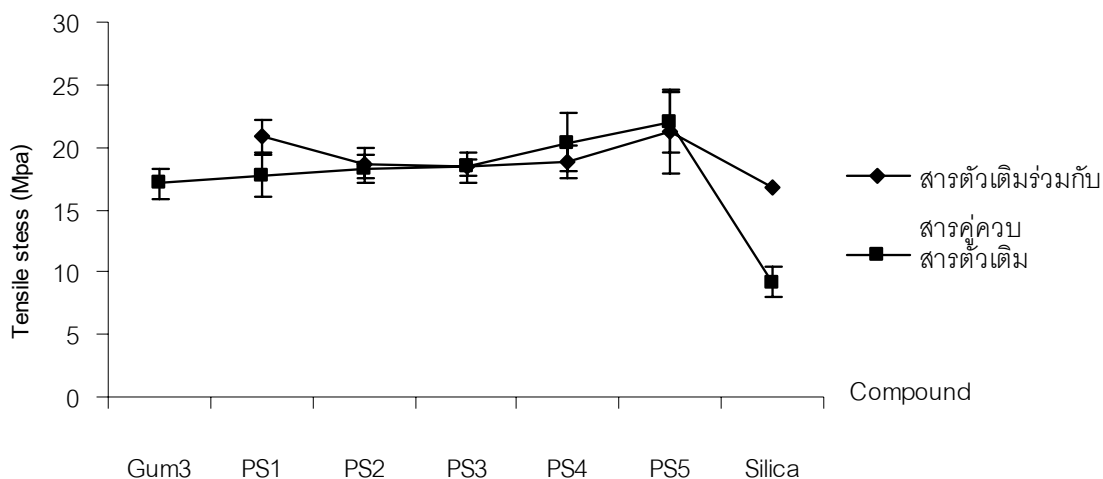
และเมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงระหว่างสูตรยางที่เติมพรีซีพีเทตซิลิกา กับสูตรยางที่เติมพอดเทอริสโตนพบว่ายางที่เติมพอดเทอริสโตนจะให้ค่าความต้านแรงดึงที่สูงกว่ายางสูตรที่เติมพรีซีพีเทตซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจากพอดเทอริสโตนมีรูปร่างลักษณะและขนาดที่แตกต่างกัน รวมทั้งบริเวณพื้นผิวของพอดเทอริสโตนมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ ส่งผลทำให้ความสามารถในการยึดเกาะกับยางดีกว่าสารตัวเติมจากพรีซีพีเทตซิลิกา และนอกจากนี้การที่พอดเทอริสโตนมีปริมาณหมู่ซิลินอลที่น้อยกว่า (จาก FT-IR สเปกตรัม) จึงทำให้มีความเป็นขั้วน้อยกว่าพรีซีพีเทตซิลิกา ดังนั้นพอดเทอริสโตนจึงเข้ากันได้กับยางธรรมชาติซึ่งไม่มีขั้วดีกว่าพรีซีพีเทตซิลิกา ส่งผลทำให้ยางที่เติมด้วยพอดเทอริสโตนมีความต้านแรงดึงสูงกว่ายางที่เติมด้วยพรีซีพีเทตซิลิกาอย่างเห็นได้ชัด

3. ผลการเติมสารคู่ควบ Si-69 ต่อความต้านแรงดึงของยางคงรูป

เพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม สารคู่ควบซิลิโคนถูกเติมลงในยางคอมพาวด์ โดยผลของการเติมสารคู่ควบ Si-69 ร่วมกับสารตัวเติม (พอดเทอริสโตนและพรีซีพีเทตซิลิกา) ต่อความต้านแรงดึงของยางคงรูปแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบความต้านแรงดึงระหว่างกลุ่มที่ใส่และไม่ใส่สาร คู่ควบ Si-69

ตารางที่ 4.5 ผลการเติมสารคู่ควบ Si-69 ร่วมกับสารตัวเติมต่อความต้านแรงดึงของยางคงรูป

สูตรสารประกอบยาง	ความต้านแรงดึง (MPa)	
	ค่าเฉลี่ย	SD
สูตรที่ 4.1 (NR-PS1-CG)	20.8	0.93
สูตรที่ 4.2 (NR-PS2-CG)	18.7	1.45
สูตรที่ 4.3 (NR-PS3-CG)	18.4	1.13
สูตรที่ 4.4 (NR-PS4-CG)	18.9	1.23
สูตรที่ 4.5 (NR-PS5-CG)	21.2	1.34
สูตรที่ 5 (NR-Silica-CG)	16.8	3.21



ภาพที่ 4.10 ความต้านแรงดึงของยางคงภาพที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69

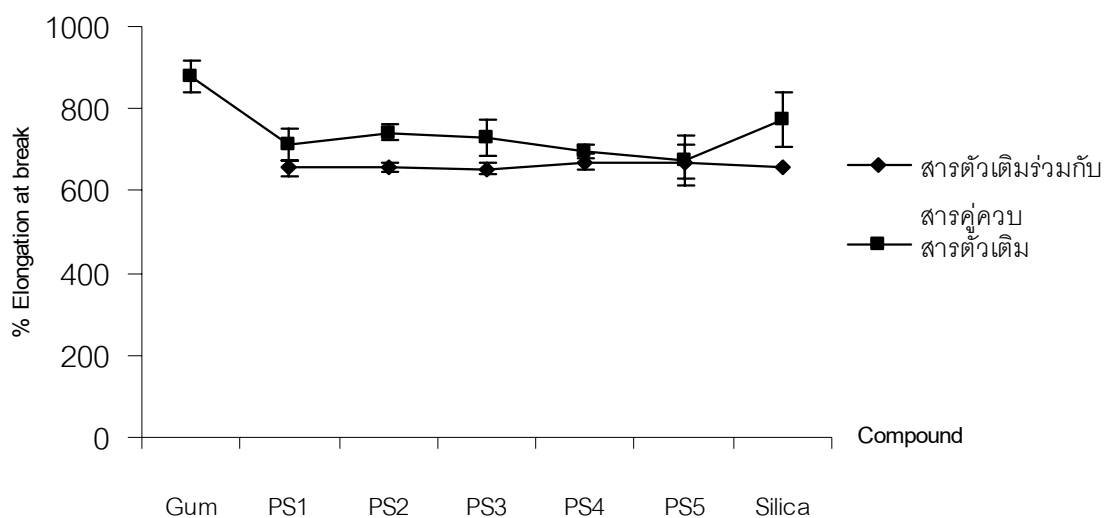
จากภาพที่ 4.10 พบว่า เมื่อเติมสารคู่ควบ Si-69 ในสารประกอบยางที่เติมพอตเทอริสโตนขนาดต่างๆ ค่าความต้านแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับที่ไม่ใส่สารคู่ควบ ทั้งนี้อาจเนื่องจากจำนวนหมู่ซิลานอลที่ผิวของพอตเทอริสโตนซึ่งเป็นหมู่ที่ทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบซิลอนมีปริมาณน้อย (จาก FT-IR สเปกตรัม) ในทางตรงกันข้าม พบว่า กรณีของสารประกอบยางที่ได้เติมพรีซิพิเตชันซิลิกา มีค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ใส่สารคู่ควบ ซึ่งนอกจากสารคู่ควบซิลอนได้เพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับพรีซิพิเตชันซิลิกาแล้ว ยังทำให้พรีซิพิเตชันซิลิกากระจายตัวในเนื้อยางได้ดีขึ้นและเพิ่มจำนวนการเชื่อมขวางอีกด้วย

4.3.3 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Percent elongation at break)

เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางคงรูปแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาด ระหว่างกลุ่มที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางคงรูปสูตรต่างๆ

สูตรสารประกอบยาง	การยืดออก ณ จุดขาด (เปอร์เซ็นต์)	
	ค่าเฉลี่ย	SD
สูตรที่ 1.3 (Gum3)	879	60.80
สูตรที่ 2.1 (NR-PS1)	713	38.76
สูตรที่ 2.2 (NR-PS2)	741	19.54
สูตรที่ 2.3 (NR-PS3)	729	42.66
สูตรที่ 2.4 (NR-PS4)	696	16.34
สูตรที่ 2.5 (NR-PS5)	674	60.8
สูตรที่ 3 (NR-Silica)	772	66.12
สูตร ที่4.1 (NR-PS1-CG)	656	9.17
สูตรที่ 4.2 (NR-PS2-CG)	657	18.45
สูตรที่ 4.3 (NR-PS3-CG)	654	10.13
สูตรที่ 4.4 (NR-PS4-CG)	670	14.12
สูตรที่ 4.5 (NR-PS5-CG)	671	21.24
สูตรที่ 5 (NR-Silica-CG)	657	44.11



ภาพที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางคงสภาพที่ได้และไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69

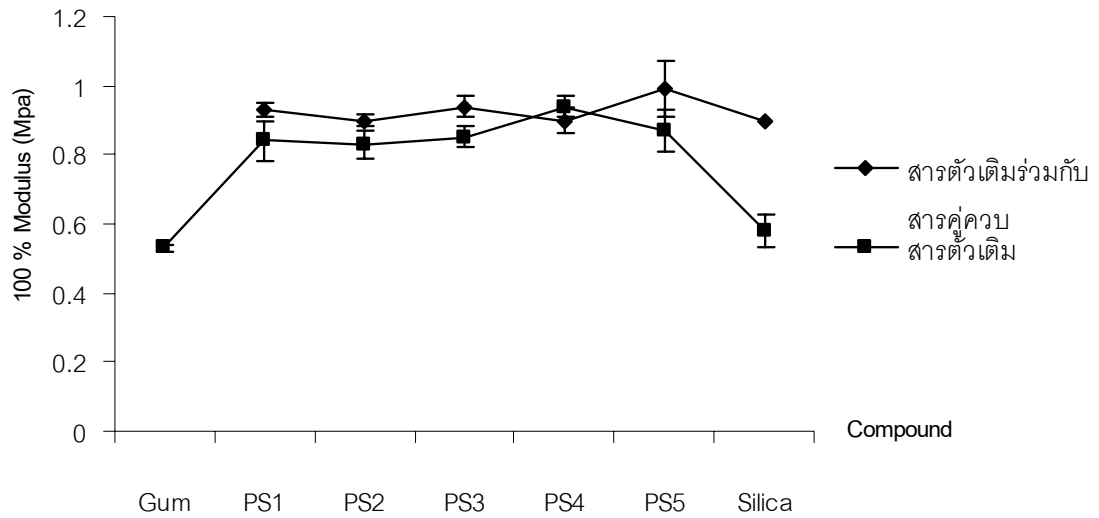
จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.11 พบว่าเมื่อเติมพอดเทอริสโตนหรือพีซีพีเทตซิลิกาลงในสูตรยาง ความสามารถในการยึดตัว ณ จุดขาด จะลดลง เนื่องจากวัสดุยางเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง เมื่อเติมสารตัวเติมที่มีมอดุลัสสูงซึ่งไม่สามารถยึดตัวได้เหมือนยางลงไป มีผลทำให้ความสามารถในการยึดตัวของยางคงรูปลดลง อีกทั้งเมื่อมีการเติมสารคู่ควบซีเลนร่วมกับการใส่สารตัวเติมจะทำให้ความสามารถในการยึดตัว ณ จุดขาดลดลงอีก เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการเคลื่อนที่ของยางจะลดลง ซึ่งเห็นผลได้อย่างชัดเจนในกรณีของยางที่ใส่พีซีพีเทตซิลิกา

