



การศึกษาการใช้ซิลิกาเจลขนาดนาโนชนิดมีรูพรุน ที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบ
เพื่อเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยกระบวนการโซลเจล

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

โดย

นายเชาวน์ ศรีเพชรดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาการใช้ซิลิกาเจลขนาดนาโนชนิดมีรูพรุน ที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบ
เพื่อเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยกระบวนการโซลเจล

โดย
นายเชวณ ศรีเพชรดี

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

THE STUDY OF NATURAL RUBBER REINFORCED BY NANO-POROUS SILICA
GEL SYNTHESIZED FROM RICE HUSK ASH VIA SOL-GEL PROCESS

By
Chao Sripethdee

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree
MASTER OF ENGINEERING
Department of Materials Science and Engineering
Graduate School
SILPAKORN UNIVERSITY
2010

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง "การศึกษการใช้ชลิ
กาเจลดนาโนชนิดมีรูพรุน ที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบ เพื่อเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดย
กระบวนการโซลเจล" เสนอโดย นายเชาวน์ ศรีเพชรดี เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปานใจ ธารทัศนวงศ์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุศักดิ์ พูนสวัสดิ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น)

...../...../.....

51402213 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : ซิลิกาเจล อินสิท/ซิลิกา/ยางธรรมชาติ/

เขาวน ศรีเพชรดี : การศึกษาการใช้ซิลิกาเจลขนาดนาโนชนิดมีรูพรุน ที่สังเคราะห์จาก
เถ้าแกลบเพื่อเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยกระบวนการ โซลเจล. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ :
ผศ.ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น. 245 หน้า.

แกลบข้าวเป็นของเหลือจากภาคการเกษตรที่อุดมไปด้วยซิลิกาซึ่งเป็นสารเสริมแรง
สำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ซิลิกาจากเถ้าแกลบสามารถสกัดให้อยู่ในรูปของสารละลายโซเดียม
ซิลิเกตได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ การปรับค่า pH ให้
เป็นกลางส่งผลให้สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ได้กลายเป็นซิลิกาเจล ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ใน
การเตรียมซิลิกาเจลที่มีรูพรุน โดยกระบวนการ โซลเจล ซึ่งกระบวนการ โซลเจลนี้เกิดพร้อมกับการ
จับตัวเป็นก้อนของเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติ ยางแห้งที่ได้จะมีการเสริมแรงด้วยซิลิกาเจลซึ่งอยู่ใน
ลักษณะของยางธรรมชาติที่แทรกตัวอยู่ใน โครงสร้างของซิลิกาเจล ผลคือยางที่ได้จะมีสมบัติพิเศษ
ในเรื่องคุณสมบัติเชิงกล และเชิงความร้อนที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังศึกษาในส่วนของการนำยางที่มี
การเสริมแรงด้วยซิลิกาเจลมาทำการเติมสารเสริมแรงร่วมอีก 2 ชนิดคือ ซิลิกาแบบตกตะกอนและ
เถ้าลอย ปริมาณสารคู่ควบโซลเจลที่มากเกินไปจะถูกใช้ไปเป็นสารปรับปรุงพื้นผิวแก่ซิลิกาแบบ
ตกตะกอนและเถ้าลอย เอกลักษณะการบ่ม สมบัติเชิงกล โครงสร้างสัณฐานวิทยา และสมบัติทาง
กายภาพ จะถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่าเวลาสก็อช เวลาในการบ่ม แรงบิดต่ำสุดและสูงสุดมีค่า
เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีที่เติมเถ้าลอยพบว่าเวลาสก็อช เวลาในการบ่ม แรงบิด
ต่ำสุดและสูงสุดมีค่าลดลง ค่ามอดูลัสที่ 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของทั้งสองระบบมีค่า
เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงและแรงฉีกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาแบบตกตะกอนที่ปรับปรุง
พื้นผิวเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีของการเติมเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลง
ส่วนค่าความต้านทานต่อแรงฉีกมีค่าเพิ่มขึ้นที่ปริมาณเถ้าลอยเป็น 10 phr อย่างไรก็ตามค่าความยาว
ณ จุดขาดมีค่าลดลงเนื่องมาจากผลของปริมาณซิลิกาและเถ้าลอย ภาพถ่ายจากกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของซิลิกาในเมตริกซ์ของยาง และความเข้า
กันกับเมตริกซ์ยางของเถ้าลอยที่ได้รับการปรับปรุงผิว

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2553
ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

51402213 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORDS : SI-GEL IN-SITU/ PRECIPITATED SILICA/ NATURAL RUBBER

CHAO SRIPETHDEE : THE STUDY OF NATURAL RUBBER REINFORCED BY NANO-POROUS SILICA GEL SYNTHESIZED FROM RICE HUSH ASH VIA SOL-GEL PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHANCHAI THONGPIN,Ph.D. 245 pp.

Rice husk is a waste from the agricultural industrials that is rich in silica, a substance important in reinforcing the compounding rubber. Silica from rice husk ash can be extracted in the form of sodium silicate solution at the temperature of 100 ° C in a sodium hydroxide solution to adjust pH to neutral resulting in sodium silicate solution has become a silica gel and sodium sulfate salt. This research is aimed to preparing nanoporous silica gel by the sol-gel process. The sol-gel process and the coagulation of rubber particles in natural rubber latex.occured simultaneously,then dried in a hot air oven at 60 ° C, this dry rubber is reinforced with silica gel (In-situ nanoporous silica gel/NR reinforcement), which is in the form of silica gel-natural rubber-silica gel cluster structure. The result is a vulcanized rubber that increased on the mechanical properties and thermal properties. Furthermore, this research also studies the application of rubber that is reinforced with silica gel to be additive with the other two types of reinforcement is a precipitated silica and fly ash, precipitated silica and fly ash was used as hybrid filler. The excess amount of silane coupling agent used to modify precipitated silica and fly ash would affect the second filler incorporating in the natural rubber. Treated and untreated, precipitated silica and fly ash would add into natural rubber reinforced by silica gel from rice husk ash via sol-gel process. Cure characteristics, mechanical properties, morphology and physical property of vulcanized rubber was studied in this work. Scorch time, cure time, minimum torque and maximum torque were increased with the amount of silica due to the good dispersion of treated precipitated silica affect to compatibility between silica particle and rubber matrix. In case of fly ash as filler was found that scorch time, cure time, minimum torque and maximum torque were decreased with amount of fly ash due to metal oxide in fly ash composition act as accelerator. Modulus at 100 and 200 %strain was increased with amount of both precipitated silica and fly ash. Tensile strength and tear strength were increased with amount of precipitated silica but decreased in case of fly ash. Tear strength was increased at the content of fly ash as 10 phr. However, elongation at break was decreased due to the effect of silica and fly ash content. SEM micrograph was shown that the good dispersion of silica in rubber matrix and compatibility of treated fly ash with natural rubber.

Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2010

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นไปได้ด้วยดี เป็นผลมาจากการได้รับความอนุเคราะห์จากหลากหลายฝ่าย ทั้งนี้ต้องขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับการสนับสนุนด้านเงินทุน อุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการที่ใช้ในงานวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง SEM ขอขอบพระคุณกลุ่มวิจัย P-PROF สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการทดสอบชิ้นงานตัวอย่าง และ บริษัทอินโนเวชั่นกรุ๊ป สำหรับความอนุเคราะห์ในการจัดหาสารเคมีบาง เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทร์ฉาย ทองปิ่น ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ แนะนำแนวทางในการศึกษา วิเคราะห์ พร้อมให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งด้วยความเอาใจใส่มาโดยตลอด ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงและขอระลึกถึงพระคุณของท่านอาจารย์ตลอดไป

กราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ คุณธรรมและศีลธรรมให้แก่ผู้ศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งคณาจารย์ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่เป็นเสมือนพี่ เสมือนบิดามารดา ที่ให้ความเมตตาอบรม สั่งสอน แก่ผู้ศึกษาตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการเบิกจ่ายวัสดุอุปกรณ์ และประสานงานในด้านต่างๆ ตลอดการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณพี่น้องชาวศิลปากร สำหรับการใช้ชีวิตอยู่ร่วมกันอย่างมีความสุข ตลอดระยะเวลาในการศึกษาเล่าเรียน และขอขอบคุณสังคมแห่งศิลปากรที่ไม่มีที่ใดเหมือน ทำให้กระผมได้ใช้ชีวิตในบรรยากาศแห่งอิสรภาพ ที่รู้จักรับผิดชอบ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบคุณครอบครัวและเครือญาติ ที่คอยส่งเสริมและให้โอกาสทางการศึกษา คอยเป็นที่ปรึกษาทางใจ ให้มีกำลังเข้มแข็งและพร้อมที่จะเผชิญกับปัญหา จนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	7
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
แกลบ (Rice husk)	8
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแกลบ	8
ซิลิกาจากเถ้าแกลบ	10
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวิธีโซลเจล	11
ลักษณะโดยทั่วไป	11
ซิลิกา (Silica).....	13
ลักษณะโดยทั่วไปของซิลิกา.....	14
ปัญหาของการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม	15
บทบาทของสารคู่ควบไฮเลน (Silane)	17
เถ้าลอย (Fly ash)	19
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย	19
อิทธิพลต่อสมบัติของเถ้าลอย	20
การใช้ประโยชน์เถ้าลอย.....	22
แหล่งที่มาของเถ้าลอยภายในประเทศ	25

บทที่	หน้า
ยางธรรมชาติ	25
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางธรรมชาติ	25
น้ำยาง (Latex).....	26
ยางแห้ง.....	33
สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ.....	35
การทำให้ยางธรรมชาติเกิดการคงรูป.....	38
ระบบทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถัน	38
ระบบทำให้ยางคงรูปด้วยสารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน	39
ระบบทำให้ยางคงรูปด้วยสารที่ไม่มีกำมะถัน	39
สารเคมีสำหรับยาง (Additives for rubber).....	42
เพื่อแก้ข้อเสียของยาง.....	42
เพื่อเป็นตัวช่วยในขบวนการแปรรูปยาง	42
ทำให้ยางมีขอบเขตการใช้งานกว้างขึ้น.....	43
เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต.....	43
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารเสริมแรงที่ใช้ในยาง.....	44
ผงเขม่าดำ (Carbon black)	44
มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite).....	49
ซิลิกา (Silica).....	50
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	51
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	56
อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	56
อุปกรณ์.....	56
สารเคมี	57
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	58
การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต	58
การเตรียม Sol-Gel NR/Si composite	58
การเตรียม NR/PSi composite.....	60
การเตรียม Sol-Gel NR/30Si+TPSi และ NR/TPSi composite.....	61

บทที่	หน้า
การเตรียม Sol-Gel NR/30Si+TFA และ Sol-Gel NR/30Si+FA composite...	63
การทดสอบ	65
การศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)	65
การศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	66
การศึกษาลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยา (Morphology)	68
การศึกษาสมบัติการต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance).....	68
การศึกษาการบวมตัว (Swelling measurement).....	69
แผนภูมิการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ	70
การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต	70
การเตรียม Si-69 Treated PSi.....	71
การเตรียม Si-69 Treated FA	71
การเตรียม Sol-Gel NR/Si composite	72
การเตรียม NR/PSi composite.....	73
การเตรียม Sol-Gel NR/30Si+TPSi composite	74
การเตรียม NR/TPSi composite	75
การเตรียม Sol-Gel NR/30Si+TFA และ Sol-Gel NR/30Si+FA composite...	76
Vulcanization	76
การทดสอบต่างๆ.....	77
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	78
ตอนที่ 1 การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต	78
ปริมาณซิลิกาในสารละลายโซเดียมซิลิเกต.....	78
การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Sol-Gel Si เทียบกับ PSi ด้วยเทคนิค FTIR	79
การวิเคราะห์หาปริมาณ Silica gel ที่เกิดขึ้นในยาง Sol-Gel NR/Si.....	80
ลักษณะทางกายภาพของ Sol-Gel NR/Si ที่ยังไม่คอมพาวด์	
ด้วยเทคนิค SEM	83
ตอนที่ 2 ศึกษาผลของ Sol-gel Silica เปรียบเทียบกับ Precipitated silica	
ที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอสิต	85
สมบัติการบ่มของยางคอมพาวด์ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi	85

บทที่	หน้า
ลักษณะการคงรูปของยางผสม	88
สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนเซต Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi	91
สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile properties)	91
สมบัติความต้านทานแรงฉีก (Tear strength)	96
สมบัติความแข็งที่ผิว (Hardness)	97
สมบัติความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance)	98
สมบัติทางกายภาพของคอมพอลิเมอร์ที่ผ่านการบ่ม (Vulcanized rubber)	100
ตอนที่ 3 การศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมแบบคู่ (Hybrid filler) ระหว่าง Silica gel จากเถ้าแกลบที่เสริมแรงในยางธรรมชาติกับ Precipitated silica ที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ Si-69 ที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอลิเมอร์	102
การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PSi ที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว	102
สมบัติการบ่มของยางคอมพาวด์ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi	103
คุณลักษณะของเวลาสกอรัชของยาง	103
คุณลักษณะเวลาในการคงรูปของยาง	104
ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)	105
ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque)	106
สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนเซต Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi	108
สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi	108
สมบัติความต้านทานแรงฉีก (Tear strength)	111
สมบัติความแข็งที่ผิว (Hardness)	112
สมบัติความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance)	113
สมบัติทางกายภาพของคอมพอลิเมอร์ที่ผ่านการบ่ม (Vulcanized rubber)	114
ตอนที่ 4 การศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมแบบคู่ (Hybrid filler) ระหว่าง Silica gel ที่เสริมแรงในยางธรรมชาติกับเถ้าลอยที่ไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวหรือเถ้าลอยที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ Si-69 ที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอลิเมอร์	116
การตรวจสอบและศึกษาลักษณะทางกายภาพของ FA	116
สมบัติการบ่มของยางคอมพาวด์ Sol-Gel NR/30Si ที่ผสม FA และ TFA	119

บทที่	หน้า
สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนเซต Sol-Gel NR/30Si ที่ผสม FA และ TFA....	122
สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile properties)	122
สมบัติความต้านทานแรงฉีก (Tear strength)	125
สมบัติความแข็งที่ผิว (Hardness)	126
สมบัติความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance).....	128
สมบัติทางกายภาพของ hybrid composite ที่ผ่านการบ่ม (Vulcanized rubber)	129
5 สรุปลผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	130
สรุปลผลการทดลอง	130
ข้อเสนอแนะ.....	139
บรรณานุกรม	140
ภาคผนวก.....	144
ภาคผนวก ก FT-IR spectra ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย ซิลิกาเจลจากเถ้าแกลบโดยกระบวนการโซลเจล.....	145
ภาคผนวก ข กราฟ TGA และข้อมูลดิบของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติที่ เสริมแรงด้วยซิลิกาเจลจากเถ้าแกลบโดยกระบวนการโซลเจลในสูตรต่างๆ ..	147
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดสอบ MDR ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติที่ เสริมแรงด้วยซิลิกาแบบกตะกอน เถ้าลอย และซิลิกาเจลจากเถ้าแกลบ โดยกระบวนการโซลเจลในสูตรต่างๆ	151
ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดสอบ Tensile และ Tear ของยางธรรมชาติ และยาง ธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาแบบกตะกอน เถ้าลอย และซิลิกาเจลจาก เถ้าแกลบโดยกระบวนการโซลเจลในสูตรต่างๆ	162
ภาคผนวก จ ข้อมูลการทดสอบ Hardness ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติที่ เสริมแรงด้วยซิลิกาแบบกตะกอน เถ้าลอย และซิลิกาเจลจากเถ้าแกลบโดย กระบวนการโซลเจลในสูตรต่างๆ	181

ภาคผนวก จ ข้อมูลการทดสอบการขัดถู (Abrasion) ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาแบบกตะกอน ใ้ลลอย และซิลิกาเจลจากใ้ลลอบโดยกระบวนการโซลเจลในสูตรต่างๆ	193
ภาคผนวก ช ข้อมูลการทดสอบ SEMของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาแบบกตะกอน ใ้ลลอย และซิลิกาเจลจากใ้ลลอบโดยกระบวนการโซลเจลในสูตรต่างๆ.....	204
ภาคผนวก ซ ข้อมูลการทดสอบการบวมตัว (Swell) ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาแบบกตะกอน ใ้ลลอย และซิลิกาเจลจากใ้ลลอบโดยกระบวนการโซลเจลในสูตรต่างๆ	210
ภาคผนวก ฌ ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติม	227
ภาคผนวก ฉ การคำนวณ.....	239

ประวัติผู้วิจัย	244
-----------------------	-----

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงเปอร์เซ็นต์สารประกอบในแถบข่าว	9
2	แสดงถึงคุณสมบัติทางเคมีของ WRHA และ BRHA.....	9
3	แสดงสมบัติทางกายภาพของ WRHA, BRHA, Silica และ Carbon black.....	9
4	องค์ประกอบทางเคมีของถั่วลันเตาแม่เมาะ	20
5	การแบ่งชั้นคุณภาพของถั่วลันเตาตามมาตรฐาน ASTM C618-96	21
6	ปริมาณการใช้ประโยชน์และการกำจัดถั่วลันเตาในยุโรปปี ค.ศ. 1999	22
7	ปริมาณการใช้ประโยชน์และการกำจัดถั่วลันเตาในสหรัฐอเมริกาปี ค.ศ. 1999	23
8	ส่วนประกอบของน้ำยาง	32
9	มาตรฐานยางแห่งประเทศไทย (Standard Thai Rubber, STR)	34
10	แสดงสมบัติโดยทั่วไปของซิลิกาแบบตกตะกอน	50
11	แสดงส่วนผสมของยางสูตร Sol-Gel NR/Si composite	60
12	แสดงส่วนผสมของยางสูตร NR/PSi composite.....	61
13	แสดงส่วนผสมของยางสูตร Sol-Gel NR/30Si+TPSi composite.....	62
14	แสดงส่วนผสมของยางสูตร NR/TPSi composite	63
15	แสดงส่วนผสมของยางสูตร Sol-Gel NR/30Si+TFA และ Sol-Gel NR/30Si+FA composite	64
16	แสดงข้อมูลปริมาณน้ำหนักของซิลิกาที่มีอยู่ใน Sol-Gel NR/Si ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน จากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA.....	81
17	แสดงองค์ประกอบธาตุที่เป็นส่วนประกอบอยู่ใน FA	116
18	แสดงข้อมูลปริมาณน้ำหนักของซิลิกาที่มีอยู่ใน Sol-Gel Si/NR จากการทดสอบ TGA	148
19	แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ NR.....	152
20	แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ NR/PSi สูตรต่างๆ	152
21	แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ.....	155
22	แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ.....	158
23	แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ Sol-Gel NR/30Si+TPSi สูตรต่างๆ	159
24	แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ Sol-Gel NR/30Si+FA สูตรต่างๆ	160

ตารางที่		หน้า
25	แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ Sol-Gel NR/30Si+TFA สูตรต่างๆ.....	161
26	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ NR.....	163
27	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ NR/PSi สูตรต่างๆ	163
28	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ	165
29	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ.....	168
30	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ Sol-Gel NR/30Si+TPSi สูตรต่างๆ.....	169
31	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ Sol-Gel NR/30Si+FA สูตรต่างๆ	170
32	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ Sol-Gel NR/30Si+TFA สูตรต่างๆ	171
33	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ NR	172
34	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ NR/PSi สูตรต่างๆ.....	172
35	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ	174
36	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ	176
37	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ Sol-Gel NR/30Si+TPSi สูตรต่างๆ	178
38	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ Sol-Gel NR/30Si+FA สูตรต่างๆ	179
39	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ Sol-Gel NR/30Si+TFA สูตรต่างๆ	180
40	แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ NR	182
41	แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ NR/PSi สูตรต่างๆ.....	182
42	แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ	185
43	แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ	187
44	แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ Sol-Gel NR/30Si+TPSi สูตรต่างๆ	189
45	แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ Sol-Gel NR/30Si+FA สูตรต่างๆ ..	190
46	แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ Sol-Gel NR/30Si+TFA สูตรต่างๆ ..	191
47	แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ NR	194
48	แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ NR/PSi สูตรต่างๆ	194
49	แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ	197

ตารางที่		หน้า
50	แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ	199
51	แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ Sol-Gel NR/30Si+TPSi สูตรต่างๆ	200
52	แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ Sol-Gel NR/30Si+FA สูตรต่างๆ ..	201
53	แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ Sol-Gel NR/30Si+TFA สูตรต่างๆ	202
54	แสดงข้อมูลการทดสอบ Swelling ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ	211
55	แสดงข้อมูลการทดสอบ Swelling ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ	215
56	แสดงข้อมูลการทดสอบ Swelling ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ	218
57	แสดงข้อมูลการทดสอบ Swelling ของ Sol-Gel NR/30Si+TPSi สูตรต่างๆ	220
58	แสดงข้อมูลการทดสอบ Swelling ของ Sol-Gel NR/30Si+FA สูตรต่างๆ	222
59	แสดงข้อมูลการทดสอบ Swelling ของ Sol-Gel NR/30Si+TFA สูตรต่างๆ	225
60	แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ.....	228
61	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ.....	231
62	แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ	234
63	การหาปริมาณซิลิกาจากสารละลาย Sodium silicate (Na_2SiO_3)	240
64	แสดงส่วนผสมของยางสูตร Sol-Gel NR/Si.....	242

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงการเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล	11
2	แสดงกระบวนการโซลเจล	13
3	แบบจำลองแสดงลักษณะโครงสร้างซิลิกา	14
4	(ก) แสดงหมู่ฟังก์ชันเคมีที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกา และ (ข) รูปแบบต่างๆของหมู่ไฮดรอกซิล	15
5	แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควาไซเลน Silane 69	17
6	แสดงปฏิกิริยาขึ้นในการปรับปรุงผิวของซิลิกาด้วย Silane 69.....	18
7	แสดงปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาที่ปรับปรุงด้วย Silane-69 แล้ว กับยางธรรมชาติ.....	19
8	ภาพขยาย SEM ของอนุภาคเดี่ยวที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน.....	21
9	สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ	35
10	พันธะเคมีหรือการเชื่อมโยงของสายโมเลกุลยางด้วยกำมะถัน	38
11	แสดงสูตรโครงสร้างของ TMTD และ DTDM.....	39
12	การเชื่อมโยงแบบพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่เกิดจากการใช้เปอร์ออกไซด์.....	40
13	สูตรโครงสร้างของ P-Quinone dioxime.....	40
14	สูตรโครงสร้างของ Diphenylmethane diisocyanate.....	41
15	โครงสร้างของผงเขม่าดำ	45
16	โมเดลแสดงโครงสร้างของเขม่าดำ (ก) แบบต่ำ และ (ข) แบบสูง	46
17	หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำ.....	47
18	แสดงลักษณะกราฟการคงรูปที่วัดได้จาก MDR	65
19	แสดงขั้นตอนทดสอบความทนทานต่อการสึกกร่อนแบบ C.....	67
20	แสดงลักษณะของห้วงคแบบต่างๆ.....	67
21	แผนผังแสดงลักษณะของเครื่องตามมาตรฐาน DIN 53516.....	69
22	ลักษณะของรูปร่างของ a) Silica gel และ b) Precipitated silica ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	79
23	กราฟ FTIR สเปกตรัมของ a) Silica gel และ b) Precipitated silica	79
24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของสาร และอุณหภูมิ จากการทดสอบน้ำหนักที่เหลือของ Sol-Gel NR/Si	80

ภาพที่		หน้า
25	แสดง SEM ใ้ของ Sol-Gel NR/Si หลังการทดสอบ TGA ของ a) Sol-Gel NR/5Si, b) Sol-Gel NR/10Si, c) Sol-Gel NR/15Si, d) Sol-Gel NR/20Si, e) Sol-Gel NR/25Si, f) Sol-Gel NR/30Si, g) Sol-Gel NR/35Si และ h) Sol-Gel NR/40Si ที่กำลังขยาย10000 เท่า.....	82
26	แสดงภาพ SEM ของ Sol-Gel NR/20Si ที่ยังไม่ผ่านการคอมพาวด์ แต่ผ่านการแช่ Toluene ที่กำลังขยาย a) 50 b) 60 และ c) 75 เท่า.....	84
27	แสดงโมเดลการเกิด Interconnection ของอนุภาคยางและกลุ่มของซิลิกา.....	85
28	ผลของปริมาณ Silica gel จากเถ้าแกลบ และ PSi ที่มีต่อ Scorch time ของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi.....	87
29	ผลของปริมาณ Silica gel จากเถ้าแกลบ และ PSi ที่มีต่อ Cure time ของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi.....	87
30	ผลของปริมาณ Silica gel จากเถ้าแกลบ และ PSi ที่มีต่อค่าแรงบิดต่ำสุดของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi	88
31	ผลของปริมาณ Silica gel จากเถ้าแกลบ และ PSi ที่มีต่อค่าแรงบิดสูงสุดของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi	89
32	ผลของปริมาณ Silica gel จากเถ้าแกลบ และ PSi ที่มีต่อ ค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) ของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi.....	91
33	ผลของปริมาณ Silica gel จากเถ้าแกลบ และ PSi ที่มีต่อ ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซนต์การดึงยืดของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi	92
34	ผลของปริมาณ Silica gel จากเถ้าแกลบ และ PSi ที่มีต่อ ค่ามอดูลัสที่ 200 เปอร์เซนต์การดึงยืดของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi	92
35	ผลของปริมาณ Silica gel จากเถ้าแกลบ และ PSi ที่มีต่อ ค่าความต้านทานแรงดึงของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi.....	94
36	ผลของปริมาณ Silica gel จากเถ้าแกลบ และ PSi ที่มีต่อ ค่าเปอร์เซนต์การดึงยืดที่จุดขาดที่จุดขาดของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi...	94
37	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ของ a) NR/30PSi และ b) NR/40PSi ที่กำลังขยาย 1000 เท่า บริเวณ Fractured surface.....	95

ภาพที่		หน้า
38	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ของ a) Sol-Gel NR/10Si, b) Sol-Gel NR/20Si, c) Sol-Gel NR/30Si และ d) Sol-Gel NR/40Si ที่กำลังขยาย 1000 เท่า บริเวณ fractured surface	96
39	ผลของปริมาณ Silica gel จากถ้ำกลบ และ PSi ที่มีต่อ ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi.....	97
40	ผลของปริมาณ Silica gel จากถ้ำกลบ และ PSi ที่มีต่อ ค่าความแข็งที่ผิวของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi.....	98
41	ผลของปริมาณ Silica gel จากถ้ำกลบ และ PSi ที่มีต่อปริมาณของตัวอย่าง คอมพอสิตที่สูญเสียไปของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi.....	99
42	แสดงผลของปริมาณ PSi ที่มีต่อค่าการบวมตัวของ NR/PSi.....	100
43	แสดงผลของปริมาณ Silica gel จากถ้ำกลบ ที่มีต่อค่าการบวมตัวของ Sol-Gel NR/Si	101
44	กราฟ FTIR ของ a) Precipitated silica ที่ปรับปรุงผิวและ b) ไม่ปรับปรุงผิว	103
45	ขั้นตอนการปรับปรุงผิวของ Precipitated silica ด้วย Si-69	103
46	ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อ Scorch time และ Cure time ของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi.....	105
47	ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าแรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุดของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi.....	107
48	ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) ของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi.....	107
49	ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่ามอดูลัสที่ 100 และ 200 เฮอร์เซ็นต์การดึงยืดของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi.....	109
50	ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึง Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi.....	110
51	ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi.....	111
52	ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi.....	112

ภาพที่	หน้า
53	ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าความแข็งที่ผิวของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi..... 113
54	ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อปริมาตรของตัวอย่าง Hybrid composite ที่สูญเสียไป ของSol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi 114
55	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัวกับปริมาณซิลิกาโดยรวม 114
56	ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าการบวมตัวของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi 115
57	ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าการบวมตัวของ NR/TPSi 115
58	ลักษณะของรูปร่างของ FA จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ 117
59	กราฟ FTIR สเปกตรัมของ FA 118
60	กราฟ FTIR สเปกตรัมของ TFA 118
61	ปฏิกิริยาขึ้นในการปรับปรุงผิวของ FA ด้วย Si-69 119
62	ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อ Scorch time และ Cure time ของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA 120
63	ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่าแรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุดของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA 121
64	ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) ของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA 122
65	ภาพ SEM ของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA ที่กำลังขยาย 1000 เท่า..... 122
66	ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่ามอดูลัสที่ 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA..... 123
67	ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA 124
68	ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA 124
69	ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA 125

ภาพที่	หน้า
70	ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่าความแข็งที่ผิวของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA..... 126
71	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA ในปริมาณต่างๆที่กำลังขยาย 100 เท่า บริเวณ fractured surface 127
72	ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อปริมาตรของตัวอย่าง Hybrid composite ที่สูญเสียไป ของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA 128
73	ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่าการบวมตัวของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA 129
74	กราฟ FTIR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ 146
75	กราฟ FTIR สเปกตรัมของ Sol-Gel NR/Si 146
76	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของสารและอุณหภูมิ จากการทดสอบน้ำหนักที่เหลือของ Sol-Gel NR/Si 148
77	ภาพ SEM ของ NR ที่กำลังขยาย 1000 เท่า 205
78	ภาพ SEM ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า..... 206
79	ภาพ SEM ของ NR/PSi สูตรต่างๆ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า..... 207
80	ภาพ SEM ของ Sol-Gel NR/30Si/PSi และ Sol-Gel NR/30Si/TPSi ที่กำลังขยาย 1000 เท่า..... 208
81	ภาพ SEM ของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA ที่กำลังขยาย 1000 เท่า..... 209
82	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกอซ (Scorch time) และเวลาในการคงรูปยาง (Cure time) กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content) 229
83	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดต่ำสุด (ML) และค่าแรงบิดสูงสุด (MH) กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content) 230
84	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างแรงบิด (ΔS) กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content) 230
85	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสดิ่งที่ 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์การดิ่งยืด กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content) 232

ภาพที่	หน้า
86	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงยืด กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content) 233
87	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content) 233
88	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content) 235
89	ผลของปริมาณ Sodium sulfate ที่มีต่อ Scorch time ของ NR/15PSi..... 236
90	ผลของปริมาณ Sodium sulfate ที่มีต่อ Cure time ของ NR/15PSi 237
91	ผลของปริมาณ Sodium sulfate ที่มีต่อค่าแรงบิดต่ำสุดของ NR/15PSi 237
92	ผลของปริมาณ Sodium sulfate ที่มีต่อค่าแรงบิดสูงสุดของ NR/15PSi..... 238
93	ผลของปริมาณ Sodium sulfate ที่มีต่อค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) ของ NR/15PSi..... 238
94	การวิเคราะห์ปริมาณแก้วสุดท้ายในชิ้นงานยาง Sol-Gel NR/Si โดยเทคนิค TGA... 241

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ซิลิกาเป็นสารเสริมแรงที่ใช้กันมากชนิดหนึ่งในยาง เมื่อผสมซิลิกาลงไปยางจะทำให้ยางนั้นมีความแข็งแรงเชิงกล ความทนทานต่อการขาดฉีก และคุณสมบัติเชิงความร้อนที่ดีขึ้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำซิลิกามาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับสารอนินทรีย์ และสารอินทรีย์เพื่อใช้ผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทางเคมี พลาสติกบาง สารเคลือบผิว และวัสดุนำแสง

แกลบเป็นผลผลิตที่เหลือจากการสีข้าว ในปีหนึ่งๆมีปริมาณแกลบสูงถึงประมาณ 5,800 พันตัน ซึ่งบางส่วนถูกนำไปใช้เป็นปุ๋ย วัสดุปรองนอนในโรงเรือนเลี้ยงเป็ด เลี้ยงไก่ และในยุคที่ประเทศต้องการพลังงานสูง จึงมีการนำแกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ทดแทนพลังงานจากน้ำมันดิบ นอกจากนี้ถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ของแกลบยังสามารถส่งออกขายในต่างประเทศได้ ในราคากิโลกรัมละ 3-4 บาท แกลบยังเป็นแหล่งซิลิกาที่มีราคาถูกและสามารถทำหน้าที่เสริมแรงได้ดีใกล้เคียงกับสารเสริมแรงชนิดอื่นๆ ซึ่งมีราคาสูงกว่า จึงเป็นข้อได้เปรียบในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม

มีรายงานจากงานวิจัยของ U. Kalapathy และคณะ [1] พบว่าในแกลบมีซิลิกาอยู่มากกว่า 60 % ซึ่งซิลิกาในแกลบจะอยู่ในรูปของ Amorphous และสามารถสกัดได้ง่ายที่อุณหภูมิไม่สูงมากโดยใช้ด่าง และการสกัดด้วยกรด ทั้งสองวิธีนี้มีข้อได้เปรียบด้านพลังงานเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการผลิตซิลิกาที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมซึ่งนิยมถลุงจากสินแร่ อย่างไรก็ตามกระบวนการสกัดด้วยด่าง ซิลิกาที่สกัดได้จะมีความบริสุทธิ์สูงกว่าการสกัดด้วยกรด

จากที่กล่าวมาข้างต้นว่าซิลิกาจากแกลบสามารถสกัดได้หลายวิธี ซิลิกาเจลมีสมบัติในการดูดซับที่ดีจึงมีการทดลองเตรียมซิลิกาเจลจากแกลบ เพื่อใช้ในงานโครมาโตกราฟี โดยเตรียมจากการรีฟลักซ์แกลบกับสารละลายต่าง [1] ซึ่งซิลิกาที่ถูกสกัดออกมาจะละลายอยู่ในรูปโซเดียมซิลิเกต

หลังจากการปรับค่า pH ให้ต่ำลงจนถึงค่าที่เป็นกลางจะส่งผลให้สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ได้นั้นกลายเป็นเจล ซิลิกาเจลที่ได้เป็นของแข็งที่มีโครงสร้างเป็น โครงข่าย 3 มิติ เรียกว่า อควอเจล (ภายในรูปพอร์มีน้ำ), ซีโรเจล (เฟสของน้ำในรูปพอร์ถูกกระเหยออกไป) และแอโรเจล (ตัวทำละลายถูกกำจัดโดย Supercritical extraction) ขึ้นอยู่กับวิธีในการผลิต ซึ่งช่องว่างระหว่างอนุภาค มีขนาดเล็กมาก อยู่ในระดับนาโน สามารถเป็นสารเสริมแรงที่ดี [2]

สำหรับยางธรรมชาติจัดเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติอันดับหนึ่งของโลก สามารถทำรายได้จำนวนมากให้แก่ประเทศและเกษตรกร พอลิเมอร์ที่มีอยู่ในน้ำยางซึ่งกระจายตัวในลักษณะเป็นคอลลอยด์ มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก มีความหนาแน่น 0.93 g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72 องศาเซลเซียส อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ความยืดหยุ่น (Elasticity) มีความเหนียว (Toughness) และมีความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) สูง สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ดี มีความสามารถในการยึดติดกับวัสดุอื่นได้ดี จึงสามารถนำยางไปใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น

เถ้าลอย (Fly ash) เป็นวัสดุที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินซึ่งโรงไฟฟ้านั้นมีหลายแห่งมากภายในประเทศ โดยเฉพาะเถ้าลอยที่เหมืองแม่เมาะนั้นมีปริมาณที่สูงถึง 3 ล้านตันต่อปี ซึ่งเป็นของเสียที่เหลือทิ้งจากกระบวนการ ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและจะต้องเสียเวลาเสียงบประมาณในการกำจัดถ้าไม่มีการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ด้วยเหตุนี้ทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ จึงมีการนำเถ้าลอยมาประยุกต์ใช้ เช่นนำไปผสมปูนซีเมนต์และคอนกรีต นำไปเป็นสารเพิ่มเนื้อในสี นำมาใช้ทำปุ๋ย ฯลฯ ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยในแต่ละแหล่งมีความแตกต่างกันไป โดยส่วนประกอบหลักจะเป็นซิลิกา ด้วยเหตุนี้จึงเหมาะที่จะนำเอาเถ้าลอยนี้มาใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อทดแทนซิลิกาที่มีราคาสูงในการผลิตยางคอมพาวด์ให้มีสมบัติดียิ่งขึ้น ปัจจุบันก็ได้มีการวิจัยในการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ ผลที่ออกมาพบว่าเถ้าลอยนั้นมีความสามารถในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางได้ แต่ประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากแรงกระทำระหว่างเถ้าลอยกับยางธรรมชาติค่อนข้างต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าลอยเกิดขึ้นมา เพื่อจะปรับปรุงให้แรงกระทำระหว่างเถ้าลอยกับยางธรรมชาตินั้นดีขึ้น เช่นการใช้ Silane coupling agent ในการปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าลอยและผสมกับยางธรรมชาติพบว่าทำให้สมบัติเชิงกลของยางคอมพาวด์ดีขึ้น

เมื่อนำสารละลายโซเดียมซิลิเกตมาผสมกับคอลลอยด์ของอนุภาคยางในน้ำยาง จะทำให้มีสารละลายซิลิเกตละลายอยู่ในน้ำยาง เมื่อทำการเติมกรดเพื่อปรับ pH ให้เป็นกลาง ทั้งอนุภาคยางและ ซิลิกาเกิดการเจด พร้อมกับเกิดการจับรวมตัวกันของอนุภาคยาง ซึ่งทำให้ได้ยางที่มีซิลิกากระจายตัวอยู่ในเนื้อยาง เมื่อยางแห้งตัวลง ยางที่ได้จะมีการเสริมแรงด้วยซิลิกาเจด เราเรียกยางชนิดนี้ว่า ยางที่มีซิลิกาเจดที่เกิดแบบ In situ (Sol-Gel NR/Si) จะเห็นว่าการเสริมแรงด้วยวิธีนี้ทำให้ซิลิกากระจายตัวในเนื้อยางได้ดีกว่าการเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกา ช่วยลดปัญหาการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคซิลิกา แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ยางที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลดี แต่ยังมีข้อเสียอีกหลายประการ เช่น ซิลิกาเจดมีสมบัติในการดูดความชื้น Cure time สูงเกินไป และยางมีความแข็งมาก จึงทำให้ใช้พลังงานในการขึ้นรูปสูง

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการเตรียมซิลิกาเจด ที่มีรูพรุน โดยกระบวนการ Sol-Gel ซึ่งกระบวนการ Sol-Gel นี้ต้องเกิดไปพร้อมกับการเกิดการจับตัวเป็นก้อนของเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติ ยางแห้งที่ได้จากการจับตัวกันของเนื้อยางในน้ำยาง จะเป็นยางแห้งที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกาเจด (In-situ nanoporous silica gel/NR reinforcement) ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะสามารถนำของเหลือใช้ในภาคเกษตรกรรมมา ใช้ประโยชน์ เพิ่มคุณค่าและมูลค่าให้กับแฉกและยางธรรมชาติ ยางที่ได้จะมีสมบัติพิเศษในเรื่องความแข็งแรงเชิงกล ความทนทานต่อการขีดถู และคุณสมบัติทางความร้อนที่สูงขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังศึกษาในส่วนของกระบวนการนำยางแห้งที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกาเจดมาทำการเติมสารเสริมแรงร่วมอีก 2 ชนิดคือ ซิลิกาแบบตกตะกอนและเถ้าลอย เพื่อทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางสัณฐานวิทยา จากตรงนี้เราสามารถเพิ่มเติมสารตัวเติมอื่นได้ อยู่ในขั้นของการศึกษาต่อยอดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อนำซิลิกาจากแกลบมาใช้ให้เป็นประโยชน์ ด้านเสริมแรงเชิงกลให้กับยางธรรมชาติ ในสภาพที่มีการกระจายตัวได้ดีในเนื้อยาง

1.2.2 เพื่อนำยางคอมพาวด์และยางที่วัลคาไนเซตมาทำการศึกษา Cure characteristic สมบัติเชิงกล โครงสร้างสัณฐาน และการบวมตัวของยางธรรมชาติที่มี Silica ที่สกัดจากแกลบผสมอยู่

1.2.3 เพื่อนำยางคอมพาวด์และยางที่วัลคาไนเซตมาทำการศึกษา Cure characteristic สมบัติเชิงกล โครงสร้างสัณฐาน และการบวมตัวของยางธรรมชาติที่มี Silica จากแกลบผสมอยู่ พร้อมทั้งเพิ่มเติมในส่วนของสารเสริมแรงร่วมซึ่งประกอบด้วยซิลิกาเกรดตกตะกอนหรือเถ้าลอยในส่วนที่ทำการปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ยางธรรมชาติที่ใช้จะเตรียมมาจากน้ำยางที่มีความเข้มข้น 60% DRC
- 1.3.2 ซิลิกาที่ใช้ในยางระบบ Sol-Gel จะมาจากการสกัดจากเถ้าแกลบโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 M
- 1.3.3 ยางคอมพาวด์ที่ใช้ระบบการผสมแบบดั้งเดิมจะใช้ซิลิกาที่เป็นเกรดตกตะกอน (precipitated silica)
- 1.3.4 จะทำการศึกษาปริมาณซิลิกาที่เติมลงไปตั้งแต่ 0 ถึง 40 phr
- 1.3.5 สารควบแน่นที่ใช้คือ Si-69
- 1.3.6 เถ้าลอยที่ใช้มาจากเหมืองแม่เมาะ ขนาดอนุภาคที่ใช้อยู่ในช่วง 25–38 ไมโครเมตร

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
 - 1.4.1.1 วิเคราะห์เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยของตน
 - 1.4.1.2 ศึกษาข้อมูลต่างๆของซิลิกา และ เถ้าลอย
- 1.4.2 ออกแบบวิธีการทดลอง และวางแผนการทดลอง
 - 1.4.2.1 ออกแบบและวางแผนการทดลองสำหรับงานวิจัย
 - 1.4.2.2 จัดซื้อสารเคมี และวัสดุที่ต้องใช้สำหรับงานวิจัย
- 1.4.3 ดำเนินงานวิจัย
 - 1.4.3.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต
 - 1.4.3.1.1 ทำการสกัดสารละลายโซเดียมซิลิเกตจากเถ้าแกลบโดยใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์
 - 1.4.3.1.2 ทำการหาปริมาณของซิลิกาในสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยการตวงมาปริมาณ 25 มิลลิลิตร ทำการปรับ pH จนได้ pH เป็น 7 จากนั้นนำซิลิกาเจลที่ได้ล้างด้วยน้ำกลั่น 5 ครั้ง เพื่อล้างเกลือโซเดียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออก หลังจากทำการกรองด้วยเครื่องดูดสุญญากาศให้นำซิลิกาเจลที่ได้ไปทำการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการชั่งน้ำหนัก

1.4.3.2 การเตรียม Sol-Gel NR/Si composite

1.4.3.2.1 ทำการเจือจางน้ำยางข้นให้เหลือ 30% เนื้อยางแห้งและสารให้ความเสถียร (Stabilizer) น้ำยางดังกล่าวโดยเติม Igepal ลงไป 3% ต่อเนื้อยาง 100 กรัม แล้วกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการระเหยเอมโมเนีย

1.4.3.2.2 ผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตในน้ำยางโดยมีการปรับปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่างๆกัน เพื่อให้ปริมาณซิลิกาที่มีอยู่ในยางที่ตกตะกอนได้เป็น 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 phr ตามลำดับ

1.4.3.2.3 ทำการตกตะกอนพร้อมทั้งทำให้ซิลิกาเกิดการ gel ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก เพื่อปรับ pH ให้เป็น 7 แล้วนำมาตกตะกอนใน Methanol อีกครั้งเพื่อให้ยางตกตะกอนได้สมบูรณ์ จากนั้นล้างเกลือโซเดียมซัลเฟต ออกจากตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่น 5 ครั้ง โดยตรวจสอบน้ำทิ้งด้วยสารละลายแบเรียมไนเตรต หากเกิดตะกอนสีขาวของแบเรียมซัลเฟตขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่ายังมีเกลือโซเดียมซัลเฟตหลงเหลืออยู่ หลังจากนั้นนำตะกอนที่สะอาดที่กรองได้ไปอบให้แห้ง

1.4.3.2.4 นำตัวอย่างของยางที่อบแห้งแล้วในแต่ละสูตรมาทำการวิเคราะห์ปริมาณซิลิกาด้วยเทคนิค TGA

1.4.3.2.5 ทำการผสมสารเติมแต่งกับยางในแต่ละสูตร ที่ทำการตกตะกอนมาด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง โดยสูตรการผสมจะศึกษาในระบบ Conventional

1.4.3.2.6 ทำการทดสอบหา cure characteristics ด้วยเทคนิค MDR

1.4.3.2.7 ทำการ Vulcanized ยางคอมพาวด์ด้วยเทคนิค Compression molding

1.4.3.3 การเตรียม NR/Precipitated Si composite

1.4.3.3.1 ทำการเจือจางน้ำยางข้นให้เหลือ 30% เนื้อยางแห้งและสารให้ความเสถียร (Stabilizer) น้ำยางดังกล่าวโดยเติม Igepal ลงไป 3% ต่อเนื้อยาง 100 กรัม แล้วกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการระเหยเอมโมเนีย แล้วนำไปตกตะกอนใน methanol

1.4.3.3.2 นำยางที่จับตัวได้ไปรีดพร้อมล้างน้ำให้เป็นแผ่นแล้วนำไปอบให้แห้ง

1.4.3.3.3 นำยางธรรมชาติที่เตรียมได้ไปทำการผสมสารเติมแต่งด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง โดยสูตรการผสมจะศึกษาในระบบ Conventional

1.4.3.3.4 ทำการทดสอบหา Cure characteristics ด้วยเทคนิค MDR

1.4.3.3.5 ทำการ Vulcanized ยางคอมพาวด์ด้วยเทคนิค Compression molding

1.4.3.4 การเตรียม Sol-Gel 30Si/NR+Silane69 treated PSi composite

1.4.3.4.1 ทำการปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกาแบบตกตะกอนโดยใช้ Si-69 โดยใช้เอทานอล 400 มิลลิลิตร ผสมกับ Si-69 13 กรัม กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนลงไป 100 กรัม ทำการกวนต่อเป็นเวลา 15 นาที ของผสมที่ได้ให้นำไปอบแห้งที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

1.4.3.4.2 ทำการเตรียมยาง Sol-Gel NR/30Si เช่นเดียวกับข้อ 1.4.3.2

1.4.3.4.3 ทำการผสมสารเติมแต่งและยางในสูตร Sol-Gel 30Si/NR ที่ทำการตกตะกอนมาพร้อมทั้งเติมซิลิกาแบบตกตะกอนที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่ ลงไป เป็นสารตัวเติมที่สองด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง โดยจะเติมเพิ่มเข้าไปในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ทำการผสมกับสารเติมแต่งและซิลิกาแบบตกตะกอนที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเป็นสารตัวเติมชนิดเดียวด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง โดยจะเติมเพิ่มเข้าไปในอัตราส่วน 30, 40, 50 และ 60 phr โดยสูตรการผสมจะศึกษาในระบบ Conventional

1.4.3.4.4 ทำการทดสอบหา cure characteristics ด้วยเทคนิค MDR

1.4.3.4.5 ทำการ Vulcanized ยางคอมพาวด์ด้วยเทคนิค Compression molding

3.5 การเตรียม Sol-Gel NR/30Si+Fly ash (treated and untreated) composite

1.4.3.5.1 ตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

1.4.3.5.2 ทำการคัดแยกขนาดของเถ้าลอยโดยใช้ Sieve โดยเลือกชั้นที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 25-38 ไมโครเมตร

1.4.3.5.3 ทำการปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าลอยโดยใช้ Si-69 โดยใช้เอทานอล 100 มิลลิลิตร ผสมกับ Silane-69 2 กรัม กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการเติมเถ้าลอยลงไป 100 กรัม ทำการกวนต่อเป็นเวลา 15 นาที ของผสมที่ได้ให้นำไปอบแห้งที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

1.4.3.5.4 ทำการเตรียมยาง Sol-Gel NR/30Si เช่นเดียวกับข้อ 1.4.3.2

1.4.3.5.5 ทำการผสมสารเติมแต่งและยางในสูตร Sol-Gel NR/30Si ที่ทำการตกตะกอนมาพร้อมทั้งเติมเถ้าลอยที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่หรือที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว ลงไปเป็นสารตัวเติมที่สองด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง โดยคิดเทียบจากปริมาณของซิลิกาที่มีอยู่ในเถ้าลอย โดยจะเติมในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และสูตรการผสมจะศึกษาในระบบ Cconventional

1.4.3.5.6 ทำการทดสอบหา cure characteristics ด้วยเทคนิค MDR

1.4.3.5.7 ทำการ Vulcanized ยางคอมพาวด์ด้วยเทคนิค Compression molding

1.4.3.6 การทดสอบอื่นๆ

1.4.3.6.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) โดยใช้ Tensile testing, Tear testing, Hardness testing, และ Abrasion testing

1.4.3.6.3 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) โดยใช้ SEM (Scanning electron microscope)

1.4.3.6.4 การศึกษาการบวมตัว (Swelling)

1.4.4 ประมวลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

1.4.5 สรุปผลการวิจัย

1.4.6 รายงานผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์สูงสุดจากของเหลือจากอุตสาหกรรมการเกษตรและสามารถได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่มีการเสริมแรงจากวัสดุที่มาจากธรรมชาติ

1.5.2 ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกาในระดับนาโน

1.5.3 ผลที่ได้จาก Hybrid filler จะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของทั้ง 2 ตัว ที่สามารถส่งเสริมกันในการเสริมแรงได้

1.5.4 ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ผลจากการวิจัย โดยเน้นผลของ Silica gel ที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แกลบ (Rice husk) [3-4]

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแกลบ

ในภาคการเกษตรซึ่งเป็นอาชีพหลักของคนไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ภายหลังจากการสีข้าวเปลือกแล้วจะได้ผลผลิตออกมาเป็น "ข้าวสารและแกลบ" โดยปริมาณแกลบที่ได้คิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณข้าวเปลือกที่ผลิตได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในปีหนึ่งๆจะมีปริมาณแกลบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสีข้าวในปริมาณมาก ซึ่งบางส่วนนำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นในเล้าไก่ ใช้ผสมดินเป็นปุ๋ยช่วยในการเจริญเติบโตของพืช ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนแก่ไอน้ำในอุตสาหกรรมการเกษตร และใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือในการอบข้าว ซึ่งภายหลังจากการเผา 75% ของแกลบข้าวนั้นเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ อีก 25% จะกลายเป็นขี้เถ้าแกลบข้าวเรียกกันทั่วไปว่า Rice husk Ash (RHA) ซึ่ง 85-90% ของ RHA นั้นคือ Amorphous silica [3] ด้วยเหตุนี้จึงถูกนำไปใช้เป็นแหล่งในการเตรียมธาตุซิลิกอนและสารประกอบซิลิกอนจำนวนหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งซิลิกา, ซิลิกอนคาร์ไบด์และซิลิกอนไนไตรด์ ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมให้เป็นวัสดุที่มีประโยชน์เพื่อหลีกเลี่ยงการทำลายสิ่งแวดล้อม องค์ประกอบหลักของแกลบข้าวแสดงไว้ดังตารางที่ 1

แกลบที่ได้มีอนุภาคสีดำปนเทาซึ่งเป็นผลมาจากเผาไหม้ของคาร์บอนของแกลบในอากาศ โดยทั่วไปจะก่อให้เกิดแถซิลิกาซึ่งมีตั้งแต่สีเทาจนดำขึ้นอยู่กับสารเจือปนอนินทรีย์และสารที่ไม่เกิดการเผาไหม้ ได้แบ่งประเภทของแถแกลบเป็น แถที่มีคาร์บอนสูง (High-carbon char), แถสีเทาที่มีคาร์บอนต่ำ (Low-carbon gray ash) และแถสีขาวที่ไม่มีคาร์บอน (Carbon-free pink หรือ White ash)

แกลบข้าวประกอบด้วยเส้นใย Floristic โปรรตีน และมีหมู่ฟังก์ชันของ Carboxyl , Hydroxy , Amidogen เป็นต้น ซึ่งทำให้สามารถใช้เป็นตัวดูดซับได้ และเมื่อเผาแกลบข้าวโดยควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ขี้เถ้าที่ได้จะมีสีดำ (Black rice husk ash : BRHA) นั้นจะประกอบด้วย Amorphous silica แต่ถ้าทำการเผาเกิน 850 องศาเซลเซียส แล้วขี้เถ้าที่ได้จะมีสีขาว (White rice husk ash : WRHA) จะประกอบด้วย Crystalline silica โดย Amorphous silica มี

ขนาดอนุภาค 25 ไมโครเมตร มีสีเทา และ pH เท่ากับ 8 และเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกันจะทำให้เกิดส่วนประกอบอื่นๆ ที่ต่างกันไปดังตารางที่ 2 [4]

ขนาดของอนุภาคแกลบข้าวที่มีขนาดเล็กมาก เพียง 25 ไมโครเมตร และมีรูพรุนจำนวนมาก ทำให้มีความสามารถในการดูดซึมและกระจายตัวได้ดีเมื่อนำไปผสมกับพลาสติก ทำให้พลาสติกที่ผสมซีเถ้าแกลบข้าว (RHA) มีความแข็งแรงมากขึ้น ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น [3] ซีเถ้าแกลบข้าว (RHA) ถือได้ว่าเป็น pozzolan (วัสดุที่มี Silica ประกอบอยู่มากกว่า 85%) ที่ดี จึงนิยมนำมาใช้ในการเสริมแรง นอกจากนั้นพบว่า วัสดุที่นำเอาซีเถ้าแกลบข้าว (RHA) ไปผสมนั้นยังมีการซีมน้ำที่ต่ำ ทนต่อการกัดและมีความสามารถในการรับแรงที่เพิ่มขึ้น 10-20% ซึ่งสมบัติดังกล่าวนี้ให้ผลเหมือนกับการใช้ผง Silica ซึ่งมีราคาสูงถึง 800 ดอลลาร์ต่อหนึ่งตัน สมบัติทางกายภาพของ WRHA, BRHA, Silica และ Carbon black แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 แสดงเปอร์เซ็นต์สารประกอบในแกลบข้าว [3]

ชนิด	Cellulose	Lignin	Silica
แกลบข้าว	50%	30%	20%

ตารางที่ 2 แสดงถึงคุณสมบัติทางเคมีของ WRHA และ BRHA [4]

	WRHA	BRHA
Chemical composition (%)		
CaO	0.1	0.1
MgO	0.4	0.2
Fe ₂ O	0.1	0.0
K ₂ O	1.6	1.1
Na ₂ O	0.1	0.1
Al ₂ O ₃	trace	trace
P ₂ O ₅	trace	trace
SiO ₂ (silica)	96.2	54.1
Lost on ignition (LOI)	1.6	44.5

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติทางกายภาพของ WRHA, BRHA, silica และ Carbon black [4]

	WRHA	BRHA	Silica	Carbon black
Mean particle size (μm)	5.4	2.4	0.011–0.019	0.026–0.030
Surface area (m^2/g)	1.4	26.4	170	98.9
Density (g/cm^3)	2.2	1.8	2.2	1.8

2.1.2 ซิลิกาจากเถ้าแกลบ

ซิลิกาที่อยู่ในแกลบนั้นเกิดขึ้นจากการดูดซึมธาตุอาหารของต้นข้าว โดยรากของข้าวก็จะทำการดูดซึมธาตุอาหารต่างๆที่จำเป็นรวมทั้งธาตุซิลิคอน (Si) ด้วย จากนั้นสารละลายซิลิคอนก็จะมาถูกสะสมอยู่ที่บริเวณผิวด้านนอกของเปลือกเมล็ดข้าวและกลายเป็นซิลิกาที่รวมตัวกับเส้นใยประเภทเซลลูโลสและลิกนิน เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงของเปลือกข้าวหรือที่เราเรียกว่าแกลบ

องค์ประกอบของแกลบนั้นประกอบด้วยสารอนินทรีย์อยู่ประมาณ 20-25% เซลลูโลส 40-50% ลิกนิน 19-30% และน้ำตาลประมาณ 17-26% โดยในส่วนของสารอนินทรีย์นั้น องค์ประกอบหลักก็คือซิลิกา ซึ่งมีช่วงอยู่ตั้งแต่ 85-99% นอกจากนั้นยังมี Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO และอื่นๆซึ่งปริมาณซิลิกาและมลทินเหล่านี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่เพาะปลูกข้าว ชนิดของข้าวและปุ๋ยที่ใช้

ซิลิกาที่ได้จากแกลบที่ผ่านกระบวนการล้างและเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสนั้นจะยังไม่มีรูปผลึกที่ชัดเจน เป็นอสัณฐานซิลิกา (Amorphous phase) มี $%SiO_2$ อยู่สูงมาก (>99%) มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) สูงมาก มีขนาดของอนุภาคที่ละเอียดมาก (ต่ำกว่า 5 ไมโครเมตร) เมื่อเทียบกับซิลิกาที่ได้จากแหล่งวัตถุดิบอื่นๆเช่น ซิลิกาที่ได้จากการบดทราย Quartz, Flint รวมทั้งเมื่อเทียบกับอสัณฐานซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตเล็กๆพวก ไดอะตอมที่ตายแล้วตกตะกอนทับถมกันมานานหลายร้อยล้านปี ซึ่งอสัณฐานซิลิกาเหล่านี้เราเรียกว่า ไดอะตอมไมท์ (Diatomite)

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ซิลิกาที่มีอยู่ในแกลบเทียบกับส่วนอื่นของต้นข้าว และพืชชนิดอื่นๆ แกลบก็ยังมีปริมาณของซิลิกาสูงกว่าพืชชนิดอื่นอยู่มาก โดยในฟางข้าวมีซิลิกาอยู่ 82 % เปลือกข้าวโพดมีซิลิกาอยู่ 54% ไม้ไผ่มีซิลิกาอยู่ 57% เป็นต้น

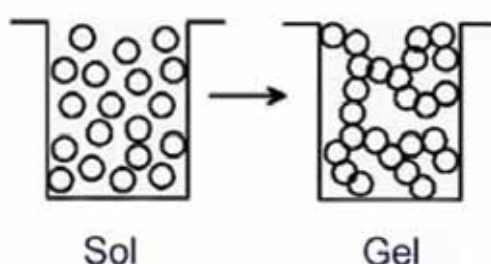
กระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบนั้นสามารถใช้แกลบดิบหรือเถ้าแกลบที่ผ่านการเผา แต่การจะทำให้ได้ซิลิกาบริสุทธิ์จากเถ้าแกลบนั้นจะทำได้ยากกว่าและซิลิกาที่ได้จะมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าซิลิกาที่สังเคราะห์จากแกลบดิบมาก

หลังจากผ่านขั้นตอนการล้างเพื่อกำจัดพวก Alkali oxide ให้ออกไปจากแกลบแล้วก็นำแกลบไปอบแห้งและทำการเผา โดยอุณหภูมิในการเผาและเวลาในการเผาจะส่งผลต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วย เมื่อผ่านกระบวนการเผาแล้วก็จะได้ผงซิลิกาสีขาวที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวิธีโซลเจล [5]

2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไป

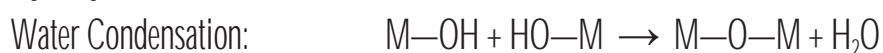
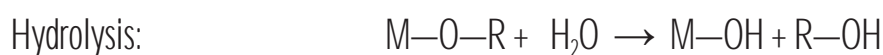
กระบวนการโซลเจลเป็นกระบวนการผลิตที่มีประโยชน์ในการผลิตเซรามิก และแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปกระบวนการโซลเจลนั้นเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า "Sol" ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมโครเมตร ให้กลายเป็นของแข็งที่เรียกว่า "Gel" ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงการเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล [5]

มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนวิจัยวัสดุ

ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซลเจลมี 3 ปฏิกิริยา คือ Hydrolysis, Water condensation และ Alcohol condensation ดังสมการ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ ค่า pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วน โมลของน้ำและโลหะและอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในสถานะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน

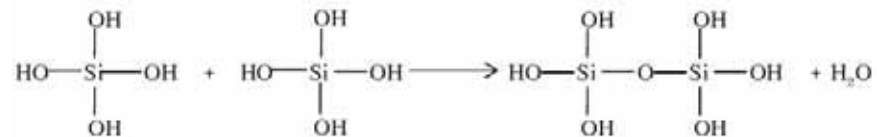


เมื่อ M แทนโลหะ Si, Zr, Ti, Al, Sn, Ce และ OR แทน Alkoxy group

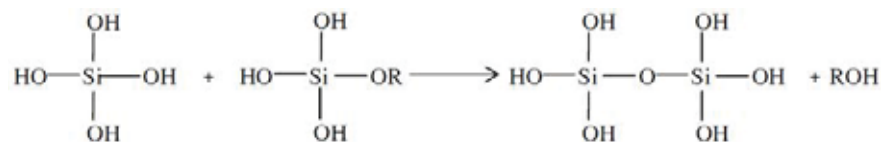
ขั้นตอนแรกของการทำโซลเจล คือ การผสมสารตั้งต้น (Precursor) กับน้ำ สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซลเจล เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น Metal Alkoxide เป็นสารตั้งต้นที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี เช่น Tetramethoxysilane (TMOS) และ Tetraethoxysilane (TEOS) ส่วน Alkoxide ชนิดอื่นๆ เช่น Aluminate, Titanate และ Borate มีใช้กันแพร่หลายโดยมักจะใช้ร่วมกับ TEOS เช่น $\text{Si}(\text{OR})_4$ ซึ่ง R คือ CH_3 (TMOS), C_2H_5 (TEOS) หรือ C_3H_7 จะเกิดปฏิกิริยา Hydrolysis ดังสมการ



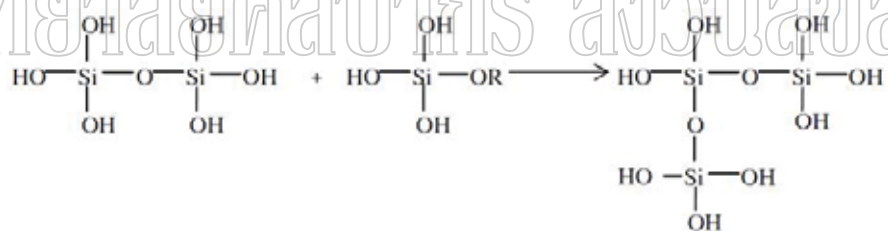
และในขณะที่เดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาควบแน่น : Water Condensation Reaction



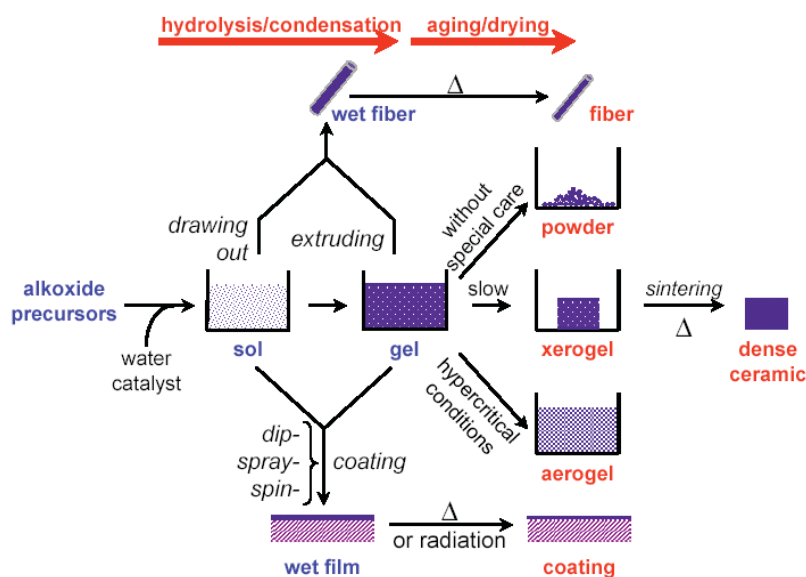
หรือ Alcohol Condensation Reaction



สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นต่อไปจนกลายเป็น Silica Network อยู่ในสภาวะที่เรียกว่า Gel จึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า ปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน



เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งและกระบวนการขึ้นรูปจะได้ผลิตภัณฑ์ใน รูปแบบต่างๆ เช่น Fiber, Aerogel, Xerogel, powder และ Coating film เป็นวัตถุดิบสำหรับ อุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไปดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงกระบวนการโซลเจล [5]

การนำเทคโนโลยีโซลเจล (Sol-Gel Technology) มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น ผงละเอียด, ฟิล์มบาง, เส้นใย และวัสดุก้อน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆต่อไป เช่น แก้วซิลิกา สารเคลือบป้องกันการสึกกร่อน การสะท้อนแสง และการติดเกาะผิวของน้ำ เป็นต้น เทคโนโลยีโซลเจลจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสารหรือวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะตัวหรือต้องการความบริสุทธิ์สูง หรือแม้แต่การผลิตสารหรือวัสดุทดแทนการใช้แร่หรือทรัพยากรธรรมชาติหายากและมีอยู่จำกัดเป็นวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการโซลเจลจะมีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากเป็นการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุลทำให้สามารถกำหนดสมบัติต่างๆตามต้องการได้ง่ายนับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์และอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น เทคโนโลยีโซลเจลนี้สามารถทำได้ตั้งแต่ห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรมซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้จริง

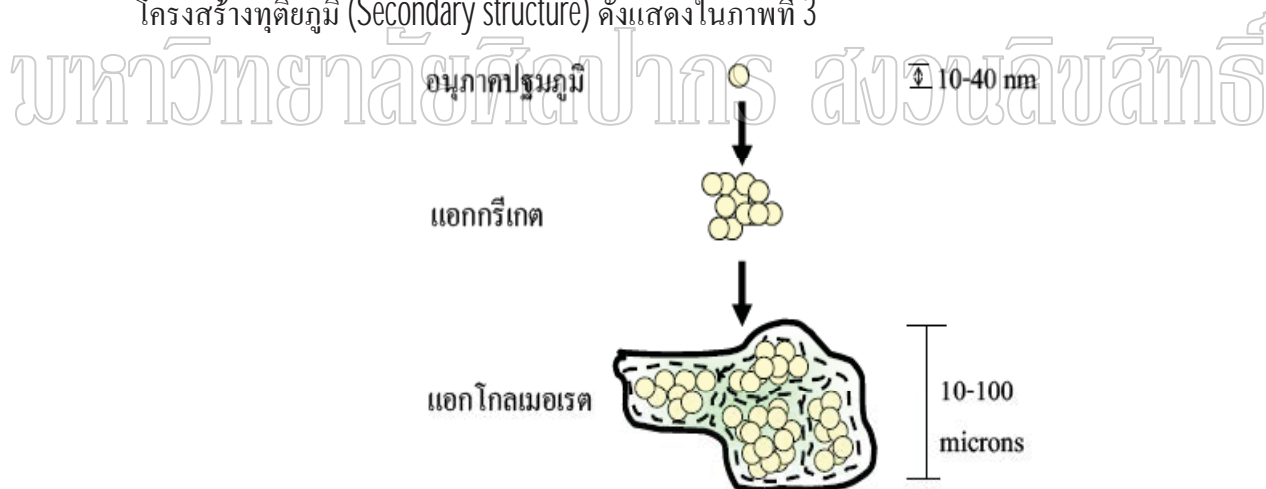
2.3 ซิลิกา (Silica) [6]

ปัจจุบัน ซิลิกาชนิดที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางคือ ซิลิกาแบบตกตะกอน (precipitated silica) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายเกรด ซิลิกาแต่ละเกรดจะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ (Primary particle size) หรือพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) โดยทั่วไปซิลิกาเกรดที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กหรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจะช่วยเสริมแรงให้แกยางได้ดีกว่าซิลิกาเกรดที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิใหญ่หรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ นอกจากนี้ปัจจัยดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีปัจจัยสำคัญอีกอย่างที่มีอิทธิพลต่อการเสริมแรงของซิลิกา นั่นคือ ลักษณะ

ทางเคมีของพื้นผิวซิลิกา (Surface chemistry) เพราะซิลิกา ทุกเกรดที่นำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยาง ล้วนแล้วแต่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) อยู่ที่พื้นผิวในปริมาณมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลนี้ค่อนข้างว่องไว ต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีและมีความเป็นขั้วค่อนข้างสูง จึงส่งผลทำให้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีความ เป็นขั้วสูง ด้วยเหตุนี้ ซิลิกาจึงผสมให้เข้ากับยางชนิดต่าง ๆ ได้ยากเพราะยางส่วนใหญ่จะไม่มีขั้ว หรือมีความเป็นขั้วต่ำ เมื่อผสมซิลิกาลงไปในยางจึงทำให้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างยางกับซิลิกา มีค่าค่อนข้างต่ำประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาจึงด้อยกว่าเขม่าดำเมื่อเปรียบเทียบที่พื้นที่ผิว เท่ากัน

2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของซิลิกา

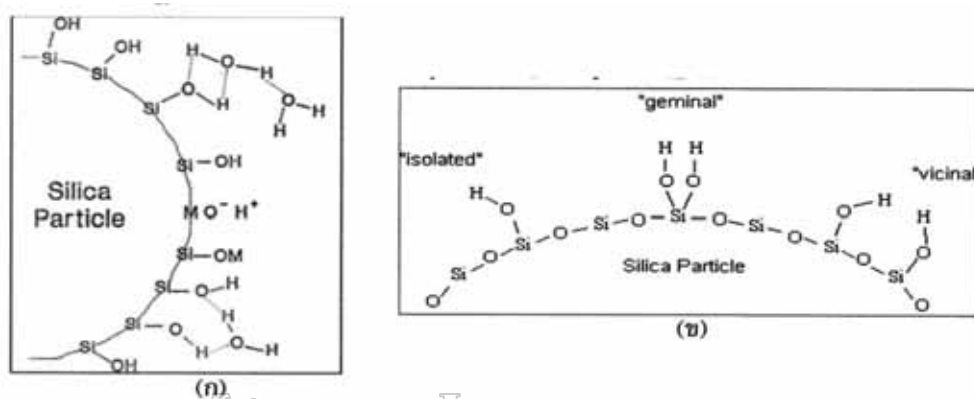
โครงสร้าง : ซิลิกาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิอยู่ใน ช่วง 10-40 นาโนเมตร ซิลิกาจะไม่อยู่อย่างเดี่ยว ๆ ในรูปของอนุภาคปฐมภูมิ แต่จะจับกลุ่ม รวมกันเป็นก้อนที่เรียกว่าแอกกรีเกต (Aggregate) เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary structure) ซึ่งโครงสร้างนี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสม นอกจากนี้ แอกรีเกตของซิลิกา ยังชอบจับกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่มากขึ้น เรียกว่าแอกโกลเมอเรต (Agglomerate) เกิดเป็น โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary structure) ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แบบจำลองแสดงลักษณะ โครงสร้างของซิลิกา [6]

พื้นที่ผิวจำเพาะ: พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการบ่งบอกถึง ประสิทธิภาพของการเสริมแรงในยาง ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และให้การเสริมแรงที่ดี เทคนิคที่นิยมใช้ในการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด (Total specific surface area) ของสารตัวเติมคือเทคนิคการดูดซับไนโตรเจนหรือที่รู้จักกันดีว่าเทคนิค BET (พัฒนาขึ้นโดย Brunauer Emmett และ Teller)

ลักษณะทางเคมีของพื้นผิว: ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างที่ควบคุมระดับการเสริมแรงของซิลิกาเพราะลักษณะทางเคมีของพื้นผิวจะเป็นตัวบ่งชี้ระดับของอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา โดยทั่วไป บนพื้นผิวของซิลิกาจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลกลุ่มอยู่อย่างหนาแน่น (4-5 หมู่ต่อ 100 \AA^2) ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกานี้จะเกาะอยู่ในหลายลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4 หมู่ไฮดรอกซิลจะทำให้พื้นผิวซิลิกามีความเป็นกรดและมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หมู่ไฮดรอกซิลสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ ที่มีอยู่ในยางคอมพาวด์ได้ เช่น สารคู่ควบไฮดรอกซิล น้ำ หรือ โกลคอลล เป็นต้น



มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนเลขสิทธิ์
ภาพที่ 4 (ก) แสดงหมู่ฟังก์ชันเคมีที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกา และ
(ข) รูปแบบต่างๆของหมู่ไฮดรอกซิล [6]

2.3.2 ปัญหาของการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

เนื่องจากบนพื้นผิวซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลในปริมาณมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลนี้จะทำให้อนุภาคของซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกัน (Filler-filler interaction) สูง ซิลิกาจึงอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (ที่เรียกว่าแอกโกลเมอเรต) อย่างเหนียวแน่นเพราะอันตรกิริยาหรือแรงดึงดูดที่ยึดกลุ่มก้อนซิลิกาเข้าด้วยกันคือพันธะไฮโดรเจน (H-bonds) ซึ่งมีความแข็งแรงค่อนข้างมากด้วยเหตุนี้ ซิลิกาจึงแตกตัว (Disperse) และกระจายตัว (Distribute) ในยางได้ยากกว่าเขม่าดำ สำหรับในกรณีที่เติมซิลิกาลงไป ในยางในปริมาณค่อนข้างมาก กลุ่มก้อนของซิลิกาก็จะเข้ามาอยู่ใกล้กันมากจนทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกลุ่มก้อนของซิลิกาด้วยกันเอง เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า "โครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติม (Filler-filler network)" ซึ่งโครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติมนี้จะทำใหยางคอมพาวด์มีความหนืดสูงขึ้น ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปด้วยความยากลำบากและทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตมากยิ่งขึ้น การเติมสารเติมแต่งบางชนิดที่สามารถเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลได้ง่ายลงไป จะช่วยทำให้กลุ่มก้อนของซิลิกาแตกตัวออกได้ง่าย

ยิ่งขึ้น ความเหนียวของยางคอมพาวด์ก็จะลดลง ทำให้กระบวนการผสมและการขึ้นรูปเป็นไปได้ง่ายขึ้น
 ยิ่งขึ้น ตัวอย่างของสารเติมแต่งดังกล่าว ได้แก่ ซิงค์ออกโตเอต (Zinc octoate) หรือ เฮกซะเมทิลีน
 เตตรามีน (HEXA) รวมถึงสารตัวเร่งปฏิกิริยาของรูปในกลุ่มกัวนินีน เช่น ไดฟีนิลกัวนินีน (DPG)
 เป็นต้น

นอกจากนี้ หมู่ไซลันอลบนพื้นผิวซิลิกายังสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้
 ดี โดยทั่วไปซิลิกาจะมีความชื้นประมาณ 4-7% (ปริมาณความชื้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับ
 ความชื้นของสิ่งแวดล้อม) ซึ่งความชื้นที่จับอยู่กับหมู่ไซลันอล บนพื้นผิวซิลิกานี้ นอกจากจะทำให้
 ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ยากขึ้นเล็กน้อยแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาของ
 ยางได้อีกด้วย โดยทั่วไป ถ้าปริมาณความชื้นในซิลิกาสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการคงรูปยางในระบบที่ใช้
 กัมมะถัน (ทั้ง Scorch time และ Vulcanization time) ก็จะยาวขึ้น เพราะซิลิกาที่อิมมิดด้วยน้ำจะ
 หน่วงปฏิกิริยาของรูป ทำให้ต้องใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น อย่างไรก็ดี ความชื้นบางส่วนจะถูกไล่
 ออกไปในระหว่างกระบวนการผสมเคมียางเพราะอุณหภูมิของยางในระหว่างการผสมเคมีจะสูง
 มาก (>100 องศาเซลเซียส) ทำให้น้ำหรือความชื้นบางส่วนระเหยออกไป ด้วยเหตุนี้ การผสมยางที่
 อุณหภูมิแตกต่างกันก็สามารถทำให้เกิดความแปรปรวนของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของรูปได้
 เช่นกัน

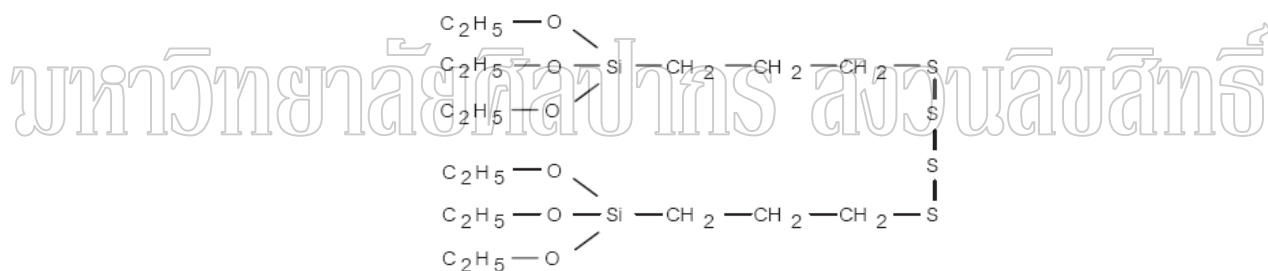
อนึ่ง ปัญหาสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มักพบเมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมคือปัญหาเรื่อง
 การคงรูปยาง เพราะบนพื้นผิวซิลิกามีหมู่ไซลันอลที่สามารถดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาของรูปที่มี
 ฤทธิ์เป็นด่าง เช่น DPG รวมถึงสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสี (Zn complex) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสาร
 กระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมะถัน การดูดซับดังกล่าวจะทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือ
 สารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีมีปริมาณลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีระดับของการคงรูปลดลง
 ด้วยเช่นกัน โดยทั่วไป ผู้ผสมเคมียางสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้โดยการเติมสารประกอบในกลุ่ม
 ไกลคอลหรือ กลุ่มเอมีนลงไปเพราะสารประกอบเหล่านี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลันอลบน
 พื้นผิวของซิลิกา ทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีที่ถูกดูดซับโดยหมู่
 ไซลันอลมีปริมาณลดลง ปฏิกิริยาของรูปก็จะเกิดได้เร็วขึ้น ตัวอย่างที่สำคัญของสารประกอบเหล่านี้
 ได้แก่ ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ไตรเอทธานอลามีน และ เฮกซะเม
 ทิลีนเตตรามีน (HEXA) เป็นต้น นอกจากการเติมสารประกอบดังกล่าวแล้ว การปรับลำดับการเติม
 สารเคมีลงไปในเรื่องผสม เช่น การเติม ZnO ลงไปในช่วงท้ายของการผสมก็จะช่วยลดปัญหาการ
 ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีได้เช่นกัน

การเติมสารประกอบในกลุ่มดังกล่าวนอกจากจะช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการ
 เกิดปฏิกิริยาของรูปแล้ว สารประกอบเหล่านี้ยังช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาอีกด้วย

(ช่วยให้โครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกาถูกทำลายได้ง่ายขึ้น) ซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายตัวได้ง่ายขึ้น ความหนืดของยางคอมพาวด์ก็จึงลดลง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างยิ่งขึ้น ปริมาณของสารเคมีที่แนะนำให้ใช้นั้นจะขึ้นโดยตรงกับปริมาณของซิลิกา เช่น ใช้ PEG ประมาณ 8-10 ส่วน โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับปริมาณของซิลิกา

2.3.3 บทบาทของสารคู่ควบไซเลน (Silane)

จากปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาและลดปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต เมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม เทคโนโลยีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือการใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) โดยทั่วไป การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกาสูงขึ้นเพราะสารคู่ควบไซเลนประกอบด้วย หมู่ฟังก์ชันเคมี 2 หมู่ที่แตกต่างกัน คือหมู่แอลคอกซี (Alkoxy group) เช่น หมู่เมทอกซี (-OCH₃) หรือ หมู่เอทอกซี (-OC₂H₅) และหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ (Organo-functional group) ดังแสดงในภาพที่ 5

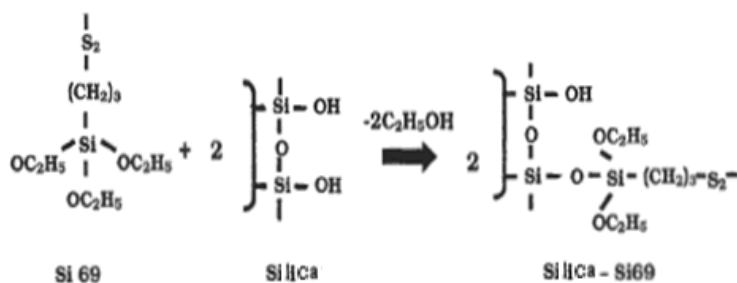


ภาพที่ 5 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน Silane 69 [6]

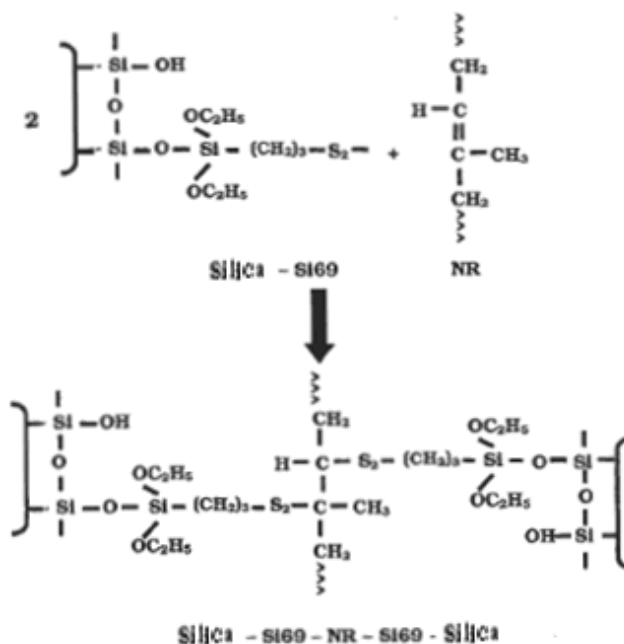
เมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงไป หมู่แอลคอกซีซึ่งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของโมเลกุลจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกาในระหว่างกระบวนการผสมเกิดเป็นพันธะไซลอคเซนที่มีความเสถียรและมีการปลดปล่อยแอลกอฮอล์ออกมา ทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกันลดลงเนื่องจากปริมาณหมู่ไซลานอลที่ลดลงจากการเกิดปฏิกิริยากับสารคู่ควบไซเลนทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาคซิลิกานั้นมีกำลังอ่อนลง ดังในกลไกปฏิกิริยาของภาพที่ 6 และ 7 ซิลิกาจึงสามารถแตกตัวและกระจายตัวในยางได้อย่างยิ่งขึ้น ยางคอมพาวด์ที่ได้ก็จึงมีความหนืดลดลง สามารถไหลและขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ส่วนหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะช่วยทำให้ซิลิกาเข้ากับยางได้ง่ายในระหว่างกระบวนการผสมเพราะหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์นี้มีความเป็นขั้วต่ำจึงเข้ากับยางได้ง่าย นอกจากนี้ หมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ของสารคู่ควบไซเลนส่วนใหญ่ยังมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งในระหว่างการอบคงรูป กำมะถันในสารคู่ควบไซเลนจะเข้าไปมีส่วน