4.3.4 มอดุลัสของยางคงรูป

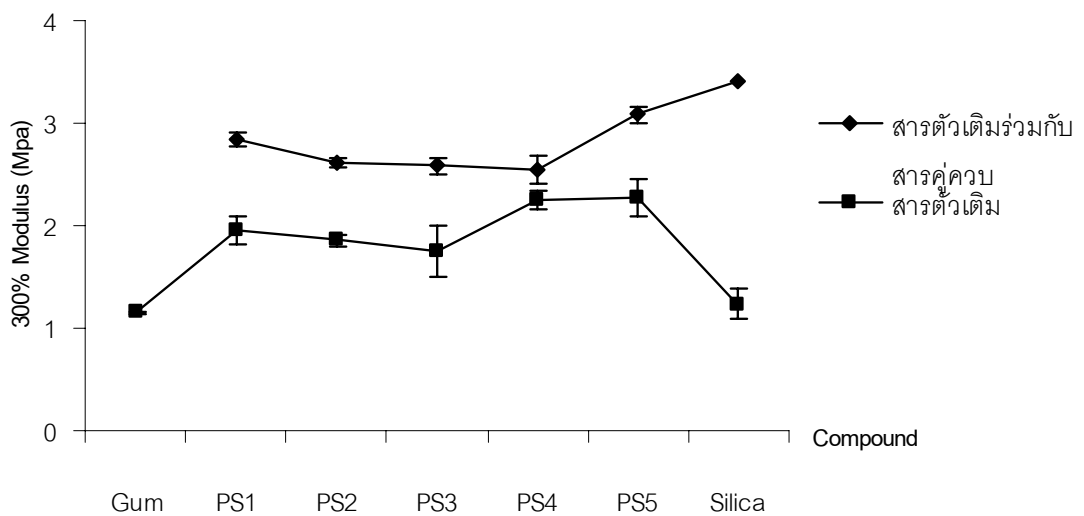
ความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือมอดุลัสที่ความเครียด 100% และ 300% แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 โดยภาพที่ 4.12 และ 4.13 แสดงมอดุลัสที่ความเครียด 100% และ 300% ตามลำดับ เปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69

ตารางที่ 4.7 มอดุลัสของยางคงภาพที่ความเครียด 100% และ 300%

สูตรสารประกอบยาง	มอดุลัส (MPa)			
	ที่ความเครียด 100%		ที่ความเครียด 300%	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
สูตรที่ 1.3 (Gum3)	0.53	0.01	1.15	0.02
สูตรที่ 2.1 (NR-PS1)	0.84	0.06	1.95	0.13
สูตรที่ 2.2 (NR-PS2)	0.83	0.04	1.86	0.06
สูตรที่ 2.3 (NR-PS3)	0.85	0.03	1.74	0.25
สูตรที่ 2.4 (NR-PS4)	0.94	0.03	2.24	0.09
สูตรที่ 2.5 (NR-PS5)	0.87	0.06	2.27	0.18
สูตรที่ 3 (NR-Silica)	0.58	0.05	1.23	0.15
สูตรที่ 4.1 (NR-PS1-CG)	0.93	0.02	2.85	0.07
สูตรที่ 4.2 (NR-PS2-CG)	0.90	0.02	2.61	0.07
สูตรที่ 4.3 (NR-PS3-CG)	0.94	0.02	2.58	0.04
สูตรที่ 4.4 (NR-PS4-CG)	0.90	0.03	2.55	0.07
สูตรที่ 4.5 (NR-PS5-CG)	0.99	0.04	3.08	0.14
สูตรที่ 5 (NR-Silica-CG)	0.90	0.18	3.42	0.99



ภาพที่ 4.12 มอดุลัสที่ความเครียด 100% ของยางคงภาพที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69



ภาพที่ 4.13 มอดุลัสที่ความเครียด 300% ของยางคงภาพที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69

จากตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.12-4.13 พบว่า ค่ามอดุลัสของยางคงรูปมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่พอตเทอริสโตน โดยผลของขนาดพอตเทอริสโตนต่อค่ามอดุลัสไม่ชัดเจน และยางคงภาพที่ได้ใส่พอตเทอริสโตนขนาดต่างๆ กันมีค่ามอดุลัสใกล้เคียงกัน แต่ที่ใส่พอตเทอริสโตนขนาดละเอียดมีแนวโน้มที่มีมอดุลัสสูงกว่าเล็กน้อย สำหรับยางที่เติมพรีซีพิเทตซิลิกาในปริมาณเท่ากับ

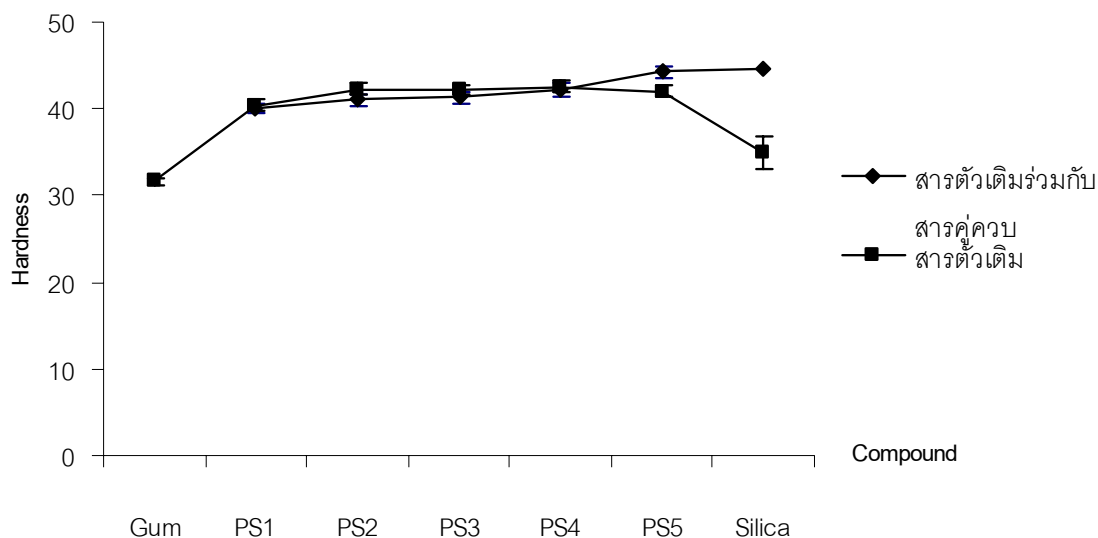
พอดเทอริสโตน พบว่าค่ามอดุลัสใกล้เคียงกับยางที่ไม่ใส่สารตัวเติมใดๆ ทั้งนี้เนื่องจากมีจำนวนการเชื่อมขวางที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อได้ใส่สารคู่ควบ Si-69 ในสารประกอบยาง พบว่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ได้ใส่สารคู่ควบ ทั้งนี้เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยาก

4.3.5 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งของยางคงรูปสูตรต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งของยางคงภาพที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69

ตารางที่ 4.8 ความแข็งของยางคงรูป

สูตรสารประกอบยาง	ความแข็ง (Shore A)	
	ค่าเฉลี่ย	SD
สูตรที่ 1.3 (Gum3)	32	0.37
สูตรที่ 2.1 (NR-PS1)	40	0.66
สูตรที่ 2.2 (NR-PS2)	42	0.67
สูตรที่ 2.3 (NR-PS3)	42	0.59
สูตรที่ 2.4 (NR-PS4)	42	0.65
สูตรที่ 2.5 (NR-PS5)	42	0.61
สูตรที่ 3 (NR-Silica)	35	1.95
สูตรที่ 4.1 (NR-PS1-CG)	40	0.60
สูตรที่ 4.2 (NR-PS2-CG)	41	0.58
สูตรที่ 4.3 (NR-PS3-CG)	41	0.64
สูตรที่ 4.4 (NR-PS4-CG)	42	0.62
สูตรที่ 4.5 (NR-PS5-CG)	44	0.69
สูตรที่ 5 (NR-Silica-CG)	44	0.64



ภาพที่ 4.14 ความแข็งของยางคงภาพที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69

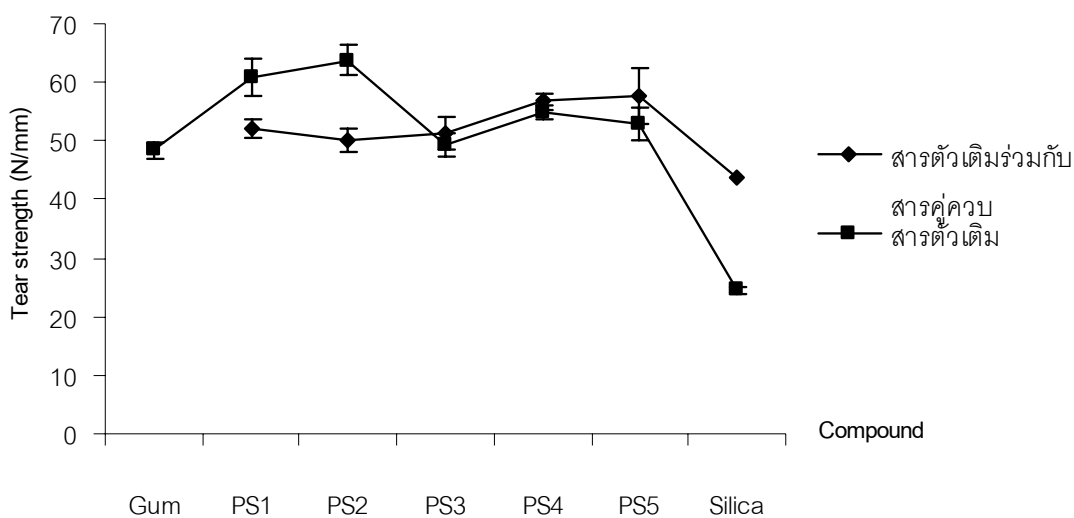
จากตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.14 พบว่า ความแข็งของยางคงภาพที่ใส่สารตัวเดิมไม่ว่าจะ เป็นพอตเทอริสโตนหรือพีวีซีเทตซิลิกามีค่าสูงกว่ายางที่ไม่ใส่สารตัวเดิม การเติมสารคู่ควบ Si-69 ไม่มีผลต่อความแข็งของยางที่ใส่พอตเทอริสโตน แต่ส่งผลให้ความแข็งของยางที่ใส่พีวีซีเทตซิลิกา เพิ่มขึ้นมาก ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนการเชื่อมขวางที่สูงขึ้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.3.6 ความต้านการฉีกขาด (Tear strength)

ความต้านการฉีกขาดของยางคงรูปแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.15 แสดง การเปรียบเทียบความต้านการฉีกขาดของยางคงภาพที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69

ตารางที่ 4.9 ความต้านการฉีกขาดของยางคงรูป

สูตรสารประกอบยาง	ความต้านการฉีกขาด (MPa)	
	ค่าเฉลี่ย	SD
สูตรที่ 1.3 (Gum3)	48	1.52
สูตรที่ 2.1 (NR-PS1)	61	3.20
สูตรที่ 2.2 (NR-PS2)	64	2.63
สูตรที่ 2.3 (NR-PS3)	49	2.04
สูตรที่ 2.4 (NR-PS4)	55	1.22
สูตรที่ 2.5 (NR-PS5)	53	2.74
สูตรที่ 3 (NR-Silica)	24	0.60
สูตรที่ 4.1 (NR-PS1-CG)	52	2.10
สูตรที่ 4.2 (NR-PS2-CG)	50	1.50
สูตรที่ 4.3 (NR-PS3-CG)	51	2.00
สูตรที่ 4.4 (NR-PS4-CG)	57	2.80
สูตรที่ 4.5 (NR-PS5-CG)	58	1.39
สูตรที่ 5 (NR-Silica-CG)	44	4.71