ร่วมในปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization reaction) เกิดเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น ด้วยเหตุนี้ สารคู่ควบไซเลนจึงทำหน้าที่เปรียบเสมือนสะพานเชื่อมระหว่างซิติลากับยาง ทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับซิติลสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิติลจึงสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจึงส่งผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ดีขึ้น โดยเฉพาะค่าโมดูลัสความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขัดถู เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปปริมาณเล็กน้อยจะช่วยให้ยางคงรูปมีความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตก (Cut growth resistance) สูงสุด แต่ในกรณีที่ต้องการยางคงรูปที่มีความต้านทานต่อการขัดถูสูงสุดก็จำเป็นต้องเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปปริมาณมากขึ้น นอกจากสมบัติเชิงกลแล้ว สารคู่ควบไซเลนยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ของยางคงรูปอีกด้วย โดยเฉพาะการลดความร้อนสะสม (Heat build up) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน ตัวอย่างของสารคู่ควบไซเลนที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ ไตรเอทอกซีไซลิลโพรพิลเตตราซัลไฟด์ (Bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide, Si-69) เมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (Mercaptopropyl-trimethoxysilane, A-189) และไทโอไซยานาโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-thiocyanato-propyl-triethoxysilane, Si-

264) เป็นต้น



ภาพที่ 6 แสดงปฏิกิริยาขึ้นในการปรับปรุงผิวของซิติลด้วย Silane 69 [7]



ภาพที่ 7 แสดงปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาที่ปรับปรุงด้วย Silane-69 แล้ว กับยางธรรมชาติ [7]

2.4 เถ้าลอย (Fly ash) [8]

เถ้าลอยเป็นของเหลือที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหินในโรงงานผลิตไฟฟ้าถ่านหิน ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดต่างๆ กัน พบว่ามีขนาดเฉลี่ยของ Silica alumina glass spheres ตั้งแต่ 5 ถึง 45 ไมโครเมตร โดยกากที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหินประมาณร้อยละ 20 จะเป็นเถ้าของหม้อต้ม (Bottom ash) และประมาณร้อยละ 80 คือเถ้าลอย ซึ่งเป็นปริมาณที่มาก ทำให้เกิดปัญหาต่างๆ มากมาย ทั้งปัญหาต่อประชากรและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการกำจัดเถ้าลอย นั้นจะอาศัยการฝังกลบ จึงต้องใช้พื้นที่ในการจัดการที่มาก วิธีที่ดีที่สุดสำหรับการแก้ปัญหาคือการลดปริมาณเถ้าลอย โดยการนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์แก่โรงงานอุตสาหกรรม

2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย [9]

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย จะประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO_2), อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เฟอรัสออกไซด์ (Fe_2O_3) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ตารางที่ 4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี 2533 - 2542 พบว่าสารประกอบที่มีจำนวนมากคือ SiO_2 และ Al_2O_3

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยแม่เมาะ

สารประกอบ	ค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	9.4-17.4
SiO ₂	37.3-52.8
Al ₂ O ₃	18.0-28.1
Fe ₂ O ₃	8.5-15.0
MgO	1.2-3.3
SO ₃	1.7-3.9
Na ₂ O	0.6-1.3
K ₂ O	2-3.3
การสูญเสียเนื่องจากการเผา	0.1-0.9

2.4.2 อิทธิพลต่อสมบัติของถ้ำลอย [9]

สมบัติของถ้ำลอยจะขึ้นอยู่กับ ลักษณะและสมบัติของถ่านหิน ลักษณะทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และความละเอียดของถ้ำลอย ดังนี้

2.4.2.1 ลักษณะและสมบัติของถ่านหิน

แบ่งตามสมบัติและระยะเวลาการเกิดออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ พีท (Peat) เกิดจากการทับถมของพืช มีลักษณะเป็นเนื้อไม้พรุนๆคล้ายฟองน้ำ สีน้ำตาลอ่อนไปจนถึงสีดำ และดูดซับน้ำไว้มาก ลิกไนต์ (Lignite) หรือถ่านหินสีน้ำตาล (Brown Coal) มีสีน้ำตาลอ่อนจนสีน้ำตาลแก่ มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ความชื้นสูง บิทูมินัส (Bituminous หรือ Soft Coal) ติดไฟง่าย กลิ่นแรง มีสารระเหยอยู่ระหว่างร้อยละ 18-45 โดยน้ำหนัก และแอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่มีปริมาณคาร์บอนสูงประมาณร้อยละ 44-92 โดยน้ำหนัก เนื้อถ่านหินสีดำ เป็นเงา มีความชื้นน้อยประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ลูกติดไฟช้าและนานกว่าถ่านหินชนิดอื่นๆ ถ่านหินที่พบในประเทศไทยส่วนใหญ่มีอายุประมาณ 50-70 ล้านปี จะเป็นถ่านหินลิกไนต์ซึ่งมีคุณภาพต่ำกว่าชนิดอื่น แต่ก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์แทนน้ำมันเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี

2.4.2.2 ลักษณะทางกายภาพของถ้ำลอย

ขึ้นอยู่กับความละเอียดของถ่านหินก่อนเผา และชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิเผาถ่านหิน พบว่าถ้ำลอยส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกลมตันและอาจเป็นรูปทรงกลมกลวงหรือรูเข็ม ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและระบบของเครื่องดักจับถ้ำลอย โดยทั่วไปจะเป็นเม็ดกลมมีขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึง 0.15 มิลลิเมตร ส่วนเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่ และอาจจะมีเถ้าลอยขนาดเล็กๆ อยู่ในเรียกว่าเถ้าถ่านหินกลวง (Cenosphere) ซึ่งมีน้ำหนักเบา และลอยน้ำได้ ในบางครั้งเถ้าลอยที่ได้ อาจมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมและพรุน ทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยชนิดนี้ต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้น ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง ภาพที่ 8 แสดง ภาพขยาย SEM ของอนุภาคเถ้าลอยที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน สีของเถ้าลอยโดยทั่วไปจะแตกต่างกันจาก สีน้ำตาลอ่อน สีเทา และสีดำขึ้นอยู่กับสารประกอบภายในเถ้าลอย



เถ้าลอยที่มีลักษณะกลม

เถ้าลอยที่มีลักษณะรูพรุน

เถ้าลอยที่มีลักษณะไม่แน่นอน

ภาพที่ 8 ภาพขยาย SEM ของอนุภาคเถ้าลอยที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน [9]

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

2.4.2.3 สมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

สมบัติทางเคมีของเถ้าลอย จะมีค่าต่างกัน ในเชิงปริมาณตามแหล่ง หรือชนิดของถ่านหิน ที่มาของเถ้าลอย ขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C618-96 ได้แบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพได้แก่ชั้นคุณภาพ F และชั้นคุณภาพ C ตาม ตารางที่ 5 โดยใช้องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ได้หลังจากการเผาถ่านหินเป็นตัวกำหนด

ตารางที่ 5 การแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-96

สมบัติ	ประเภทของเถ้าลอย	
	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , min %	70.0	50.0
SO ₃ , max %	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้, max %	6.0	6.0
อัลคาไลน์ ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na ₂ O), max %	1.5	1.5
ดัชนีกำลังรับแรงอัด, min %	75.0	75.0

เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์และบิทูมินัส จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 5 บางครั้งเรียกว่าเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ (Low - Calcium Fly Ash) เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์และซับบิทูมินัส และมีแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 15-23 บางครั้งเรียกว่าเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง (High - Calcium Fly Ash)

2.4.2.4 ขนาดของเถ้าลอย

ขึ้นอยู่กับการบดถ่านหินที่จะนำไปเผา ชนิดของเครื่องบดและชนิดของเตาเผา ดังนั้นถ้าบดถ่านหินให้ละเอียดมากขึ้น และเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ภายในเตาเผา จะทำให้ได้เถ้าลอยที่มีขนาดเล็ก แต่ถ้าใช้ถ่านหินที่บดหยาบกว่าหรือเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะทำให้ได้เถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่และมีถ่านหินปนอยู่จำนวนมาก

2.4.3 การใช้ประโยชน์เถ้าลอย [9]

รูปแบบของการใช้เถ้าลอยในยุโรป จากข้อมูลปี ค.ศ. 1999 มีการนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมด้านต่างๆ ซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 6 เป็นภาพรวมการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยในยุโรปประมาณร้อยละ 38 อย่างไรก็ตามอัตราการใช้งานในประเทศต่างๆ ยังแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในสวิตเซอร์แลนด์ เยอรมัน เบลเยียม อิตาลี และเดนมาร์ก มีอัตราการใช้ประโยชน์เข้าใกล้ร้อยละ 100 สำหรับในประเทศอื่นๆ อัตราการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยนั้นยังน้อยอยู่มาก ในประเทศอังกฤษซึ่งมีปริมาณเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณ 5 ล้านตันต่อปี ระดับของการใช้ประโยชน์จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 50 ทั้งนี้แนวโน้มการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยนั้นมีเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านวัสดุก่อสร้าง

ตารางที่ 6 ปริมาณการใช้ประโยชน์และการกำจัดเถ้าลอยในยุโรป ปี ค.ศ. 1999

การใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ	ปริมาณการใช้ (ล้านตัน)
Cement raw material	3.7
Blended cement	1.9
Concrete addition	5.4
Aerated concrete block	0.7
Non-Aerated concrete block	0.6
Lightweight aggregate	0.2

Grouting	0.5
Subgrade stabilization	0.3
General engineering fill	1.3
Structural fill	1.4
Infill	1.4
ในด้านอื่นๆ	0.7
Reclamation/restoration	15.4
Temporary stockpile	0.7
กำจัด	3.8
รวม	38.0

ตารางที่ 7 ปริมาณการใช้ประโยชน์และการกำจัดเถ้าลอยในสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 1999

การใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ	ปริมาณการใช้ (ล้านตัน)
Cement/concrete/grout	10.3
Flowable fill	0.8
Structural fill	2.9
Road base/sub-base	1.1
Mineral filler	0.1
Mining applications	1.4
Waste stabilization/solidification	1.8
ด้านเกษตรกรรม	0.1
Miscellaneous และอื่นๆ	10.4
รวม	18.9
เปอร์เซ็นต์ที่ใช้ทั้งหมด	33.2%

ในสหรัฐอเมริกา พบว่ามีเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณ 56.9 ล้านตัน โดยปริมาณ 38.0 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 67 จะถูกกำจัดโดยการฝังกลบ ถือเป็นปริมาณที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับภาพรวมของยุโรป ดังตารางที่ 7 ซึ่งจะเห็นว่า การใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยส่วนใหญ่ จะใช้ในส่วนของปูนซีเมนต์ และคอนกรีต

การนำไปใช้ประโยชน์ในประเทศไทย ปัจจุบันถ้ำลอยนำมาใช้เป็นสารผสมในคอนกรีตผสมเสร็จสำหรับงานก่อสร้าง และเป็นวัตถุดิบเสริมปูนซีเมนต์ในการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น กระเบื้องมุงหลังคา เสาเข็ม ท่อ พื้นสำเร็จรูป เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมหลักในการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัด (Rolling Compact Concrete, RCC)

ในการศึกษาการนำถ้ำลอยลิกไนต์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในหน่วยงานต่างๆ ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้แก่ การนำถ้ำลอยลิกไนต์มาทำผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างคือการนำมาทำเป็นซีเมนต์บดลือกก่อนังและซีเมนต์บดลือกปูพื้น

ในปี พ.ศ. 2534 องคมนตรีพลเอกพิจิตร กุลละวณิชย์ ได้นำวัสดุคล้ายอิฐบดลือกมาจากประเทศฮังการี และนำขึ้นทูลเกล้าฯ ถวายแด่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เพื่อเป็นตัวอย่าง ต่อมาพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงมอบหมายให้ นายสุเมธ ดันติเวชกุล ดำเนินการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์ ในขณะเดียวกัน พลเอกพิจิตร กุลละวณิชย์ ได้มีหนังสือถึง กฟผ. เพื่อทำการศึกษาเรื่องดังกล่าว ซึ่ง กฟผ. ได้ตั้งคณะทำงานเพื่อศึกษาการนำถ้ำลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้าง จากการศึกษาพบว่า สามารถนำถ้ำลอยลิกไนต์มาทดแทนซีเมนต์ได้

กฟผ. ได้นำถ้ำลอยลิกไนต์ผสมน้ำประมาณร้อยละ 15-20 ทำการบดอัดชั้นละประมาณ 35 เซนติเมตร เพื่อแก้ไขปัญหาลูกรากทรุดของสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ 3 นอกจากนี้ยังนำถ้ำลอยลิกไนต์ผสมน้ำประมาณร้อยละ 40-50 เทลงไปในบริเวณที่ทรุดตัวของดินระหว่างผนังดินและผนังคอนกรีตของคลองส่งน้ำจากเขื่อนแม่จาม เหมือนแม่เมาะ ได้ใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ 1 ส่วนผสมกับซีเมนต์ 1 ส่วน และผสมรวมกับน้ำและเบนทูนไนท์ เพื่ออัดฉีดน้ำปูนเข้าไปตามรอยแยกต่างๆ ของผนังบ่อเหมือง เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยาสันดาปกับถ้ำลิกไนต์บางส่วนที่มีอยู่ ซึ่งจะก่อให้เกิดการลุกไหม้ติดไฟเกิดขึ้นสำหรับงานก่อสร้างถนน ได้นำถ้ำลอยลิกไนต์มาใช้ทำชั้นรองพื้นทางของถนน โดยการผสมน้ำร้อยละ 15-20 แล้วทำการบดอัด การทำถนนคอนกรีต RCCP (Roller Compacted Concrete Pavement) โดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์และซีเมนต์เท่าๆ กันผสมกับทรายและหิน โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อสารประสานประมาณ 0.30 พร้อมทั้งใส่สารลดน้ำ (water reducing agent) ลงไปทำการผสมและนำไปเทลงบริเวณหน้างาน ทำการบดอัดเหมือนงานก่อสร้างทั่วไป นอกจากนี้ในงานถนนคอนกรีตเสริมเหล็กในส่วนที่เป็นสารประสาน จะใช้ซีเมนต์ประมาณร้อยละ 65 และถ้ำลอยลิกไนต์ร้อยละ 35 ได้มีการนำถ้ำลอยลิกไนต์ไปใช้ใน งานก่อสร้างเขื่อนหลายแห่ง เช่น งานก่อสร้างเขื่อนที่ปากมูล โดยจะใช้ซีเมนต์ประมาณร้อยละ 31 และถ้ำลอยลิกไนต์ประมาณร้อยละ 69 ในส่วนที่เป็นสารประสาน ทำการผสมกับทรายและหินแล้วทำการบดอัดชั้นละประมาณ 35 เซนติเมตร ทำการบดอัด 6 เทียว เพื่อให้เป็นไปตามรูปแบบของ

เขื่อน ในงานก่อสร้างเขื่อนปากมูลนี้ ได้นำเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะไปใช้ประมาณ 6,000 ตัน นอกจากนี้ ในงานก่อสร้างเขื่อนแม่ปิงตอนล่าง ก็ได้นำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ในงานก่อสร้างเขื่อนด้วย สาเหตุที่นำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้เป็นส่วนผสมในการก่อสร้างเขื่อนนี้ เนื่องจากต้องการลดปริมาณความร้อนคอนกรีต ซึ่งมีประมาณมากในระหว่างการก่อสร้าง และช่วยให้คอนกรีตมีการแข็งตัวช้าลง เพื่อจะได้มีเวลาทำงานมากขึ้น และที่สำคัญคือป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับสารบางอย่างที่มีอยู่ในทรายและหิน ซึ่งจะทำให้เกิดสารใหม่ขึ้นและเกิดการขยายตัวทำให้เขื่อนแตกร้าวได้ กฟผ. แม่เมาะ ได้นำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็กหลายแห่ง เช่น งานคอนกรีตเสริมเหล็กของระบบสายไฟในโรงไฟฟ้า ถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งโดยหลักการแล้ว การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ในงานคอนกรีตนั้นเพื่อให้คอนกรีตนั้นมีความสามารถในการใช้งานได้ดีขึ้น เพราะอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะเป็นทรงกลม ช่วยให้คอนกรีตไหลไปตามจุดต่างๆ ของโครงสร้างได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องสั่นสะเทือนเข้าช่วย นอกจากนี้ ยังมีการนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้เป็นสารช่วยเร่งการตกตะกอน โดยนำไปผสมกับกรด และขณะนี้กำลังทำการวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้เป็นปุ๋ย

2.4.4 แหล่งที่มาของเถ้าลอยภายในประเทศ [9]

ในปัจจุบันแหล่งของเถ้าลอยที่สำคัญในประเทศไทยมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า ประมาณวันละ 40,000 ตัน การเผาถ่านหินลิกไนต์จะได้เถ้าลิกไนต์ออกมามีประมาณวันละ 10,000 ตัน ซึ่งในจำนวนนี้จะเป็นเถ้าลอยประมาณ 8,000 ตัน โรงไฟฟ้าแม่เมาะได้ควบคุมคุณภาพถ่านหินก่อนเข้าโรงไฟฟ้า ให้มีปริมาณซัลเฟอร์ (S) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมตั้งแต่ พ.ศ. 2533 ถึงปัจจุบัน ก่อให้เกิดผลพลอยได้คือ เถ้าลอยลิกไนต์มีองค์ประกอบทางเคมีค่อนข้าง สม่าเสมอ และอยู่ในเกณฑ์ของสาร Pozzolan Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618-69

2.5 ยางธรรมชาติ [10-11]

2.5.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางธรรมชาติ

ยางพาราเป็นยางที่ได้มาจากต้นยางพาราซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดมาจากกลุ่มน้ำอเมซอน น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวข้น และมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber) ประมาณ 30% แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60%

เรียกว่า น้ำยางข้น (Concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็รีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (Two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน จะเรียกว่ายางแผ่นรมควัน

นอกจากยางแผ่นรมควันแล้ว อุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควันผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่นขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR5L ซึ่งมีสีจางมาก จำเป็นต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีเงาปนสูงและมีสีเข้ม ก็อาจใช้ยางแผ่นหรือขี้ยางเป็นวัตถุดิบ เป็นต้น ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน

น้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber) แฉวนลอยอยู่ในน้ำ ปริมาณของเนื้อยางขึ้นกับชนิดของพันธุ์ อายุ และฤดูกาลที่กรี๊ดยาง โดยทั่วไปยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ ได้แก่

2.5.2 น้ำยาง (Latex)

เนื่องจากน้ำยางสดที่ได้มาจากการกรี๊ดต้นยางมีปริมาณน้ำที่มากเกินไป ไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ และยังทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) เพื่อลดปริมาณน้ำในน้ำยางสด จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก เรียกว่าน้ำยางที่ได้นี้ว่า น้ำยางข้น (Concentrated latex) แต่เนื่องจากในน้ำยางมีสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น โพรตีน และฟอสโฟไลปิด (Phospholipid) ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถถูกย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ หรือเชื้อแบคทีเรีย ได้เป็นก๊าซชนิดต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน หรือสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้น น้ำยางจึงสามารถบูดเน่าส่งกลิ่นเหม็นได้ จึงต้องมีการเติมสารแอมโมเนียลงไป หรืออาจใช้แอมโมเนียร่วมกับสารเคมีอื่นๆ เพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางที่เติมปริมาณแอมโมเนียเข้มข้นถึง 0.7% เรียกว่า High ammonia latex (HA latex) และน้ำยางที่เติมปริมาณแอมโมเนียเข้มข้นเพียง 0.2% จะเรียกว่า Low

ammonia latex (LA latex) อีกทั้งจำเป็นต้องใส่สารเคมีอื่นเพิ่มด้วย เช่น ZnO/TMTD 0.02% หรือใช้กรดบอริก 0.2% เป็นต้น

2.5.2.1 คุณสมบัติของตัวน้ำยางเองหลังจากการกรี๊ด น้ำยางสดจะคงสภาพเป็นน้ำยางไม่เกิน 6 ชั่วโมง จากนั้นจะเกิดการเสียดสภาพดังนี้ [12]

2.5.2.1.1 Flocculation เกิดการจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ (เม็ดพริก) หลังจากกรี๊ดประมาณ 2 ชั่วโมง จะเริ่มจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ คล้ายเม็ดพริก แล้วค่อยๆ หนืดขึ้น

2.5.2.1.2 Coagulation จับตัวเป็นก้อน เกิดการแยกเป็น 2 ส่วน คือ ยาง และ เซรุ่ม

2.5.2.1.3 Gelation จับตัวทั้งก้อน เสียดสภาพแล้ว แต่ยังคงรูปเป็น Gel

2.5.2.2 การเติบโตของเชื้อแบคทีเรียในน้ำยาง

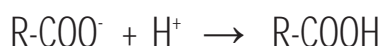
เนื่องจากในน้ำยาง มีประกอบของน้ำตาลชนิดคิวบาซีทอลประมาณ 1% และ กลูโคส ซูโคส ฟรุกโตส ปริมาณเล็กน้อย เป็นน้ำตาลที่เหมาะสมแก่การเจริญของแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำยาง น้ำตาลเหล่านี้จะถูกแบคทีเรียใช้เป็นอาหาร เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายทำให้เกิดกรดไขมันที่มีโมเลกุลขนาดเล็กๆ (Short chain fatty acid) ในส่วนของเกิดการบูดเน่า มีกลิ่นเหม็นของน้ำยาง เกิดจาก ในน้ำยางมีส่วนประกอบของโปรตีนและกรดอะมิโนยางจะเกิดการสูญเสียสภาพและรวมตัวเป็นก้อน โดยกรดเหล่านี้จัดเป็นกรดไขมันที่ระเหยได้ง่าย เรียกชื่อว่า VFA (Volatile fatty acid) VFA ประกอบด้วย กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และกรดโพรไพโอนิก VFA จึงเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการรักษาสภาพของน้ำยาง

ในส่วนของโปรตีนที่อยู่บริเวณผิวของอนุภาคยางนี้ จะมี ส่วนประกอบของกำมะถัน (Cystine disulphide linkage) อยู่ประมาณ 5% ดังนั้นขณะที่น้ำยางเกิดการเสียดสภาพ จะเกิดการบูดเน่า โดยโปรตีนในส่วนนี้จะสลายตัวให้สารประกอบพวก ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารเมอร์แคปแทน (Mercaptan) ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นขึ้น ปกติน้ำยาง จะจับตัวเป็นก้อนอย่างสมบูรณ์เมื่อ ค่า pH ของน้ำยาง อยู่ที่ 4.0-5.0

2.5.2.3 กลไกการจับก้อนของเนือยางในน้ำยาง

น้ำยาง มีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเล็ก ๆ กระจายอยู่ในน้ำมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว มีสภาพเป็นคอลลอยด์ เมื่อเราเติมกรดลงไป ส่งผลให้ค่า pH ของน้ำยางเปลี่ยนแปลงลดลง จากนั้นน้ำยางจึงเกิดการสูญเสียสภาพ โดยน้ำยางจะค่อย ๆ หนืดขึ้น เนื่องจากอนุภาคของยางเริ่มจับตัวเป็นเม็ดเล็ก ๆ และจับตัวเป็นก้อนใหญ่ขึ้น จนน้ำยางสูญเสียสภาพโดยน้ำ

ยางจะแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง และส่วนที่เป็นเซรุ่ม หรืออาจจะอธิบายได้ว่า ปกติน้ำยางจะคงสภาพการเป็นคอลลอยด์อยู่ได้ในสภาวะที่เป็นเบสหรือด่าง หรือที่มีค่า pH สูง (จึงต้องเติมแอมโมเนีย) เมื่อเติมกรดลงไป pH ต่ำลง อนุภาคยางก็ไม่สามารถกระจายอยู่ในน้ำได้ เกิดการลอยมาจับตัวกันเป็นก้อนยางที่ใหญ่ขึ้น ถ้าเติมสารเคมีที่ทำให้กรดลงไป จะทำให้น้ำยางเสียสภาพเนื่องจาก Fatty acid soap ที่อยู่บนอนุภาคเม็ดยาง ได้ถูกเปลี่ยนไปให้ Fatty acid ที่ไม่มีประจุเหลืออยู่



การลดจำนวนประจุบนอนุภาคเม็ดยางทำให้น้ำยางหมดความเสถียร และจับตัวเป็นก้อน

2.5.2.4 คำศัพท์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับน้ำยางและคุณสมบัติของน้ำยาง

- TSC (Total solid contents) หรือ ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยาง เนื่องจากน้ำยางเป็นของเหลวในรูปสารแขวนลอย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรู้ค่าความเข้มข้นในน้ำยาง ในรูปปริมาณของแข็งและของเหลว (น้ำ) ว่ามีอยู่เท่าไรโดยนำน้ำยางไปทำการระเหยส่วนที่เป็นของเหลว(น้ำ)ออก แล้วทำการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ มีหน่วยเป็น %

- DRC (Dry Rubber contents) หรือ ค่าปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยาง มีหน่วยเป็น %

- Alkalinity หรือ ค่าความเป็นด่างของน้ำยาง มีหน่วยเป็น %

- VFA No.(Volatile fatty acid number) หรือ ค่าปริมาณกรดไขมันระเหยได้ในน้ำยาง ไม่มีหน่วย

- KOH No. (Potassium Hydroxide Number) หรือ ค่าปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำยาง ไม่มีหน่วย

- NRC (Non rubber content) หรือ ค่าปริมาณส่วนที่ไม่ใช่ยางในน้ำยาง คำนวณมาจากค่า TSC ลบด้วยค่า DRC

- pH ของน้ำยาง ค่านี้จะเป็นผลพลอยได้จากการทดสอบค่า KOH No. เพราะใช้การวัดค่า pH ของน้ำยางในการทดสอบ

- ปริมาณยางจับเป็นก้อน (Coagulum content) หมายถึง ปริมาณของสารที่ตกค้างอยู่บนตัวกรองสเตนเลสที่ทดสอบ สารเหล่านี้นี้ประกอบด้วยเศษยางจับตัวและสารอื่นที่เจือปนมากับน้ำยาง ค่านี้มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตที่เข้มงวด เช่น การผลิตเส้นด้ายยางยืด น้ำยางที่มีค่า Coagulum content สูงอาจก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันที่ปลายหลอดในระหว่างกระบวนการผลิตได้

- ความเสถียรเชิงกลของน้ำยาง (Mechanical Stability Time (MST)) หมายถึง ความเสถียรของน้ำยางต่ออิทธิพลทางกล เช่น การกวน การบีบ การเคลื่อนย้าย

หรือการกระทำทางกลโดยวิธีอื่นๆ สามารถทำได้โดยวัฏระยะเวลาที่เริ่มปั่นกวนน้ำยางจนกระทั่งสังเกตเห็นน้ำยาง เริ่มจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ ในหน่วยของวินาที ค่า MST สูงจะบ่งชี้ว่า น้ำยางมีความเสถียรต่ออิทธิพลทางกลได้สูง แต่ถ้าค่า MST ต่ำแสดงว่าน้ำยางนั้นจะสูญเสียความเสถียร สามารถจะจับเป็นเม็ดได้ง่าย เมื่อน้ำยางถูกกระทบกับอิทธิพลทางกล

2.5.2.5 การหาค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยาง

ดังที่ทราบแล้วว่าในน้ำยาง 100 ส่วนนั้น จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นเนื้อยาง 25-45 ส่วน และส่วนที่เป็นน้ำ 55 - 75 ส่วน การหาปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยาง จะหาค่าของเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยาง โดยคิดเทียบจากน้ำยาง 100 ส่วนว่า จะมีเนื้อยางแห้งอยู่ที่ส่วน ซึ่งวิธีการหาสามารถกระทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมปฏิบัติกันอยู่ในปัจจุบัน มี 2 วิธี คือ 1) วิธีใช้เครื่องมือวัดความถ่วงจำเพาะ 2) วิธีชั่งน้ำหนักของยางตัวอย่าง หรือ วิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ

2.5.2.5.1 วิธีใช้เครื่องมือวัดความถ่วงจำเพาะ

เครื่องมือวัดความถ่วงจำเพาะของน้ำยาง เรียกว่า "เมโทรแลค" หรือ "ลาเทลโซมิเตอร์" เป็น เครื่องมือที่ใช้วัดหาปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางโดยอาศัยค่าความถ่วงจำเพาะ ของน้ำยาง มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนก้านและส่วนกระเปาะ ที่ก้านจะมีขีดกำหนดค่าเนื้อยางแห้งไว้ โดยจะมี 2 ระบบ คือ ระบบอังกฤษ ซึ่งจะบอกค่าเป็นปอนด์ต่อแกลลอน และระบบเมตริก ซึ่งจะบอกค่าเป็นกรัมต่อลิตร โดยค่าปริมาณเนื้อยางแห้งต่ำจะอยู่ด้านล่างค่าสูงจะอยู่ด้านบน ซึ่งหมายความว่า เมโทรแลคจะจมลงไปใต้น้ำยางที่มีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งต่ำ ทั้งนี้เพราะยางที่มีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งสูงจะมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำยางที่มีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งต่ำ

การใช้เมโทรแลควัดหาปริมาณเนื้อยางแห้งยางแห้งในน้ำยางนั้น ส่วนใหญ่โรงงานแปรรูปยางจะใช้วัดหาค่าปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางที่ทางการโรงงานรวบรวมได้ เพื่อผลประโยชน์ในการคิดคำนวณน้ำและน้ำกรดที่จะผสมใส่ลงในน้ำยาง เพื่อให้ยางจับตัวกันอย่างสมบูรณ์ และมีคุณสมบัติเหมาะสมตามที่โรงงานต้องการ ค่าปริมาณเนื้อยางแห้งที่วัดได้จึงไม่ถูกต้องนักเมื่อเทียบกับวิธีชั่งน้ำหนักยางตัวอย่างหรือวิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการอย่างไรก็ตามการหาปริมาณ เนื้อยางแห้งในน้ำยางโดยใช้เมโทรแลคนี้ทำได้ง่ายสะดวก วัสดุทนทาน จึงมีคนนำมาประยุกต์ใช้ในการซื้อขายน้ำยาง ซึ่งผู้ซื้อและผู้ขายสามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งได้ และรับจ่ายเงินได้ทันทีที่มีการซื้อขาย

2.5.2.5.2 ขั้นตอนการหาค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางโดยใช้เมโทรแลค

ก่อนใช้เมโทรแลคในการวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้ง ต้องเตรียมอุปกรณ์ที่จะใช้วัดให้พร้อม ซึ่งได้แก่ เมโทรแลค ครอบดวงสำหรับใส่น้ำยาเพื่อใช้วัดโดยเมโทรแลค ถาดหรือตะแกรงสำหรับรองครอบดวงเพื่อรับน้ำยาที่ล้นครอบดวงเมื่อใส่มะโทรแลค และน้ำสะอาด จากนั้นนำเมโทรแลคแช่ลงในครอบดวงบรรจุน้ำสะอาดที่เตรียมไว้เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่และลดแรงตึงผิว แล้วจึงใช้วัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งตามขั้นตอนดังนี้

ตัดตัวอย่างน้ำยาที่ต้องการวัด 1 ส่วน (ประมาณ 250 – 300 มิลลิลิตร) ผสมกับน้ำสะอาด 2 ส่วน กวนให้เข้ากันดี แล้วเทใส่ในครอบดวงให้เต็มจนล้น เป่าฟองอากาศที่ลอยอยู่บนผิวน้ำยาในครอบดวง ออกให้หมดแล้วค่อย ๆ หย่อนเมโทรแลคลงในครอบดวง ปล่อยให้ลอยเป็นอิสระ อ่านค่าที่ก้านของเมโทรแลค บริเวณที่ผิวน้ำยาตัดกับก้าน เมโทรแลค หลังจากที่เมโทรลอยตัวนิ่งแล้ว

นำค่าที่อ่านได้ไปคูณด้วย 3 ก็จะได้เปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งในน้ำยาดังกล่าวที่วัดออกมา

2.5.2.5.3 วิธีชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง หรือ วิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ

วิธีนี้เป็นวิธีวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งในน้ำยาได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยใช้หลักความจริงในการดำเนินงาน คือ นำน้ำยาไปทำให้แห้งให้เหลือแต่เฉพาะเนื้อเยื่อ แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบระหว่างน้ำยาก่อนที่จะนำไปทำให้แห้ง กับเนื้อเยื่อที่แห้งแล้วว่าเป็นเท่าไร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ออกมาก็จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งในน้ำยา เช่น น้ำยา 100 กรัม นำไปทำเป็นยางแผ่นแล้วอบให้แห้ง จะได้ยางแผ่นหนัก 35 กรัม นั่นคือ น้ำยานั้นมีค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้ง 35% การหาเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้ง โดยการชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง หรือวิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ มีขั้นตอนดำเนินงาน 10 ขั้นตอนดังนี้

1. ตัดตัวอย่างน้ำยาที่ต้องการหาเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้ง

ชั่งตัวอย่างน้ำยาในถ้วยพลาสติก ถ้วยละ 10 กรัม (ชั่งถ้วยพลาสติกก่อน ถ้าถ้วยพลาสติกหนัก 8.5 กรัม ก็ให้ใส่น้ำยาลงไป ชั่งเป็น 18.5 กรัม)

เติมน้ำกลั่นหรือน้ำสะอาดผสมลงในตัวอย่างน้ำยาประมาณ 20 มิลลิลิตร

15 - 20 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

เติมน้ำกรดอะซีติก ความเข้มข้น 2% ลงไปอีกประมาณ

ตั้งทิ้งไว้ให้ยางจับตัวประมาณ 30 นาที

นำยางที่จับตัวสมบูรณ์แล้ว ไปรีดให้เป็นแผ่นบาง ๆ

ความหนาไม่เกิน 2 มิลลิเมตร

ล้างแผ่นยางที่รีดจนบางได้ที่แล้วให้สะอาด

นำแผ่นยางที่ล้างสะอาดแล้ว ไปอบให้แห้งในตู้อบที่

อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลาอบ 16 ชั่วโมง

นำแผ่นยางที่อบแห้งแล้วออกจากตู้อบ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก พร้อมบันทึกน้ำหนักยางแห้งไว้

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งจากสูตร เปอร์เซ็นต์

เนื้อยางแห้ง = $(\text{น้ำหนักยางแห้ง} \times 100) / \text{น้ำหนักน้ำยางสด}$

2.5.2.6 ส่วนประกอบของน้ำยาง

น้ำยางธรรมชาติเป็นสารที่ไม่บริสุทธิ์ มีปริมาณของเนื้อยางแห้ง

อยู่ระหว่าง 25-45% และมีความแตกต่างระหว่างปริมาณสารที่เป็นของแข็งและสารที่เป็นเนื้อยาง

แห้งประมาณ 3 % น้ำยางประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง ประมาณ 35% และส่วนที่

ไม่ใช่เนื้อยาง ประมาณ 65% โดยเมื่อนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วสูง 20,000 รอบต่อนาที จะ

แยกน้ำยางออกเป็น 4 ส่วน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ส่วนประกอบของน้ำยาง

ส่วนที่	ประเภท	ส่วนประกอบ
1	ส่วนของเนื้อยาง 35%	ยาง 33.6% โปรตีน 0.5% ไขมัน 0.9% อนุมูลของโลหะ
2	เฟรย์-วิสถึง 2%	คาร์โรตีนอยด์ 1.0% ไขมัน
3	ส่วนเซรุ่ม 48%	คาร์โบไฮเดรตและอิโนซิทอล 1.0% โปรตีน สารจากโปรตีนและสารประกอบพวก ไนโตรเจน กรดนิวคลีอิกและสารประกอบจากกรดนี้ อนุมูลของอนินทรีย์สาร อนุมูลของโลหะ
4	ส่วนชั้นกลาง 15% (ตะกอนสีเหลือง หรือขาว สาร พวกลูทอยด์)	โปรตีนและสารประกอบพวกไนโตรเจน ยางและคาร์โรตีนอยด์ ไขมันและอนุมูลของโลหะ

โปรตีน (Protein) โปรตีนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำยางประกอบด้วย โปรตีนที่ห่อหุ้มอยู่ตรงผิวรอบนอกของอนุภาคยางประมาณ 25%, โปรตีนที่มีอยู่ในชั้นน้ำ 50% และโปรตีนปนอยู่ในสารลูทอยด์ อีก 25% ซึ่ง โปรตีนที่อยู่ในสารลูทอยด์ จะทำให้เกิดการ แพ้ โครงสร้างของโปรตีนทำให้อนุภาคมีประจุลบ โปรตีนมีทั้งประจุบวกและลบในโมเลกุล ขึ้นอยู่กับค่า pH ของตัวกลางเมื่อมีการสูญเสีย น้ำ เช่นการเติมแอลกอฮอล์ หรือ กรดอะซิติก อนุภาคยาง จะเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนเรียกว่า Coagulum แยกออกจากส่วนของเซรุ่ม บนผิวของอนุภาคยางมีกำมะถันอยู่ประมาณ 5% ดังนั้น ขณะที่น้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพจะเกิดการบด नेता โปรตีนส่วนนี้จะสลายตัวให้สารพวกไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารเมอร์แคปแทนทำให้มีกลิ่นเหม็น

ไขมัน (Lipid) ระหว่างผิวอนุภาคยางและโปรตีน ส่วนใหญ่เป็นพวกฟอสโฟไลปิดชนิด α -Lecithin ซึ่งเชื่อว่าทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคยาง

น้ำยางในสถานะที่เป็นค้าง เช่น มีแอมโมเนียอยู่ 60% ขึ้นไป (HA) สารฟอสโฟไลปิดจะถูกไฮโดรไลซ์ เป็นกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาวซึ่งจะรวมตัวกับแอมโมเนียกลายเป็นสบู่ ทำให้น้ำยางเสถียรยิ่งขึ้น น้ำยางที่มีแอมโมเนียปริมาณน้อย ประมาณ 0.2% (LA) การไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นน้อย จำเป็นต้องเพิ่มสบู่ เพื่อเพิ่มความเสถียรของน้ำยาง

2.5.3 ยางแห้ง

ยางแห้งเตรียมได้จากการนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรด เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นจึงทำการไล่ความชื้นออกจากเนื้อยาง เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา ยางแห้งมีหลายรูปแบบได้แก่

2.5.3.1 ยางแผ่น

ยางแผ่น เป็นการนำยางแห้งที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด แล้วทำให้แห้งโดยการนำไปตากแดดหรือผึ่งในอากาศร้อนเพื่อไล่ความชื้น โดยเรียกยางที่ได้จากกระบวนการนี้ว่า ยางแผ่นไม่รมควัน (Air dried sheet, ADS) หรือหากนำยางแผ่นที่ได้ไปอบรมควันต่อที่อุณหภูมิ 60 – 70 องศาเซลเซียส จะเรียกว่า ยางแผ่น

2.5.3.2 ยางเครฟ

ยางเครฟ เป็นยางที่ได้จากการนำเศษยางไปรีดในเครื่องเครฟ (Creping machine) พร้อมทั้งทำความสะอาดด้วยน้ำเพื่อเอาสิ่งสกปรกออกจากยางในระหว่างการรีด จากนั้นจึงนำไปผึ่งลมให้แห้ง

2.5.3.3 ยางแท่ง

ยางแท่ง ได้จากการนำยางมาทำเป็นก้อนเล็กๆและอบให้แห้งด้วยอากาศร้อน และนำไปอัดเป็นแท่ง ยางแท่งจะมีคุณภาพสม่ำเสมอกว่ายางแผ่นและยางเครฟ เนื่องจากผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ ซึ่งพิจารณาจากปริมาณสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในยาง โดยประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานยางแท่งซึ่งเรียกว่า Standard Thai Rubber (STR) ดังตารางที่ 9

2.5.3.4 ยางเกรดที่มีความหนืดคงที่หรือยาง CV (Constant Viscosity)

เนื่องจากยางแห้งเมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลาต่างๆ ยางจะเริ่มแข็งขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Storage hardening ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดจากหมู่อัลดีไฮด์ (Aldehyde group) ที่มีอยู่ในยางธรรมชาติเข้าไปทำปฏิกิริยาควบแน่นกันเกิดเป็น โครงสร้างสามมิติที่มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง ดังนั้นจึงป้องกันโดยการสารเคมี เช่น ไฮดรอกซิลลามีน (Hydroxylamine)

ลงไปใต้น้ำอย่างก่อนการเติมกรด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปรากฏการณ์นี้ ทำให้ยางที่ได้มีค่าความหนืดคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา

ตารางที่ 9 มาตรฐานยางแท่งของไทย (Standard Thai Rubber, STR) [10]

ข้อกำหนด	STR XL	STR 5L	STR 5	STR 5CV	STR 10	STR 10CV	STR 20	STR 20CV
ปริมาณสิ่งสกปรกที่เหลือน้อยบน ช่องขนาด 44 ไมครอน (max%wt)	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
ปริมาณเถ้า (max %wt)	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.80	0.80
ปริมาณไนโตรเจน (max %wt)	0.50	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
ปริมาณสารระเหยได้ (max %wt)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ค่า Plasticity เริ่มต้น (P_0) (min.)	35	35	30	-	30	-	30	-
ค่า Plasticity Retention Index (PRI) (min.)	60	60	60	60	50	50	40	40
สี (Lovibond scale) (max.)	4.0	6.0	-	-	-	-	-	-
ความหนืดมูนิ ML 1+4@100°C	-	-	-	*	-	**	-	***
สีของเครื่องหมาย	น้ำเงิน บน พื้น ขาว	เขียว อ่อน	เขียว อ่อน	ขาว บน พื้น เขียว อ่อน	น้ำตาล บนพื้น ขาว	ขาวบน พื้น น้ำตาล	แดง บน พื้น ขาว	ขาว บน พื้น แดง
สีของแผ่นฟิล์มโพลีเอทิลีน (LDPE) ที่ใช้ห่ออย่าง	ขาว ใส	ขาว ใส	ขาว ใส	ขาว ใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาว ใส	ขาว ใส
สีของแถบโพลีเอทิลีน	ขาว ใส	ขาว ใส	ขาว ทึบ	ขาว ใส	ขาวทึบ	ขาวทึบ	ขาว ทึบ	ขาว ทึบ

* 70 (+7, -5), 60 (+7, -5) และ 50 (+7, -5) ** 60 (+7, -5) *** 65 (+7, -5)

ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติ มีสมบัติเชื่อมโยงในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความหนืดสูงทำให้ยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย

ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้า (fatigue resistance) ที่สูงมากด้วย

ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการขัดถูสูง เนื่องจากความสามารถในการเกิดพันธะเชื่อมขวางของพันธะคู่ภายในโมเลกุลยางมีมากกว่ายางที่โมเลกุลมีขั้วชนิดอื่น

ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} ohm.cm

ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้ายางเกิดการคงรูป จากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลาย แต่ยางจะสามารถทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางยังสามารถทนต่อการด่างและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อการด่างในกรดและกรดกำมะถันเข้มข้น

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้

ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อถูกยึดและได้รับโอโซนเป็นเวลานานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการยึดตัวของยาง

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ

การยุบจม (Compression set) ยางธรรมชาติมีค่าการยุบจมค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงปานกลาง แต่ที่อุณหภูมิต่ำยางธรรมชาติจะมีค่าการยุบจมที่สูงขึ้น เนื่องมาจากเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ขณะที่เมื่ออุณหภูมิสูงยางธรรมชาติจะไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ค่าการยุบจมจึงสูงขึ้น

การกระเดิงกระดอน (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระเดิงกระดอนสูง และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำ เมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ เช่นยางรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงก็อาจทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

อุณหภูมิการใช้งาน (Service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55 ถึง 70 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่ถ้าอุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะต้องลดลง เนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในการออกสูตรผสมสารเคมียางที่เหมาะสม ยางธรรมชาติจะสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90 หรือ 100 องศาเซลเซียส

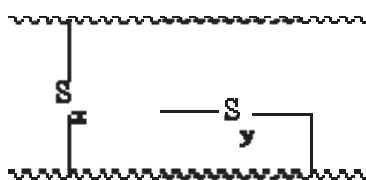
อย่างไรก็ตาม ยางดิบยังคงมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียรขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือยางจะอ่อนตัวและเหนียวเมื่อได้รับความร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ การใส่ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (Rubber compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ จะเรียกว่า "ยางสุกหรือยางคงรูป" (Vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย

2.7 การทำให้ยางธรรมชาติเกิดการคงรูป [13]

การทำให้ยางคงรูปหรือทำให้ยางสุก คือ การทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโมเลกุลหรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ส่งผลให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงจากค่อนข้างอ่อน มีความเป็นพลาสติกสูง ไปเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นดีและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียรและไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากนัก และทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงแดดได้ดียิ่งขึ้น จึงสามารถนำยางไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันต้องอาศัยสารเคมีกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing or curing agents) และความร้อนเพื่อให้สารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาได้

2.7.1 ระบบทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถัน

เป็นระบบที่ใช้อย่างกว้างขวางกับยางที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลไม่อิ่มตัว (Unsaturation) ระบบนี้จำเป็นต้องมีสารตัวกระตุ้น (Activator) เช่น ZnO และกรดสเตียริก สำหรับสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาคงรูป สัดส่วนระหว่างการใช้กำมะถันกับสารตัวเร่งมีความสำคัญเพราะเป็นตัวกำหนดชนิดของพันธะเคมีที่เกิดขึ้น เช่น ถ้าใช้ปริมาณกำมะถันมากและใช้สารตัวเร่งน้อย เรียกว่าระบบธรรมดาหรือ Conventional vulcanization (CV system) ซึ่งจะมีพันธะเคมีแบบ Polysulphide crosslinks และแบบ cyclic แต่ถ้าใช้ปริมาณกำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งมากจะได้พันธะเคมีส่วนใหญ่เป็นแบบ Monosulphide crosslinks เรียกขานกันว่าระบบประสิทธิภาพหรือ Efficient vulcanization (EV system) ดังแสดงในภาพที่ 10 นอกจากนี้ยังมีอีกระบบหนึ่งเรียกว่า ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV system) ซึ่งจะอยู่กึ่งกลางระหว่าง 2 ระบบข้างต้น



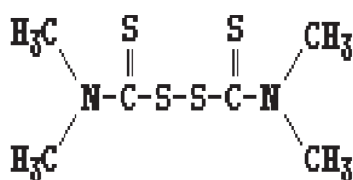
ระบบ EV ค่า X จะเท่ากับ 1 หรือ 2 (Mono- or disulphide)
ระบบ CV ค่า X จะสูงส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 3 ถึง 8 (Polysulphide)

ภาพที่ 10 พันธะเคมีหรือการเชื่อมโยงของสายโมเลกุลยางด้วยกำมะถัน [13]

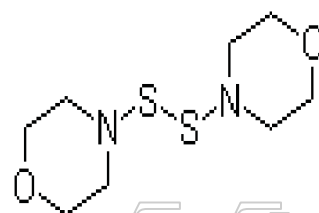
อย่างไรก็ตามพันธะเคมีแบบ Polysulphide จะให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดีแต่ไม่ทนต่อความร้อนเนื่องจากพันธะ S-S เป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง ในขณะที่ยางที่มีพันธะแบบ Mono- หรือ Disulphide จะให้สมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่า แต่ยางจะเสถียรต่อความร้อนได้ดี

2.7.2 ระบบทำใหยางคงรูปด้วยสารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน

นอกจากการใช้ธาตุกำมะถันเป็นสารคงรูปแล้ว สารประกอบอินทรีย์ที่สลายตัวให้กำมะถันที่อุณหภูมิการอบให้ยางคงรูปก็สามารถใช้เป็นสารคงรูปได้ สารกลุ่มนี้ได้แก่ TMTD (Tetramethyl thiuram disulphide) และอนุพันธ์ของ morpholine เช่น DTDM (Dithio dimorpholine) สูตรโครงสร้างของ TMTD และ DTDM แสดงดังในภาพที่ 11



tetramethyl thiuram disulfide



4,4'-Dithiodimorpholine

ภาพที่ 11 แสดงสูตรโครงสร้างของ TMTD และ DTDM [14]

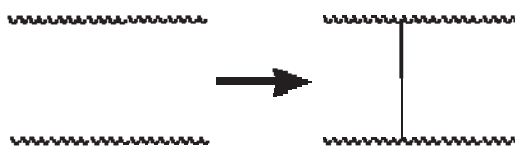
การใช้สารประกอบพวกนี้เป็นสารคงรูปมีข้อดีคือลดปัญหาการเกิดการบลูม (bloom) และเนื่องจากปฏิกิริยาจะไม่เกิดจนกว่ากำมะถันจะสลายตัวออกมา ดังนั้นจึงลดปัญหาการเกิดยาง scorch สารพวกนี้ยังก่อให้เกิดพันธะเคมีแบบ monosulphide เป็นส่วนใหญ่ทำใหยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีมาก

2.7.3 ระบบทำใหยางคงรูปด้วยสารที่ไม่มีกำมะถัน

2.7.3.1 เปอร์ออกไซด์

เป็นสารคงรูปที่สำคัญสำหรับยางที่มีโมเลกุลอิ่มตัว (Saturation) หรือ โมเลกุลที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อปฏิกิริยาในการสร้างพันธะเคมีเชื่อมโมเลกุล เช่น ยาง EPM เป็นต้น ในทำนองเดียวกันเปอร์ออกไซด์ก็สามารถใช้เป็นสารคงรูปสำหรับยางที่ไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ ยาง SBR และยาง NBR ได้ และจะทำให้ยางเหล่านี้ทนต่อความร้อนได้ดี สารกลุ่มนี้ไม่ได้

เข้าไปเชื่อมระหว่างโมเลกุลของยาง แต่จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Radicals) แล้วเกิดเป็นพันธะเคมีแบบคาร์บอน-คาร์บอน ระหว่างสายโมเลกุลของยาง ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การเชื่อมโยงแบบพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่เกิดจากการใช้เปอร์ออกไซด์

2.7.3.2 โลหะออกไซด์

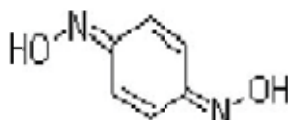
เช่น ZnO ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของรูปของยางนีโอพรีน โดยนิยมใช้ร่วมกับ MgO เพื่อเป็นตัวจับอะตอมคลอรีนที่เกิดขึ้น

2.7.3.3 สารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ หรือมากกว่า

สารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ บางชนิดสามารถใช้เป็นสารที่ทำให้ยางคงรูปได้ เพราะหมู่ฟังก์ชันที่ปลายด้านหนึ่งของสารประกอบเหล่านี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่โมเลกุลยาง ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันอีกปลายด้านหนึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่โมเลกุลยางที่อยู่ใกล้เคียง สารประกอบเหล่านี้จึงมีหน้าที่เปรียบเสมือนสะพานเชื่อมสายโซ่โมเลกุลยางเข้าด้วยกัน ตัวอย่างที่สำคัญของสารประกอบเหล่านี้ ได้แก่

ควิโนนไดออกไซม์ (Quinonedioxime)

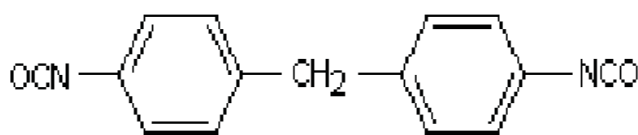
สารประกอบในกลุ่มควิโนนไดออกไซม์สามารถแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระได้ง่าย จึงนิยมใช้เป็นสารที่ทำให้ยางคงรูป เพราะจะทำให้ยางเกิดการคงรูปได้เร็วโดยไม่ต้องใช้กำมะถันและยางคงรูปที่ได้ก็จะมี ความคงทนต่อความร้อนและไอน้ำสูงเป็นพิเศษ ตัวอย่างที่สำคัญของสารประกอบกลุ่มนี้คือ เบนโซควิโนนไดออกไซม์ (p-benzo quinone dioxime), CDO) และไดเบนโซควิโนนไดออกไซม์ (Dibenzo-CDO) สูตรโครงสร้างของเบนโซควิโนนไดออกไซม์ ดังแสดงในภาพที่ 13



p-Quinone dioxime

ภาพที่ 13 สูตรโครงสร้างของ P-Quinone dioxime [14]

สารประกอบในกลุ่มไอโซไซยาเนต ได้รับการพัฒนาให้สามารถใช้ในการคงรูปของยางธรรมชาติ ยางคงรูปที่ได้จะมีความคงทนต่อความร้อนสูง และยังมีความแข็งแรงสูงกว่าที่ได้จากการคงรูปด้วยระบบกำมะถันอีกด้วย เช่น บล็อกไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (Block diphenyl methanediisocyanate) สูตรโครงสร้างของไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต ดังแสดงในภาพที่ 14



diphenylmethane diisocyanate

ภาพที่ 14 สูตรโครงสร้างของ Diphenylmethane diisocyanate [14]

ไดเอมีน (Diamine)

สารประกอบในกลุ่มไดเอมีน เช่น เฮกซะเมทิลีน ไดเอมีน (Hexamethylene diamine) ใช้ร่วมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือตะกั่วออกไซด์ (PbO) สามารถใช้ในการคงรูปยางฟลูออโรคาร์บอนได้ แต่ในปัจจุบันสารประกอบดังกล่าวนี้ไม่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีระยะเวลาสกรอว์ชี่ที่สั้นมาก จึงทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปด้วยความยากลำบาก ยางคงรูปที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำและยังมีสมบัติการเสถียรหลังการกดอัดที่ไม่ดี ในปัจจุบันผู้ผลิตจึงนิยมใช้บิสฟีนอล เอ-เอฟ (Bisphenol AF) ร่วมกับตัวจับกรด เช่น MgO/Ca(OH)₂ แทน เพราะระบบการคงรูปแบบหลังนี้จะทำให้ยางมีระยะเวลาการ สกรอว์ชี่ที่ยาวขึ้น นอกจากนี้ยางคงรูปที่ได้ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าและมีค่าการเสถียรหลังการอัดที่ต่ำกว่า

นอกจากการใช้สารเคมีดังกล่าวแล้ว การฉายรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา ก็สามารถทำให้ยางคงรูปได้เช่นกัน โดยเมื่อถูกรังสีโมเลกุลของยางจะแตกตัวให้อนุมูลอิสระและจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบ คาร์บอน-คาร์บอนทำให้ยางที่ได้มีความเสถียรต่อความร้อน มีความบริสุทธิ์สูงเพราะไม่มีสารเคมีอื่นใดเจือปน จึงเหมาะสำหรับการผลิตอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนยางที่ใช้ทางการแพทย์

2.8 สารเคมีสำหรับยาง (Additives for rubber) [14]

สารเคมีสำหรับยาง หมายถึง สารเคมีต่างๆที่ผสมลงไปนยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่ คุณสมบัติตามต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีแล้วไม่อาจนำไปใช้งานได้เว้นแต่สารเคมีเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับยางก่อนซึ่งสามารถเร่งได้ด้วยกาให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีเรียกว่ายางไม่คงรูป (Green compound หรือ Uncured compound) ส่วนยางที่สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางแล้วเรียกว่ายางคงรูป (Vulcanized rubber หรือ Cured rubber) เหตุผลในการผสมยางกับสารเคมีมี 4 ประการคือ

2.8.1 เพื่อแก้ไขข้อเสียของยาง ซึ่งข้อเสียของยางมีดังนี้คือ

2.8.1.1 ยางที่มีคุณสมบัติเป็นทั้งพลาสติก (Plastic) และมีอีลาสติก (Elastic) สมบัติเป็นพลาสติก (Plastic) คือ ความสามารถที่ยางจะพยายามรักษารูปร่างที่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามแรงกระทำ ส่วนสมบัติเป็นอีลาสติก (Elastic) คือความสามารถที่ยางพยายามจะรักษารูปร่างเดิมก่อนที่จะทำให้เปลี่ยนแปลงไปตามแรงกระทำ การที่ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติกนี้ ทำให้ไม่สามารถนำยางไปใช้งานได้โดยตรง

2.8.1.2 ยางเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่อุณหภูมิต่ำยางจะแข็งกระด้าง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยางจะนิ่มหรือเยิ้ม การมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกทำให้ยางใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด อุณหภูมิสูงประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส ยางจะนิ่มลง

2.8.1.3 ยางมีความแข็งแรงต่ำ ความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ และความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ เนื่องจากความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อย สายโซ่เคลื่อนไหวได้ง่ายเกินไป ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนไหวเพื่อกระจายพลังงานที่ได้รับไปสู่ส่วนอื่นได้เป็นผลให้ความแข็งแรงของวัสดุต่ำ

2.8.1.4 ยางสามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลายหลายชนิด เช่น โทลูอิน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ เป็นต้น

2.8.2 เพื่อเป็นตัวช่วยในขบวนการแปรรูปยาง

ปกติยางดิบที่ยังไม่ผสมกับสารเคมีอะไร จะมีสมบัติเหนียวและทำให้ลำบากในการนำไปเข้าขบวนการต่างๆ เช่น การรีดยางให้เป็นแผ่นเรียบจากเครื่องรีดเรียบ (Calender) หรือการทำท่อยาง เส้นยาง จากเครื่องอัดรีด (Extruder) เป็นต้น ขบวนการเหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงความผิดปกติหรือความไม่สม่ำเสมอของยางเมื่อผ่านเครื่องรีดเรียบ และความผิดปกติในการพองตัวของยางเมื่อผ่านเครื่องอัดรีด แต่หลังจากที่ได้เติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารตัวเติม สารช่วยในการ

แปรรูปร่าง จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องรีดเรียบมีผิวเรียบ และสามารถจะลดปัญหาเกี่ยวกับความไม่สม่ำเสมอของแผ่นยางหรือการพองตัวของท่อยางได้

2.8.3 ทำให้ยางมีขอบเขตการใช้งานกว้างขึ้น

จากความเหมาะสมในการผสมสารเคมีในยาง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก และผลิตภัณฑ์ที่ได้เหล่านี้จะเปลี่ยนจากอ่อนไปจนถึงผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถในการทนความร้อน เช่น กระจ่างน้ำร้อน และผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งมาก เช่น ปลอกหม้อเบตเตอร์ที่ต้องการสมบัติของผลิตภัณฑ์อย่างไร ก็สามารถเลือกชนิดและปริมาณสารเคมีได้ตามวัตถุประสงค์

2.8.4 เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต

การนำยางมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ ถ้าใช้แต่เนื้อยางล้วนๆ จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงสามารถผสมสารอื่นที่มีราคาถูกลงไป เช่น Clay จะทำให้ลดต้นทุนการผลิตลงสารที่ใช้ผสมยางเพื่อการผลิตวัสดุสำเร็จรูปยางสารต่างๆที่ใช้สำหรับการผลิตวัสดุสำเร็จรูปยาง อาจจำแนกเป็นพวกๆ ได้ดังนี้

2.8.4.1 สารทำให้ยางคงรูปหรือสารวัลคาไนซิง (Vulcanizing agent) เป็นสารก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (crosslink) ตรงตำแหน่งที่วงไวต่อปฏิกิริยาได้แก่ สารกำมะถัน สารที่มีส่วนประกอบของกำมะถัน สารเปอร์ออกไซด์

2.8.4.2 สารเร่ง (Accelerator) ได้แก่ สารเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดปานกลางหรือเร็ว เช่น กัวนินีน (Guanidine), ไธอาโซล (Thiazole), ซัลฟิनाไมด์ (Sulphenamide), ไธยูเรม (Thiuram)

2.8.4.3 สารกระตุ้น (Activator) หรือ สารเสริมตัวเร่ง เป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการวัลคาไนซิงยางให้เร็วขึ้นโดยการทำให้สารเร่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อจะได้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น เร่งอัตราการวัลคาไนซิงยางให้เร็วขึ้น และปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้นโดยทำให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงขึ้น ได้แก่ กรดสเตียริก (Stearic acid) และซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)

2.8.4.4 สารตัวเติม (Filler) เป็นสารอื่นๆที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อลดต้นทุนในการผลิตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น พวกเขม่าดำ (Carbon black), แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) และ ซิลิกา (Silica) เป็นต้น

2.8.4.5 สารช่วยในการแปรรูปยาง หรือสารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เป็นสารทำให้ยางนิ่ม สารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) แบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

2.8.4.5.1 สารทำให้ยางนิ่มโดยทางเคมี (Chemical Plasticizer) เป็นสารเคมีที่เมื่อใส่เข้าไปในยางจะทำให้ยางนิ่มและลดเวลาของการบดยางลง การใช้งานมักใช้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มักใส่สารเคมีประเภทนี้ลงไปในช่วงเมื่อเริ่มต้นการผสมหรือบดในเครื่องบด 2 ลูกกลิ้งและปล่อยให้สารทำปฏิกิริยากับยางเป็นระยะเวลาสั้นๆก่อนที่จะใส่สารอื่นลงไป ได้แก่ Sulphonic acid, Xylyl mercaptan

2.8.4.5.2 สารช่วยทำให้ยางนิ่มโดยทางกายภาพ (Physical plasticizer) เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่เข้าไปแล้วจะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนไหวได้ง่าย ยางจะนิ่มลง แปรรูปได้ง่ายขึ้นที่สำคัญได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันเอสเทอร์

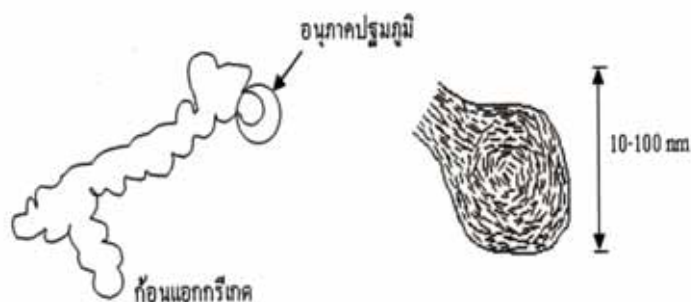
2.8.4.6 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agent) ได้แก่สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidant) หรือ สารต้านทานปฏิกิริยาไอโซน (Antiozonant) ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิดจะทำให้ยางมีอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางยาวนานขึ้น

2.8.4.7 สารพิเศษอื่นๆ (Miscellaneous ingredient) ไม่ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใส่สำหรับยางทั่วไป แต่บางครั้งจะใส่ลงไปในช่วงเมื่อมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติพิเศษบางประการ เช่น สารที่ทำให้เกิดสี (Coloring material) สารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) สารหน่วง (Retarder) เป็นต้น

2.9 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารเสริมแรงที่ใช้ในยาง [6,15]

2.9.1 ผงเขม่าดำ (Carbon black)

ผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง องค์ประกอบหลักของผงเขม่าดำคือ "ธาตุคาร์บอน" อนุภาคของโครงสร้างเขม่าดำมีอนุภาคกิ่งแกรไฟต์ดังแสดงในภาพที่ 15 นั่นคืออะตอมของคาร์บอนจะจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ขนานกัน (โดยเฉพาะชั้นด้านนอก) บางส่วนก็เกิดการเชื่อมล้ำกันเล็กน้อย ทำให้อนุภาคที่มีโครงสร้างแบบกิ่งแกรไฟต์ ผงเขม่าดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-100 นาโนเมตร



ภาพที่ 15 โครงสร้างของผงเขม่าดำ [15]

2.9.1.1 การผลิตผงเขม่าดำ ผงเขม่าดำแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลักๆตามชนิดกรรมวิธีการผลิต ได้แก่

2.9.1.1.1 Furnace black เป็นผงเขม่าดำที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ผงเขม่าดำชนิดนี้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นวงแหวน (Highly aromatic oil) อนุภาคปฐมภูมิที่ได้จากวิธีการนี้จะมีขนาด 20-80 นาโนเมตร

2.9.1.1.2 Thermal black เป็นผงเขม่าดำที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีอากาศของแก๊สธรรมชาติ ผงเขม่าดำชนิดนี้มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิก่อนข้างใหญ่โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 120-500 นาโนเมตรและพื้นที่ผิวของเขม่าดำชนิดนี้ไม่มีรูพรุน เขม่าดำชนิดนี้จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่สู้เท่าเขม่าดำชนิดอื่นๆ เหตุผลนี้เทอร์เมอร์แบล็คจึงไม่มีการเสริมแรงในยางเพราะให้ค่าความต้านทานแรงดึงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นแต่เขม่าดำชนิดนี้จะช่วยให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ง่ายและยางที่ได้จะมีสมบัติการกระด้างกระดอนและสมบัติเชิงพลวัตที่ดีกว่าเฟอร์เนชแบล็ค ในปัจจุบันมีการใช้น้อยมากเนื่องจากมีราคาสูงกว่าเฟอร์เนชแบล็ค

2.9.1.1.3 Channel black เป็นผงเขม่าดำที่ได้จากการเผาไหม้บางส่วน (Partial combustion) โดยการผ่านก๊าซธรรมชาติไปยังช่องไฟ เขม่าที่เกิดจะไปเกาะที่ฝาผนังเหล็กด้านบน จากนั้นก็ทำการเก็บรวบรวมเขม่าดำที่ได้ อนุภาคปฐมภูมิของชานเนลแบล็คจะมีขนาดเล็กมาก (9-30 นาโนเมตร) และมีความเป็นกรดค่อนข้างสูงจึงมีฤทธิ์หน่วงปฏิกิริยาของรูป ปัจจุบันมีการใช้ในอุตสาหกรรมน้อยมาก

2.9.1.2 ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ

ขนาดอนุภาคของเขม่าดำมีรูปร่างเป็นทรงกลมจะไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ แต่จะถูกหลอมรวมเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่า "แอกกริเกต" ขอบเขตการเสริมแรงของผงเขม่าดำ

ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของแอกกรีเกตแต่ขึ้นอยู่กับอนุภาคปฐมภูมิ ผงเขม่าดำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ยางทั่วไปมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิในช่วง 19-95 นาโนเมตร โดยทั่วไปผงเขม่าดำมีพื้นที่ผิวจำสูงและอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ผงเขม่าดำเกรดนี้จะเสริมแรงให้กับยางได้ดี

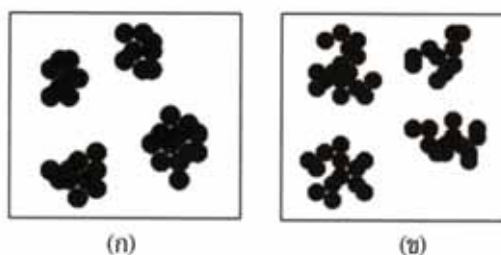
2.9.1.3 โครงสร้าง

ของเขม่าดำจะบ่งบอกถึงลักษณะการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคผงเขม่าดำ นอกจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคปฐมภูมิที่เกิดเป็นแอกกรีเกต ซึ่งจัดเป็นโครงสร้างแบบปฐมภูมิแล้วแอกกรีเกตแต่ละกลุ่มยังสามารถเกาะกลุ่มได้อย่างหลวมๆ ด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อน (แรงแวนเดอร์วาลส์) เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิที่เกิดเป็นโครงสร้างเรียกว่า "แอกโกลเมอเรต" ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะถูกทำลายได้ง่ายด้วยแรงเฉือนที่เกิดในระหว่างกระบวนการผสม โดยทั่วไปผงเขม่าดำมีการกระจายตัวของทั้งจำนวนอนุภาคและขนาดของแอกกรีเกตที่กว้างมาก

การเกาะกลุ่มกันเป็นโครงสร้างดังกล่าวส่งผลให้ผงเขม่าดำมีรูพรุนภายในเกิดขึ้น ปริมาณของรูพรุนนี้จะขึ้นอยู่กับระดับการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนของผงเขม่าดำ โดยทั่วไปโครงสร้างของผงเขม่าดำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ตามระดับการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน คือ โครงสร้างแบบต่ำ (Low structure) โครงสร้างแบบปกติ (Normal structure) และ โครงสร้างแบบสูง (High structure) เขม่าดำที่มีโครงสร้างแบบต่ำ คือเขม่าดำที่มีอนุภาคปฐมภูมิมักเกาะกันอย่างหนาแน่น ทำให้มีรูพรุนหรือช่องว่างน้อย ส่วนเขม่าดำที่มีโครงสร้างแบบสูง คือเขม่าดำที่มีอนุภาคปฐมภูมิมักเกาะกันอย่างหลวมๆ ทำให้มีรูพรุนภายในมาก

ผงเขม่าดำมีโครงสร้างยิ่งสูง รูปร่างของแอกกรีเกตก็ยิ่งไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นแอกกรีเกตเหล่านี้ก็จะมีความสามารถในการเกาะกลุ่มได้น้อยลง ส่งผลให้ผงเขม่าดำมีโครงสร้างมีปริมาตรของช่องว่างภายในสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการวัดปริมาตรของช่องว่าง เป็นตัวบ่งบอกระดับโครงสร้างของผงเขม่าดำ

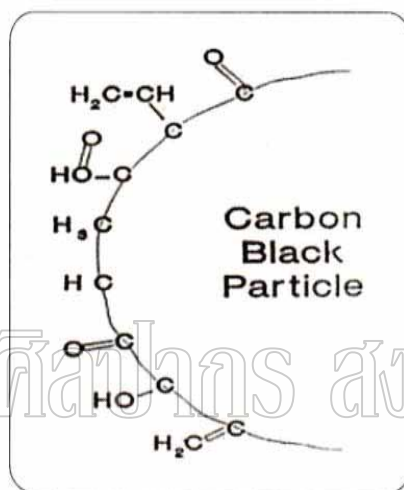
โดยทั่วไปเทอร์โมลแบล็คจะมีปริมาตรของช่องว่างภายในโครงสร้างต่ำมาก และเฟอร์เนซแบล็คซึ่งมีปริมาตรของช่องว่างภายในโครงสร้างสูงมาก ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 โมเดลแสดงโครงสร้างของเขม่าดำ (ก) แบบต่ำ และ (ข) แบบสูง [15]

2.9.1.4 สมบัติทางเคมีของพื้นผิว

ผงเขม่าดำประกอบด้วยโครงสร้างของธาตุคาร์บอนประมาณ 90-95% และองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ ออกซิเจนและไฮโดรเจน ลักษณะทางเคมีของผงเขม่าดำค่อนข้างแตกต่างกันมากเพราะพื้นที่ผิวของผงเขม่าดำประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันทางเคมีมากมายและการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้บนผิวก็แตกต่างกันดังภาพที่ 17 หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวเหล่านี้ไม่เพียงจะมีผลต่อความว่องไวของปฏิกิริยา ยังมีผลต่ออัตราเร็วการคงรูปของยางอีกด้วย การเพิ่มของปริมาณออกซิเจนในเขม่าดำ จะทำให้ยางมีค่าเวลาสกรอว์ที่ยาวขึ้นมีอัตราเร็วในการคงรูปและค่าโมดูลัสที่ต่ำลง



ภาพที่ 17 หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำ [15]

ปัจจุบันไม่มีวิธีมาตรฐานที่สามารถวัดสมบัติทางเคมีที่ของพื้นที่ผิวได้โดยตรง แต่สามารถวัดค่าออกไซด์ของพื้นที่ผิวได้จากการวัดระดับความเป็นกรด - ด่าง และน้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อให้ความร้อนกับเขม่าดำที่ 950 องศาเซลเซียส การวัดปริมาณยางบวคบางครั้งก็สามารถใช้บ่งบอกความว่องไวทางปฏิกิริยาของพื้นผิวได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ปริมาณของยางบวคก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปริมาณของเขม่าดำ การกระจายตัวของโมเลกุลของยาง เป็นต้น

2.9.1.5 ความเป็นรูพรุนของอนุภาค

พื้นที่ผิวของผงเขม่าดำจะไม่เรียบแต่จะมีลักษณะเป็นรูพรุน การวัดความเป็นรูพรุนของเขม่าดำ สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของของเขม่าดำที่ได้จาก (ก) การคำนวณจากขนาดของอนุภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยตั้งสมมุติฐานว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม (ข) การดูดซับธาตุไนโตรเจนหรือที่เรียกว่า เทคนิค BET

2.9.1.6 การนำไฟฟ้าและความร้อน

ผงเขม่าดำสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้อย่างดี ค่าของการนำไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้น ตามโครงสร้างที่มีความพรุนมากและพื้นที่ผิวของเขม่าที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีช่องว่างที่เป็นอากาศมากขึ้นทำให้ความสามารถในการไหลของอิเล็กตรอนลดลง หมู่ฟังก์ชันทางเคมี โดยเฉพาะหมู่มือออกซิเจนเป็นองค์ประกอบก็มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของผงเขม่าดำเช่นกัน เพราะได้มีการศึกษาพบว่า การกำจัดหมู่มือฟังก์ชันเหล่านี้ โดยการให้ความร้อนที่สภาวะบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าลดลงอย่างมาก

2.9.1.7 ผลของผงเขม่าดำต่อสมบัติของยาง

โดยปกติผงเขม่าดำมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิขนาดเล็กแม้ว่าจะให้การเสริมแรงยางที่ดี แต่ก็จะทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากขึ้น เพราะความหนืดของยางคอมพาวด์จะสูงขึ้นมาก ส่วนโครงสร้างของยางคอมพาวด์ก็จะมีผลต่อกระทบต่อกระบวนการผลิตมากกว่าสมบัติการคงรูปของยาง ถ้าโครงสร้างของเขม่าดำสูงขึ้น ยางคอมพาวด์ที่ได้ก็จะมี ความหนืดสูงขึ้นด้วย ส่วนยางคงรูปที่ได้แม้ว่าจะมีค่ามอดูลัสและความแข็งแรงสูงขึ้นก็ตาม แต่ไม่มีผลต่อความทนทานต่อแรงดึงหรือความทนทานต่อแรงฉีกขาด

หมู่มือฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของผงเขม่าดำก็มีผลกระทบต่ออัตราเร็วในปฏิกิริยาการคงรูป โดยเฉพาะหมู่มือคาร์บอนิลิกและหมู่มือฟีนอลิก เพราะหมู่มือฟังก์ชันเหล่านี้จะส่งผลให้ ความเป็นกรดสูงขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาในการคงรูปได้ช้าลง

สำหรับผงเขม่าดำที่มีอนุภาคปฐมภูมิใกล้เคียงกัน ผงเขม่าดำที่มีรูพรุนของพื้นผิวที่สูงกว่าก็จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าและอาจมีผลทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปเกิดได้ช้าลง เพราะสารตัวเร่งปฏิกิริยาอาจถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนของพื้นผิวมากขึ้น นอกจากนี้พื้นผิวของเขม่าดำที่มีรูพรุนสูง ก็แสดงว่าผงเขม่าดำเกรดนี้จะมีความหนาแน่นต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักมากขึ้น จึงทำให้ยางมีสมบัติในการกระเดื่องกระดอนลดลง แต่ยางก็จะมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การเติมผงเขม่าดำที่ไม่มีรูพรุนลงไป ในปริมาณที่เท่ากัน

2.9.1.8 การใช้งานในอุตสาหกรรมยาง

ผงเขม่าดำประมาณร้อยละ 80 ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยางล้อ โดยทั่วไปนิยมใช้เทอร์มอลแบล็กในการผลิตยางบุผนังด้านในของล้อ (Inner linings) ใช้เฟอร์เนสแบล็กเกรดที่ให้การเสริมแรงต่ำในการผลิตโครงล้อ (Carcasses) และเกรดที่ให้การเสริมแรงสูงในการผลิตดอกยาง (Tread)

เฟอร์เนซแบล็กเกรดที่มีปริมาตรช่องว่างในโครงสร้างสูงและให้การเสริมแรงสูงจะใช้ในการผลิตดอกยางที่ทำจากยางสังเคราะห์เพราะจะช่วยให้ดอกยางมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น และช่วยลดการเกิดรอยแตกตามร่อง (Groove cracking) สำหรับการผลิตดอกยางของรถวิงทางวิบากนั้นนิยมใช้ยางธรรมชาติผสมกับผงเขม่าดำเกรดที่มีโครงสร้างแบบต่ำแต่ให้การเสริมแรงสูงเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการฉีกขาดของยางล้อ

เทอร์โมลแบล็กซึ่งมีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิค่อนข้างใหญ่ (เสริมแรงในยางได้น้อยมาก) นิยมใช้ในการผลิตสายพานรูปตัววี (V-belt) เพราะจะทำให้เกิดความร้อนสะสมต่ำในระหว่างการใช้งาน

ปัจจุบัน เขม่าดำที่ใช้กันมากที่สุดคือเฟอร์เนซแบล็กเพราะเขม่าดำชนิดนี้สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้มากมายหลากหลายชนิด โดยเกรดที่มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็กก็จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงและมีความต้านทานต่อการขัดถูสูง เช่น ผิวด้านบนของสายพานลำเลียง (Conveyor belt covers) และพื้นรองเท้าบางประเภท สำหรับเกรดที่มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิใหญ่ก็นิยมใช้ในการผลิตท่ออย่าง ยางหุ้มสายเคเบิล และผลิตภัณฑ์ยางที่ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดรีด เป็นต้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

2.9.2 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

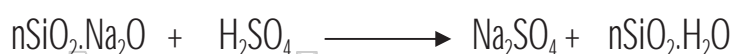
มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) เป็นสารเสริมแรงที่นำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์กันอย่างแพร่หลาย โครงสร้างของแร่กลุ่มนี้ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่น และแผ่นอลูมินา 1 แผ่น ซึ่งอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นซิลิกาทั้งสอง อะตอมซิลิกอนและอลูมิเนียมในแผ่นเหล่านั้นต่างก็เกาะยึดอะตอมของออกซิเจนร่วมกันประกอบกันเป็นผลึกของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ เนื่องจากโครงสร้างของแร่กลุ่มนี้ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่น และแผ่นอลูมินา 1 แผ่นจึงมักเรียกว่าเป็นโครงสร้างประเภท 2:1 ซึ่งมอนต์มอริลโลไนต์นี้เป็นสารเสริมแรงที่มีขนาดในระดับนาโน โดยมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร ความยาวประมาณ 200-300 นาโนเมตร จากโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์พบว่าสามารถที่จะปรับปรุงได้โดยการใช้ไอออนของสารอินทรีย์แลกเปลี่ยนกับไอออนของสารอนินทรีย์ที่อยู่ระหว่างชั้นซิลิเกตโดยผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ส่งผลให้ชั้นซิลิเกตสามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่าสารเสริมแรงทั่วไป งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามอนต์มอริลโลไนต์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนได้ดีมาก โดยทำให้วัสดุที่ได้มีความแข็งตึง (Stiffness) ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) อุณหภูมิการโค้งงอ (Heat distortion temperature) ที่สูง และป้องกันต้องการผ่านของก๊าซ (Gas barrier action) ได้เป็นอย่างดี เป็นต้น

2.9.3 ซิลิกา (Silica)

ถึงแม้ว่าในการเสริมแรงด้วยซิลิกามีสมบัติในด้านต่างๆที่ต่ำกว่าและแพงกว่าผงเขม่าดำ (Carbon black) แต่ถึงอย่างนั้นซิลิกาก็ยังเป็นสารตัวเติมที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีสันต่างๆ เนื่องจากซิลิกามีสีอ่อนซึ่งต่างจากผงเขม่าดำที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีแต่สีดำเท่านั้น นอกจากนี้ในบางกรณียังใช้ซิลิกา ร่วมกับผงเขม่าดำเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการฉีกขาดและเพิ่มความแข็งแรงระหว่างการยึดติดระหว่างยางกับสิ่งทอ ในปัจจุบันซิลิกาถูกนำมาใช้ในการผลิตยางล้อรถยนต์เพราะซิลิกาจะทำให้ค่าความต้านทานต่อการหมุน (Rolling resistance) ต่ำลงจึงสามารถช่วยประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง

2.9.3.1 ซิลิกาแบบตกตะกอน

เป็นซิลิกาที่นิยมใช้ทำเป็นตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ เนื่องจากมีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเหมาะกับกระบวนการในอุตสาหกรรมยางและราคาไม่แพง ซึ่งสามารถผลิตได้จากวิธีการตกตะกอน (Precipitation) ด้วยกรดซัลฟูริกของสารละลายอัลคาไลซิลิเกต (Alkali-silicate) เช่นในกรณีของโซเดียมซิลิเกตดังแสดงในสมการ



ซึ่งหลังจากได้ซิลิกาที่อิ่มตัวด้วยน้ำแล้วก็นำซิลิกานี้ไปกรองและล้างเพื่อกำจัดโซเดียมซัลเฟต ก่อนที่จะนำไปทำให้แห้งและเก็บลงในภาชนะบรรจุ ซิลิกาที่ผลิตได้จากวิธีนี้เรียกว่า "ซิลิกาแบบตกตะกอน" ซึ่งสมบัติโดยทั่วไปของซิลิกาแบบตกตะกอนนั้นสามารถแสดงได้ในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงสมบัติโดยทั่วไปของซิลิกาแบบตกตะกอน [15]

สมบัติ	ปริมาณ
การสูญเสียน้ำหนักที่ 105 องศาเซลเซียส, %	4-7
การสูญเสียน้ำหนักที่ 1000 องศาเซลเซียส, %	8-12
พื้นที่ผิว BET, m ² /g	45-700
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, μm	10-100
ดัชนีหักเห	1.45
ความหนาแน่น, g/cm ³	2.0

2.9.3.2 ซิลิกาฟุ่ม

ซิลิกาฟุ่มหรือซิลิกาที่ได้จากการระเหยจะเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ประกอบด้วยน้ำน้อยกว่า 2% สามารถเตรียมได้จากการเผาสารประกอบซิลิกอนจนระเหยเป็นไอและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคที่เล็กมากๆ ซิลิกาฟุ่มเป็นสารเติมแต่งที่ช่วยในการเสริมแรงได้ดี ซึ่งให้ค่าความต้านทานต่อการดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการขีดถู โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยางซิลิโคน ซิลิกาฟุ่มจะเป็นตัวหน่วงทำให้ยางใช้เวลาในการคงรูปนานขึ้น ซึ่งทำให้ต้องเพิ่มปริมาณของตัวเร่งจำพวกไกลคอลหรือเอมีนมากขึ้น ในกระบวนการขึ้นรูปควรจะใช้พวกแวช พอลิเอทิลีน หรือสารหล่อลื่นอื่นเพื่อหลีกเลี่ยงการเกี่ยวพันกับลูกกลิ้ง หรือการยึดติดกับแม่พิมพ์หลังจากที่ยางสุกแล้ว

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เถ้าแกลบเป็นของเหลือจากการเผาแกลบในโรงสีข้าว ซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบมากกว่า 60% สามารถใช้เป็นแหล่งซิลิการาคาถูกได้ การผลิตซิลิกาจากเถ้าแกลบมีข้อได้เปรียบกว่าการผลิตจากสารอนินทรีย์ คือ กระบวนการผลิตใช้อุณหภูมิต่ำ และมีต้นทุนการผลิตต่ำ โดยทั่วไปการผลิตซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดเล็กมักใช้สารตั้งต้นเป็น TMOS, TEOS และ PEDS ซึ่งมีราคาค่อนข้างแพง สำหรับในระดับอุตสาหกรรมย่อมไม่คุ้มค่า [1]

วิธีการสกัดซิลิกาโดยทั่วไปแล้ว นิยมทำโดยละลายเถ้าแกลบในสารละลายด่าง (Alkaline solution) เพื่อเปลี่ยนรูปให้เป็นสารละลาย Sodium silicate จากนั้นจึงเติม HCl เพื่อทำให้ pH ต่ำลง จะได้ silica aqua gel แล้วจึงล้างเพื่อทำความสะอาด นำ Silica aqua gel ที่ได้ไปอบให้แห้งก็จะได้ซิลิกาที่เรียกว่า Xerogel [2]

ส่วนในการผสมยาง (Latex) กับสารละลาย Sodium silicate นั้น จะต้องอาศัยเทคนิค Co-coagulating จากงานวิจัยของ T. Wang และคณะ [2] พบว่าเทคนิคนี้จะทำให้คุณสมบัติของ Rubber-pristine clay nanocomposites โดยรวมดีขึ้น เนื่องจากช่วยเพิ่ม ความแข็งที่ผิว, ความต้านทานต่อการดึง, ความต้านทานแรงฉีก

ในปัจจุบันเทคโนโลยีส่วนใหญ่ที่ใช้ในการสังเคราะห์ Rubber-clay nanocomposites สามารถเตรียมโดยกระบวนการ Rubber melt ของสารละลายที่เกิดการ Intercalated ของ Organoclay และทางน้ำยาง Latex โดยการใช้ Pristine clay เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายที่เกิดการ Intercalated ของ Organoclay กับวิธีการ Co-coagulating ของ Rubber latex ที่มี Clay แวนดอยอยู่ ซึ่งใช้ Pristine clay (Non-organoclay) พบว่าวิธีหลังนี้อาจเป็นทางเลือกใหม่ที่ดีที่สามารถทำได้ใน

ระดับอุตสาหกรรม เพราะราคาของ Pristine clay ไม่แพง มีวิธีการเตรียมง่ายและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ [16]

Silica aerogel เตรียมได้มาจากกระบวนการ Sol-gel จากนั้นตามด้วยการอบให้แห้งภายใต้ความดันบรรยากาศโดยใช้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งสารละลายโซเดียมซิลิเกตได้มาจากการสกัดซิลิกาจากแกลบโดยใช้สารละลาย Sodium hydroxide ปรับ pH ให้เป็นกลางโดยใช้สารละลายกรด Sulfuric จะได้ซิลิกาที่อยู่ในรูป Silica hydrosol จากนั้นต้องทำการล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้งเพื่อกำจัดเกลือ Sodium sulfate ที่เกิดขึ้น [17]

Y. Hsieh และคณะ ศึกษาการสกัดซิลิกาจากแกลบโดยใช้สารละลาย Sodium hydroxide ความเข้มข้นที่เหมาะสมและสามารถสกัดซิลิกาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือความเข้มข้นที่ 1 Molar จึงทำให้ได้สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เมื่อผ่านกระบวนการ Sol-gel แล้วมีองค์ประกอบเป็นซิลิกาอยู่สูงที่สุด และพบว่าเมื่ออุณหภูมิการสกัดเพิ่มขึ้นก็มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน [18]

Rubber compound ต้องการสารเสริมแรง Vulcanized rubbers ปกติจะเสริมแรงด้วย Carbon black และ Inorganic minerals ด้วย เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล Carbon black เป็นสารเสริมแรงที่ดีมาก มีการกระทำกับยางที่ดี แต่บ่อยครั้งมันจะลดความสามารถในการผลิต Rubber compound เมื่อเติม Carbon black ในปริมาณมากๆ [19]

J. Karger Kocsis [20] พบว่า Montmorillonite ใช้เป็นสารเติมในยางแต่ยังมีการเสริมแรงได้ไม่ดี เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่และพื้นที่ผิวน้อย แต่ในทางตรงกันข้าม Minerals ที่ใช้เพื่อเสริมแรง เช่น Fibril และ Platelet layered clays เป็น Silicate layer มีโครงสร้างเป็น Planar หนา 1 นาโนเมตร และยาวมากกว่า 500 นาโนเมตร ชั้นของซิลิเกตไม่สามารถแยกออกได้ด้วยวิธีการปกติ แต่สามารถทำให้กระจายตัวออกใน Polymer matrix ได้ด้วยวิธี Co-coagulation และสามารถปรับปรุงพัฒนาสมบัติเชิงกลได้

D. G. Hundiwale และคณะ [21] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมเถ้าลอย โดยศึกษาเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่มีการผสมแคลเซียมคาร์บอเนต และผสมวัสดุยางคอมพอสิตด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) ที่อุณหภูมิและเวลาการบ่ม 140 องศาเซลเซียส และ 40 นาที ตามลำดับ พบว่าสมบัติเชิงกล ทั้งค่าความต้านการดึงยึด (Tensile strength) โมดูลัส (Modulus) ที่ 100, 200 และ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยึด เพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติม (Filler) มากขึ้น โดยเถ้าลอยจะทำให้ค่าความต้านทานการดึงยึดที่ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากรูปทรงของเถ้าลอยที่เป็นทรงกลมทำให้เฟสของยางสามารถเชื่อมติดกับเฟสของเถ้าลอยได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมี

ลักษณะรูปทรงที่ไม่แน่นอน แต่ที่ปริมาณเถ้าลอยมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะทำให้ความต้านทานการดึงยึดและมอดูลัสลดลง เนื่องจากผลจากรวมตัวกันของสารตัวเติม สำหรับค่าความแข็งที่ผิวแบบ Shore A (Hardness shore-A) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น และเนื่องจากสารตัวเติมทั้งสองเป็นออกไซด์ของโลหะอนินทรีย์ (Inorganic metal oxide) ซึ่งมีผลให้วัสดุผสมมีความแข็งที่ผิวมากขึ้น

N. A. N. Alkadasi และคณะ [22] ได้ศึกษาผลของสารคู่ควบ (Coupling agent) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของเถ้าลอยที่เติมในยางบิวตะไดอิน โดยศึกษาเปรียบเทียบกับเถ้าลอยที่ไม่ได้ใช้สารคู่ควบ จากการทดลองพบว่า การเติมเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวด้วย Si-69 ลงไปในยางบิวตะไดอิน ช่วยทำให้เพิ่มค่ามอดูลัสที่การยึดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ และค่าความแข็งที่ผิวให้ดีขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบ Si-69 สามารถเกิดพันธะเคมีเชื่อมระหว่างสองเฟสนี้ ทำให้เถ้าลอยเป็นสารเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

S. Thongsang และ N. Sombatsompop [7] และ N. Sombatsompop และคณะ [23] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของการเติมซิลิกาเกรดการค้า และซิลิกาจากเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิวลงในยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ โดยวิธีการผสมให้เข้ากันบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง และนำสารประกอบยางไปอัดขึ้นรูปร้อนให้ยางคงรูป เพื่อให้ได้เป็นแผ่นยางสำหรับนำไปเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกล ทางด้านความต้านทานแรงดึง การต้านแรงฉีกขาดและความแข็งที่ผิวในส่วน of ยางธรรมชาติ พบว่าการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยลงไป ในยางคอมพาวด์ที่ปริมาณ 0 ถึง 75 phr ทำให้เวลาในการคงรูปยาง และความหนืดของยางธรรมชาติลดลงเมื่อเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยมีโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งโลหะออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นที่ช่วยให้ยางคงรูปเร็วขึ้น ส่วนสมบัติที่ได้หลังจากการวัลคาไนซ์ พบว่า การเติมซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาจากเถ้าลอยในช่วงอัตราส่วนระหว่าง 0 ถึง 30 phr มีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ ค่ามอดูลัสของสารประกอบยางธรรมชาติที่ 200 เปอร์เซ็นต์การดึงยึดตัวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของซิลิกามากกว่า 30 phr พบว่าการเติมซิลิกาเกรดการค้า ทำให้ค่ามอดูลัส ค่าความแข็งที่ผิว และการต้านทานแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ซิลิกาจากเถ้าลอยมีแนวโน้มคงที่ ในส่วนของยางเอสปีอาร์พบว่า พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังจากการวัลคาไนซ์จะคล้ายคลึงกับระบบของยางธรรมชาติ ยกเว้นค่าความต้านทานแรงดึงและการต้านแรงฉีกขาด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ ซิลิกาเกรดการค้าที่สูงขึ้น และมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของซิลิกาจากเถ้าลอย ปัจจัยที่ทำให้สารประกอบยางที่เติมซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาจากเถ้าลอยมีสมบัติที่แตกต่างกัน เนื่องจากแรงกระทำระหว่างขนาดของอนุภาคสารเติมแต่งและปริมาณของสารประกอบเถ้าลอยที่อยู่ในยางคอมพาวด์ ซึ่งเมื่อปริมาณเถ้าลอยสูงขึ้นจะทำหน้าที่เป็นเหมือนสารตัวเติมในยางมากกว่าสารเสริมแรง

จากงานวิจัยในระยะแรก [23] สามารถเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในสารประกอบยางธรรมชาติได้ในปริมาณสูงถึง 60 phr เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนในการผลิตมากขึ้น แต่เนื่องจากสมบัติเชิงกลโดยรวมด้อยกว่าซิลิกาเกรดการค้า จึงนำไปสู่การปรับปรุงผิวเถ้าลอย พบว่ากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวที่เหมาะสม โดยการนำเถ้าลอยเคลือบด้วยสารกลุ่มควาไซเลน (Si-69) ที่ปริมาณความเข้มข้น 2 ถึง 4 % โดยน้ำหนัก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลทางด้านมอดูลัสและการต้านแรงฉีกขาดเพิ่มสูงขึ้น และปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางของสารประกอบยางธรรมชาติมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อเทียบกับการใช้เถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิวทางเคมี ต่อมา S. Thongsang และ N. Sombatsompop [7] ได้ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าลอยด้วยสารกลุ่มควาไซเลน Si-69 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า สารกลุ่มควาไซเลน Si-69 ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล ผ่านการสร้างพันธะ C-S กับโมเลกุลของยางเชื่อมกับอนุภาคเถ้าลอยเกิดผ่านพันธะซิลอกเซน (Siloxane linkage) ขณะที่การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ ที่ปริมาณ Si69 2 - 4 % โดยน้ำหนัก พบว่าสมบัติเชิงกลจะเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณ Si-69 เพิ่มขึ้นเป็น 6 - 8 % เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก พบว่า สมบัติเชิงกลจะลดลง เป็นผลมาจากการลดลงของปริมาณการเชื่อมโยง (Crosslink density) และการเกิดเป็นพอลิซิลอกเซน (Polysiloxane) จากควาไซเลนของ Si-69 อีกทั้งยังเป็นตัวขัดขวางการเกิดการเชื่อมโยงของซัลเฟอร์ จากงานวิจัยนี้แนะนำให้ใช้ปริมาณของสารกลุ่มควาไซเลนในช่วง 2 - 4 % โดยน้ำหนัก จะได้สมบัติของวัสดุที่เหมาะสมในเวลาต่อมาได้ศึกษา ผลของการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ ภายในประเทศ [24] โดยนำเถ้าลอยจากแม่เมาะ ระยอง และบ้านโป่ง มาปรับปรุงผิวเถ้าลอยด้วย Si-69 ปริมาณ 2 % โดยน้ำหนัก แล้วเติมลงไปในยางธรรมชาติปริมาณ 30-75 ส่วนในร้อยส่วน จากนั้นนำยางธรรมชาติทุกสูตรไปทดสอบสมบัติการคงรูปยาง สมบัติด้านการทนแรงดึงและแรงฉีกขาด ความแข็งที่ผิว การกระด้างกระดอน และการยุบตัวถาวร พบว่าเถ้าลอยทั้งสามแหล่งสามารถนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติได้ และสามารถทดแทนซิลิกาเกรดการค้าได้ในปริมาณซิลิกา 30 ส่วนในร้อยส่วน ซึ่งสมบัติเชิงกลด้านทนแรงดึง ทนแรงฉีกขาด และค่าความแข็งที่ผิวเทียบเท่ากัน นอกจากนี้ยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยยังสามารถรักษาสมบัติความเป็นอีลาสติกของยางได้ดีกว่าซิลิกาเกรดการค้าด้วย โดยเฉพาะเถ้าลอยจากแม่เมาะซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากลักษณะที่เป็นทรงกลมของเถ้าลอยจากแม่เมาะ แตกต่างกับเถ้าลอยจากระยอง และบ้านโป่ง ที่มีลักษณะของรูปทรงที่ไม่แน่นอน

A. R. R. Menon และคณะ [25] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล และการสลายตัวทางความร้อนของยางธรรมชาติที่มีการเติมเถ้าลอยที่ถูกปรับปรุงด้วยสารอนุพันธ์ของคาร์ดานอล (Cardanol derivatives) จากผลการทดลองพบว่า การปรับปรุงด้วยคาร์ดานอลจะช่วยลดพลังงานในการผสม

และทำให้เวลาการบ่มสุกลดลง เป็นผลมาจากคาร์บอนสามารถทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Plasticizer) ได้ อีกทั้งช่วยปรับปรุงค่าความต้านทานการดึงยึดและการต้านทานแรงฉีกขาด รวมทั้งมีเสถียรภาพทางความร้อนที่มากขึ้นด้วย

K. Grade และคณะ [26] ศึกษาการปรับปรุงผิวของเก้าอี้เพื่อเป็นสารเสริมแรงในยางไอโซพรีน ในการปรับปรุงผิวของเก้าอี้โดยใช้กรด เบส เกลือ พบว่า เมื่อปรับปรุงผิวแล้วทำให้มีพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการปรับผิวด้วยสารละลายเบสแล้วตามด้วยสารละลายกรด ทำให้ผิวของเก้าอี้มีพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น ใกล้เคียงกับลักษณะพื้นผิวของซิลิกา สามารถนำไปผสมเพื่อเป็นสารเสริมแรงในยางไอโซพรีนได้ดีด้วย สำหรับการใส่สารคู่ควบ Bis(trithoxysilylpropyl) tetrasulphane (TEPT) จะช่วยให้การกระจายของเก้าอี้ในยางไอโซพรีนได้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งช่วยให้การกระเด็นกระดอนของยางลดลง เนื่องจากการที่หมู่ไฮดรอกซิลบริเวณพื้นผิวของเก้าอี้หายไป และทำให้สารประกอบยางพอลิไอโซพรีนมีสมบัติทางด้านความแข็งแรงลดลง และปริมาณการเกิดพันธะข้ามมีการเปลี่ยนแปลงน้อย

H.M. Da Costa และคณะ [27] ศึกษาผลกระทบของสารคู่ควบและสารปรับปรุงผิวทางเคมีของเก้าอี้เคลือบที่เติมลงในวัสดุคอมพอสิตอย่างธรรมชาติ โดยใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง และได้ศึกษาสมบัติด้านการคงรูป สมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติที่คงรูปแล้ว ได้แก่ สมบัติด้านแรงดึง การต้านแรงฉีกขาด การทนการขัดสี และค่าความแข็งที่ผิว นอกจากนี้ยังใช้เทคนิค FTIR เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของซิลิกาที่ตกตะกอนในเก้าอี้เคลือบที่บดละเอียด และเก้าอี้เคลือบที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 ที่มีต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติทางกายภาพของยางที่คงรูป งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบเก้าอี้เคลือบที่ปรับปรุงผิวทางเคมีกับสารเติมแต่งซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ จากการทดลองพบว่า ผลของการใช้สารคู่ควบไซเลนไม่ส่งผลทำให้สมบัติดีขึ้น แต่เก้าอี้เคลือบที่ปรับปรุงผิวที่อัตราส่วน 20 phr ให้สมบัติความแข็งแรงสูงกว่าสารประกอบยางที่เติมด้วยสารเติมแต่งประเภทซิลิกาและผงเขม่าดำ

S. Chuayjuljit [28] ศึกษาการใช้ซิลิกาจากเคลือบเป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยนำเคลือบที่ล้างน้ำแล้วไปทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดเป็นผงและผสมลงไปยางธรรมชาติ ผลการวิจัยพบว่า สารประกอบยางธรรมชาติที่เติมด้วยซิลิกาจากเคลือบมีสมบัติความต้านทานแรงดึง การต้านทานแรงฉีกขาด การต้านทานการสึกหรอ และสมบัติการกระเด็นกระดอนที่ดีกว่าการเติมด้วยซิลิกาเกรดการค้า และใช้เวลาในการคงรูปยางที่น้อยกว่า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์

3.1.1.1 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ของบริษัท ยง ฟง
แมชชีนเนอรี

3.1.1.2 เครื่องอัดไฮโดรลิก (Compression molding machine) ของบริษัท
Hydro-tech รุ่น PR1D-W300L 350

3.1.1.3 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer, MDR)
ของบริษัท GOTECH รุ่น GT-M2000

3.1.1.4 เครื่อง Universal testing Machine ของบริษัท ซิมาส รุ่น Autograph

AG-T 3.1.1.5 เครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) ของบริษัท PTC Instruments รุ่น 473

3.1.1.6 เครื่อง abrasion ของบริษัท Zwick Material Testing รุ่น 6102.01

3.1.1.7 เครื่องทดสอบ Fourier Transform Infrared Spectrophotometer
(FTIR) ของบริษัท Bruker Optic รุ่น Vertex70

3.1.1.8 เครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA) ของบริษัท PERKIN
ELMER รุ่น TGA 7

3.1.1.9 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของบริษัท CamScan
รุ่น MX 2000

3.1.1.10 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ของบริษัท
BrukerAXS รุ่น S4 Pioneer

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 น้ำยางธรรมชาติ (Rubber latex 60%DRC) จากบริษัทสินทองไทย รับเบอร์

3.1.2.2 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) จากบริษัทวิทยาศาสตร์ เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ในกระบวนการผลิตยาง

3.1.2.3 กรดสเตียริก (Stearic acid) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทอินโนเวชั่นกรุ๊ป เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ในกระบวนการผลิตยาง บริษัท

3.1.2.4 MBT ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทอินโนเวชั่นกรุ๊ป เป็นสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ในกระบวนการผลิตยาง

3.1.2.5 DPG ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทอินโนเวชั่นกรุ๊ป เป็นสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ในกระบวนการผลิตยาง

3.1.2.6 Sulphur ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทอินโนเวชั่นกรุ๊ป เป็นสารคงรูปยาง (Curing agent)

3.1.2.7 ซิลิกาแบบตกตะกอน (PSi) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทอินโนเวชั่นกรุ๊ป ใช้เป็นสารเสริมแรง

3.1.2.8 แก้วลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ขนาดน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร

3.1.2.9 Toluene จากบริษัท RCI Labscan เป็นสารละลายเพื่อใช้ในการทดสอบการบวมตัวของยาง (Swelling measurement)

3.1.2.10 Sulfuric acid จากบริษัท LAB-SCAN เป็นสารละลายที่ใช้ในการปรับ pH ของยางให้มีค่าเท่ากับ 7 เพื่อให้ยางเปลี่ยนสถานะจากสารละลายเป็นเจล

3.1.2.11 สารคู่ควบ (Coupling agents) ประเภทไซเลน Bis-(3-triethoxy silylpropyl) tetrasulfane (Si-69) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทอินโนเวชั่นกรุ๊ป

3.1.2.12 Methanol จากบริษัท RCI Labscan เป็นสารที่ใช้ในการทำให้อย่างเกิดการตกตะกอน

3.1.2.13 Ethanol จากบริษัท RCI Labscan เป็นตัวทำละลายเพื่อใช้ปรับสภาพผิวของ PSi และ FA

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต

3.2.1.1 สกัดสารละลายโซเดียมซิลิเกตโดยการรีฟลักซ์เข้าเคลบจำนวน 10 กรัม กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เข้มข้น 1 โมลาร์) จำนวน 300 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ 1000 มิลลิลิตร พร้อมทั้งใช้การกวนด้วย Magnetic stirrer โดยอุณหภูมิในการสกัดคือ 100-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง สารละลายโซเดียมซิลิเกตทั้งหมดที่สกัดได้จะถูกผสมรวมกันในถังพลาสติกขนาด 50 ลิตร และทำการกวนโดยใช้ Mechanical stirrer กวนสารละลายโซเดียมซิลิเกตในถังดังกล่าวเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการผสมที่ดีและให้ความเข้มข้นสุดท้ายมีความสม่ำเสมอเท่ากันทั้งถัง

3.2.1.2 การหาปริมาณของซิลิกาในสารละลายโซเดียมซิลิเกตโดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถทำได้โดยใช้ Volumetric pipet ขนาด 25 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายโซเดียมซิลิเกตมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปรับ pH ของสารละลายให้เป็น 7 โดยสารละลายกรดซัลฟิวริก (เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ตรวจวัดค่า pH ด้วยกระดาษวัด pH แบบละเอียด เมื่อสารละลายเกิด gel แล้วให้ทิ้งปฏิกิริยาไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการ gel ของ silica ที่สมบูรณ์ จากนั้นทำการล้างซิลิกาเจลที่ได้ด้วยน้ำกลั่น แล้วทำการกรองสุญญากาศโดยใช้กระดาษกรองชนิดไม่มีขี้เถ้าหลังจากการเผา น้ำที่ทิ้งที่ได้จากการกรองมาทดสอบดูว่าเกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) นั้นถูกชะล้างออกไปหมดหรือยังโดยการใช้สารละลายแบเรียมไนเตรด ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$) หยดลงไป ถ้าพบที่เกิดตะกอนสีขาวของแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) นั้นแสดงว่าซิลิกาเจลที่ได้ยังไม่สะอาดควรล้างต่ออีกประมาณ 4 - 5 ครั้ง จากนั้นนำซิลิกาเจลดังกล่าวที่กรองได้พร้อมกระดาษกรอง ใส่ในถ้วย crucible ที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว ทำซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง จากนั้นนำไปเผาในเตาเผาโดยให้อุณหภูมิสูงสุดถึงที่ 700 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำถ้วย Crucible ไปทำการชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาปริมาณของซิลิกาที่ได้ และพร้อมทั้งหาค่าเฉลี่ย

3.2.2 การเตรียม Sol-Gel NR/Si composite

3.2.2.1 จากน้ำยางชั้น 500 กรัม (น้ำยางชั้นมีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง 60% และมีการรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย 0.7%) ทำการเจือจางน้ำยางชั้นดังกล่าวให้เหลือเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งเป็น 30% โดยการเติมน้ำกลั่นเข้าไป 500 กรัม และเติม Igepal (ใช้เป็น Stabilizer) ลงไป 3% ต่อเนื้อยาง 100 กรัม ทำการกวนด้วย Mechanical stirrer ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการระเหยแอมโมเนีย

3.2.2.2 ผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตในน้ำยางที่เตรียมได้โดยมีการปรับปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตในปริมาณต่างๆกัน เพื่อให้ยางที่ตกตะกอนได้มีปริมาณซิลิกาอยู่ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 phr จากนั้นตามด้วยการกวนด้วย Mechanical stirrer เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการผสมที่ดีและมีความเข้มข้นสม่ำเสมอทั่วทุกแห่ง จากนั้นทำการทดสอบสมบัติของน้ำยางที่มีการเติมโซเดียมซิลิเกต ในปริมาณต่างๆ เช่น การกระจายของอนุภาคยางในน้ำยาง

3.2.2.3 ทำการตกตะกอนพร้อมทั้งทำให้ซิลิกาเกิดการ Gel ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก (เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ตรวจวัดค่า pH อย่างสม่ำเสมอด้วยกระดาษวัด pH จนกระทั่งสารละลายมี pH ประมาณ 7 ตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จนยางตกตะกอนและเพื่อให้เกิดการ gel ที่สมบูรณ์ แล้วนำไปกรอง จากนั้นนำตะกอนที่กรองได้ไปตกตะกอนใน Methanol ทำการกวนด้วย Mechanical stirrer เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้อีก 2 ชั่วโมงเพื่อให้อนุภาคของยางตกตะกอนลงมาได้สมบูรณ์มากขึ้น จากนั้นล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นหลายๆรอบเพื่อทำการกำจัดเกลือโซเดียมซัลเฟต (เป็นเกลือที่ละลายน้ำได้ 100 %) ที่เกิดขึ้นออกให้ได้มากที่สุด การทดสอบว่าเกลือโซเดียมซัลเฟตนั้นถูกล้างออกไปหมดหรือยังนั้นทำได้โดยการใช้สารละลายเบเรียมไนเตรตหยดลงไปใต้น้ำล้างตะกอนอย่างที่ผ่านมาแล้ว ถ้าเกิดตะกอนของเบเรียมซัลเฟตขึ้นแสดงว่าเกลือที่เกิดขึ้นยังถูกล้างออกไม่หมด เมื่อล้างตะกอนอย่างจนแน่ใจแล้วว่าไม่มีเกลือเหลืออยู่ก็จะทำการกรองตะกอนอย่างแล้วนำมาผึ่งให้แห้งพอหมาดๆในแดด จากนั้นนำไปทำการอบให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2-3 วัน (สังเกตจากตะกอนยางจะเปลี่ยนสีจากสีขาวไปเป็นสีเหลืองขุ่นๆเกือบใสนั่นหมายถึงแห้งแล้ว หรือ ทำการชั่งน้ำหนักทุก 6 ชั่วโมง ว่าน้ำหนักนั้นถ้าคงที่หมายถึงว่าแห้งแล้ว)

3.2.2.4 นำตัวอย่างของยางที่อบแห้งแล้วในแต่ละสูตรไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA เพื่อหาปริมาณ Silica ที่อยู่ในยางในแต่ละสูตรนั้นๆ ว่าปริมาณซิลิกาที่คำนวณได้จากสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เติมลงไปใต้น้ำยางเทียบกับปริมาณซิลิกาที่มีอยู่ในยางที่ตกตะกอนลงมาได้ว่ามีปริมาณที่สอดคล้องใกล้เคียงกันหรือไม่ โดยใช้การให้ความร้อนด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที ไปจนถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แล้วคำนวณปริมาณซิลิกาจากเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่เหลือจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA

3.2.2.5 เมื่อเราทราบปริมาณของซิลิกาที่มีอยู่ในยางสูตร Sol-Gel แล้วจะสามารถทำให้เราสามารถคำนวณเพื่อหาปริมาณของสารเคมีที่จะต้องใช้ในการคอมพาวด์ยางได้อย่างถูกต้อง โดยในงานวิจัยนี้จะทำการผสมยางด้วยสูตรผสมแบบ Conventional vulcanization (CV) ด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) โดยขั้นตอนในการบดผสมยางคอมพาวด์ใน

แต่ละสูตรใช้เวลาทั้งหมด 30 นาที คือ ทำการ Masticate 5 นาที จากนั้นทำการเติม Zinc oxide, Stearic acid, MBT และ DPG ภายในเวลา 25 นาที สุดท้ายตามด้วยการเติม Sulphur อีก 5 นาที ส่วนผสมของยางสูตร Sol-Gel NR/Si ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แสดงส่วนผสมของยางสูตร Sol-Gel NR/Si composite

สารเคมียาง	ปริมาณ (phr)
Zinc oxide	5
Stearic acid	3
MBT	0.5
DPG	0.2
Sulphur	3

3.2.2.6 นำยางที่คอมพาวด์ได้ไปทำการทดสอบหา Cure characteristics ด้วยเทคนิค MDR (Moving die rheometer) ที่อุณหภูมิทดสอบที่ 160 องศาเซลเซียส โดยข้อมูลที่ต้องการศึกษาคือ Maximum torque, Minimum torque, Torque difference, Scorch time และ Cure time

3.2.2.7 นำ Cure time ที่ได้จากเทคนิค MDR ไปใช้เป็นเวลาในการขึ้นรูปชิ้นงานยางคอมพาวด์โดยใช้เทคนิค Compression molding

3.2.3 การเตรียม NR/PSi composite

3.2.3.1 จากน้ำยางชั้น 500 กรัม (น้ำยางชั้นมีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง 60% และมีการรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย 0.7%) ทำการเจือจางน้ำยางชั้นดังกล่าวให้เหลือเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งเป็น 30% โดยการเติมด้วยน้ำกลั่นเข้าไป 500 กรัม และเติม Igepal ลงไป 3% ต่อเนื้อยาง 100 กรัม ทำการกวนด้วย Mechanical stirrer ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการระเหยแอมโมเนียส่วนใหญ่ออกไป แล้วใช้ Methanol เพื่อทำให้น้ำยางจับตัวกัน

3.2.3.2 ยางที่จับตัวได้นำไปรีดเป็นแผ่น ขณะรีดต้องทำการล้างด้วยน้ำไปด้วยเรื่อยๆ เพื่อเป็นการกำจัดสิ่งที่ไม่ใช่ยางออกไป จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 วัน (สังเกตได้จากยางจะเปลี่ยนจากสีขาวไปเป็นสีเหลืองขุ่นๆ แสดงว่ายางแห้งแล้ว หรือ ทำการชั่งน้ำหนักว่าน้ำหนักคงที่หรือยัง)

3.2.3.3 นำยางธรรมชาติที่เตรียมได้ไปทำการผสมยางด้วยสูตรผสมแบบ Conventional vulcanization (CV) ด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) โดยขั้นตอนในการบดผสมยางคอมพาวด์ ในแต่ละสูตรใช้เวลาทั้งหมด 30 นาที คือ ทำการ Masticate เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการเติมซิลิกาแบบตักตะกอน (Vary ตามปริมาณซิลิกาของยางสูตร Sol-Gel NR/Si คือ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 phr) ลงไปเป็นอันดับแรกใช้เวลาไม่เกิน 10 นาที จากนั้นทำการเติม Zinc oxide, Stearic acid, MBT, DPG ภายในเวลา 10 นาที สุดท้ายเติม Sulphur ภายในเวลา 5 นาที ส่วนผสมของยางสูตร NR/PSi ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 แสดงส่วนผสมของยางสูตร NR/PSi composite

สารเคมียาง	ปริมาณ (phr)
Precipitated silica	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40
Zinc oxide	5
Stearic acid	3
MBT	0.5
DPG	0.2
Sulphur	3

3.2.3.4 นำยางที่คอมพาวด์ได้ไปทำการทดสอบหา Cure characteristics ด้วยเครื่อง MDR (Moving die rheometer) ที่อุณหภูมิทดสอบที่ 160 องศาเซลเซียส โดยข้อมูลที่ต้องการศึกษาคือ Maximum torque, Minimum torque, Torque difference, Scorch time และ Cure time

3.2.3.5 นำ Cure time ที่ได้จากเครื่อง MDR ไปใช้เป็นเวลาในการขึ้นรูปชิ้นงานยางคอมพาวด์ โดยใช้เครื่อง Compression molding

3.2.4 การเตรียม Sol-Gel 30Si/NR + TPSi และ NR/TPSi composite

3.2.4.1 จากน้ำยางข้น 500 กรัม (น้ำยางข้นมีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง 60% และมีการรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย 0.7%) ทำการเจือจางน้ำยางข้นดังกล่าวให้เหลือเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งเป็น 30% โดยการเติมน้ำกลั่นเข้าไป 500 กรัม และเติม Igepal (Stabilizer) ลงไป 3% ต่อเนื้อยาง 100 กรัม ทำการกวนด้วย Mechanical stirrer ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการระเหยแอมโมเนีย

3.2.4.2 ผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตในน้ำยางที่เตรียมได้โดยมีการปรับปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตในปริมาณต่างๆกัน เพื่อให้ยางที่ตกตะกอนได้มีปริมาณซิลิกาอยู่ที่ 30 phr จากนั้นตามด้วยการกวนด้วย Mechanical stirrer เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการผสมที่ดี และมีความเข้มข้นสม่ำเสมอทั่วทุกแห่ง จากนั้นทำการทดสอบสมบัติของน้ำยางที่มีการเติมโซเดียมซิลิเกต ในปริมาณต่างๆ เช่น การกระจายของอนุภาคยางในน้ำยาง ความหนืดของน้ำยาง จากนั้นดำเนินการตามข้อที่ 3.2.2.3 และ 3.2.2.4

3.2.4.3 ทำการปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกาแบบตกตะกอนโดยใช้ Si-69 โดยใช้เอทานอล 400 มิลลิลิตร ผสมกับ Si-69 13 กรัม กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนลงไป 100 กรัม ทำการกวนต่อเป็นเวลา 15 นาที ของผสมที่ได้ให้นำไปอบแห้งที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จนได้ ตัวอย่าง Silane 69 treated PSi ที่อบแห้งแล้วไปทำการทดสอบ FTIR เพื่อให้แน่ใจว่าที่ผิวซิลิกาแบบตกตะกอนมี Si-69 อยู่จริง

3.2.4.4 เมื่อเราทราบปริมาณของซิลิกาที่มีอยู่ในยางสูตร Sol-Gel ว่าเป็น 30 phr แล้วจะสามารถทำให้เราคำนวณเพื่อหาปริมาณของสารเคมีที่จะต้องใช้ในการผสมยางได้อย่างถูกต้อง โดยขั้นตอนในการบดผสมยางคอมพาวด์สูตรนี้จะใช้เวลาทั้งหมด 30 นาทีเช่นเดิม คือทำการ Masticate เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการเติม Silane 69 treated PSi (10, 20 และ 30 phr) ลงไปเป็นอันดับแรกใช้เวลาไม่เกิน 10 นาที จากนั้นทำการเติม Zinc oxide, Stearic acid, MBT, DPG ภายในเวลา 10 นาที สุดท้ายเติม Sulphur ภายในเวลา 5 นาที ส่วนผสมของยางสูตร Sol-Gel 30Si/NR + Silane69 treated PSi composite ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 แสดงส่วนผสมของยางสูตร Sol-Gel 30Si/NR+TPSi composite

สารเคมียาง	ปริมาณ (phr)
Silane 69 treated PSi	10, 20 and 30
Zinc oxide	5
Stearic acid	3
MBT	0.5
DPG	0.2
Sulphur	3

3.2.4.5 นำยางธรรมชาติที่เตรียมโดยวิธีเดียวกับในข้อ 3.2.3.1 มาทำการบดผสมยางคอมพาวด์สูตร NR/Silane69 treated PSi composite สูตรนี้จะใช้เวลาทั้งหมด 30 นาที เช่นเดิม คือ ทำการ Masticate เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการเติม Silane 69 treated PSi (30, 40, 50 และ 60 phr) ลงไปเป็นอันดับแรกใช้เวลาไม่เกิน 10 นาที จากนั้นทำการเติม Zinc oxide, Stearic acid, MBT, DPG ภายในเวลา 10 นาที สุดท้ายเติม Sulphur ภายในเวลา 5 นาที ส่วนผสมของยางสูตร NR/Silane69 treated PSi composite ดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 แสดงส่วนผสมของยางสูตร NR/TPSi composite

สารเคมียาง	ปริมาณ (phr)
Silane 69 treated PSi	30, 40, 50 and 60
Zinc oxide	5
Stearic acid	3
MBT	0.5
DPG	0.2
Sulphur	3

3.2.4.6 นำยางที่คอมพาวด์ ได้ไปทำการทดสอบหา Cure characteristics ด้วยเทคนิค MDR (Moving die rheometer) ที่อุณหภูมิทดสอบที่ 160 องศาเซลเซียส โดยข้อมูลที่ต้องการศึกษาคือ Maximum torque, Minimum torque, Torque difference, Scorch time และ Cure time

3.2.4.7 นำ Cure time ที่ได้จากเทคนิค MDR ไปใช้เป็นเวลาในการขึ้นรูปชิ้นงานยางคอมพาวด์โดยใช้เทคนิค Compression molding

3.2.5 การเตรียม Sol-Gel NR/30Si + TFA และ Sol-Gel NR/30Si + FA composite

3.2.5.1 ดำเนินการเช่นเดียวกับข้อ 3.2.4.1 และ 3.2.4.2

3.2.5.2 ตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ของบริษัท BrukerAXS รุ่น S4 Pioneer

3.2.5.3 ทำการคัดแยกขนาดของเถ้าลอยโดยใช้ Sieve โดยเลือกชั้นที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 25 – 38 ไมโครเมตร

3.2.5.4 เตรียม Si-69 2 กรัม ต่อเถ้าลอย 100 กรัม ทำโดยการผสม Si-69 2 กรัม ลงในเอทานอล 100 มิลลิลิตร แล้วกวนเป็นเวลา 30 นาที เติมเถ้าลอย 100 กรัม ลงในสารละลายที่ได้ แล้วกวนต่อไปอีก 15 นาที จน Coupling agent กระจายตัวดีบนพื้นผิวของเถ้าลอย จากนั้นอบเถ้าลอยให้แห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จนได้ ตัวอย่าง Silane69 treated FA ที่อบแห้งแล้วไปทำการทดสอบ FTIR เพื่อให้แน่ใจว่าที่ผิวเถ้าลอยมี Si-69 อยู่จริง

3.2.5.5 เมื่อเราทราบปริมาณของซิลิกาที่มีอยู่ในยางสูตร Sol-Gel ว่าเป็น 30 phr แล้วจะสามารถทำให้เราคำนวณเพื่อหาปริมาณของสารเคมีบางที่จะต้องใช้ในการผสมยางได้อย่างถูกต้อง โดยขั้นตอนในการผสมยางคอมพาวด์สูตรนี้จะใช้เวลาทั้งหมด 30 นาที เช่นเดิม คือทำการ Masticate เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการเติมเถ้าลอย หรือ Silane69 treated FA (10, 20 และ 30 phr เทียบตามปริมาณของซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบของเถ้าลอย) ลงไปเป็นอันดับแรกใช้เวลาไม่เกิน 10 นาที จากนั้นทำการเติม Zinc oxide, Stearic acid, MBT, DPG ภายในเวลา 10 นาที สุดท้ายเติม Sulphur ภายในเวลา 5 นาที ส่วนผสมของยางสูตร Sol-Gel 30Si/NR + Silane69 treated Fly ash composite และ Sol-Gel 30Si/NR + Fly ash composite ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 แสดงส่วนผสมของยางสูตร Sol-Gel 30Si/NR+TFA composite และ Sol-Gel 30Si/NR+FA composite

สารเคมีบาง	ปริมาณ (phr)
Fly ash & treated FA	10, 20 and 30 (Si content)
Zinc oxide	5
Stearic acid	3
MBT	0.5
DPG	0.2
Sulphur	3

3.2.5.6 นำยางที่คอมพาวด์ ได้ไปทำการทดสอบหา Cure characteristics ด้วยเทคนิค MDR (Moving die rheometer) ที่อุณหภูมิทดสอบที่ 160 องศาเซลเซียส โดยข้อมูลที่ต้องการศึกษาคือ Maximum torque, Minimum torque, Torque difference, Scorch time และ Cure time