ภาพที่ 4.15 ความต้านการฉีกขาดของยางคงภาพที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69

1. ผลของขนาดของพอตเทอริสโตนต่อความต้านการฉีกขาด

จากตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.15 พบว่า ยางคงภาพที่ใส่พอตเทอริสโตนมีความต้านการฉีกขาดเพิ่มสูงขึ้นจากที่ไม่ได้ใส่พอตเทอริสโตน โดยพอตเทอริสโตนที่มีขนาดอนุภาคเล็ก [สูตรที่ 2.1 (NR-PS1) และ สูตรที่ 2 (NR-PS2)] ทำให้ยางคงรูปมีความต้านการฉีกขาดสูงกว่ายางสูตรที่ใส่พอตเทอริสโตนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ [สูตรที่ 2.2 (NR-PS2)] และสูตรที่ใส่พอตเทอริสโตนที่มีการกระจายขนาดอนุภาคที่กว้าง ทั้งนี้เนื่องจากพอตเทอริสโตนที่มีขนาดเล็กสามารถเกิดอันตรกิริยากับเนื้อยางได้ดีกว่า ในขณะที่สูตรที่ 2.5 (NR-PS5) ซึ่งใช้พอตเทอริสโตนที่ผ่านการบด ยางคงภาพที่ได้กลับมีความต้านการฉีกขาดลดลง สาเหตุอาจเนื่องจากอนุภาคที่เล็กมากๆ การกระจายตัวในเนื้อยางเป็นไปได้ยากขึ้น การกระจายตัวที่ไม่ดีส่งผลให้ความต้านการฉีกขาดของยางลดลง เมื่อเทียบกับสูตรที่ 2.1 (NR-PS1) และสูตรที่ 2.2 (NR-PS2) แต่ยังมีค่ามากกว่ายางที่ไม่ใส่สารตัวเติม

2. ผลของพรีซีพีเทตซิลิกาต่อความต้านการฉีกขาด

ยางคงภาพที่ใส่พรีซีพีเทตซิลิกามีความต้านการฉีกขาดต่ำกว่ายางสูตรที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและสูตรที่ใส่พอตเทอริสโตน ซึ่งมีสาเหตุมาจากจำนวนการเชื่อมขวางที่น้อยกว่าและการที่มีหมู่ ซิลานอลซึ่งมีขั้วอยู่จำนวนมาก ทำให้เข้ากันกับยางที่ไม่มีขั้วได้ยาก รวมทั้งมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของพรีซีพีเทตซิลิกาในเนื้อยางผ่านพันธะไฮโดรเจนของหมู่ซิลานอลบนผิวของพรีซีพีเทตซิลิกาอีกด้วย

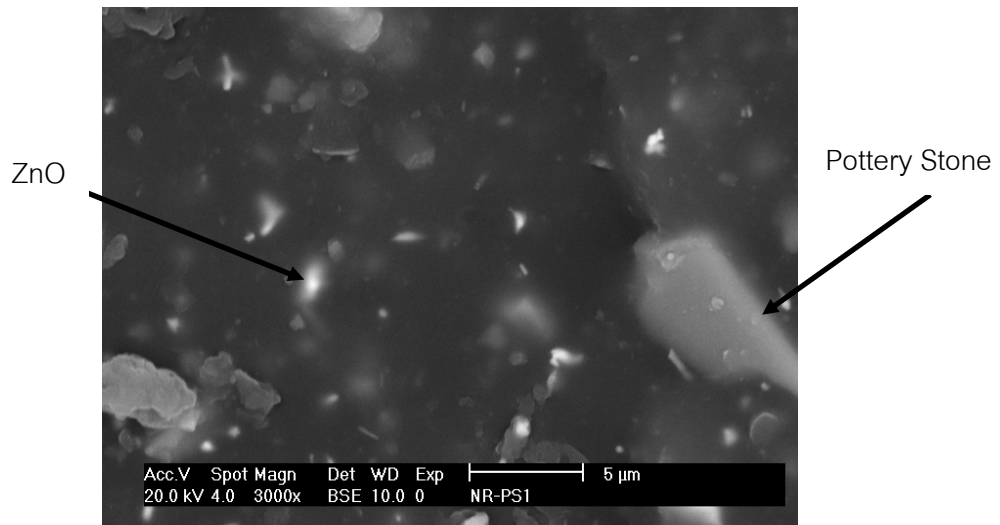
3. ผลการเติมสารคู่ควบ Si-69 ต่อความต้านการฉีกขาด

เมื่อใส่สารคู่ควบซิลิโคนร่วมกับพอตเทอริสโตนที่ผ่านการบด พบว่าความต้านการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากสารคู่ควบ Si-69 ช่วยให้การกระจายตัวของพอตเทอริสโตนในสารประกอบยางดีขึ้น ในขณะที่ยางที่เติมพอตเทอริสโตนสูตรที่ 2.1 (NR-PS1) และสูตรที่ 2.2 (NR-PS2) การเติมสารคู่ควบกับทำให้ความต้านการฉีกขาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด

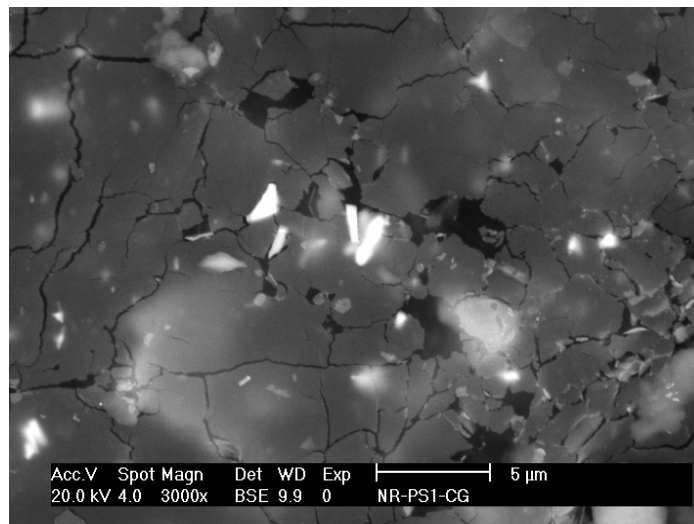
สำหรับสูตรยางที่ใส่พรีซีพีเทตซิลิกานั้น การเติมสารคู่ควบซิลิโคนลงไปช่วยให้อนุภาคของพรีซีพีเทตซิลิกากระจายตัวได้ดีขึ้น ลดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของพรีซีพีเทตซิลิกาและช่วยเพิ่มจำนวนการเชื่อมขวาง ทำให้ความต้านการฉีกขาดสูงขึ้น

4.4 ลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในเนื้อยาง

ลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในเนื้อยางสามารถศึกษาได้จากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยภาพที่ 4.16-4.21 แสดงสัณฐานวิทยาของยางคงภาพที่ใส่ฟอตเทอริ สโตนและพีซีพีเทตซิลิกาทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบ Si-6



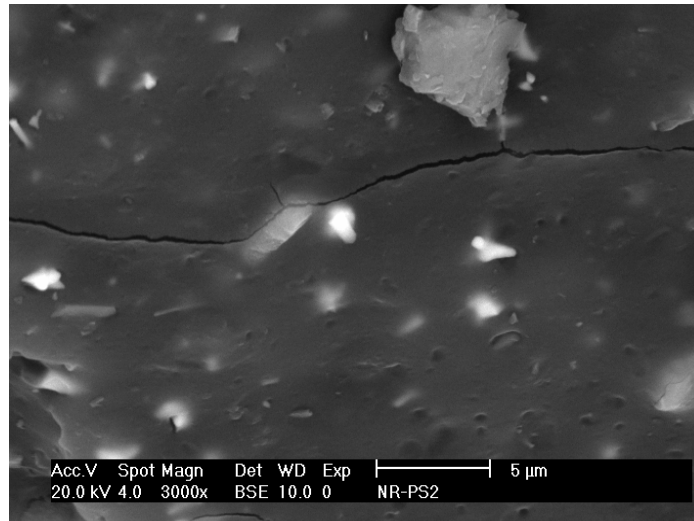
(a)



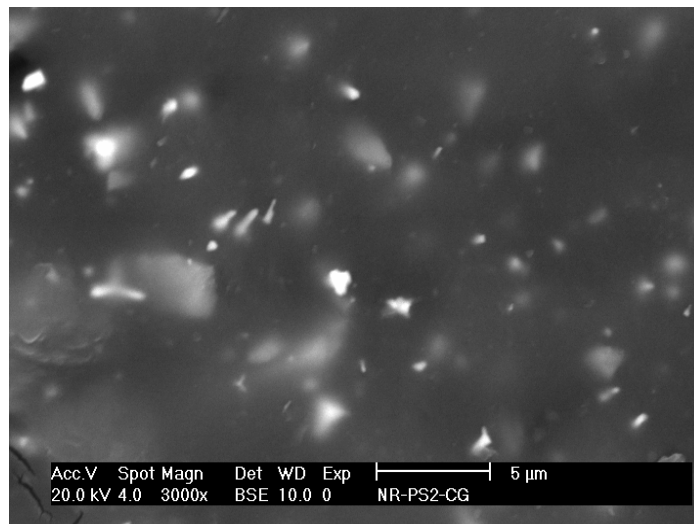
(b)

ภาพที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของยางคงภาพที่ใส่ฟอตเทอริสโตนที่มีขนาดเล็กกว่า $45 \mu\text{m}$ (NR-PS1) :

(a) ไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69 และ (b) ใส่สารคู่ควบ Si-69

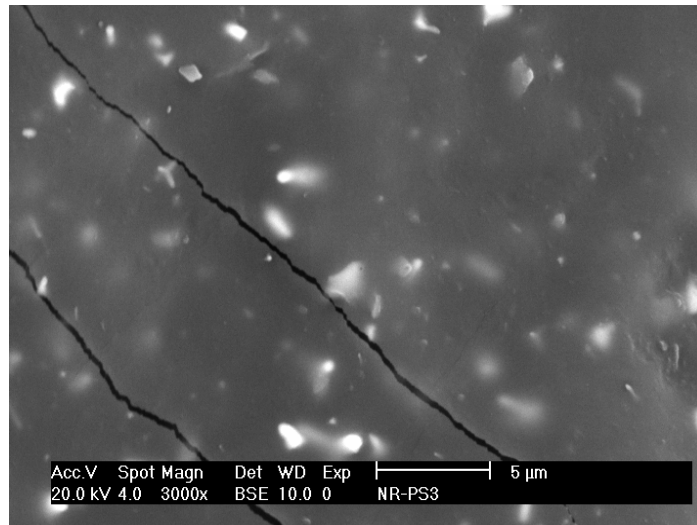


(a)

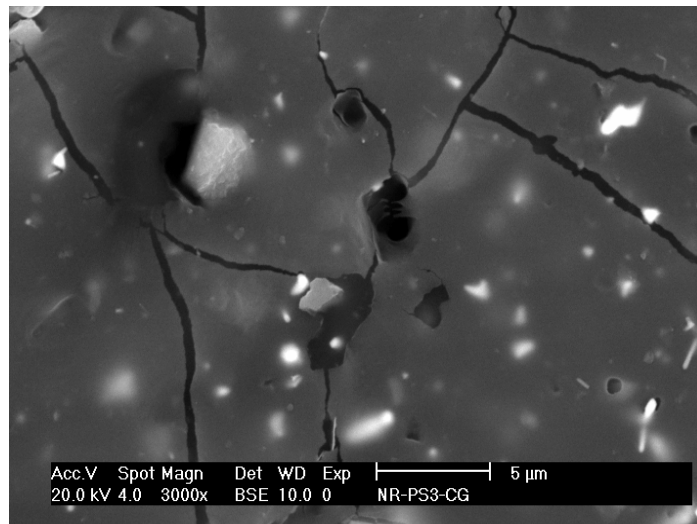


(b)

ภาพที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของยางคงภาพที่ใส่ฟอตเทอริสโตนที่มีขนาด 45-62 μm (NR-PS2) :
 (a) ไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69 และ (b) ใส่สารคู่ควบ Si-69



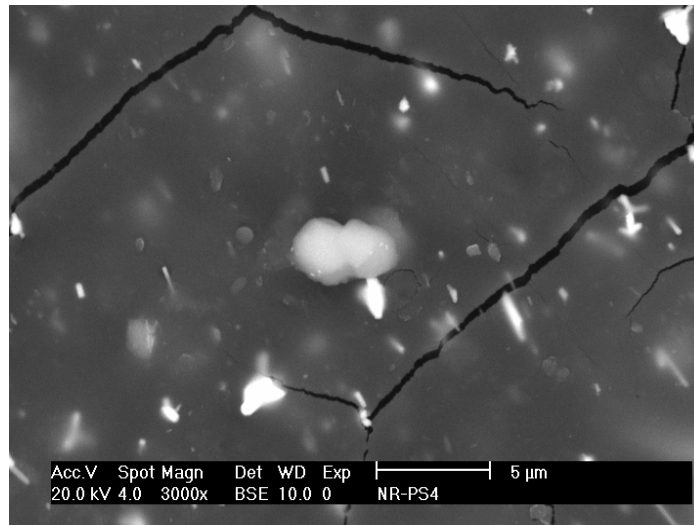
(a)



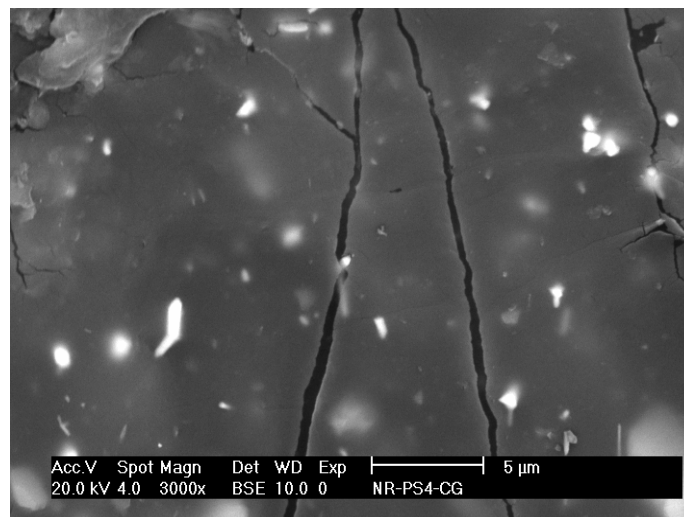
(b)

ภาพที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของยางคงภาพที่ใส่พอดเทอริสโตนที่มีขนาด 63-106 μm (NR-PS3) :

(a) ไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69 และ (b) ใส่สารคู่ควบ Si-69



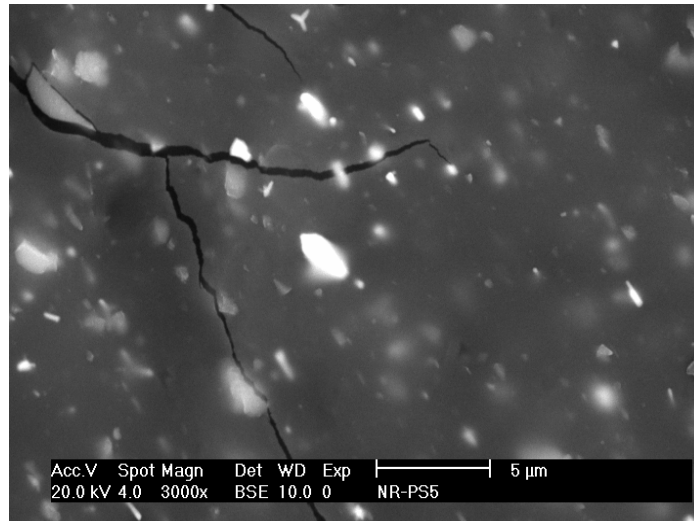
(a)



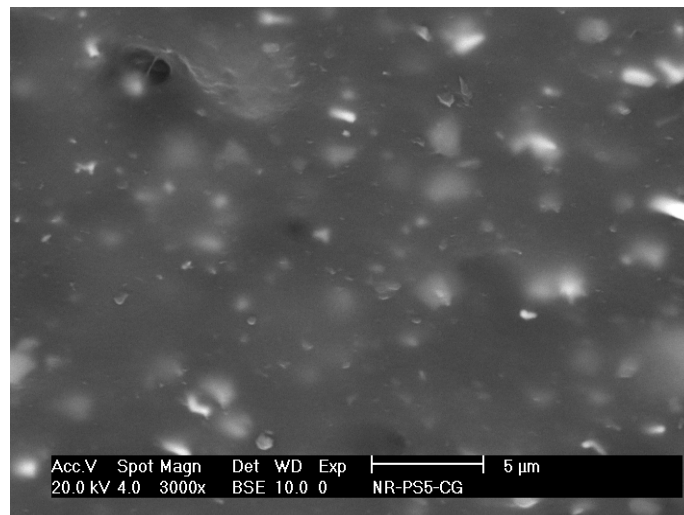
(b)

ภาพที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของยางคงภาพที่ใส่พอดเทอริสโตนที่มีขนาดเล็กกว่า $106 \mu\text{m}$ (NR-PS4) :

(a) ไม่ใส่สารควบ Si-69 และ (b) ใส่สารควบ Si-69



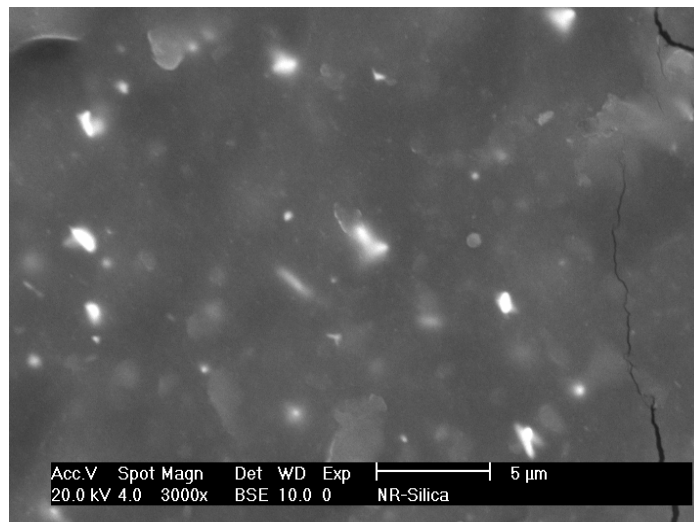
(a)



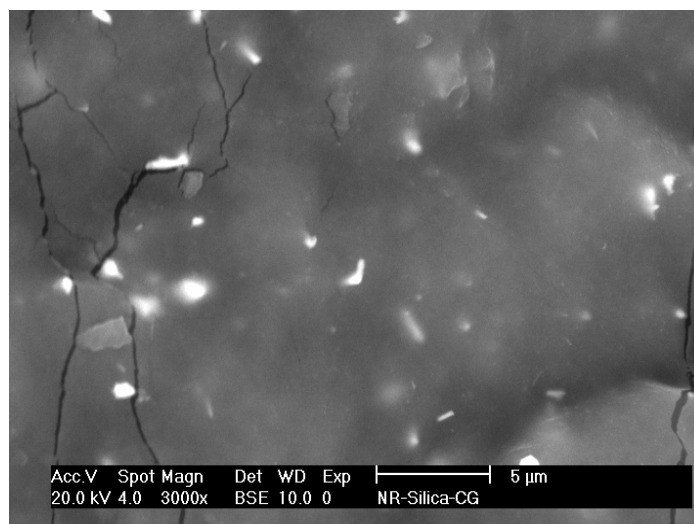
(b)

ภาพที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของยางคางภาพที่ใส่พอดเทอริสโตนที่ผ่านการบด (NR-PS5) :

(a) ไม่ใส่สารคู่ควบ Si-69 และ (b) ใส่สารคู่ควบ Si-69



(a)



(b)

ภาพที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของยางคงภาพที่ใส่พรีซิพิเตตซิลิกา (NR-silica) :

(a) ไม่ใส่สารควบแน่น Si-69 และ (b) ใส่สารควบแน่น Si-69

จากภาพที่ 4.16-4.21 แสดงให้เห็นว่า ยางสูตรที่มีการใส่สารควบแน่น Si-69 มีการกระจายตัวของพอดเทอริสโตนและพรีซิพิเตตซิลิกาในเมทริกซ์ของยางดีขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการวิจัยเกี่ยวกับการนำซิลิกาจากแหล่งธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ พอตเทอริสโตนมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ และศึกษาเปรียบเทียบกับพรีซิพิตเทซิลิกาซึ่งเป็นซิลิกาที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนซึ่งใช้ในทางการค้า รวมทั้งศึกษาผลของการใช้สารคู่ควบซีเลนร่วมกับสารเติมแต่งดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางธรรมชาติให้สามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมมีประสิทธิภาพ และมีต้นทุนการผลิตต่ำ ซึ่งผลจากการวิจัยสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. การเติมพอตเทอริสโตนทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบซีเลนในสารประกอบยางมีผลต่อเวลาการคงรูปยาง (cure time) ไม่มากนัก ในขณะที่การเติมพรีซิพิตเทซิลิกามีผลทำให้เวลาการคงรูปเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อใส่สารคู่ควบซีเลนร่วมด้วยมีผลทำให้เวลาการคงรูปลดลง

2. ยางคงภาพที่ได้จากการเติมพอตเทอริสโตนทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบซีเลนมีดัชนีการบวมตัว (swelling index) ต่ำกว่ายางคงภาพที่ไม่ใส่สารตัวเติม ในขณะที่การเติมพรีซิพิตเทซิลิกามีผลทำให้ดัชนีการบวมตัวสูงขึ้น และลดลงเมื่อใส่สารคู่ควบซีเลนแต่ยังสูงกว่าเมื่อใส่พอตเทอริสโตน