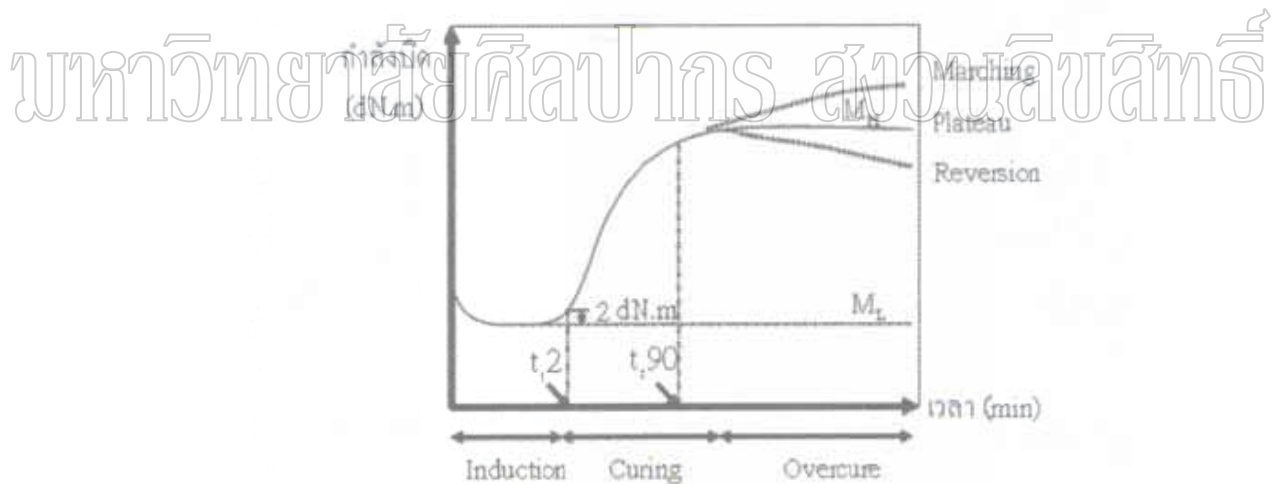
3.2.5.7 นำ Cure time ที่ได้จากเทคนิค MDR ไปใช้เป็นเวลาในการขึ้นรูปชิ้นงานยางคอมพาวด์ โดยใช้เทคนิค Compression molding

3.3 การทดสอบ

3.3.1 การศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) [29]

ภายหลังจากกระบวนการผสม สารประกอบยางที่ได้จะต้องถูกนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงก่อนทุกครั้งเพราะลักษณะการเชื่อมโยงของยางสามารถบ่งชี้ได้ว่ามีความผิดปกติ เช่น การกระจายตัวของสารที่ไม่ทั่วถึงทั้งเนื้อยาง เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการผสมหรือไม่

ทดสอบด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) โดยนำสารประกอบยางมาตัดเป็นชิ้นเล็กใส่ในคานย เพื่อทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเชื่อมโยงของยางดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แสดงลักษณะกราฟการคงรูปที่วัดได้จาก MDR [30]

M_L คือ ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)

M_H คือ ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque)

ΔS คือ ผลต่างระหว่างค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุด (Torque difference)

t_{90} คือ ระยะเวลาสกอร์ช (Scorch time) เป็นระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 2 เดซินิวตัน-เมตร

t_{c90} คือ ระยะเวลาในการคงรูป (Cure time) เป็นค่าร้อยละการเพิ่มขึ้นของแรงบิดจากจุดต่ำสุด (M_L) เมื่อเปรียบเทียบกับจุดสูงสุด (M_H) หรือระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางเชื่อมโยงไปร้อยละ 90 โดยทั่วไป จัดเป็นค่า "ระยะเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสม (Optimum curing time)"

CRI คือ ดัชนีอัตราการเชื่อมโยง ซึ่งแสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง สามารถคำนวณดังสมการที่ 3.1

$$CRI = 100 / (t_{c90} - t_{c2}) \quad (3.1)$$

3.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) [29]

3.3.2.1 การศึกษาสมบัติการดึงยึด (Testing of Tensile Properties)

สมบัติแรงดึงที่นิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของยางได้แก่ ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) โมดูลัส (Modulus) มาตรฐานที่ใช้ทดสอบแรงดึงคือ ASTM D 412

สมบัติแรงดึงของยางสามารถวัดได้โดยการดึงขึ้นทดสอบมาตรฐานจนขาดด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่ (มาตรฐาน ASTM D 412 ได้กำหนดอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500±50 มิลลิเมตร/นาที) ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing Machine ในระหว่างการดึงเครื่องจะทำการวัดและบันทึกค่าแรงดึงที่เปลี่ยนไปตามระยะการยืดตัวของยางแล้วนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณและพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด พร้อมทั้งคำนวณค่าความทนทานต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และค่าโมดูลัสที่ความเครียดต่างๆ สำหรับรูปร่างของขึ้นทดสอบมาตรฐานที่ใช้คือ ขึ้นงานรูปดัมเบลล์

3.3.2.2 สมบัติการต้านทานการฉีกขาด (Testing of Tear Strength)

การทดสอบสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยางตามมาตรฐาน ASTM D624 สามารถทำได้โดยการวัดแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ขึ้นทดสอบขาดออกจากกัน ซึ่งลักษณะของการทดสอบโดยทั่วไปจะคล้ายคลึงกับการทดสอบสมบัติแรงดึงคือจะดึงขึ้นทดสอบจนขาดด้วยเครื่อง Universal testing Machine ที่อัตราเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500±50 มิลลิเมตร/นาที ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM D624 อย่างไรก็ตาม การทดสอบความทนทานต่อการฉีกขาดจะแตกต่างจากการทดสอบความทนทานต่อแรงดึงตรงที่รูปร่างของขึ้นทดสอบจะไม่ใช้รูปดัมเบลล์ และงานวิจัยนี้ใช้ รูปร่างขึ้นทดสอบแบบคาย C ดังภาพที่ 19



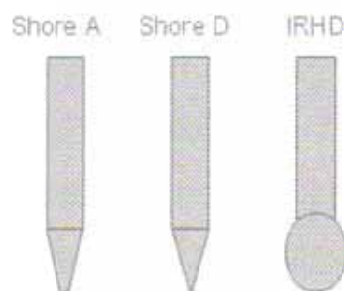
ภาพที่ 19 แสดงชิ้นทดสอบความทนทานต่อการฉีกขาด แบบ C

ซึ่งชิ้นทดสอบมีรอยตำหนิตั้งต้นเป็นมุมแหลมอยู่ เมื่อได้รับแรงดัดยางจะเริ่มเกิดการฉีกขาด ณ รอยตำหนินั้น ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดจะถูกแสดงในรูปของอัตราส่วนของแรงดัดที่ทำให้เกิดการฉีกขาดต่อความหนาของชิ้นทดสอบ (มีหน่วยเป็น N/mm) และค่าแรงที่นำมาใช้ในการคำนวณหาความทนทานต่อการฉีกขาดคือ ค่าแรงดัดสูงสุดที่ทำให้ยางเกิดการฉีกขาด

3.3.2.3 สมบัติความแข็งที่ผิว (Hardness test)

ความแข็งที่ผิวเป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของยางซึ่งมักจะใช้ร่วมกับสมบัติแรงดัดในการกำหนดคุณภาพของยาง ความแข็งจะแตกต่างจากความแข็งแกร่ง (Stiffness) เพราะความแข็งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉพาะที่บริเวณผิวเท่านั้น แต่ความแข็งแกร่งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางทั้งก้อน หลักการพื้นฐานของการวัดค่าความแข็งที่ผิวก็คือ จะนำหัวกด (Indentor) ไปกดลงบนชิ้นทดสอบภายใต้สภาวะที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM D2240 คือ อุณหภูมิ $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ความลึกของการทะลุทะลวงของหัวกด (Depth of penetration) จะสะท้อนถึงค่าความแข็งที่ผิวของยางเพราะยางที่มีความแข็งที่ผิวสูงก็จะมีค่าความลึกของการทะลุทะลวงต่ำ

เครื่องวัดที่ใช้คือ เครื่องคูโรมิเตอร์ (Durometer) โดยแบบชอร์ เอ นิยมใช้วัดความแข็งที่ผิวสำหรับยางทั่วไปที่มีความแข็งที่ผิวดำกว่า 90 ชอร์ เอ แต่สำหรับยางที่มีความแข็งที่ผิวสูงกว่านี้จะนิยมใช้เครื่องวัดแบบชอร์ ดี หัวกดแบบต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 แสดงลักษณะของหัวกดแบบต่างๆ

3.3.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยา (Morphology) [31]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องที่ใช้ส่องดูวัตถุขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นใหญ่ขึ้นได้กว่าเดิมถึงสองแสนเท่า ด้านบนจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (Primary electron) โดยจะควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงๆ (High voltage) โดยใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) โฟกัสให้อิเล็กตรอนนั้นตกกระทบชิ้นงาน และเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบชิ้นงานจะได้สัญญาณแบบต่าง ๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (Secondary electron) อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับ (Backscattered electron) หรือ X-ray สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกตรวจวัดโดย Detector แต่ละชนิด และแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และแปลเป็นภาพและกราฟในที่สุด

โดยทำการเตรียมชิ้นงานด้วยการนำชิ้นทดสอบแช่ในโตรเจนเหลวจนกระทั่งชิ้นงานแข็งตัว หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบมาหักเพื่อนำผิวหน้าที่เกิดจากการหักชิ้นทดสอบมาติดกับ Stab แล้วทำการเคลือบผิวหน้าด้วยทอง ก่อนทำการทดสอบ

ลักษณะของสัญญาณชนิดต่างๆ

-Secondary Electrons ให้ข้อมูลในลักษณะเป็นภาพพื้นผิวจริงของวัตถุ มีลักษณะสูงต่ำและร่องรอยที่เกิดขึ้นจริงบนวัตถุ

-Back scattered Electrons ให้ข้อมูลในลักษณะเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ แต่ให้ความแตกต่างบนพื้นผิวของวัตถุในลักษณะ แบ่งเป็นเฟสสว่างและเฟสมืด ขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของธาตุ (Z) ที่ผสมอยู่ในวัตถุนั้น ธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าจะมีเฟสที่สว่างกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า

3.3.5 การศึกษาสมบัติการต้านทานการขัดถู [29]

ความต้านทานต่อการขัดถูของยาง หมายถึง ความต้านทานของยางต่อการสึกหรอเมื่อต้องสัมผัสกับพื้นผิวขัดที่เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา วิธีการมาตรฐานที่ใช้ทดสอบวัดความต้านทานต่อการขัดถูมีหลายวิธี ในงานวิจัยนี้เราใช้มาตรฐาน DIN 53516 ด้วยเครื่อง DIN abrasion tester ชิ้นทดสอบรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร จะถูกกดด้วยแรงกดคงที่ที่ 10 นิวตัน ให้ไปสัมผัสกับพื้นผิวขัดคอรันดัม (Corundum) ที่มีความคมหรือมีกำลังการขัดถูอยู่ในช่วง 170- 200 มิลลิกรัม ที่พันอยู่รอบลูกกลิ้งซึ่งหมุนอยู่ด้วยอัตราเร็ว 40 ± 1 รอบต่อนาที ดังภาพที่ 21 ในระหว่างการทดสอบ ชิ้นทดสอบจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ในแนวระนาบ (จากซ้ายไปขวา) ด้วยอัตราเร็ว 4.2 มิลลิเมตรต่อรอบการหมุนของลูกกลิ้ง จากนั้นก็จะทำการวัดน้ำหนักของชิ้นทดสอบที่สูญเสียไป หลังจากยางถูกขัดถูเป็นระยะทาง 40 เมตร ในกรณีที่ยาง

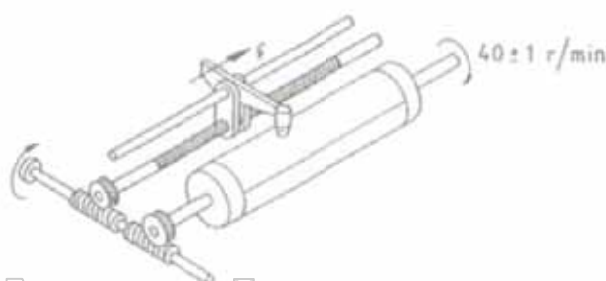
มีค่าความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำมาก จะทำการวัดน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากที่ยางถูกขัดถูเป็นระยะทาง 20 เมตรแทน จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปคูณ 2 เพื่อที่จะหาน้ำหนักที่สูญเสียไปเพื่อที่จะหาน้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อได้รับการขัดถูเป็นระยะทางเท่ากับ 40 เมตร เมื่อได้น้ำหนักที่สูญเสียไปแล้วก็จะสามารถคำนวณหาปริมาตรของยางที่สูญเสียไป

สูตรคำนวณหาปริมาตรของยางที่สูญเสียไป (ΔV_c) ได้จากสมการ

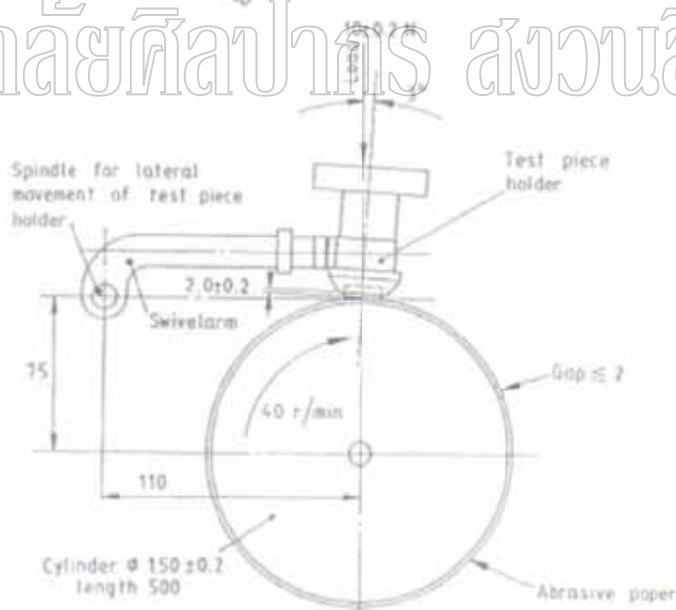
$$\Delta V_c = \Delta m / \rho \quad (3.2)$$

ρ = ความหนาแน่นของยาง

Δm = มวลของยางที่สูญเสียไป



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 21 แผนผังแสดงลักษณะของเครื่องตามมาตรฐาน DIN 53516 [29]

3.3.6 การศึกษาการบวมตัว (Swelling measurement)

วิธีการศึกษาการดูดซับ ตรวจสอบโดยดูพฤติกรรมของการบวมตัวของยางที่เกิดพันธะเชื่อมขวางในโครงสร้าง โดยแสดงออกมาในรูปของ Swelling ratio ขั้นตอนการทดสอบ เริ่มจากตัด

ชิ้นงานเป็นรูปวงกลมขนาด จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานยงก่อนนำชิ้นงานยงไปแช่ในสารละลายโทลูอีน หลังจากนั้นนำชิ้นงานยงไปแช่ในสารละลายโทลูอีน จับเวลาทุกๆ 15 นาที เพื่อชั่งน้ำหนักของชิ้นงานยงที่ชุ่มไปด้วยสารละลายโทลูอีน จนกว่าน้ำหนักของชิ้นงานยงคงที่ โดยชั่งน้ำหนักชิ้นงานยงทุกๆ 15 นาที ค่า swelling ratio คำนวณจากสมการ 3.3

$$\text{swelling ratio} = \frac{W_t - W_0}{W_0} \quad (3.3)$$

เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักของชิ้นงานยงขณะแห้ง
 W_t คือ น้ำหนักของชิ้นงานยงขณะบวมตัว

3.4 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ

3.4.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต

ผสมเต็มแก้วจำนวน 10 กรัม กับสารละลาย NaOH (1M) 300 มิลลิตร ในขวดรูปชมพู่ พร้อมทั้งกวนเป็นเวลา 12 ชั่วโมงด้วย โดยอุณหภูมิในการสกัดคือ 100-110 °C

เก็บใส่ในถัง 200 ลิตร กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

นำไปหาปริมาณซิลิกาที่มีเป็นน้ำหนักกรัมต่อหน่วยปริมาตร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

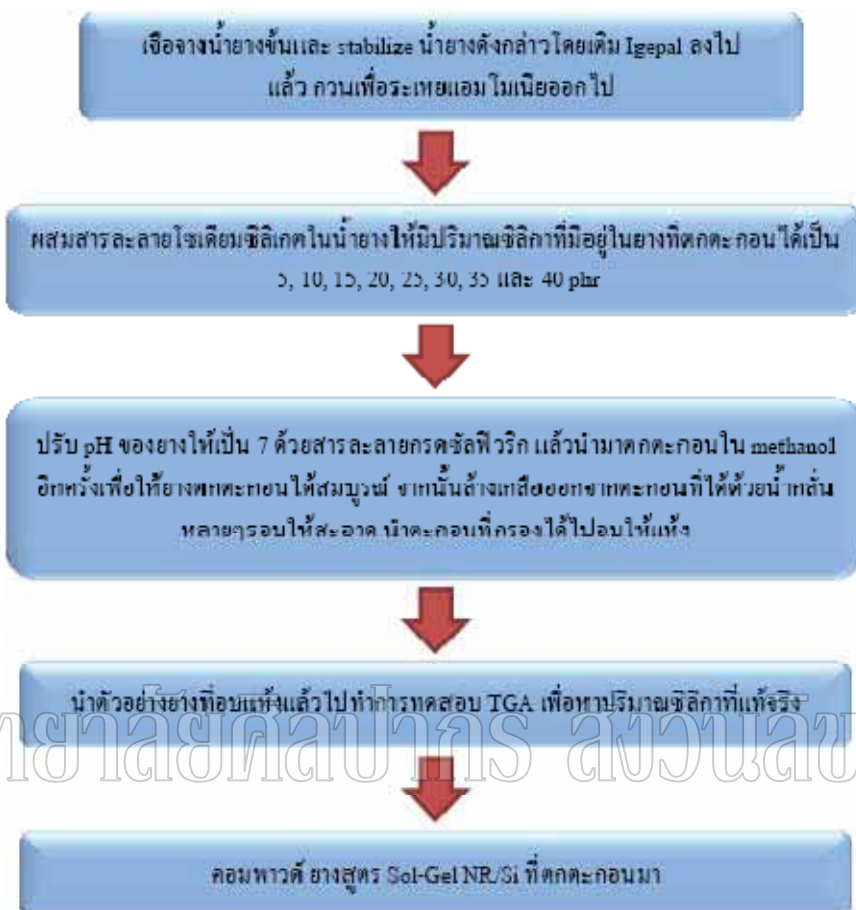
3.4.2 การเตรียม Si-69 Treated PSI



3.4.3 การเตรียม Si-69 Treated FA



3.4.4 การเตรียม Sol-Gel NR/Si composite



มหาวิทยาลัยศิลปากร ลงวันลิขสิทธิ์

3.4.5 การเตรียม NR/PSi composite



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

3.4.6 การเตรียม Sol-Gel 30Si/NR + TPSi composite



มหาวิทยาลัยศิลปากร ลงวันลิขสิทธิ์

3.4.7 การเตรียม NR/TPSi composite



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

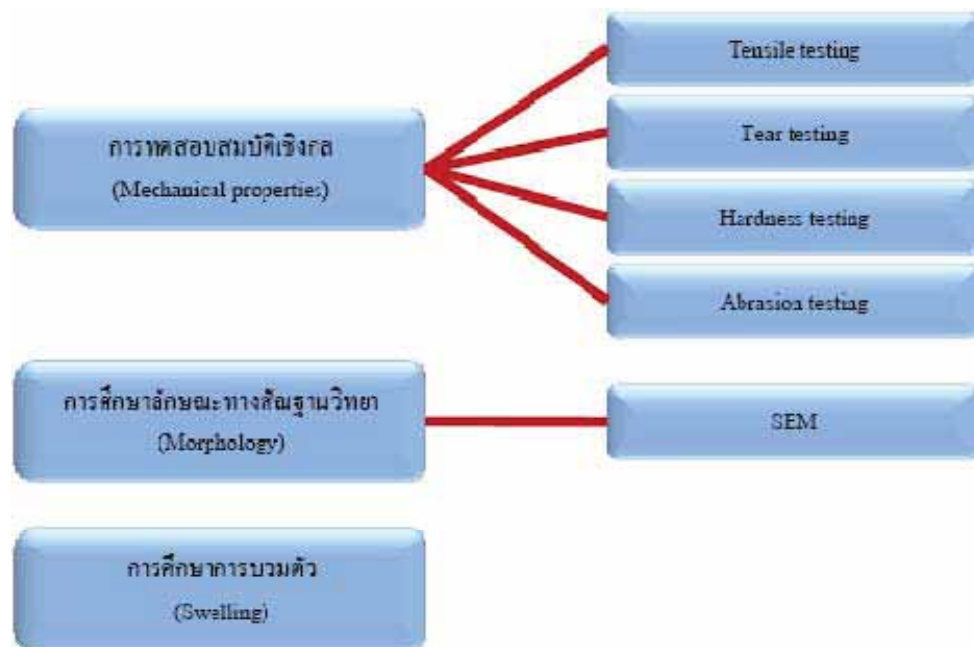
3.4.8 การเตรียม Sol-Gel NR/30Si + TFA และ Sol-Gel NR/30Si + FA composite



3.4.9 Vulcanization



3.4.10 การทดสอบต่างๆ



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

บทที่ 4

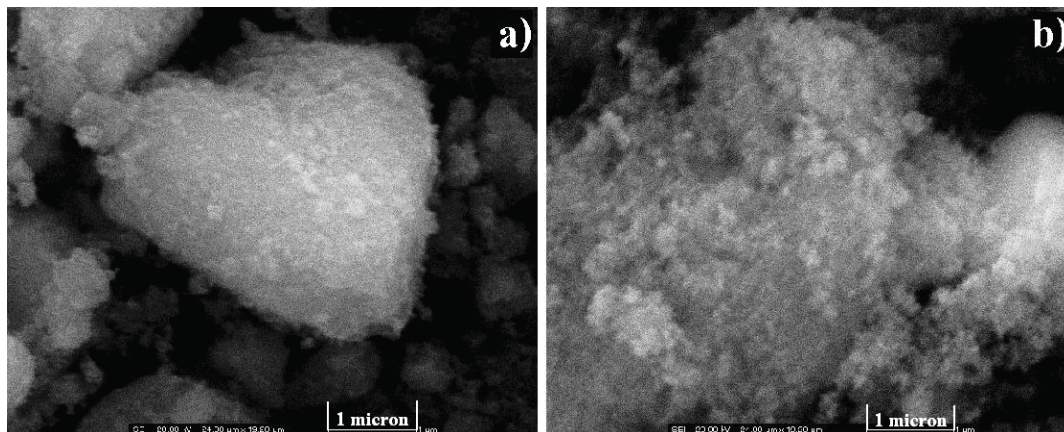
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารตัวเติมสามชนิด คือ Precipitated silica (PSi) Silica gel จากเถ้าแกลบ และเถ้าลอย (FA) โดยในการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 4 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต จากการสกัดซิลิกาในเถ้าแกลบให้อยู่ในรูปของสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พร้อมทั้งทำการหาปริมาณของซิลิกาที่มีอยู่ในหนึ่งหน่วยปริมาตรของสารละลายโซเดียมซิลิเกต และศึกษาลักษณะทางพื้นผิว ลักษณะรูปร่างของซิลิกาที่ได้ ตอนที่ 2 ศึกษาผลของ Silica gel จากเถ้าแกลบที่เสริมแรงในยางธรรมชาติที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอสิต เปรียบเทียบกับผลของ Precipitated silica (PSi) ซึ่งไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอสิต ตอนที่ 3 เป็นการศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมแบบคู่ (hybrid filler) ระหว่าง Silica gel จากเถ้าแกลบที่เสริมแรงในยางธรรมชาติกับ Precipitated silica ที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ Si-69 ที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอสิต และตอนที่ 4 เป็นการศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมแบบคู่ (hybrid filler) ระหว่าง Silica gel ที่เสริมแรงในยางธรรมชาติกับเถ้าลอย (FA) ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวหรือเถ้าลอยที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ Si-69 ที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอสิต

ตอนที่ 1 การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต

4.1 ปริมาณซิลิกาในสารละลายโซเดียมซิลิเกต

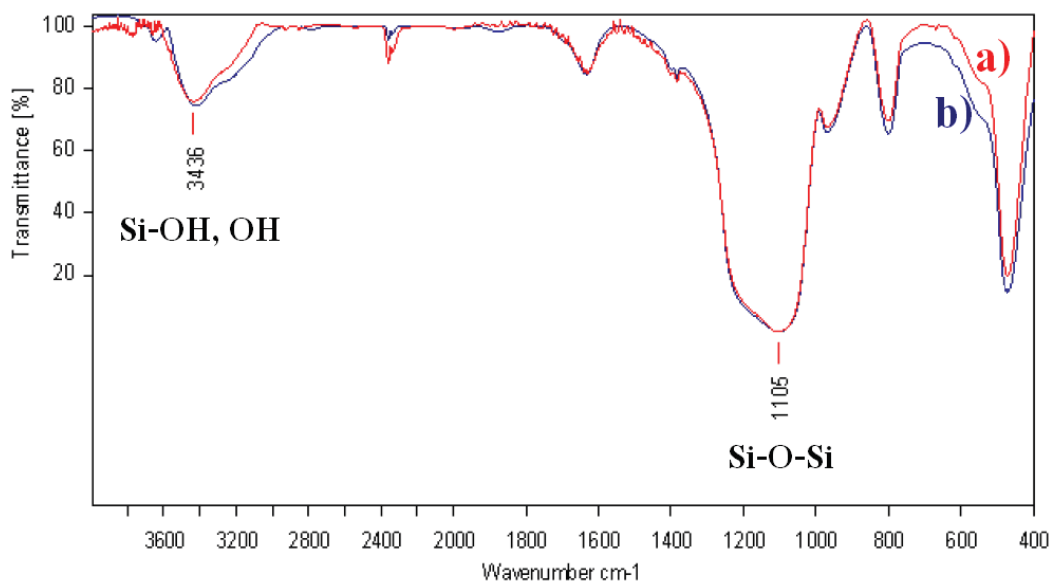
การหาปริมาณซิลิกาที่แน่นอนในหนึ่งหน่วยปริมาตรของสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะทำให้สามารถกำหนดปริมาณที่แน่นอนของซิลิกาในเนื้อยางธรรมชาติที่เตรียมผ่านกระบวนการโซลเจลได้ จากการปรับค่า pH ของสารละลายโซเดียมซิลิเกตปริมาตร 25 มิลลิลิตร ให้มีค่า pH เป็นกลาง เพื่อให้เกิดเป็นซิลิกาเจลขึ้นอย่างสมบูรณ์ และเมื่อนำซิลิกาเจลดังกล่าวไปทำการล้างด้วยน้ำให้สะอาดแล้วนำไปเผาในเตาเผาให้แห้ง พบว่าปริมาณของซิลิกาต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตนั้นคิดเป็น 0.0399 กรัมต่อมิลลิลิตร รูปร่างทางกายภาพของ Silica gel จากเถ้าแกลบที่ได้เมื่อนำไปทดสอบด้วย Scanning electron microscope (SEM) พบว่ามีความคล้ายคลึงกันกับซิลิกาแบบตกตะกอนดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ลักษณะของรูปร่างของ a) Silica gel และ b) Precipitated silica ที่กำลังขยาย 5000 เท่า
หมายเหตุ: Silica gel จากเถาเถา ต้องมีการบดก่อนนำไปทดสอบ SEM

4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Sol-Gel Si เทียบกับ PSi ด้วยเทคนิค FTIR

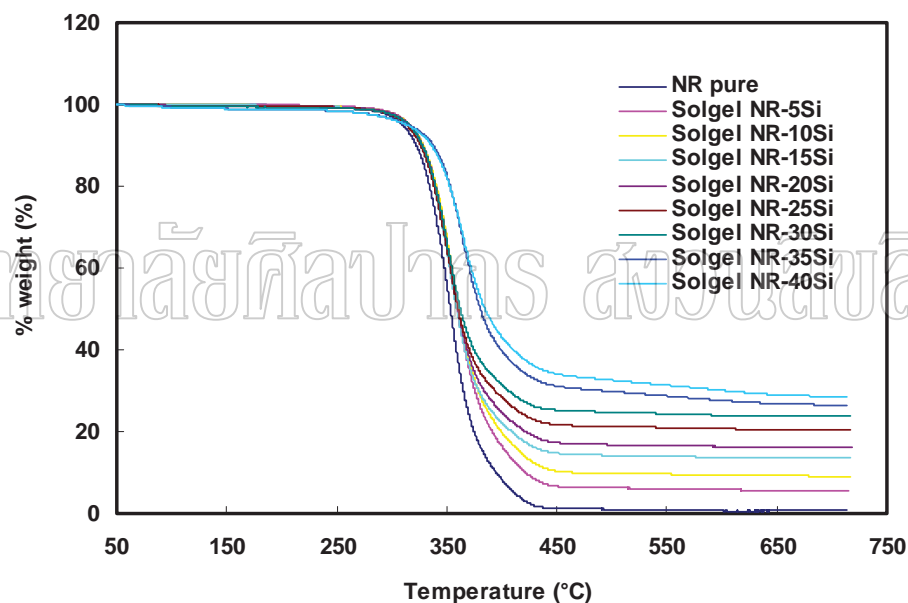
จากการทดสอบ FTIR ผลของการทดสอบแสดงในภาพที่ 23 คือกราฟ FTIR สเปกตรัมของ Silica gel จากเถาเถาที่เตรียมขึ้นมาจากกระบวนการ Sol-Gel และ PSi เกรดการค้า ซึ่งมีการดูดกลืนที่ 3436 cm^{-1} เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการสั่นของ -OH และเป็นการสั่นแบบยืดของหมู่ซิลานอล (Si-OH) บนพื้นผิวของซิลิกา ขณะที่แถบการดูดกลืนที่ 1105 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบยืดของหมู่ซิลอกเซน (Si-O-Si) จึงสรุปได้ว่า Sol-gel Si มีเอกลักษณ์ทาง FTIR เหมือนกับ Precipitated silica ทุกประการ



ภาพที่ 23 กราฟ FTIR สเปกตรัมของ a) Silica gel และ b) Precipitated silica

4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณ Silica gel ที่เกิดขึ้นภายในยาง Sol-Gel NR/Si

จากการปรับปริมาณของสารละลายโซเดียมซิลิเกตในน้ำยางธรรมชาติแล้วตกตะกอนด้วยกระบวนการ Sol-Gel จึงสามารถเตรียมยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากเถ้าแกลบที่มีปริมาณซิลิกาในอัตราส่วนที่ต้องการ โดยวิเคราะห์ปริมาณซิลิกาโดยใช้เทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA) ดังแสดงในภาพที่ 24 จากกราฟพบว่าเมื่อปริมาณ Silica gel จากเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิการสลายตัวมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากซิลิกามีความเสถียรทางความร้อนที่สูงกว่ายางธรรมชาติเมื่อซิลิกาไปอยู่ในเมตริกซ์ยางจึงทำให้ความเสถียรทางความร้อนมีค่าสูงขึ้น ทำให้กราฟ Shift ไปทางด้านขวา ปริมาณของซิลิกาในยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากเถ้าแกลบโดยผ่านทางกระบวนการโซลเจลในอัตราส่วนที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 16

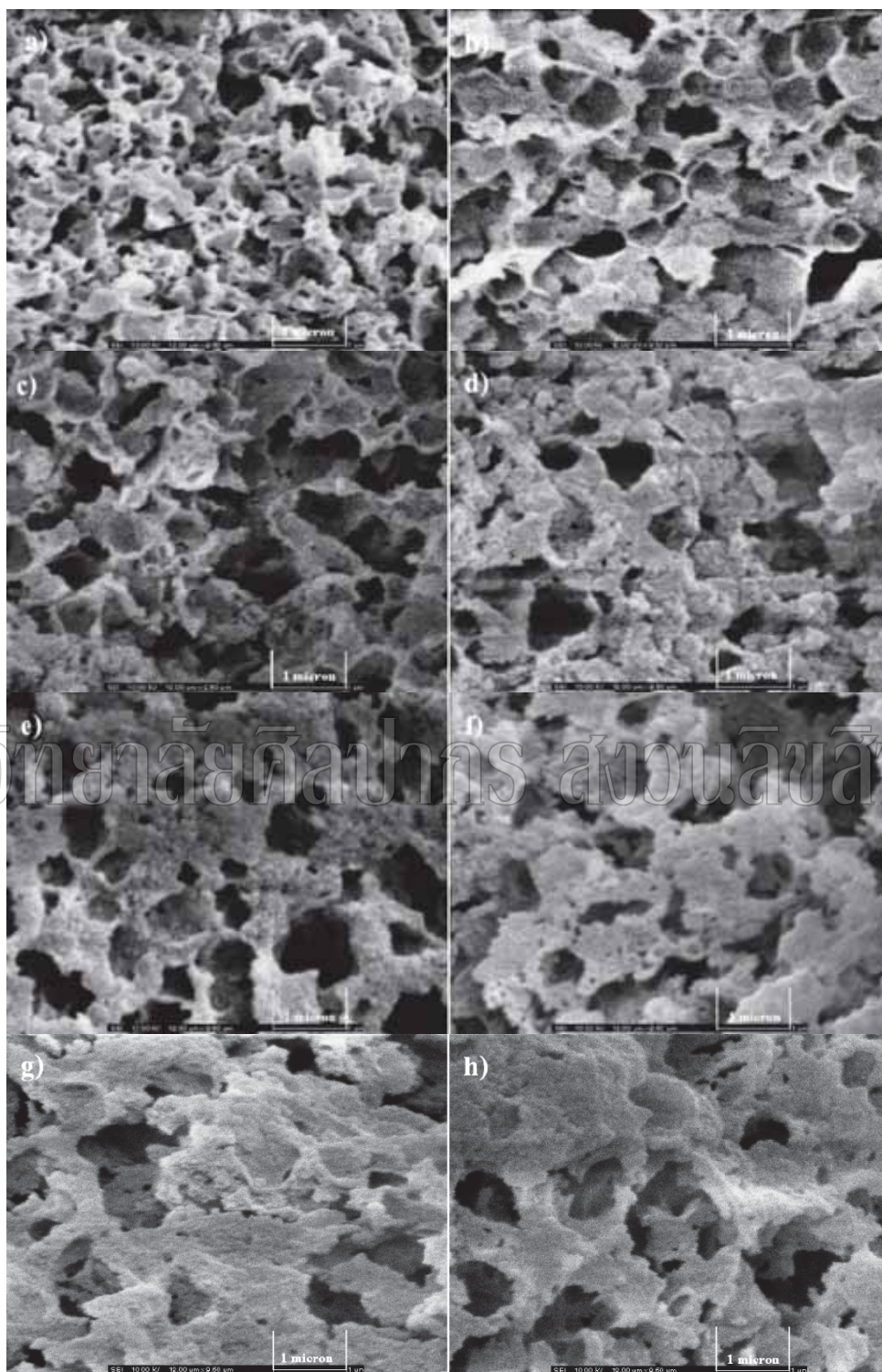


ภาพที่ 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของสารและอุณหภูมิจากการทดสอบน้ำหนักที่เหลือของ Sol-Gel NR/Si

ตารางที่ 16 แสดงข้อมูลปริมาณน้ำหนักของซิลิกาที่มีอยู่ใน Sol-Gel NR/Si ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน จากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA

Material	ปริมาณซิลิกา (phr)
Sol-gel NR/5Si	5.21±0.18
Sol-gel NR/10Si	10.21±0.43
Sol-gel NR/15Si	15.29±0.21
Sol-gel NR/20Si	20.03±0.13
Sol-gel NR/25Si	25.19±0.36
Sol-gel NR/30Si	30.04±1.17
Sol-gel NR/35Si	35.11±0.02
Sol-gel NR/40Si	40.41±0.48

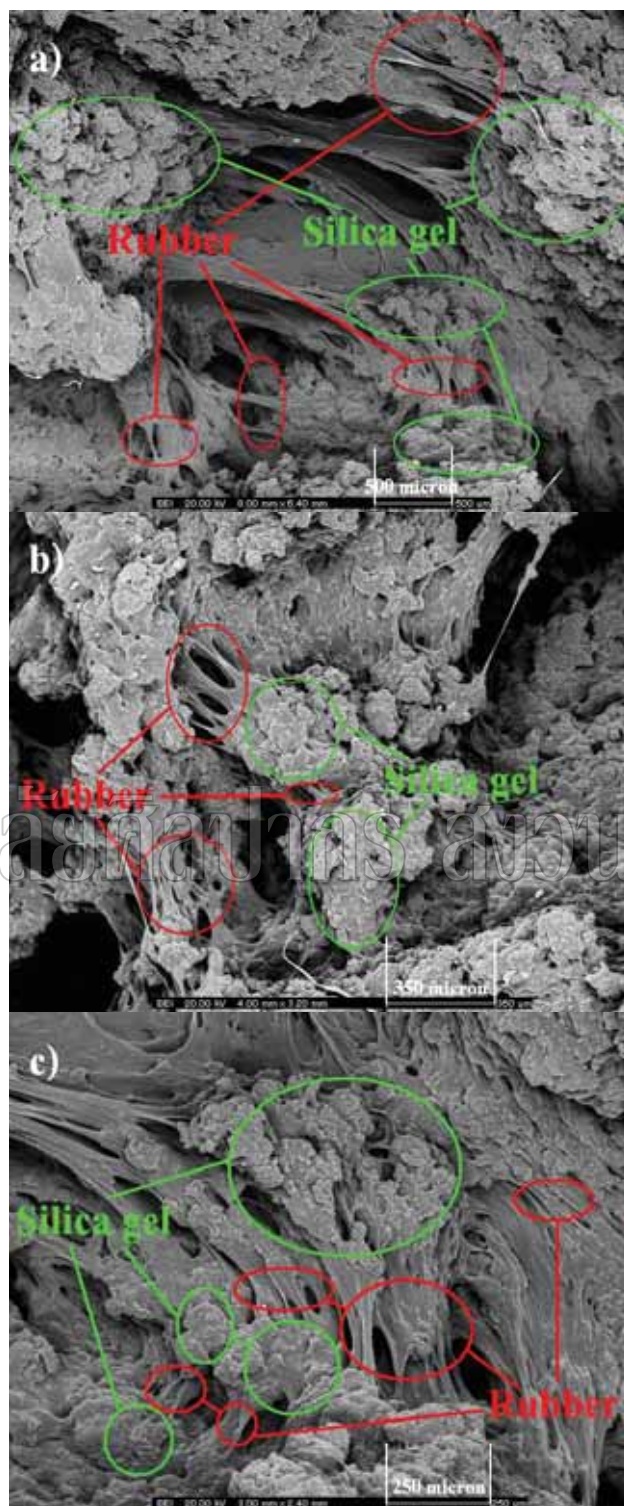
เมื่อนำเนื้อหาของ Sol-Gel NR/Si ที่เหลือจากการทดสอบ TGA ไปทำการทดสอบ SEM เพื่อดูลักษณะของ Silica gel จากเก้าแกลบ โดยจากการทดสอบ TGA สิ่งที่สลายตัวไปจนหมดคือโมเลกุลของยางธรรมชาติ ส่วนที่ไม่สลายตัวคือ Silica gel จากเก้าแกลบ ดังแสดงในภาพที่ 25 จะสังเกตเห็นว่าที่ปริมาณ Silica gel จากเก้าแกลบที่ 5 phr ลักษณะความพรุนของตัวอย่างจะมากที่สุด เพราะ Sol-gel NR/5Si มีปริมาณซิลิกาน้อยเมื่อเทียบกับเนื้อยาง ในขั้นกระบวนการ Sol-gel เมื่อซิลิกาเกิดการ Gel จะเกิดการกระจายตัวของ Silica gel ที่ดี อิทธิพลของ Filler-Filler interaction มีน้อย Silica gel จึงไม่เกิดการ Agglomerate จากงานวิจัยของ S. Kohjiya และคณะซึ่งได้ศึกษาในเรื่องของการเติมซิลิกา ลงไปในยางคอมพาวด์โดยกระบวนการ Sol-gel และได้ศึกษาในส่วนของ Interaction ระหว่าง Silica gel และ Interaction ระหว่าง Silica gel กับยางโดยใช้เทคนิค Atomic force microscopy ผลจากการทดสอบทำให้ทราบว่าความสามารถในการเปียกผิว (Wettability) ของยางไปบน Silica gel มีสูงกว่าของที่ผสมซิลิกาเกรดการค้าในระบบ Conventional เนื่องจากกระบวนการ Sol-gel ส่งผลให้ซิลิกากระจายตัวในเมตริกซ์ของยางในลักษณะที่เป็น In situ ทำให้ Silica-silica interaction มีน้อย เป็นเหตุให้เกิดการกระจายตัวของซิลิกาในเมตริกซ์ยางได้ดีกว่าของที่ผสมซิลิกาเกรดการค้าในระบบ Conventional [44] เมื่อปริมาณ Silica gel จากเก้าแกลบตั้งแต่ 20-40 phr พบว่าอนุภาคซิลิกาที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพราะในขั้นกระบวนการ Sol-gel เมื่อซิลิกาเกิดการ Gel ทำให้ Silica gel ที่อยู่ใกล้กันมี Interaction ที่สูงต่อกันผ่านทาง H-bonding จึงทำให้ Silica gel เกิด Agglomerate