3. ยางคงภาพที่มีการเติมพอตเทอริสโตนมีความต้านแรงดึงสูงกว่าที่ไม่ได้ใส่สารตัวเติม และเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อใส่สารคู่ควบซีเลน ในขณะที่การใส่พรีซิพิตเทซิลิกามีผลทำให้ความแรงดึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากมีระดับการเชื่อมขวางที่ต่ำและการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของพรีซิพิตเทซิลิกา แต่การใส่สารคู่ควบซีเลนมีผลทำให้ความต้านแรงดึงสูงขึ้นได้มาก

4. เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางที่เติมพอตเทอริสโตนและพรีซิพิตเทซิลิกาทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบมีค่าลดลง แต่มีค่าไม่ต่ำมากนัก คือ อยู่ในช่วงประมาณ 655-770% เมื่อเทียบกับที่ไม่ใส่สารตัวเติม ซึ่งมีค่าประมาณ 880%

5. ความแข็งของชิ้นงานที่ใส่พอตเทอริสโตนและพรีซิพิตเทซิลิกามีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง และการใส่สารคู่ควบซีเลนร่วมกับพอตเทอริสโตนมีผลต่อความแข็งของชิ้นงานไม่มากนัก ในขณะที่การใส่สารคู่ควบซีเลนร่วมกับพรีซิพิตเทซิลิกามีผลทำให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

6. การใส่พอตเทอริสโตนในสารประกอบยางมีผลทำให้ความต้านการฉีกขาดของยางคงรูปมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ทั้งนี้ยังขึ้นกับขนาดอนุภาคของพอตเทอริสโตนอีกด้วย และการเติมสารคู่ควบซีเลเนมีผลต่อความต้านการฉีกขาดไม่มากนัก ในขณะที่การใส่พรีซีพิตเซิลิกามีผลทำให้ความต้านการฉีกขาดของชิ้นงานลดลงมาก ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานมีระดับการเชื่อมขวางต่ำและการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของพรีซีพิตเซิลิกา อย่างไรก็ตาม การใส่สารคู่ควบซีเลเนมีผลทำให้ความต้านการฉีกขาดสูงขึ้น

7. สันฐานวิทยาของยางคงภาพที่เติมพอตเทอริสโตนและพรีซีพิตเซิลิกาแสดงให้เห็นอนุภาคของ ZnO และสารตัวเติมกระจายอยู่ในเมทริกซ์ของยาง และการใส่สารคู่ควบซีเลเนมีผลทำให้การกระจายตัวของสารตัวเติมในเมทริกซ์ของยางเพิ่มมากขึ้น

8. จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆ แสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำพอตเทอริสโตนมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังอาจช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบที่มีเป็นจำนวนมากภายในประเทศอีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางที่จะนำพอตเทอริสโตนมาใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติได้ ซึ่งอาจต้องมีปรับปรุงและออกแบบสูตรยางให้เหมาะสม เพื่อให้สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ยางดีขึ้น รวมทั้งศึกษาการนำซิลิกาจากแหล่งธรรมชาติอื่นๆ มาเป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ เพื่อลดการใช้ซิลิกาทางการค้าที่มีราคาสูง ซึ่งจะส่งผลโดยตรงทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง

รายการอ้างอิง

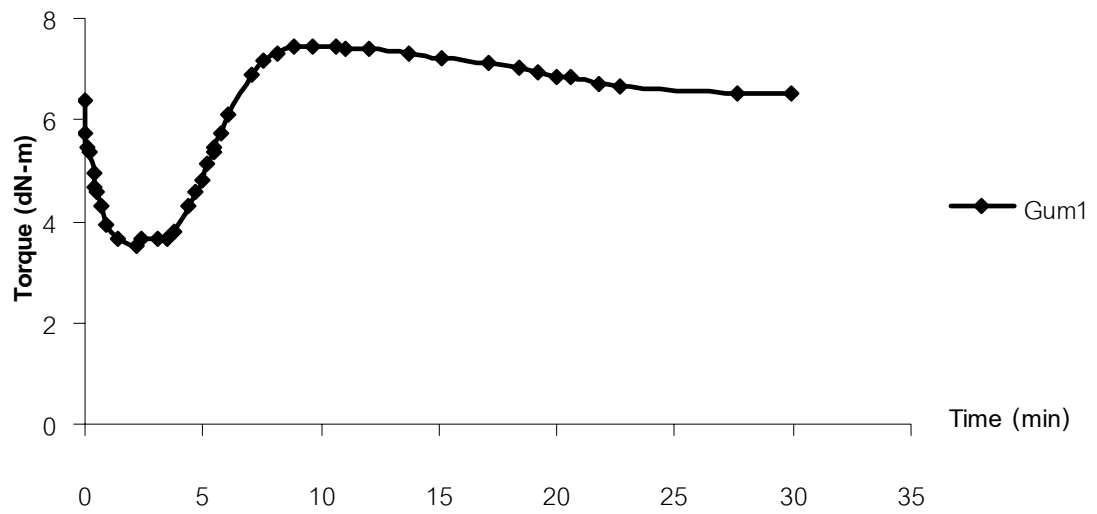
1. สีน สีนสกุล. 2545. แหล่งเรียนรู้ทางธรณีวิทยาทางประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
2. ศุภรัตน์ นวลสุวรรณ. 2538. ยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
3. วิภาวี พัฒนกุล. 2549. ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์. การฝึกอบรมหลักสูตรการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางแห้ง, กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง, กรมวิชาการเกษตร, 2549: 3-24.
4. อธิธิพล แจ่มชัด. 2545. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
5. พงษ์ธร แซ่อู๋. 2548. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์.
6. พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. ภาควิชาเทคโนโลยีการยาง คณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
7. Rattanasom, N., Saowapark, T., and Deeprasertkul, C. 2007. Reinforcement of Natural Rubber with Silica/Carbon Black Hybrid Filler. Polymer Testing 26: 369-377.
8. Ansarifar, A., Shiah S.F. and Bennett, M. 2006. Optimising the Chemical Bonding between Silanised Silica Nanofiller and Natural Rubber and Assessing its Effects on the Properties. Journal of Adhesion and Adhesives 26: 454-463.
9. Sombatsompop, N., Thongsang, S., Markpin, T. and Wimolmala, E. 2004. Fly-Ash Particles and Precipitated Silica as Fillers in Rubbers: Part1. Untreated Filler in NR and SBR Compounds. Applied polymer science 93: 2119-2130.
10. Sae-Oui, P., Rakdee, C. and Thanmathorn, P. 2002. Use of Rice Husk Ash as Filler in Natural Rubber Vulcanizates in Comparision with Other Commercial Fillers. Applied Polymer Science. 83: 2485-2493.
11. ธิติมา รุกขไชยศิริกุล. 2544. เคมีอินทรีย์ 2, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

ภาคผนวก

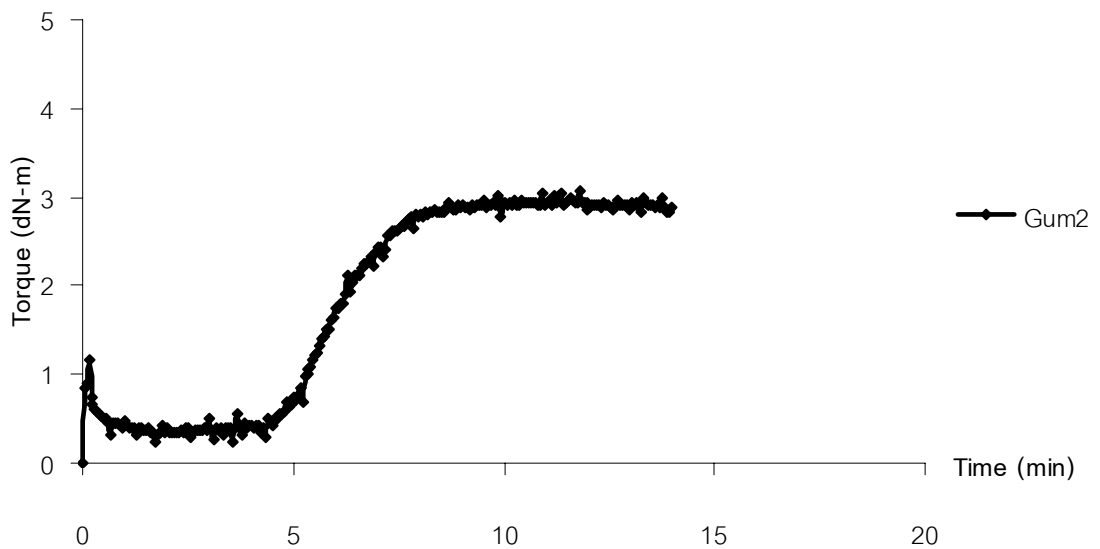
ภาคผนวก ก

เวลาการคงรูปของยางก่อนกำหนดและเวลาในการคงรูปของยาง

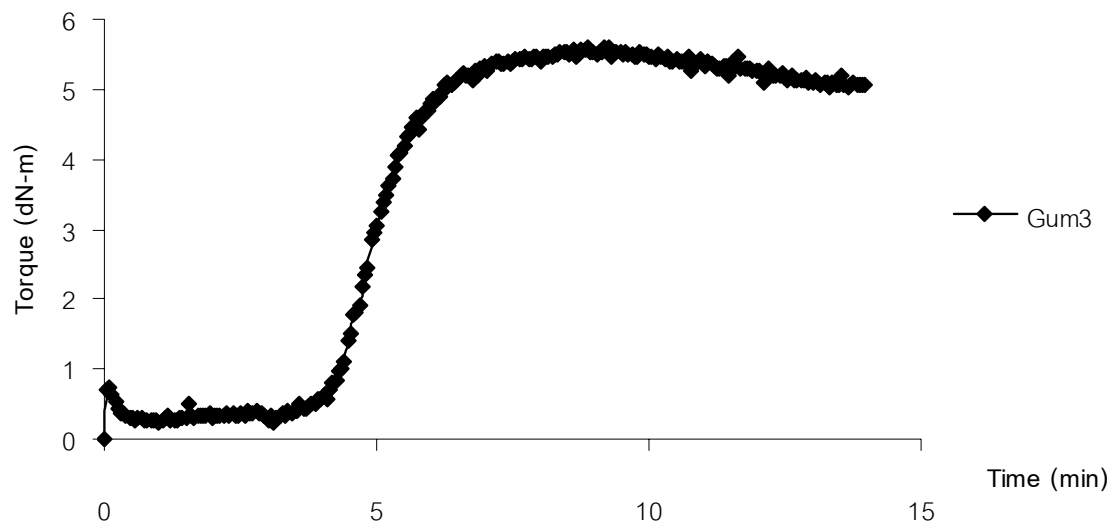
ภาพที่ ก.1 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 1.1 (Gum1)



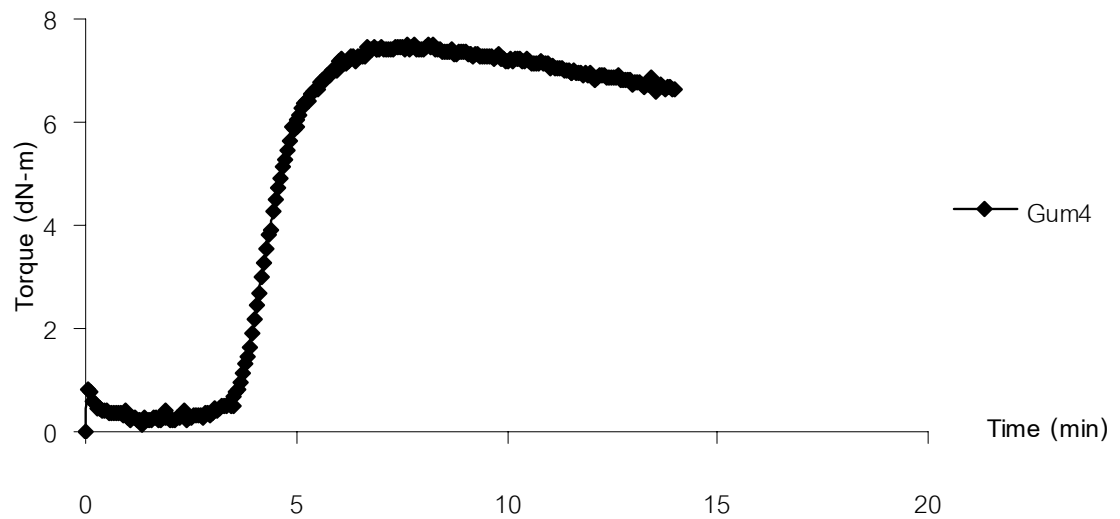
ภาพที่ ก.2 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 1.2 (Gum2)



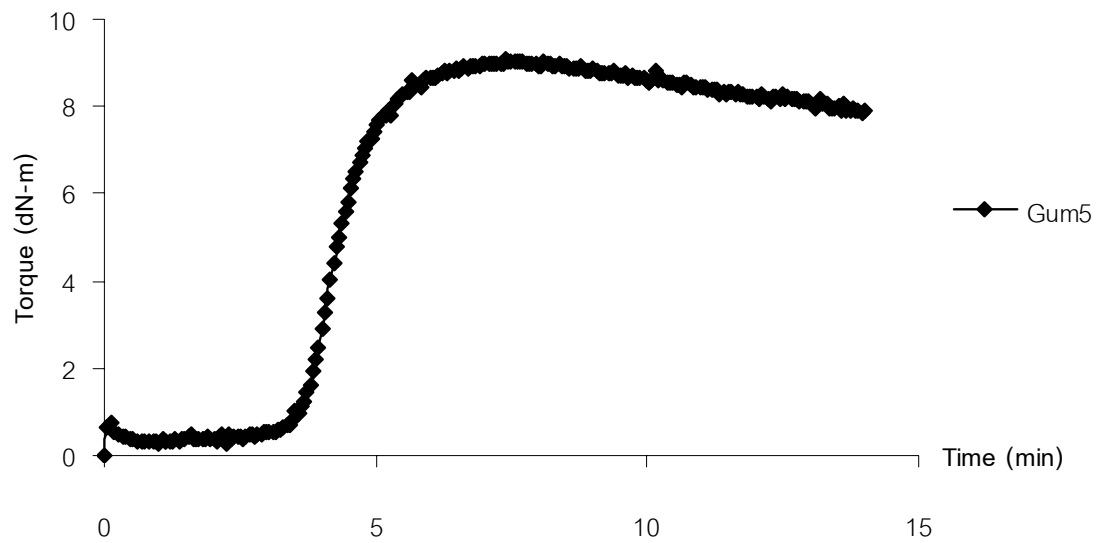
ภาพที่ ก.3 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 1.3 (Gum3)



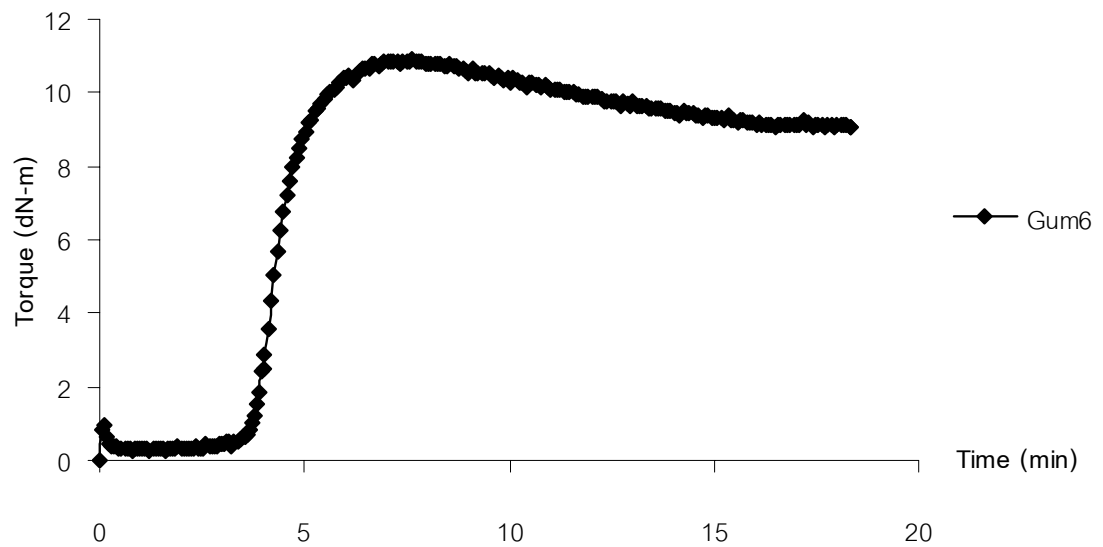
ภาพที่ ก.4 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 1.4 (Gum4)



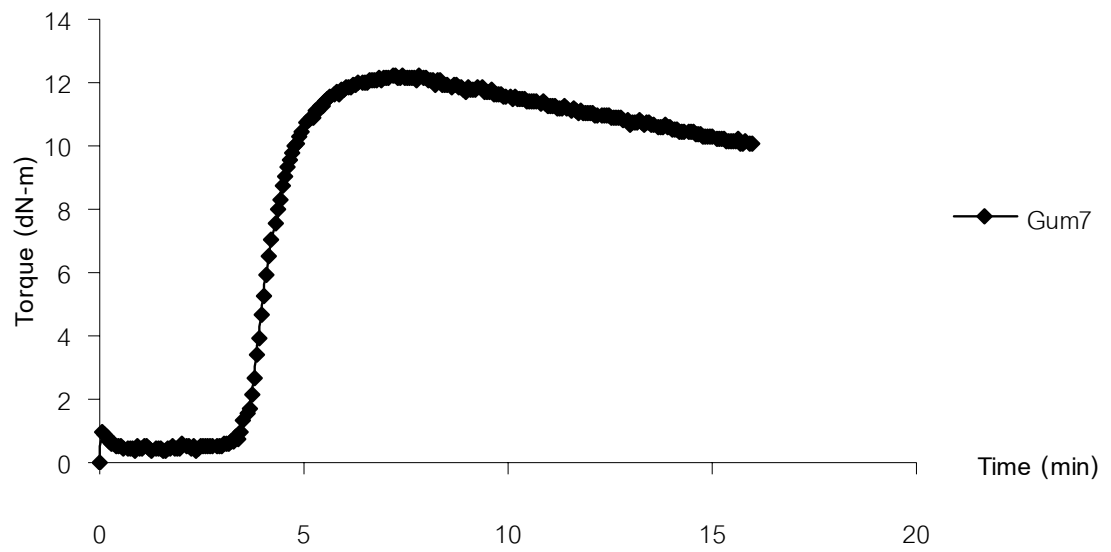
ภาพที่ ก.5 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 1.5 (Gum5)



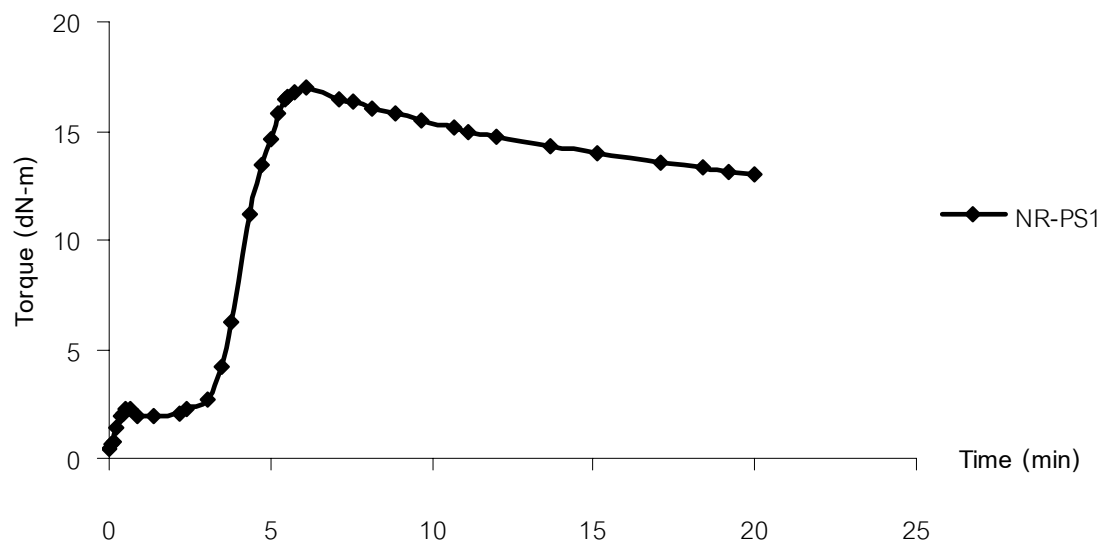
ภาพที่ ก.6 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 1.6 (Gum6)



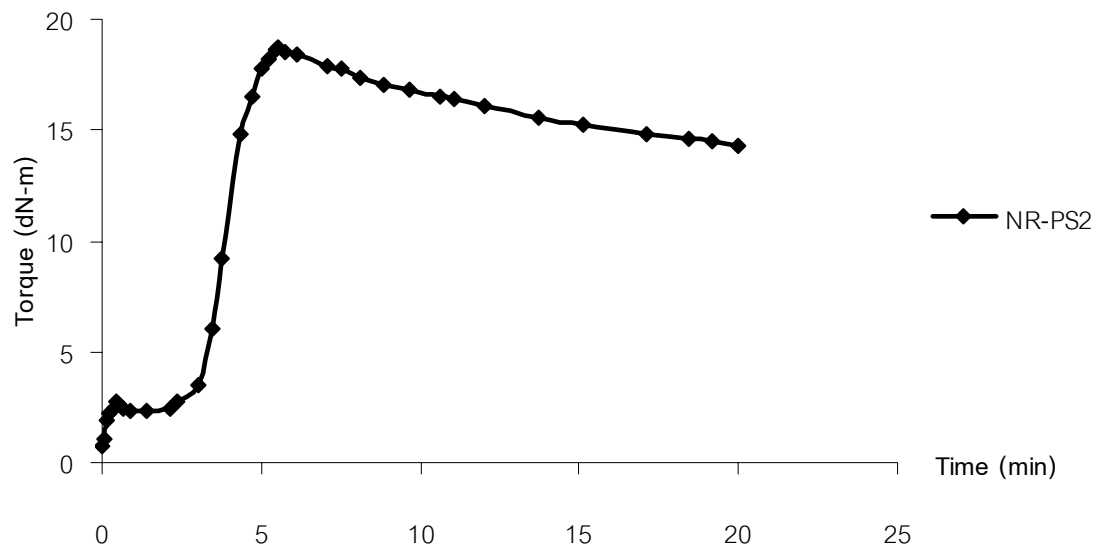
ภาพที่ ก.7 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 1.7 (Gum7)



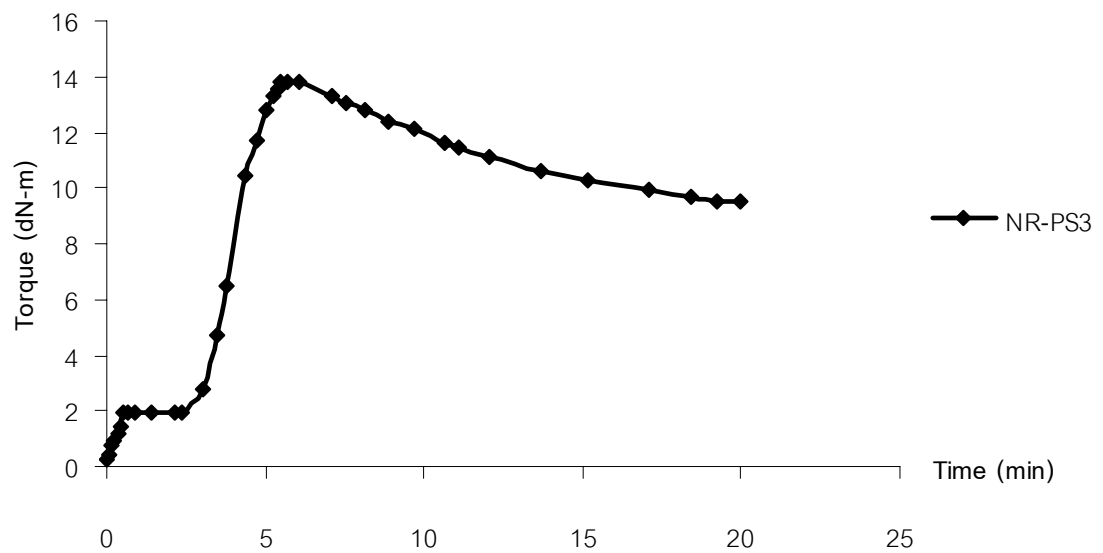
ภาพที่ ก.8 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 2.1 (NR-PS1)



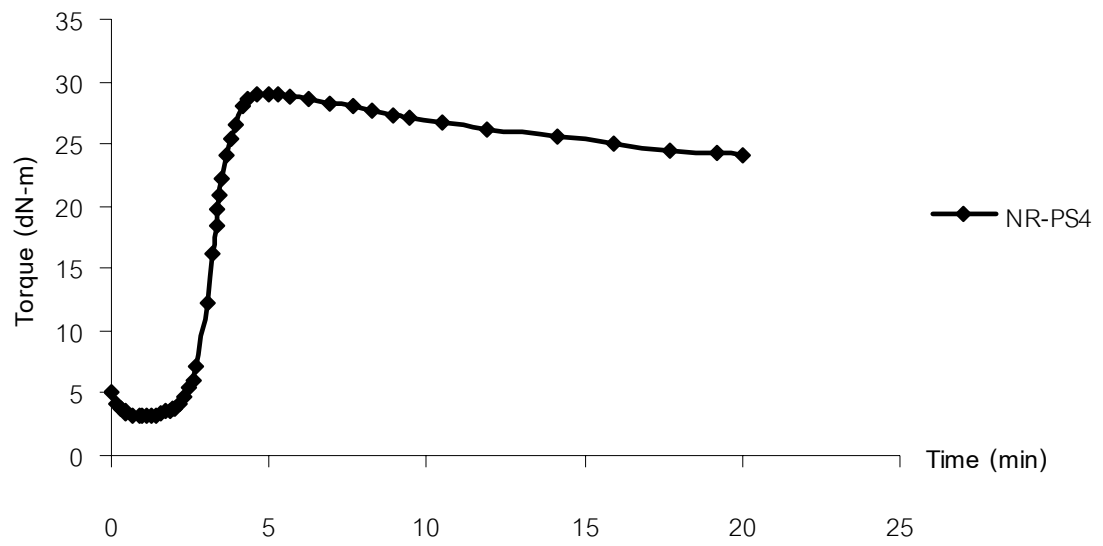
ภาพที่ ก.9 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 2.2 (NR-PS2)



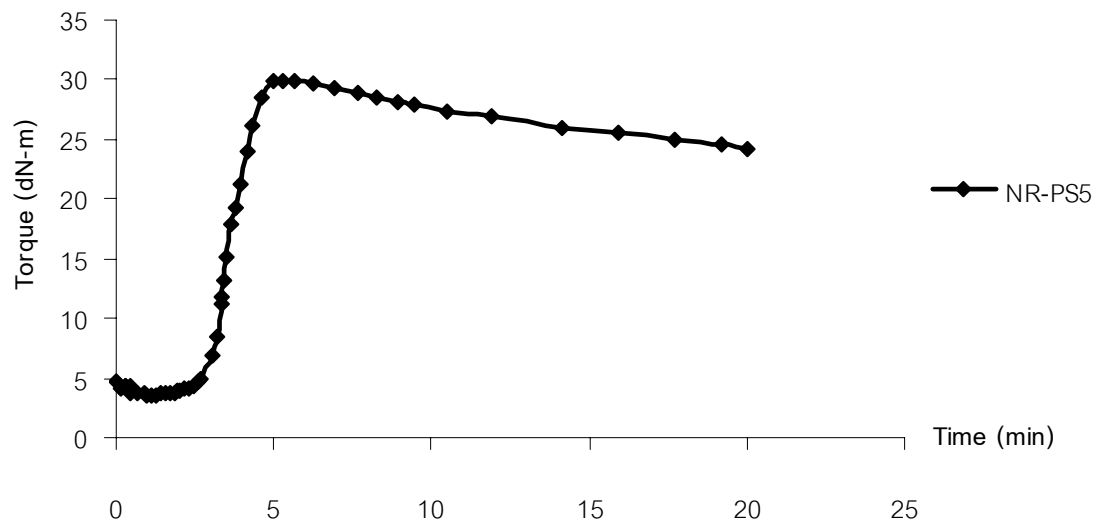
ภาพที่ ก.10 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 2.3 (NR-PS3)



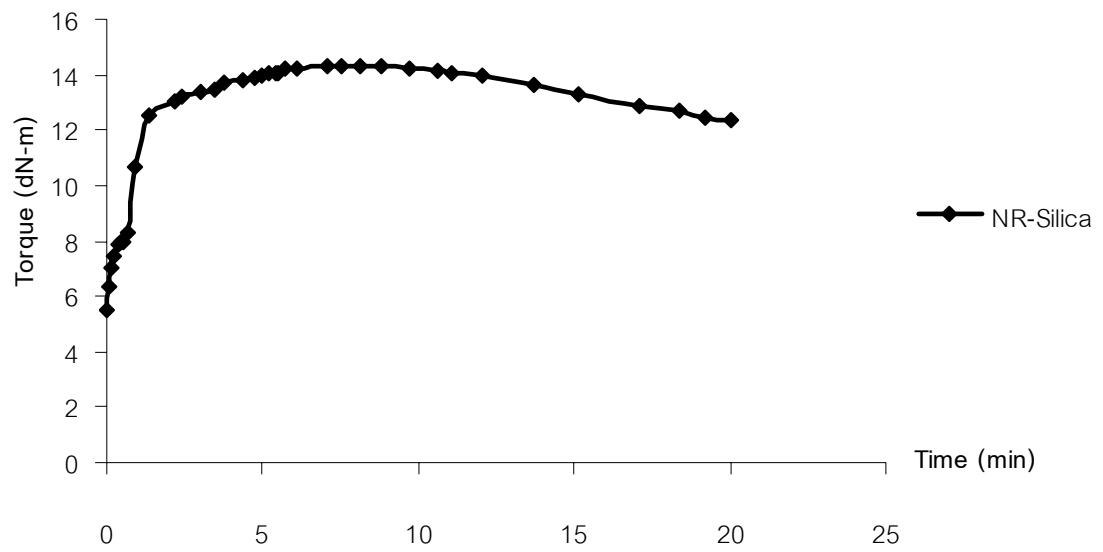
ภาพที่ ก.11 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 2.4 (NR-PS4)



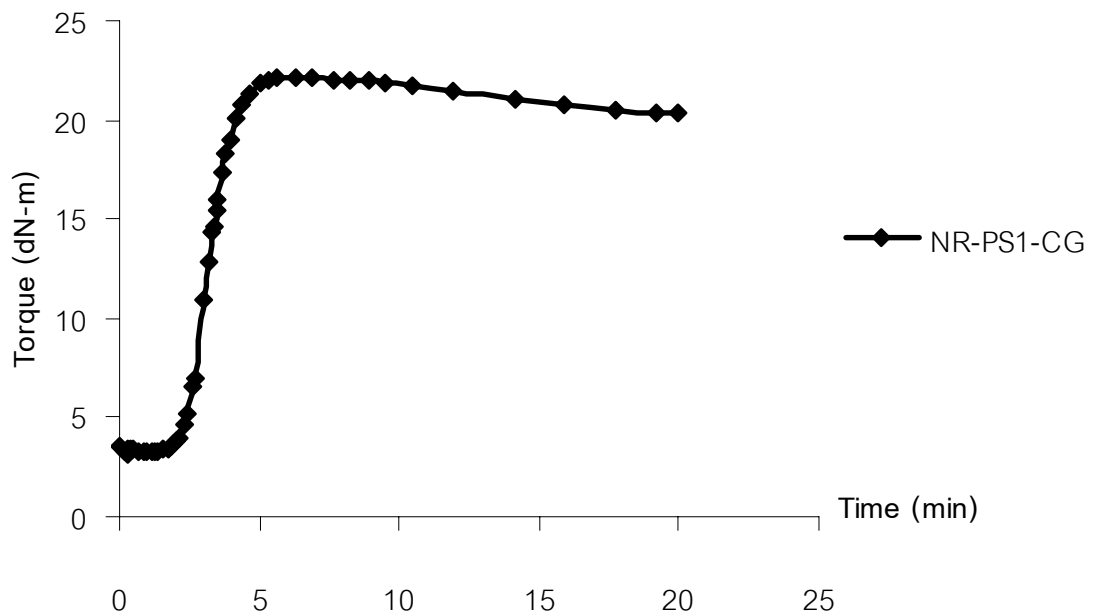
ภาพที่ ก.12 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 2.5 (NR-PS5)



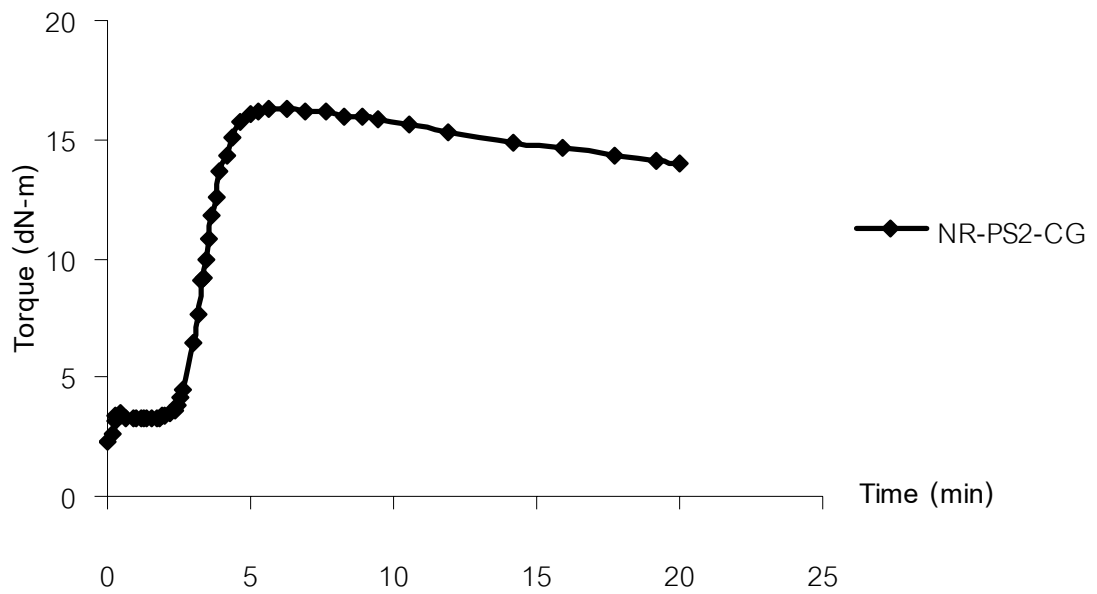
ภาพที่ ก.13 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 3 (NR-Silica)



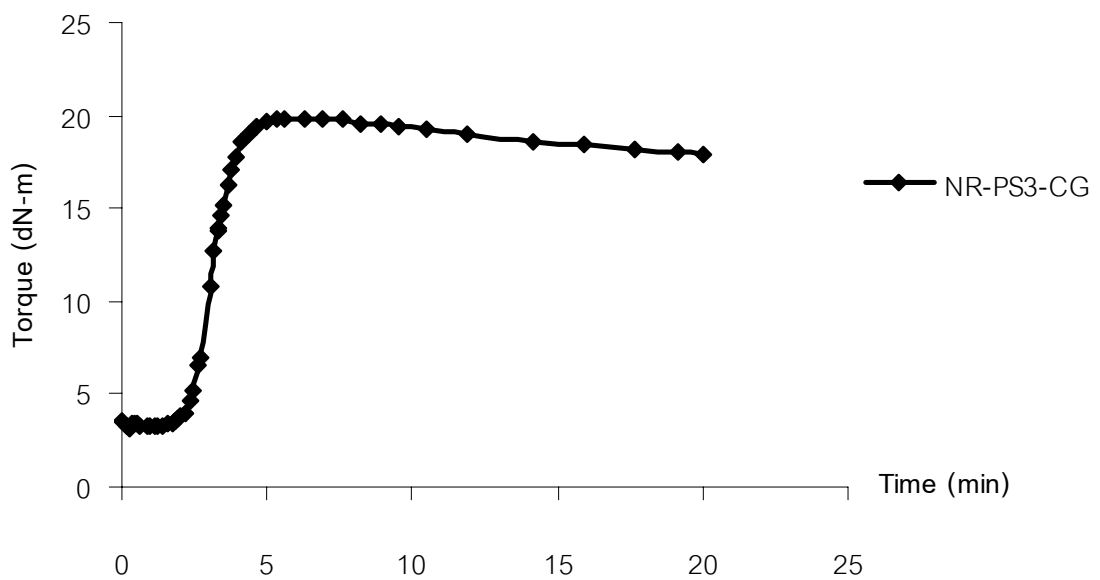
ภาพที่ ก.14 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 4.1 (NR-PS1-CG)



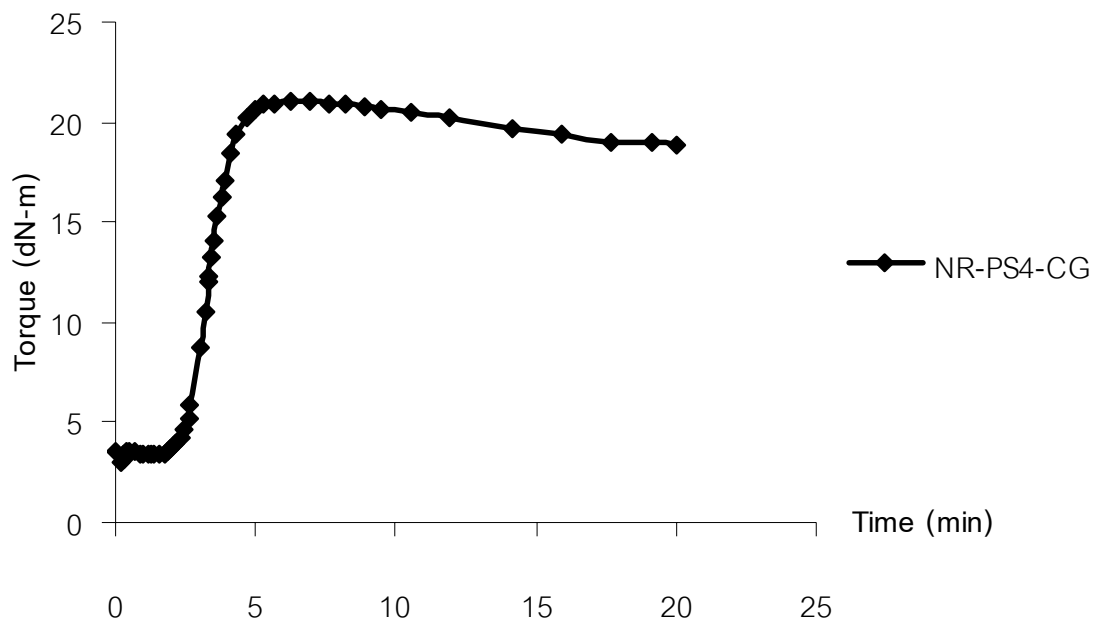
ภาพที่ ก.15 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 4.2 (NR-PS2-CG)



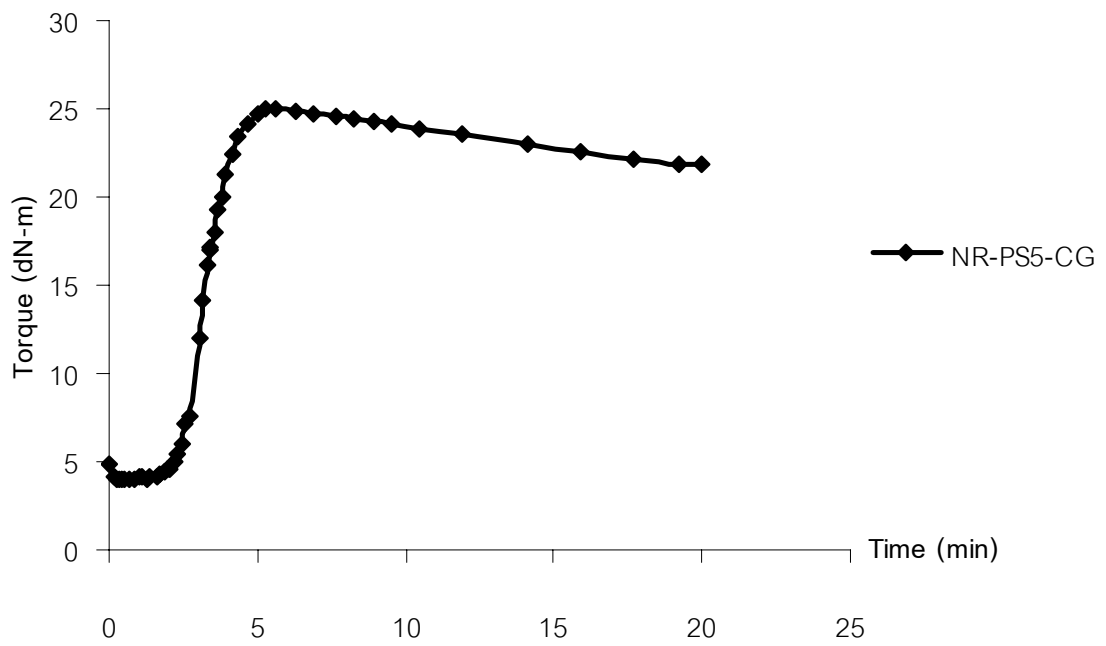
ภาพที่ ก.16 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 4.3 (NR-PS3-CG)



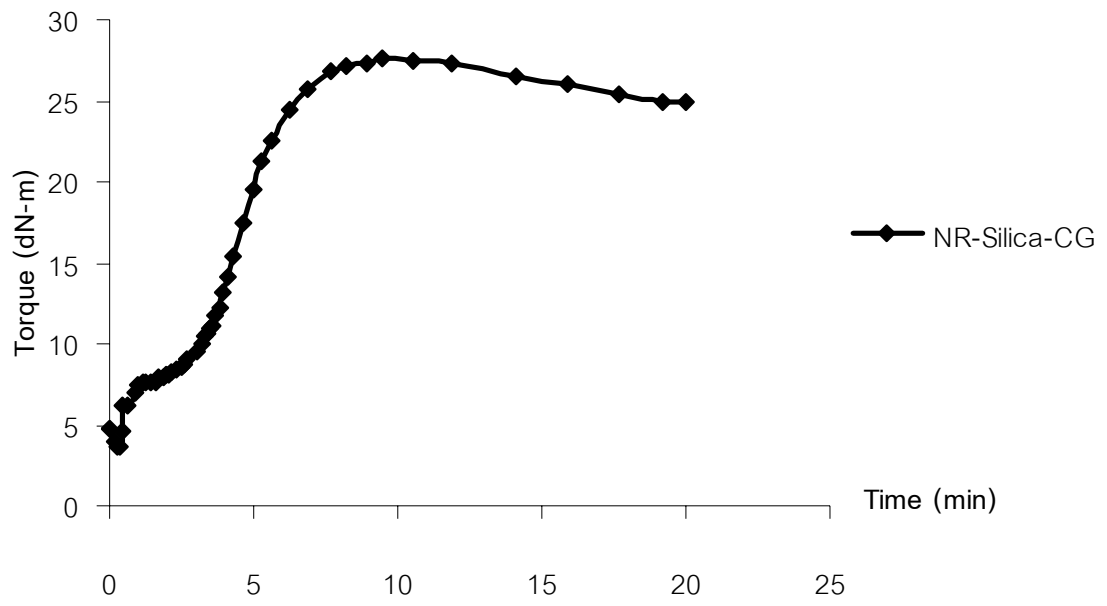
ภาพที่ ก.17 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 4.4 (NR-PS4-CG)



ภาพที่ ก.18 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 4.5 (NR-PS5-CG)



ภาพที่ ก.19 กราฟแสดงการคงรูปของสารประกอบยางสูตร 5 (NR-Silica-CG)



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชนิษฐา หนูมัน เกิดที่จังหวัดปทุมธานี ในวันที่ 13 เมษายน 2523 จบการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายในปี พ.ศ.2542 จากโรงเรียนนนทบุรีพิทยาคม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต ในปีการศึกษา พ.ศ.2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต เมื่อปีการศึกษา 2549 สาขาวิชาพอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานวิจัยที่มีการเผยแพร่

- Noomun, K., Lertsutthiwong, P., Jongaroonngamsang, N., Rojsitthisak, P. and Nimmannit, U., Preparation of Alginate Nanocapsules Containing Turmeric Oil, Carbohydrate polymers, 2008.
- Noomun, K., Lertsutthiwong, P., Khunthon, S., Siraalertmukul, K., and Chandkrachang, S., New Insulating Particleboards Prepared from Mixture of Solid Wastes from Tissue Paper Manufacturing and Corn Peel, Bioresource technology, 2007.