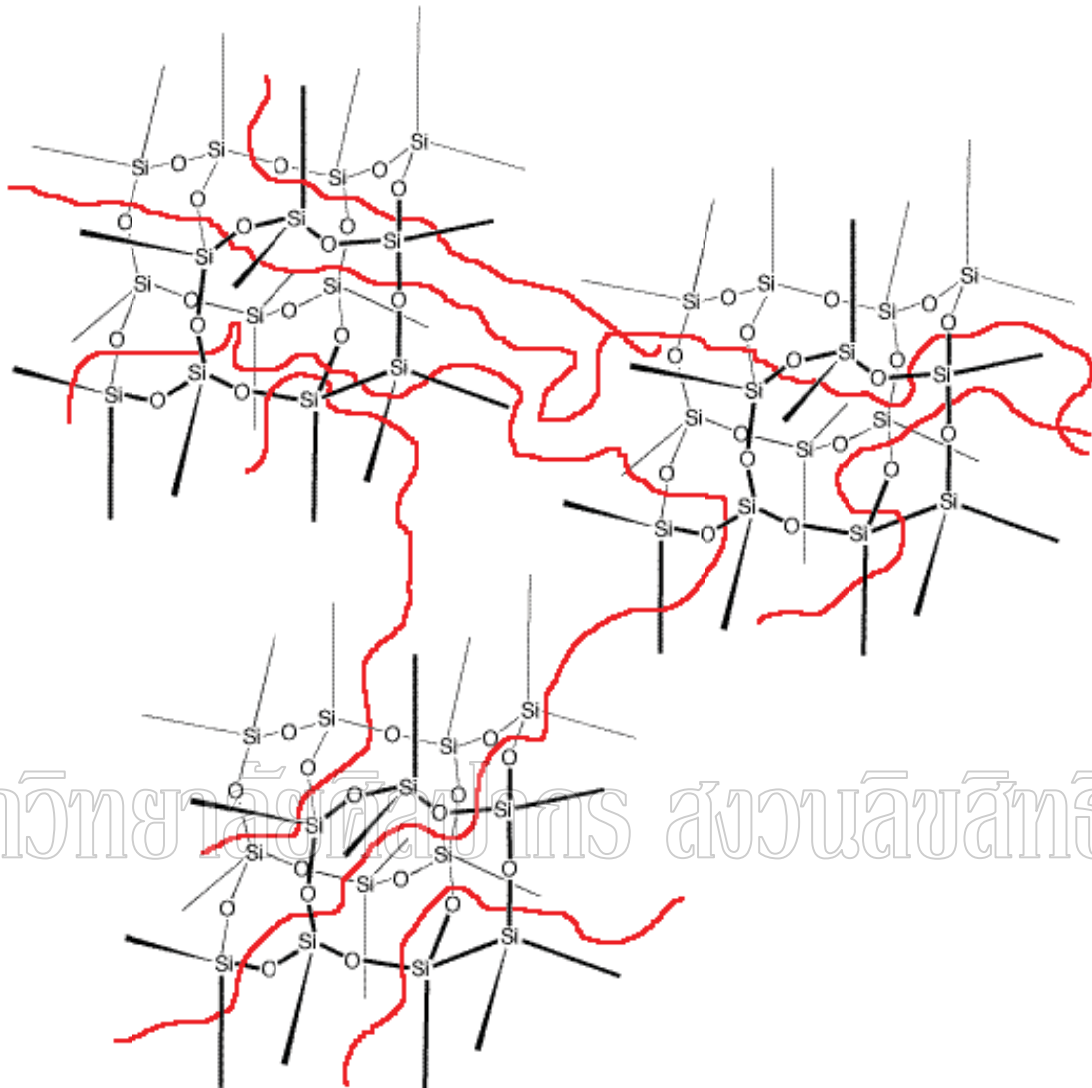
ภาพที่ 25 แสดง SEM เฝ้าของ Sol-Gel NR/Si หลังการทดสอบ TGA ของ a) Sol-Gel NR/5Si, b) Sol-Gel NR/10Si, c) Sol-Gel NR/15Si, d) Sol-Gel NR/20Si, e) Sol-Gel NR/25Si, f) Sol-Gel NR/30Si, g) Sol-Gel NR/35Si และ h) Sol-Gel NR/40Si ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

4.4 ลักษณะทางกายภาพของ Sol-Gel NR/Si ที่ยังไม่คอมพาวด์ ด้วยเทคนิค SEM

เพื่อศึกษาลักษณะการมีอยู่ของ Silica gel จากเส้นแกลบในยางธรรมชาติจึงจำเป็นต้องทำการละลายโมเลกุลยางบางส่วนที่ครอบคลุม Silica gel ออกโดยการนำไปแช่ใน Toluene จากนั้นทำการกรองแล้วอบแห้งจึงนำยางตัวอย่างนั้นมาทดสอบด้วยเทคนิค SEM จากการวิเคราะห์พื้นผิวของ Sol-Gel NR/Si ดังกล่าว โดยใช้ระบบ Electron back scatter ทำให้ทราบถึงลักษณะการกระจายตัวของซิลิกาที่ทั่วถึงในเมทริกซ์ของยาง และจะสังเกตเห็นได้ชัดว่ามีการเชื่อมกันของกลุ่มก้อน Silica gel คนละกลุ่มด้วยอนุภาคของยาง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ดังแสดงในภาพที่ 26 โดยปกติยางธรรมชาติจะละลายใน Toluene ได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจาก Toluene สามารถแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลยางได้ และไปทำลาย Rubber-rubber interaction ได้ แต่ในกรณีของยาง Sol-gel NR/Si สายโซ่ของยางธรรมชาติถูกล้อมรอบด้วย Silica gel เกิดเป็น Bound rubber ทำให้มี Interaction ระหว่างยางธรรมชาติกับ Silica gel ในลักษณะของ Filler-rubber interaction ในรูปแบบของ Physical bonding ทำให้อนุภาคยางที่ถูก Bound ในอนุภาคของซิลิกาไม่สามารถที่จะละลายใน Toluene ได้ โดยการวิเคราะห์ SEM สามารถที่จะวิเคราะห์ธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างที่ใช้ทดสอบได้โดยเทคนิค Energy dispersive X-ray (EDX) ซึ่งยืนยันว่าในสารตัวอย่างดังกล่าวมีซิลิกาอยู่ตรงบริเวณที่เป็นอนุภาคที่เกาะกลุ่มกัน โมเดลของการเชื่อมกันของกลุ่มของซิลิกาด้วยอนุภาคยางดังกล่าวนี้จะแสดงอยู่ในภาพที่ 27 โดยที่ลักษณะการแทรกตัวของ Silica gel ไปในเมทริกซ์ของยางนั้น Y. Ikeda และ S. Kohjiya [43] ได้ศึกษาในเรื่องของการนำยางวัลคาไนเซตไปแช่ให้บวมตัวใน tetraethoxysilane (TEOS) จากนั้นจึงให้ n-butylamine เพื่อทำให้ TEOS เกิดกระบวนการ Sol-Gel ควบแน่นกลายเป็น Silica gel ในเนื้อยางวัลคาไนเซต



ภาพที่ 26 แสดงภาพ SEM ของ Sol-Gel NR/30Si ที่ยังไม่ผ่านการคอมพาวด์ แต่ผ่านการแช่ Toluene ที่กำลังขยาย a) 50 b) 60 และ c) 75 เท่า



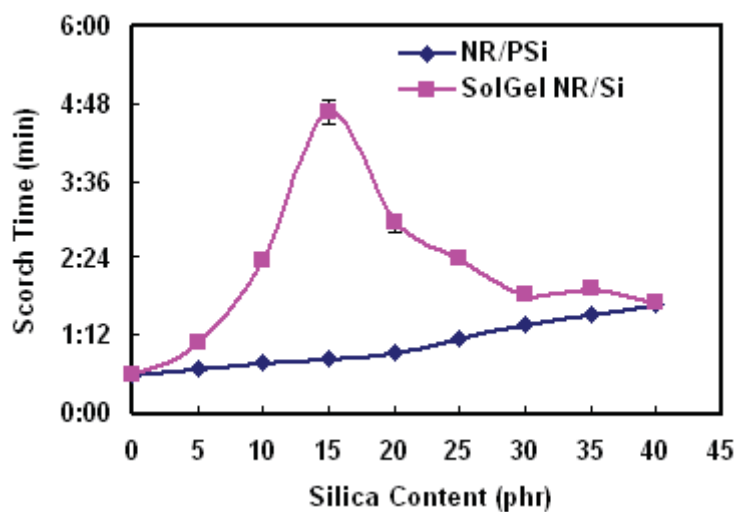
ภาพที่ 27 แสดงโมเดลการเกิด Interconnection ของอนุภาคยางและกลุ่มของซิลิกา

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของ Sol-gel Silica เปรียบเทียบกับ Precipitated silica ที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอสิต

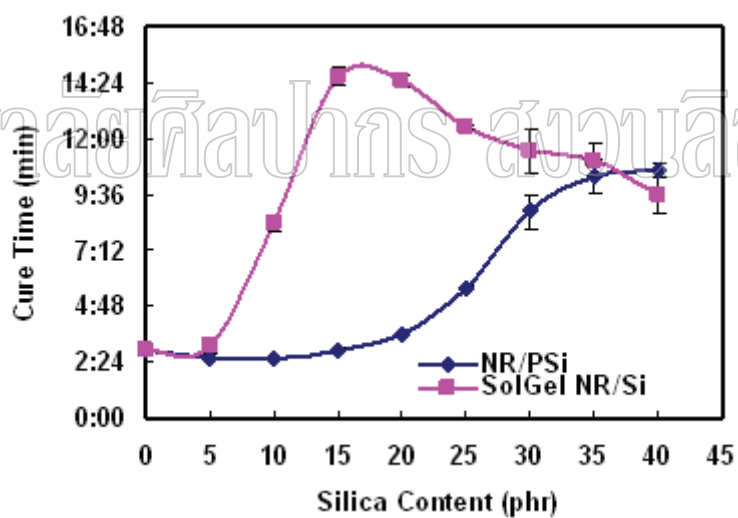
4.5 สมบัติการบ่มของยางคอมพาวด์ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi

โดยทั่วไปนั้นคุณสมบัติการบ่มของยางธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวกระตุ้น รวมไปถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูป สำหรับงานวิจัยตอนที่ 2 นี้จะเป็นการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม Silica gel จากเค้าแปลนเทียบกับ Precipitated silica ว่ามีผลต่อคุณลักษณะการคงรูปของยางคอมพาวด์อย่างไร โดยศึกษาด้วยเทคนิค MDR ซึ่งผลการ

ทดลองแสดงดังภาพที่ 28 และ 29 พบว่าเมื่อปริมาณการเติม Precipitated silica ในยางธรรมชาติมากขึ้น (มากกว่า 15 phr) มีผลทำให้เวลาสกอร์ชและเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากบนพื้นผิวซิลิกาที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-Si-OH) ที่สามารถดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูปที่มีฤทธิ์เป็นด่าง สารตัวเร่งดังกล่าวในงานวิจัยนี้คือ DPG รวมถึงสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสี (Zn complex) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน การดูดซับดังกล่าวจะทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีมีปริมาณลดลง เป็นเหตุให้เวลาสกอร์ช และเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์ยาวนานขึ้น [6] ส่วนปริมาณซิลิกาในช่วง 0-15 phr ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการคงรูปมากนักเนื่องมาจาก Precipitated silica ที่เติมลงไปนั้นมีปริมาณน้อยจึงสามารถกระจายตัวได้เป็นอย่างดีทั่วทั้ง Rubber matrix ด้วยเหตุนี้จึงทำให้กระบวนการการเกิดพันธะข้ามยังไม่ถูกรบกวนโดยอนุภาคของซิลิกาที่เติมลงไป [23] ในส่วนของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Silica gel จากถ้ำเกลือ พบว่าแนวโน้มของเวลาสกอร์ชและเวลาในการคงรูปเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ปริมาณ silica gel เป็น 15 phr เนื่องจากความเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากของ Silica gel จากถ้ำเกลือดังที่กล่าวไว้ในคำอธิบายของภาพที่ 25 a), b) และ c) ทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ที่พื้นผิวมากเช่นกัน เป็นสาเหตุให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป และสารกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถันซึ่งเป็นสารที่มีขั้วถูกดูดซับ สูญเสียประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อปริมาณ Silica gel มากกว่า 15 phr ขึ้นไป พบว่าเวลาสกอร์ช และเวลาในการคงรูปของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Silica gel จากถ้ำเกลือมีค่าลดลง เนื่องมาจากเมื่อปริมาณ Silica gel เพิ่มมากขึ้นผลของหมู่ไฮดรอกซิลที่มีมากที่ผิวของซิลิกา ทำให้เกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างซิลิกาเจลด้วยตัวเองผ่านทาง H-bonding [32] ขนาดอนุภาคของ Silica gel มีขนาดใหญ่ขึ้นดังที่อธิบายไว้ในภาพที่ 25 d) - h) ทำให้หมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) อิสระที่พื้นผิวของ Silica gel มีปริมาณลดลง ซึ่งทำให้ดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูปได้น้อยลง



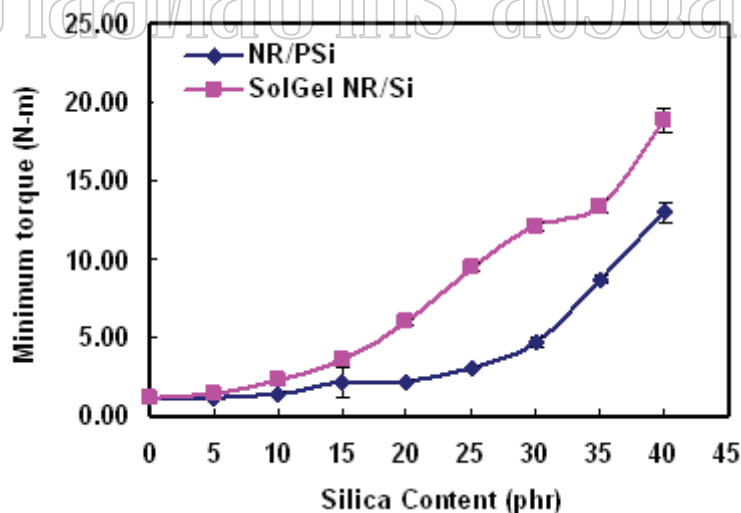
ภาพที่ 28 ผลของปริมาณ silica gel จากถั่วแกลบ และ PSi ที่มีต่อ Scorch time ของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi



ภาพที่ 29 ผลของปริมาณ silica gel จากถั่วแกลบ และ PSi ที่มีต่อ Cure time ของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi

4.6 ลักษณะการคงรูปของยางผสม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติที่มี Silica gel จากเถ้าแกลบผสมอยู่ โดยจะเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่มี Precipitated silica ผสมอยู่ เป็นที่ทราบกันดีว่าค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque) บ่งบอกถึงความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนืดของยางคอมพาวด์ที่สถานะอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งจากผลการทดลองที่แสดงในภาพที่ 30 สังเกตเห็นได้ว่าค่าแรงบิดต่ำสุดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น ซึ่งการที่ยางธรรมชาติมีปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นนั้น ทำให้เกิดการขัดขวางการไหลของยางขณะอยู่ภายใต้แรงเฉือนในเครื่องทดสอบ [33] เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงบิดต่ำสุดระหว่างยางธรรมชาติที่มี Silica gel จากเถ้าแกลบผสมอยู่ โดยจะเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่มี Precipitated silica ผสมอยู่ จะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดต่ำสุดของยางผสม silica gel จากเถ้าแกลบจะมีค่ามากกว่ายางผสม Precipitated silica เนื่องจากในระบบยาง Sol-Gel NR/Si นั้นมีแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ที่เกิด Interconnected กันภายในยางทำให้ขัดขวางการไหลของสายโซ่ได้มาก จึงมีค่าแรงบิดต่ำสุดที่สูงกว่าในระบบยาง NR/PSi

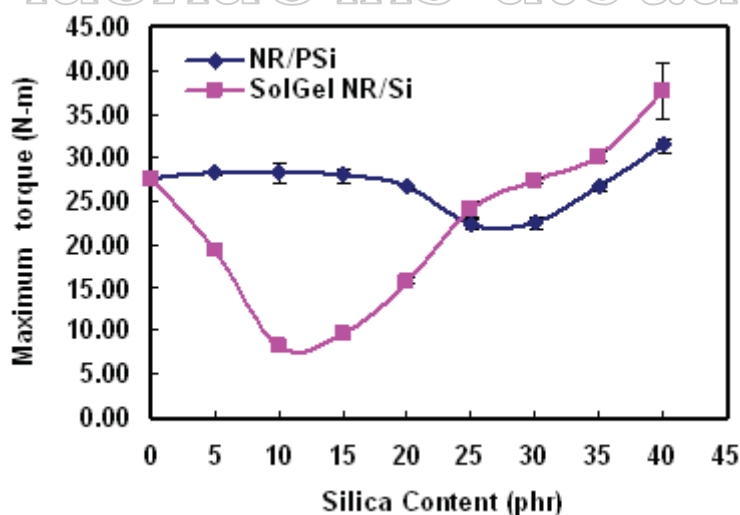


ภาพที่ 30 ผลของปริมาณ silica gel จากเถ้าแกลบ และ PSi ที่มีต่อค่าแรงบิดต่ำสุดของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi

ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque) ที่นำมาทดสอบด้วยเทคนิค MDR แรงบิดของเครื่องที่ใช้บิตยางที่ cure แล้วดังแสดงในภาพที่ 31 ซึ่งแสดงค่ามอดูลัส หรือ Crosslink density สังเกตเห็น

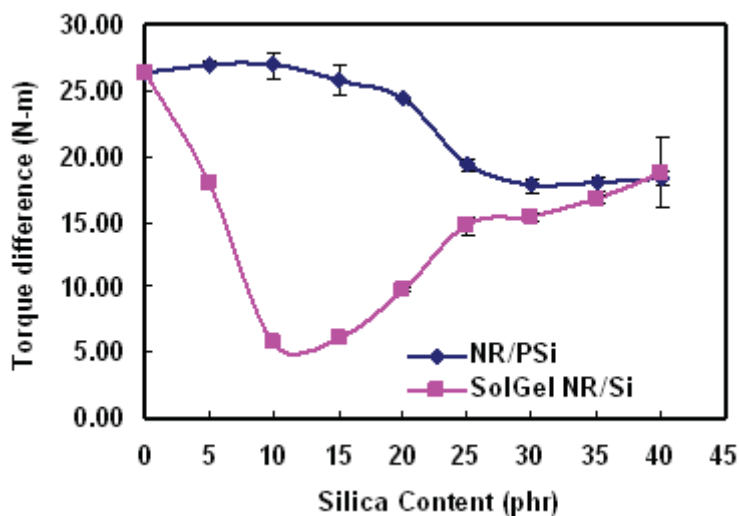
ได้ว่าในระบบยางผสมที่มี Silica gel จากถ้ำเกลือในช่วงปริมาณ Silica gel ตั้งแต่ 0-10 phr มีค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าลดลงนั้นเนื่องมาจากการ Silica gel มีความเป็นรูพรุนที่มากและมีความเป็นขั้วที่สูง จึงดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาของรูปและสารกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมะถันทำให้กระบวนการเกิดพันธะข้ามเกิดได้ไม่สมบูรณ์ และในช่วงปริมาณ silica gel จากถ้ำเกลือตั้งแต่ 15-25 phr จะส่งผลให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นจนเทียบเท่ากับยางผสมที่มี Precipitated silica ผสมอยู่ที่ปริมาณซิลิกาเท่ากับ 25 phr เนื่องจาก Interaction ระหว่าง Silica gel ด้วยกันที่สูงขึ้นผ่านทาง H-bonding เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้น ทำให้อนุภาค Silica gel อยู่กันเป็นกลุ่มมากขึ้น ความเป็นรูพรุนน้อยลง ส่งผลให้เกิดการดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาของรูปและสารกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมะถันลดลง ทำให้กระบวนการเกิดพันธะข้ามเกิดได้ดีขึ้น ส่วนยางผสมที่มี Silica gel จากถ้ำเกลือผสมอยู่ที่ปริมาณตั้งแต่ 30-40 phr พบว่ามีค่าแรงบิดสูงสุดมากกว่ายางผสมที่มี Precipitated silica ผสมอยู่ เนื่องจากในระบบยาง Sol-Gel NR/Si นั้นมีแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ที่เกิด Interconnected กันภายในยาง จึงทำให้ยางผสมที่มี Silica gel จากถ้ำเกลือมีความแข็งแรงมากกว่ายางผสมที่มี Precipitated silica ผสมอยู่

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 31 ผลของปริมาณ Silica gel จากถ้ำเกลือ และ PSi ที่มีต่อค่าแรงบิดสูงสุดของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi

ค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) สามารถคำนวณได้จากผลต่างระหว่างแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด จากงานวิจัยของ Lopez-Manchado และคณะ [34] พบว่าแรงบิดที่เกิดขึ้นนั้นสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง ดังในภาพที่ 32 แสดงค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) ของสารประกอบยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Silica gel จากถั่วแกลบและยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Precipitated silica พบว่าค่า ΔS มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ Silica gel จากถั่วแกลบเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0-10 phr เนื่องจากความมีขี้ที่มากของ Silica gel ที่มีขนาดอนุภาคเล็กและมีความพรุนสูงจะไปอุดช่องว่างการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยาง จากนั้นเมื่อปริมาณ Silica gel จากถั่วแกลบเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 15-25 phr สังเกตเห็นได้ว่าค่า ΔS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณ Silica gel จากถั่วแกลบที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการ Agglomerate ของอนุภาคซิลิกาผ่านทาง H-bonding ทำให้ความพรุนลดลงการอุดช่องว่างจึงลดลง ทำให้ความสามารถในการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลยางเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณ Silica gel จากถั่วแกลบเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 30-40 phr พบว่าค่า ΔS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนมีค่าเทียบเท่ากับยางผสมที่มี Precipitated silica ผสมอยู่ที่ 40 phr เนื่องจากเมื่อปริมาณ Silica gel จากถั่วแกลบเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อนุภาคของ Silica gel มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติที่แทรกอยู่ในโครงสร้างของ Silica gel ในรูปแบบของ Silica gel-Rubber-silica gel cluster มีมากขึ้น ทำให้โมเลกุลของยางที่แทรกอยู่ภายในโครงของ Silica gel มีโอกาสที่จะเกิดพันธะเชื่อมขวางได้ลดลงอธิบายได้ดังภาพที่ 27 ส่วนกรณีการเติม Precipitated silica ปริมาณ 0-20 phr ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔS แสดงว่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้นตั้งแต่ 25-40 phr กลับพบว่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ Precipitated silica เพิ่มขึ้น เป็นเพราะที่ปริมาณ Precipitated silica น้อยๆนั้นอนุภาคซิลิกายังไม่เกิดการเกาะกลุ่มกันจึงไม่ขัดขวางการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลยางธรรมชาติ แต่เมื่อปริมาณ Precipitated silica เพิ่มมากขึ้นจะสังเกตเห็นการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลิกาซึ่งจะไปขัดขวางการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยางทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางลดลง



ภาพที่ 32 ผลของปริมาณ Silica gel จากถ้ำแคลบ และ PSi ที่มีต่อค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) ของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi

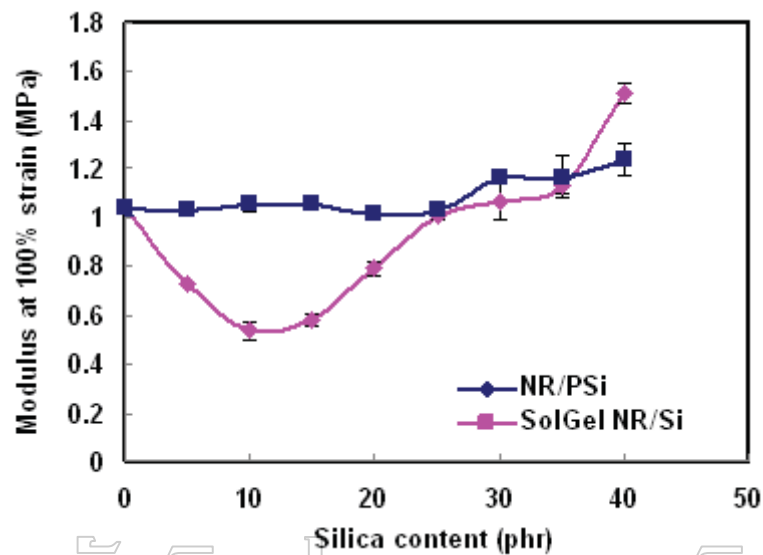
4.7 สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนเซต Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi

การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Silica gel จากถ้ำแคลบ โดยกระบวนการโซลเจลและยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Precipitated silica ในงานวิจัยนี้จะทดสอบจากสมบัติความต้านทานแรงดึงยืด สมบัติความต้านทานแรงฉีกขาด ความแข็งของยางคอมพอสิต และสมบัติความต้านทานการขีดถู

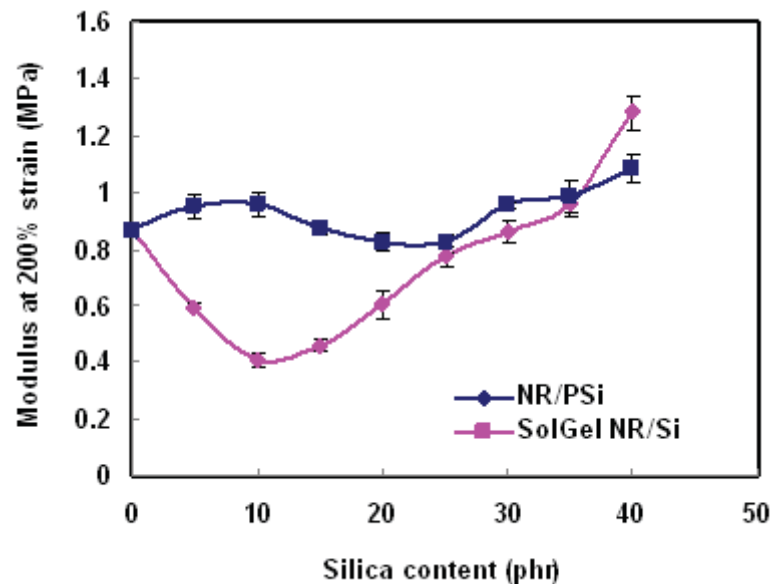
4.7.1 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile properties)

ค่ามอดูลัสดึงเป็นค่าที่แสดงถึงสมบัติการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาค่ามอดูลัสทั้งที่การดึงยืด 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ผลการทดสอบพบว่าค่ามอดูลัสแรงดึงแสดงในภาพที่ 33 และ 34 ในสำหรับระบบยาง Sol-Gel NR/Si ในช่วงปริมาณ Silica gel จากถ้ำแคลบ ตั้งแต่ 0-10 phr พบว่าค่ามอดูลัสมีค่าต่ำลงเนื่องจากความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลยางลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) ที่ลดลง ทำให้ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปมีค่าลดลง และพบว่าเมื่อปริมาณ Silica gel เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 15-25 phr พบว่าค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเนื่องจากความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลยางเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) ที่เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ silica gel เพิ่มขึ้นถึง 40 phr จะเห็นว่าค่ามอดูลัสของยางผสมที่มี Silica gel จากถ้ำแคลบผสมอยู่จะสูงกว่ายางผสมที่มี Precipitated silica ผสมอยู่ เนื่องจากการเกิดโครงสร้างของ

Silica gel-rubber-silica gel cluster ทำให้สามารถต้านทานการยืดออกของสายโซ่โมเลกุลยว
 ระหว่างการดึงยืด ส่งผลให้มีค่าความแข็งแรง (Stiffness) ที่สูงขึ้น ส่วนในกรณีที่มีการเติม
 Precipitated silica พบว่าค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกาที่เติม
 เข้าไปจะไปขัดขวางการดึงยืดของโมเลกุลยางทำให้ยังมีความแข็งแรงที่สูงขึ้น



ภาพที่ 33 ผลของปริมาณ Silica gel จากถั่วแกลบ และ PSi ที่มีต่อค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi

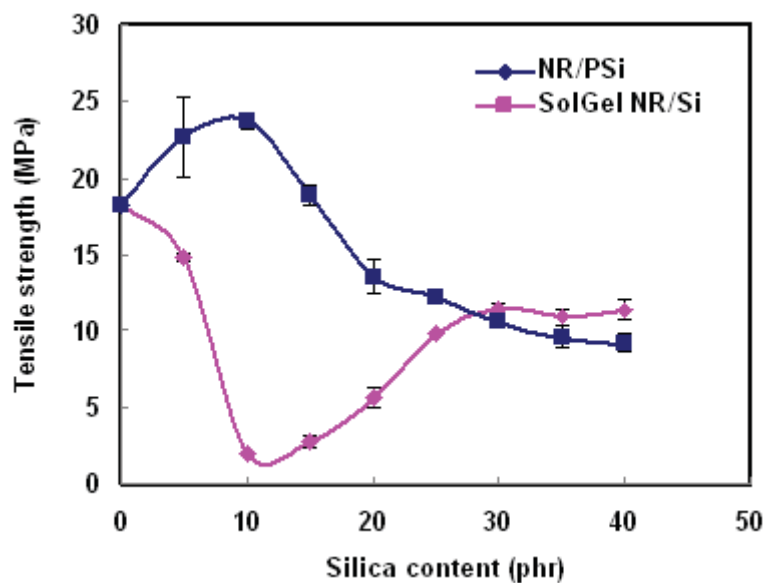


ภาพที่ 34 ผลของปริมาณ Silica gel จากถั่วแกลบ และ PSi ที่มีต่อค่ามอดูลัสที่ 200 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi

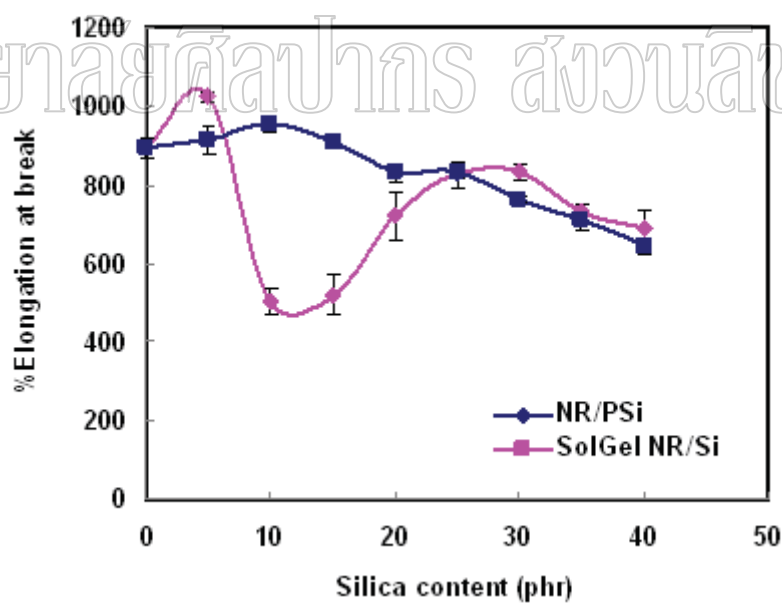
ภาพที่ 35 และ 36 แสดงผลของปริมาณ Precipitated silica และ Silica gel จากเถ้าแกลบที่มีต่อความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ตามลำดับ ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Precipitated silica มีค่าตั้งแต่ 0-10 phr ที่ปริมาณการเติม Precipitated silica มากกว่า 10 phr พบว่ามีการลดลงอย่างมากของค่าความต้านทานแรงดึง เนื่องจากปริมาณซิลิกาที่เติมลงไปปริมาณน้อยทำให้การกระจายตัวของซิลิกาเป็นไปอย่างทั่วถึง แต่เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ความต่อเนื่องของเฟสยางในการรับแรงน้อยลงทำให้มีความต้านทานแรงดึงลดลง

สำหรับเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Precipitated silica มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจาก การเกิดการ Agglomerate ของอนุภาคสารตัวเติม และขัดขวางการยืดตัวของวัฏภาคยาง ดังแสดงในภาพที่ 37 ในส่วนของธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Silica gel จากเถ้าแกลบนั้นจะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงปริมาณ Silica gel ตั้งแต่ 0-10 phr นั้นค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเนื่องมาจากผลของปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่ลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) ที่ลดลง ทำให้เมื่อยางถูกดึงยืดจะไม่เกิด Stress induce crystalline ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนผ่านกันได้โดยง่ายโดยใช้แรงที่น้อยลง รวมไปถึง Filler-rubber-interaction ที่น้อย เพราะความเป็นขั้วที่ต่างกันของยางธรรมชาติและ Silica gel จากเถ้าแกลบ จึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดลดลง

ที่ปริมาณ Silica gel จากเถ้าแกลบตั้งแต่ 10 – 30 phr ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เมื่อยางถูกดึงยืดจะเกิด Stress induce crystalline จากการยึดจับกันด้วยพันธะเชื่อมขวางทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนผ่านกันได้ยากขึ้นและต้องใช้แรงดึงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณซิลิกาเจลดั้งแต่ 30-40 phr ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลงอีกครั้งหนึ่ง แต่ก็ยังคงสูงกว่ายางธรรมชาติที่เติม Precipitated silica ทั้งนี้เนื่องจากในระบบยาง Sol-Gel NR/Si นั้นมีแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-Rubber-silica gel cluster) ที่เกิด Interconnected กันภายในยาง ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ทั่วถึงมากกว่า และเกิดการเกาะกลุ่มกันของซิลิกาที่น้อยกว่า ดังแสดงในภาพที่ 38 ซึ่งไม่พบการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค Silica gel จากเถ้าแกลบ



ภาพที่ 35 ผลของปริมาณ silica gel จากเถ้าแกลบ และ PSi ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi

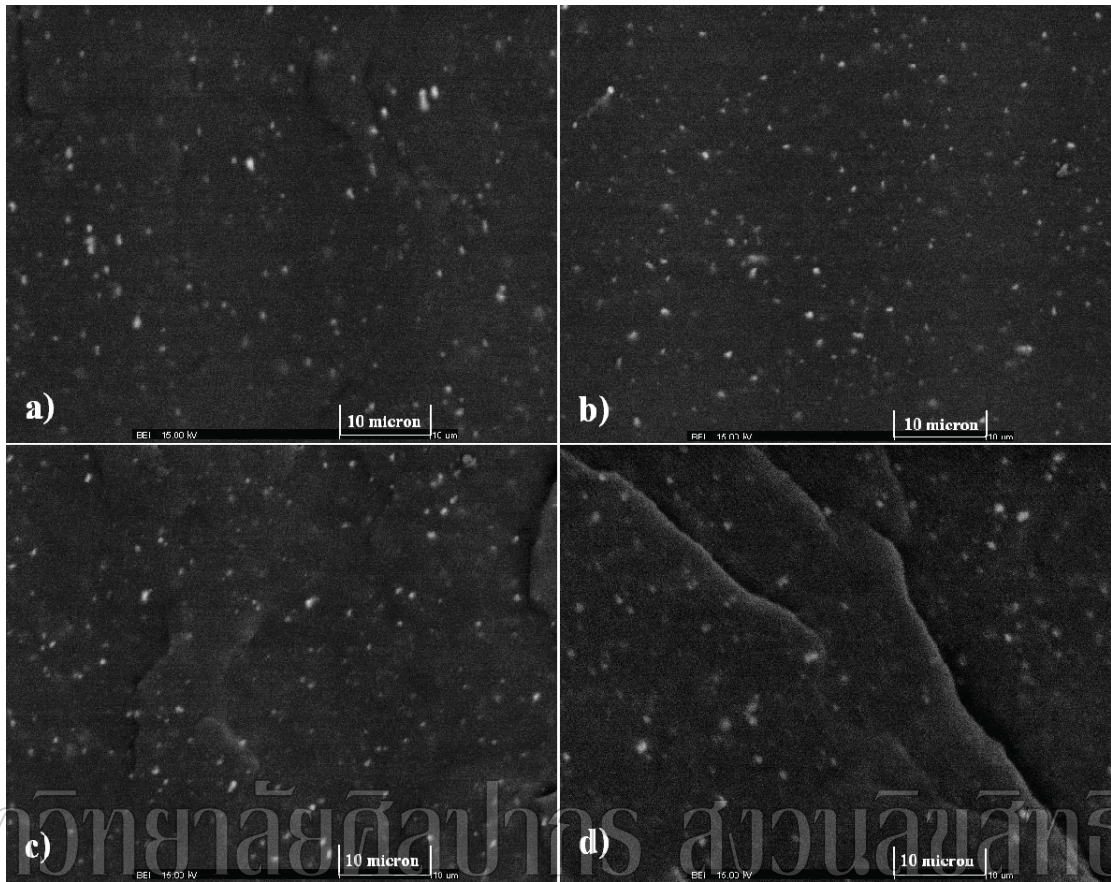


ภาพที่ 36 ผลของปริมาณ silica gel จากเถ้าแกลบ และ PSi ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi



มหาวิทยาลัยศิลปากร สอนลิขสิทธิ์

ภาพที่ 37 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ของ a) NR/30PSi และ b) NR/40PSi
ที่กำลังขยาย 1000 เท่า บริเวณ Fractured surface

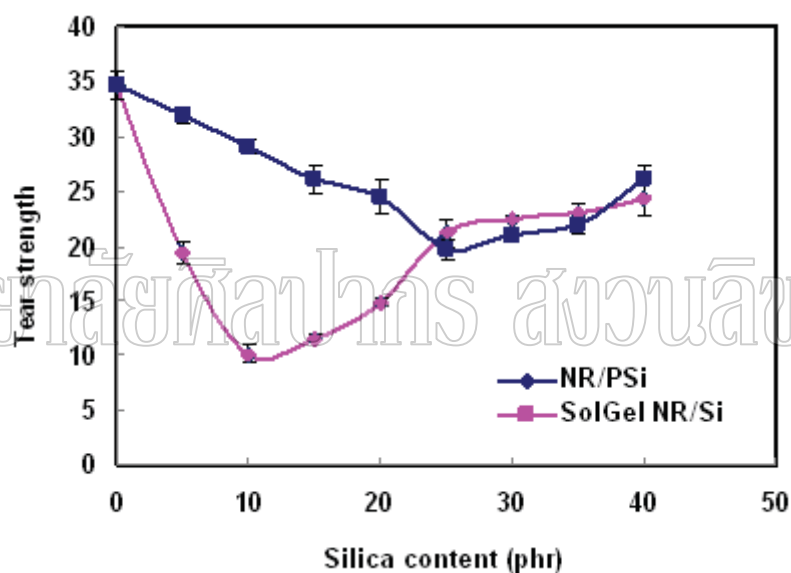


ภาพที่ 38 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ของ a) Sol-Gel NR/10Si, b) Sol-Gel NR/20Si, c) Sol-Gel NR/30Si และ d) Sol-Gel NR/40Si ที่กำลังขยาย 1000 เท่า บริเวณ fractured surface

4.7.2 สมบัติความต้านทานแรงฉีก (*Tear Strength*)

การทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาดของคอมพอสิตสามารถทำได้โดยการวัดแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานขาดออกจากกัน คล้ายกับการทดสอบสมบัติแรงดึง แต่จะแตกต่างกันตรงที่รูปร่างของชิ้นทดสอบจะมีรูปร่างเป็นมุมแหลม (ภาพที่ 19) เมื่อได้รับแรงดึงคอมพอสิตจะเริ่มเกิดการฉีกขาดตรงบริเวณมุมแหลมนี่ จนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน เริ่มที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Crack tip ตามรอยมุมแหลมของชิ้นงานมาตรฐานที่เกิดขึ้น และการกระจายแรงเค้นบริเวณใกล้เคียง The tip of a growing crack ตามกลไก Visco-elastic [35,36] สำหรับผลของปริมาณ Precipitated silica และ Silica gel จากถ้ำเกลือ ที่มีต่อความต้านทานแรงฉีกขาด แสดงในภาพที่ 39 พบว่ายางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Silica gel จากถ้ำเกลือมีค่าความต้านทานแรงฉีกขาดลดลงที่ปริมาณ Silica gel ตั้งแต่ 0-10 phr เนื่องจากการลดลงของความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวาง รวมถึง

การที่ไม่มี Interaction กันระหว่างยางและ Silica gel จากเจ้าแกลบจึงทำให้ใช้แรงเพื่อทำให้เกิดการฉีกขาดน้อยลง เมื่อปริมาณของ Silica gel เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 15-25 phr พบว่าค่าความต้านทานแรงฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Silica gel เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวาง ส่วนที่ปริมาณ Silica gel ตั้งแต่ 30-40 phr ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของยางในระบบที่เติม Silica gel จากเจ้าแกลบมีค่ามากกว่ายางในระบบที่เติม Precipitated silica เนื่องจากในระบบยาง Sol-Gel NR/Si นั้นมีแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ที่เกิด Interconnected กันภายในยาง ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ทั่วถึงกว่า และเกิดการเกาะกลุ่มกันของซิลิกาที่น้อยกว่ามาก

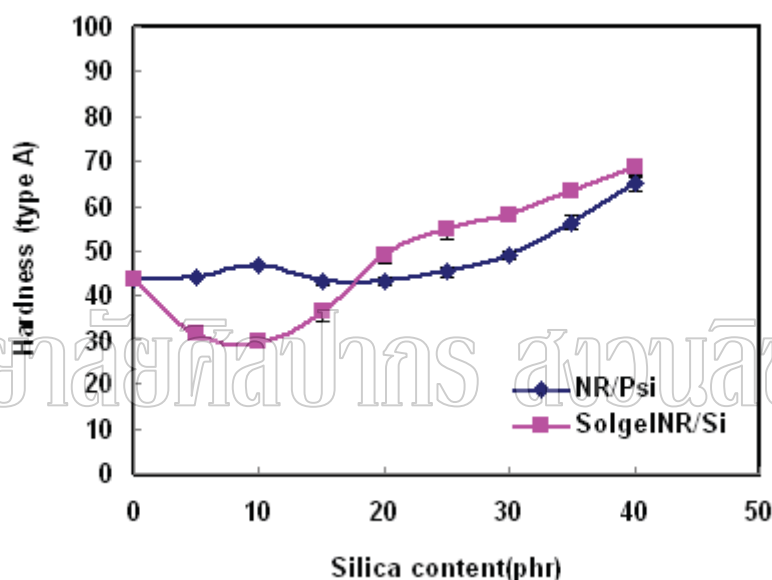


ภาพที่ 39 ผลของปริมาณ Silica gel จากเจ้าแกลบ และ PSi ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi

4.7.3 สมบัติความแข็งที่ผิว (Hardness)

สมบัติความแข็ง คือความสามารถในการต้านทานการกดที่ผิวหน้าของยาง ค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Silica gel จากเจ้าแกลบเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Precipitated silica ดังแสดงในภาพที่ 40 พิจารณายาง Sol-Gel NR/Si พบว่าที่ปริมาณ Silica gel ตั้งแต่ 0-10 phr ค่าความแข็งที่ผิวมีค่าลดลงเนื่องจากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink density) ที่มีค่าต่ำทำให้ยางนิ่มกว่าระบบยางที่มี Precipitated silica ผสมอยู่ สำหรับที่ปริมาณ Silica

gel จากถั่วแกลบตั้งแต่ 15-40 phr ค่าความแข็งที่ผิวของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Silica gel จากถั่วแกลบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Silica gel มากขึ้นและมีค่าความแข็งที่ผิวสูงกว่ายางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Precipitated silica เนื่องจากในระบบยาง Sol-Gel NR/Si นั้นมีแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ที่เกิด Interconnected กันภายในยาง ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ทั่วถึงกว่า และเกิดการเกาะกลุ่มกันของซิลิกาที่น้อยกว่ามาก อีกทั้ง การเกิด การเชื่อมขวางที่มากขึ้น ทำให้ความแข็งที่ผิวมีค่ามากขึ้นเช่นกัน

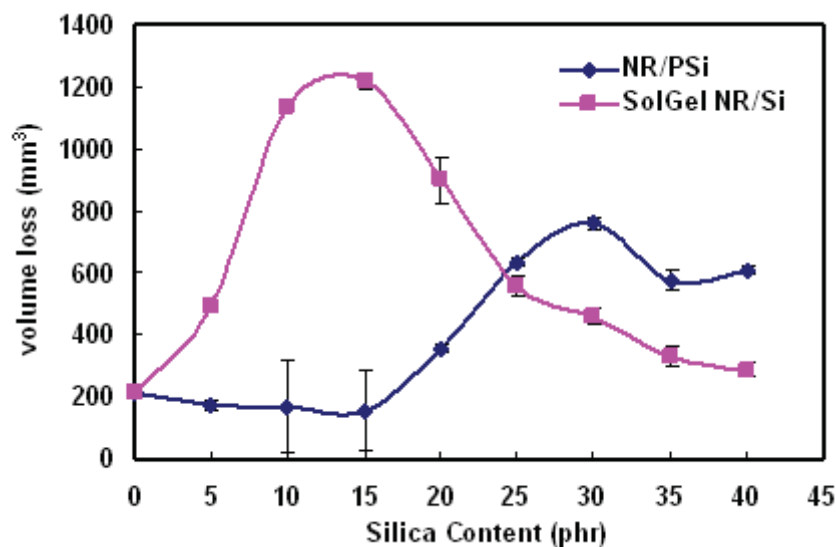


ภาพที่ 40 ผลของปริมาณ Silica gel จากถั่วแกลบ และ Psi ที่มีต่อค่าความแข็งที่ผิวของ Sol-Gel NR/Si และ NR/Psi

4.7.4 สมบัติความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion Resistance)

ค่าการต้านทานการขัดถู คือความสามารถของพื้นผิววัสดุในการต้านทานต่อการสึกหรอเนื่องจากการสัมผัสเสียดสีกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากปริมาณของตัวอย่างยางที่สูญเสียไป (Volume loss) [29] โดยยางที่มีปริมาณของตัวอย่างยางสูญเสียไปสูง มีค่าการต้านทานการขัดถูที่ต่ำ จากผลการทดสอบแสดงได้ดังภาพที่ 41 เมื่อปริมาณ Silica gel จากถั่วแกลบเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0-15 phr พบว่าค่า Volume loss มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่น้อยลง และ Interaction ระหว่างยางกับ Silica gel จากถั่วแกลบที่มีน้อยเพราะความเป็นขั้วที่ต่างกันมากของยาง

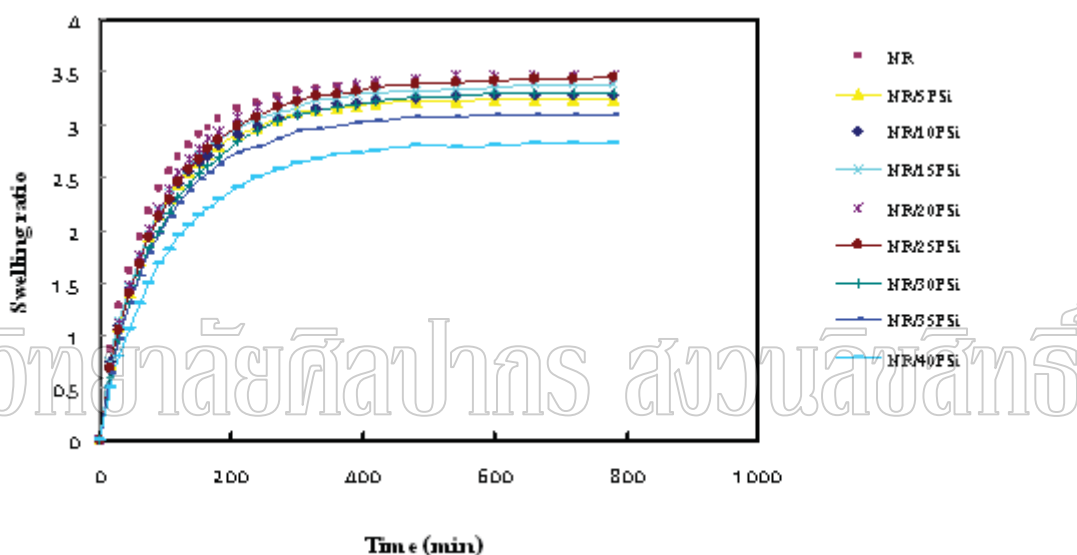
และ Silica gel กล่าวคือ Silica gel และเนื้อยางยึดเกาะกันไม่ดี เป็นเหตุให้เมื่อทดสอบการขัดถู ชิ้นงานตัวอย่างจึงสูญเสียน้ำหนักไปโดยง่าย สำหรับที่ปริมาณ Silica gel จากเค้าเคลือบเพิ่มขึ้น มากกว่า 15 phr ค่า Volume loss มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่ เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการยึดเกาะที่ดียิ่งขึ้นระหว่างโมเลกุลยางด้วยกันเองจึงต้านทานต่อการขัดถูได้มากขึ้น และที่ปริมาณ Silica gel จากเค้าเคลือบตั้งแต่ 30-40 phr ค่า Volume loss นั้นมีค่าต่ำกว่าในระบบ ที่เติม Precipitated silica เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ที่เกิด Interconnected กัน ภายใต้งาน ทำให้มีความต้านทานต่อการขัดถูมากกว่า ส่วนในกรณียางธรรมชาติที่มีการเติม Precipitated silica ในช่วงปริมาณซิลิกาตั้งแต่ 0-15 phr ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่า Volume loss เนื่องจากปริมาณซิลิกาที่เติมลงไปยังน้อยจึงไม่รบกวนการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลยาง ในระบบจึงทำให้เกิดการยึดเกาะกันของโมเลกุลยางที่ดี ที่ปริมาณ Precipitated silica ตั้งแต่ 20-40 phr ค่า Volume loss มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณซิลิกาที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการเกาะ กลุ่มกันของอนุภาคซิลิกา ส่งผลทำให้เกิดการขัดขวางการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลยาง และ Interaction ที่ไม่ดีระหว่างเนื้อยางและ Precipitated silica เนื่องจากความเป็นขั้วที่ตรงกัน ทำให้ การยึดเกาะระหว่างเนื้อยางและ Precipitated silica มีน้อย ทำให้ความต้านทานต่อการขัดถูของวัสดุ ลดลง



ภาพที่ 41 ผลของปริมาณ Silica gel จากเค้าเคลือบ และ PSi ที่มีต่อปริมาณของตัวอย่างคอมพอสิต ที่สูญเสียไป ของ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi

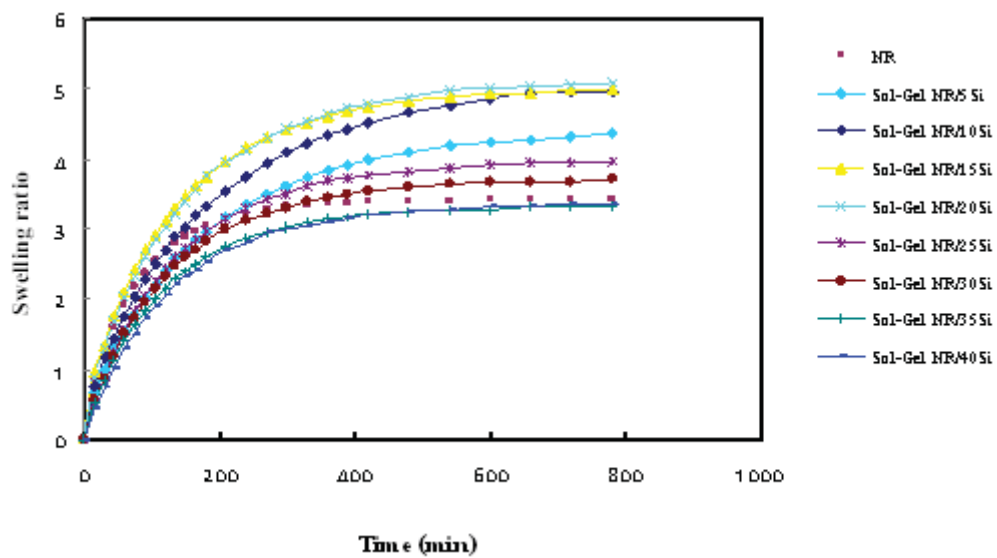
4.8 สมบัติทางกายภาพของคอมพอลิเมอร์ที่ผ่านการบ่ม (Vulcanized rubber)

การบวมตัว (Swelling) บ่งบอกถึงคุณสมบัติทางกายภาพของยาง Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi จากการทดสอบการบวมตัวใน Toluene ของยางทั้งสองระบบ ในกรณียางธรรมชาติที่มีการเติม Precipitated silica พบว่าเมื่อปริมาณของ Precipitated silica เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการบวมตัวน้อยลง เนื่องจากปริมาณของ Precipitated silica ที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้สัดส่วนปริมาณเนื้อยางในชิ้นงานลดลง จึงทำให้สามารถดูดซับตัวทำละลายได้น้อยจึงเกิดการบวมตัวน้อยลง ดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 แสดงผลของปริมาณ PSi ที่มีต่อค่าการบวมตัวของ NR/PSi

สำหรับในกรณียางธรรมชาติที่มี Silica gel จากเถ้าแกลบอยู่ พบว่าเกิดการบวมตัวมากขึ้นเมื่อปริมาณ Silica gel เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0-20 phr เนื่องจากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่ลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าความแตกต่างแรงบิด (ΔS) ทำให้ชิ้นงานสามารถดูดซับตัวทำละลายได้มากขึ้น และที่ปริมาณ Silica gel เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 25-40 phr การบวมตัวมีค่าลดลงเนื่องจากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับตัวทำละลายของชิ้นงานลดลง ดังแสดงในภาพที่ 43



ภาพที่ 43 แสดงผลของปริมาณ Silica gel จากเจ้าแกลบ ที่มีต่อค่าการบวมตัวของ Sol-Gel NR/Si

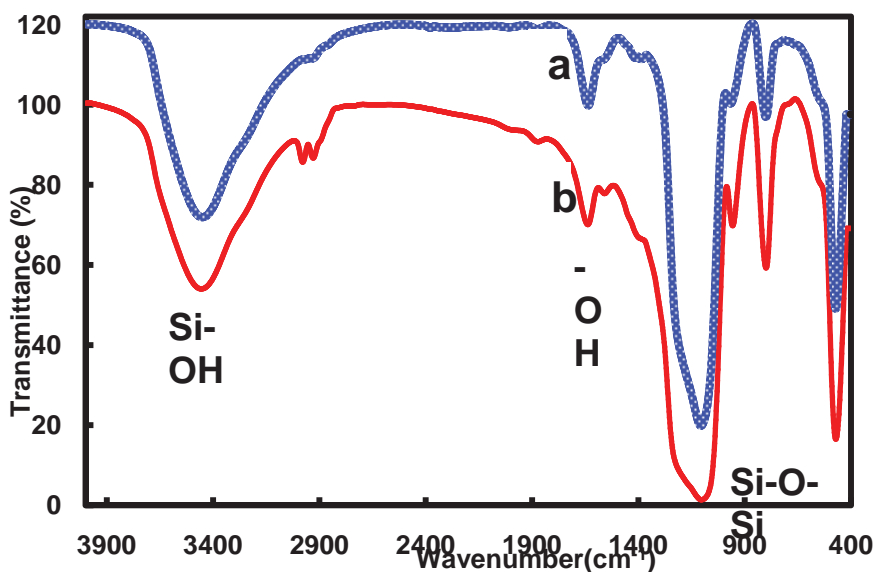
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตอนที่ 3 การศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมแบบคู่ (Hybrid filler) ระหว่าง Silica gel จากเถ้าแกลบ ที่เสริมแรงในยางธรรมชาติกับ Precipitated silica ที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ Si-69 ที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอสิต

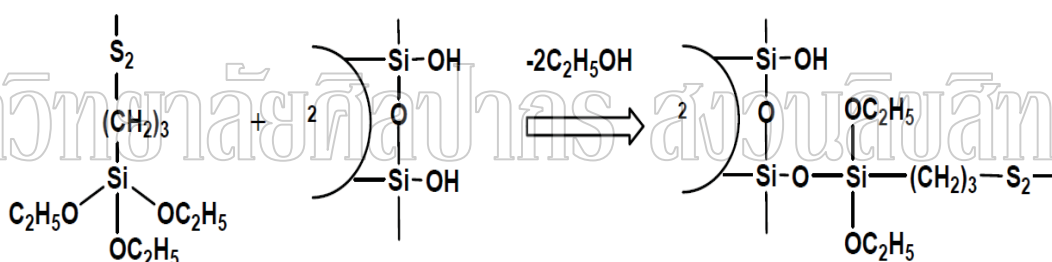
จากงานวิจัยในตอนที่ 2 จึงเลือกใช้ Sol gel NR/30Si มาศึกษาต่อเนื่องจากค่าสมบัติเชิงกลของยาง Sol-Gel NR/Si มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่เติม Precipitated silica ที่ปริมาณซิลิกาเท่ากัน และปริมาณซิลิกาสุทธิยังไม่สูงมาก

4.9 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PSi ที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุง (Modified) ผิวของ Precipitated silica ด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด 69 (Si-69) เพื่อปรับปรุงให้ Precipitated silica มีผิวหน้าที่สามารถเข้ากับยางธรรมชาติได้ดี [6, 15, 37] เมื่อทำการปรับปรุงผิวของ Precipitated silica แล้ว ผู้วิจัยได้ทำการการพิสูจน์เอกลักษณ์ผลการปรับปรุงผิว Precipitated silica นั้นด้วย FTIR ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 44 โดยมีการเปรียบเทียบผลกับ Precipitated silica ที่ไม่ปรับปรุงโดยแสดงแถบการดูดกลืนที่ประมาณ 3450 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยืด (Stretching vibration) ของหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ที่มีมากบนพื้นผิวของซิลิกา ต่อมาเป็นแถบการดูดกลืนที่ประมาณ 1629 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ -OH แถบการดูดกลืนที่ประมาณ 1109 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (Si-O-Si) และแถบการดูดกลืนที่ประมาณ 462 และ 792 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบหักงอ (Bending vibration) ของหมู่ Si-O-Si ซึ่งแถบการดูดกลืนดังที่กล่าวมานี้จะพบได้ทั้งในสเปกตรัมของซิลิกาทั้งที่ผ่านการปรับปรุง (TPSi) และยังไม่ผ่านการปรับปรุง (PSi) แต่สำหรับแถบการดูดกลืนที่มีเฉพาะในซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้ว คือ แถบการดูดกลืนที่ประมาณ $2927-2970 \text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ -C-CH₃ และ -CH₂- ซึ่งเป็นการสั่นของ -CH₂ ในโมเลกุลของ Si-69 ที่อยู่บนพื้นผิว Precipitated silica ที่ทำการปรับปรุง นอกจากนี้ยังพบว่าแถบการดูดกลืนที่ประมาณ 1100 cm^{-1} กว้างมากขึ้น แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่ไฮดรอกซิล (Si-O-Si) ก็เนื่องมาจากหมู่อัลคอกซี (Alkoxy) ของสารคู่ควบ Si-69 นั้นทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวของ Precipitated silica ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามปฏิกิริยาที่แสดงในภาพที่ 45



ภาพที่ 44 กราฟ FTIR ของ a) Precipitated silica ที่ปรับปรุงผิวและ b) ไม่ปรับปรุงผิว



ภาพที่ 45 ขั้นตอนการปรับปรุงผิวของ Precipitated silica ด้วย Si-69 [7]

4.10 สมบัติการบ่มของยางคอมพาวด์ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi

ในงานวิจัยส่วนนี้ทำการศึกษาระบบที่มี Sol-Gel Si และ TPSi ผสมในยาง เปรียบเทียบกับระบบที่มี TPSi ผสมในยาง โดยผลการทดสอบคุณลักษณะการบ่มของยางทั้งสองระบบ แสดงดังภาพที่ 49 และ 50 โดยจะอภิปรายผลการทดสอบตามลำดับดังนี้

4.10.1 คุณลักษณะของเวลาสกอร์ชของยาง

เวลาสกอร์ช (Scorch time) คือระยะเวลาที่ยางสามารถไหลได้ก่อนเกิดการคงรูป ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงด้วย Excess silane (TPSi) ที่เติมลงไปนยาง Sol-Gel NR/30Si และยาง NR/TPSi ซึ่งผลการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์ด้วย MDR แสดงได้ดังภาพที่ 46 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อพิจารณาในระบบของยาง NR/TPSi พบว่า

เมื่อปริมาณของ TPSi ในระบบเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เวลาสกรอ์ชนั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) และสารกระตุ้น (Activators) ไม่ถูกดูดซับด้วยหมู่ไฮดรอกซิลของ Precipitated silica เพราะมีการใส่ Excess silane (TPSi) จึงทำให้อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมนั้นไม่ส่งผลต่อเวลาสกรอ์ชของยาง

สำหรับในระบบของยาง Sol-Gel NR/30Si/TPSi นั้นพบว่า เมื่อปริมาณของ TPSi ที่เติมลงไป ในยางเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้เวลาสกรอ์ชมีค่าลดลง เนื่องจากยาง Sol-Gel NR/30Si/TPSi ที่ยังไม่มีการเติม TPSi (ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 30 phr) ซิลิกาจะยังมีรูพรุนที่สูงอยู่เพราะไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกา ซึ่งรูพรุนที่มากนั้นจะดูดซับตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ทำให้หน่วยปฏิกิริยาการเริ่มวัลคาไนเซชันส่งผลให้เวลาสกรอ์ชช้า แต่เมื่อเติม TPSi ลงไปจะทำให้ไปลดความเป็นรูพรุนของซิลิกาในยางระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi ให้น้อยลงเนื่องจาก TPSi ที่เติมลงไปนั้นมีการปรับปรุงผิวด้วย Excess silane จึงทำให้เวลาสกรอ์ชนั้นเร็วขึ้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบยางระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi กับ NR/TPSi พบว่าที่ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 30 phr นั้นพบว่าระบบยาง Sol-Gel NR/30Si/TPSi นั้นมีเวลาสกรอ์ชมากกว่าระบบยาง NR/TPSi เนื่องจากยางระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi ซิลิกามีรูพรุนที่สูงกว่ายางระบบ NR/TPSi

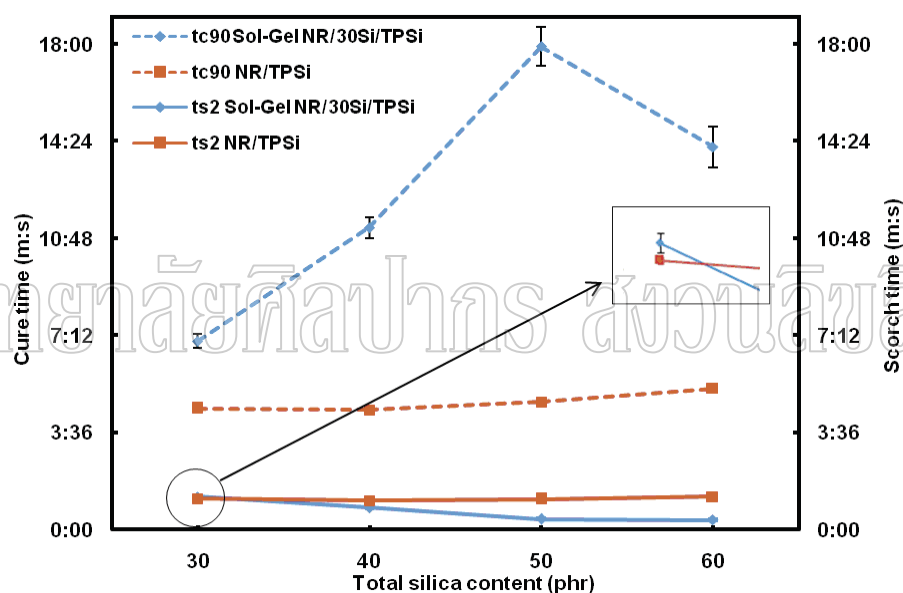
4.10.2 คุณลักษณะเวลาในการคงรูปของยาง

เวลาในการคงรูปของยาง (Cure time) นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวกระตุ้น รวมไปถึงอุณหภูมิในการคงรูป ซึ่งผลการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์ด้วย MDR แสดงได้ดังภาพที่ 46 พบว่า เมื่อปริมาณของ TPSi เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ยางในระบบ NR/TPSi มีเวลาในการคงรูปของยางเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคของซิลิกานั้นมีโอกาสมาอยู่ใกล้กันมากขึ้นทำให้อาจมีโมเลกุลยางบางส่วนถูกล้อมรอบไปด้วยอนุภาคของซิลิกา ส่งผลให้โมเลกุลยางนั้นไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันกับโมเลกุลยางรอบนอกได้เป็นผลทำให้ใช้เวลาในการคงรูปนานขึ้น [23] ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบยางที่ไม่ปรับปรุงผิวด้วย Excess silane (NR/PSi) พบว่ายางระบบ NR/TPSi จะต้องใช้เวลาในการคงรูปน้อยกว่า

เมื่อพิจารณาในระบบยาง Sol-Gel NR/30Si/TPSi พบว่าเมื่อเติม TPSi ลงในปริมาณ 10 และ 20 phr (ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 40 และ 50 ตามลำดับ) จะทำให้เวลาในการคงรูปของยางนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการกระจายตัวของซิลิกาในเฟสของยางได้ดี จึงทำให้ซิลิกานั้นเกิดการ

ขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของสารเคมีที่ใช้ในการคงรูปร่าง ซึ่งทำให้หน่วยปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน แต่เมื่อเติม TPSi ในปริมาณ 30 phr (ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 60) จะส่งผลให้เวลาในการคงรูปมีค่าลดลง เนื่องจากซิลิกาเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนในเฟสของยาง จึงส่งผลให้สารเคมีสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับยางได้ง่าย

เมื่อเปรียบเทียบขงระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi กับ NR/TPSi ที่ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 30 phr จะเห็นได้ว่าขงระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi นั้นมีเวลาในการคงรูปที่สูงกว่า เนื่องจากซิลิกาเจลที่อยู่ในขงระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi นั้นมีความเป็นรูพรุนสูงและยังมีหมู่ไฮดรอกซิล (-Si-OH) อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาทำให้เกิดการดูดซับตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ที่ผิว จึงเป็นผลให้ต้องใช้เวลาในการคงรูปมากกว่า



ภาพที่ 46 ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อ Scorch time และ Cure time ของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi

4.10.3 ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum Torque)

ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum Torque; ML) คือค่าความหนืดต่ำสุด เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความหนืดของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi ที่ยังไม่คงรูป หรือความสามารถในการไหลของยางที่อุณหภูมิการทดสอบ ซึ่งจากภาพที่ 47 เมื่อพิจารณาในระบบของยาง NR/TPSi พบว่าค่าแรงบิดต่ำสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ TPSi ในระบบเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก TPSi ที่เติมลงไปนั้นจะเกิดการขัดขวาง

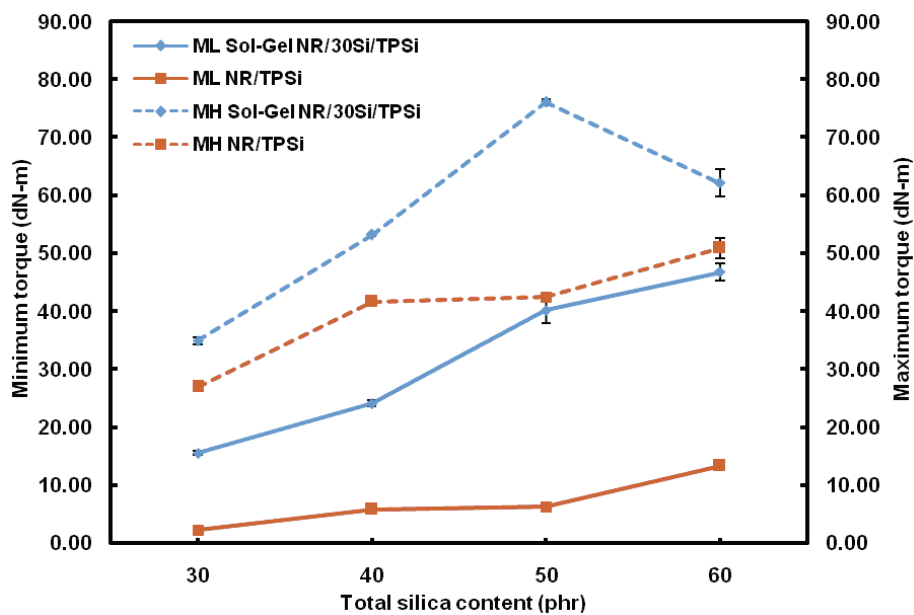
การไหลของสายโซ่โมเลกุลของยางทำให้ค่าแรงบิดต่ำสุดมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของซิลิกาที่เติมลงไป

สำหรับในระบบของยาง Sol-Gel NR/30Si/TPSi นั้นพบว่า เมื่อปริมาณของ TPSi ที่เติมลงไป ในยางเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าแรงบิดต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันและสูงกว่าระบบยาง NR/TPSi เนื่องจากในระบบยาง Sol-Gel NR/30Si/TPSi นั้นมีแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ที่เกิด Interconnected กันภายในยางทำให้ขีดขวางการไหลของสายโซ่ได้มาก จึงมีค่าแรงบิดต่ำสุดที่สูงกว่าในระบบยาง NR/TPSi

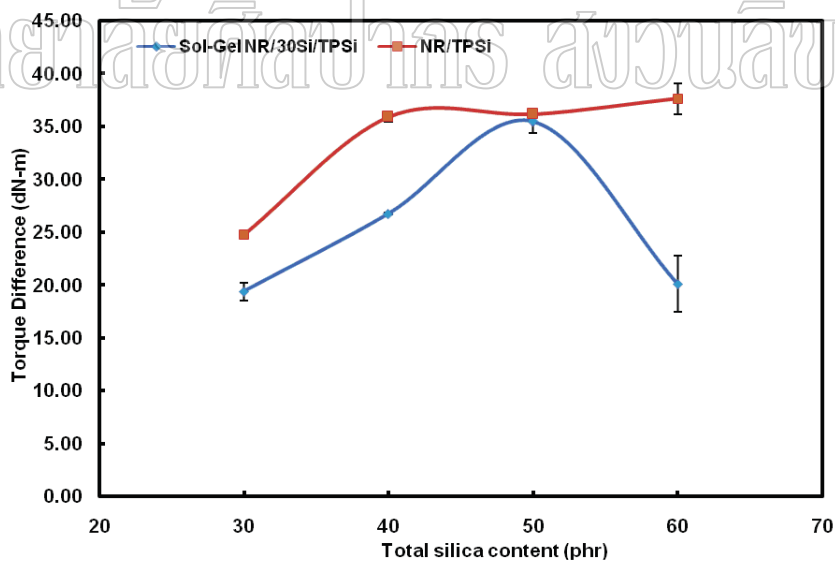
4.10.4 ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum Torque)

ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum Torque; MH) คือค่าที่บ่งชี้ถึงความแข็งแกร่งหรือค่ามอดูลัสเฉือนของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi คงรูป ณ อุณหภูมิการทดสอบจากภาพที่ 47 พบว่าเมื่อปริมาณของ TPSi ในระบบเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าแรงบิดสูงสุดของระบบยาง NR/TPSi มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก TPSi ที่เติมลงไปนั้นมีการกระจายตัวในเฟสของยางได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้สามารถต้านทานการไหลของยางได้ นอกจากนี้ TPSi ที่ใช้นั้นมีการปรับปรุงผิวด้วย Excess silane ทำให้อะตอมของซิลเฟอรที่อยู๋ในโมเลกุลของสารคู่ควบไซเลนชนิด Si-69 นั้นช่วยในปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน และเป็นการเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink density) ซึ่งส่งผลให้แรงบิดสูงสุดเพิ่มขึ้นอีกด้วย

เมื่อพิจารณาในระบบของยาง Sol-Gel NR/30Si/TPSi พบว่า เมื่อเติม TPSi ลงไปในยางในปริมาณ 10-20 phr (ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 40-50 phr ตามลำดับ) จะส่งผลให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับระบบยาง NR/TPSi แต่มีค่าสูงกว่าระบบยาง NR/TPSi เนื่องจากในระบบยาง Sol-Gel NR/30Si/TPSi นั้นมีแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ที่เกิด Interconnected กันภายในยาง แต่เมื่อเติม TPSi ปริมาณ 30 phr (ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 60 phr) ลงในระบบยาง Sol-Gel NR/30Si จะส่งผลให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากซิลิกานั้นกระจายตัวไม่ดีทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนส่งผลให้เฟสของยางกับเฟสของตัวเติมนั้นแยกจากกัน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าลดลง



ภาพที่ 47 ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าแรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุดของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi



ภาพที่ 48 ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) ของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi

4.11 สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนเซต Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi

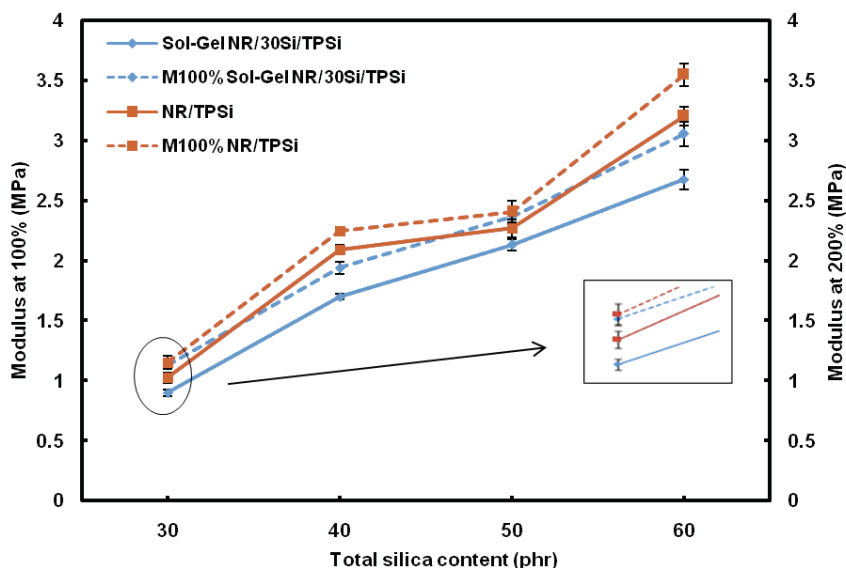
ในการศึกษาสมบัติเชิงกลของงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนเซต โดยศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง, ความต้านทานการฉีกขาด และความแข็งของยางทั้งสองระบบ แสดงดังภาพที่ 49-52 โดยจะอภิปรายผลการทดสอบตามลำดับดังนี้

4.12.1 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi

● ค่ามอดูลัสดึง (Modulus)

ค่ามอดูลัสดึงเป็นค่าที่แสดงถึงสมบัติการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาทั้งที่การดึงยืด 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าค่ามอดูลัสดึงมีแนวโน้มที่เหมือนกันแสดงได้ดังภาพที่ 49 พบว่า เมื่อเติม TPSi ลงในระบบยาง NR/TPSi เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ามอดูลัสดึงมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากผลของการเติม TPSi ที่มีความแข็งสูงกว่าค่าความแข็งของโมเลกุลยาง ซึ่งสามารถต้านทานการยืดออกของสายโซ่โมเลกุลยางระหว่างการดึงยืด ส่งผลให้มีค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ที่สูงขึ้น เมื่อพิจารณาภายในระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi พบว่า เมื่อปริมาณของ TPSi ที่เติมลงในยางเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ามอดูลัสดึงมีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบของทั้งสองระบบพบว่า ยางระบบ NR/TPSi สูงกว่ายางระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi เนื่องจากภายในระบบ NR/TPSi มีปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink density) ที่สูงกว่ายางระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi ดังจะเห็นได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างระหว่างแรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุด (ΔS) กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content) ในภาพที่ 48



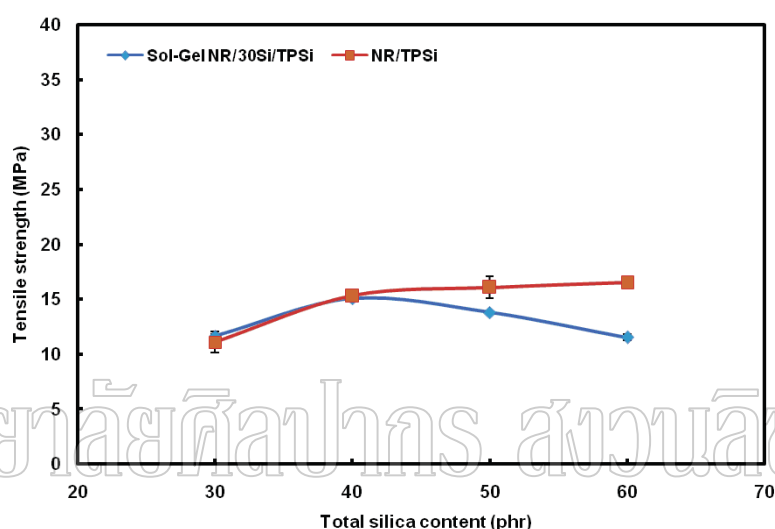
ภาพที่ 49 ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่ามอดูลัสที่ 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi

● ค่าความต้านทานแรงดึงยืด (Tensile Strength)

ค่าความต้านทานแรงดึงยืด (Tensile strength) นั้นแสดงถึงค่าของแรงเค้นที่ต้องการสำหรับการแตกออกของพันธะ ซึ่งผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงยัดนั้นแสดงได้ดังภาพที่ 50 พบว่า ในยางระบบ NR/TPSi ค่าความต้านทานแรงดึงยืดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรก และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณ TPSi เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในขั้นตอนการคอมพาวด์ยางนั้นมีการใส่ TPSi เป็นสารตัวแรกลงในยาง NR ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาค TPSi ในเมทริกซ์ของยางได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงทำให้การกระจายตัวของ TPSi นั้นมีอิทธิพลเหนือกว่าปริมาณ TPSi ที่เติมลงไป

ในยางระบบ Sol-Gel NR/30Si /TPSi พบว่า เมื่อเติม TPSi ลงในยาง Sol-Gel NR/30Si ปริมาณ 10 phr (ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 40 phr) จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงยืดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคของ TPSi ที่เติมลงไปนั้นมีการปรับปรุงผิวด้วย Excess silane ซึ่งส่งผลให้อนุภาค TPSi เกิดการกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของยาง แต่เมื่อเติม TPSi ลงไปเพิ่มขึ้นเป็น 20 และ 30 phr (ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 50 และ 60 phr) ค่าความต้านทานแรงดึงยืดมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากอิทธิพลของปริมาณ TPSi ที่เติมลงไปนั้นเหนือกว่าอิทธิพลของ Excess silane ที่ทำการปรับปรุงผิว อีกทั้งเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลิกาซึ่งสังเกตได้จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM

เมื่อพิจารณาจากทั้งสองระบบพบว่า ที่ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 30 phr พบว่า ยางระบบ NR/30Sol-GelSi/TPSi มีค่าความต้านทานแรงดึงยืดที่สูงกว่ายางระบบ NR/TPSi เนื่องจากอิทธิพลของแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ที่เกิด Interconnected กันภายในยาง แต่ที่ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 40, 50 และ 60 phr นั้นผลที่ได้ตรงกันข้าม เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลิกา

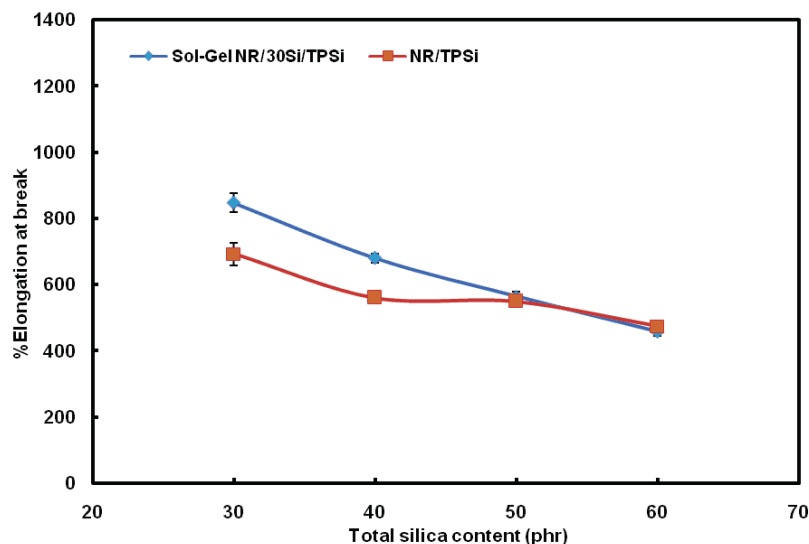


ภาพที่ 50 ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi

● เเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด (Elongation at Break)

สำหรับผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของยางทั้งสองระบบดังแสดงในภาพที่ 51 พบว่า เเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของ TPSi ที่เติมลงในระบบยางมีมากขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมที่มากขึ้นนั้นส่งผลให้อนุภาคสารตัวเติมใกล้ชิดกันมากขึ้น จนทำให้ Interaction ระหว่างยางกับสารตัวเติมลดลง ทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดลดลง จากการทดลองจะสังเกตเห็นว่า ที่ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 30 phr ยางระบบ NR/TPSi มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดต่ำกว่ายางระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi เนื่องจากปริมาณการเชื่อมขวาง (Crosslink density) ที่มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกันกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่าง

ระหว่างแรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุด (ΔS) กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content) ดังภาพที่ 48

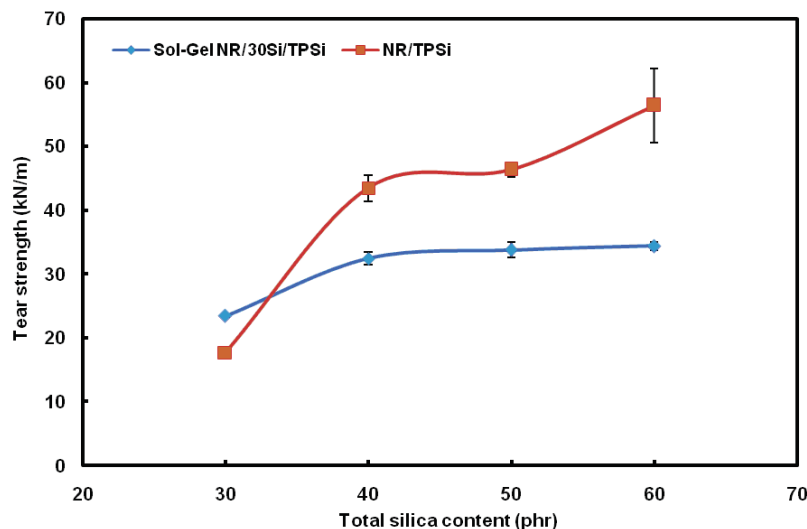


ภาพที่ 51 ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

4.11.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงฉีก (Tear Strength)

จากผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของยาง NR/TPSi ดังแสดงในภาพที่ 52 พบว่า เมื่อเติม TPSi ลงไปในระบบยาง NR/TPSi จะทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของระบบยาง NR/TPSi เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติม TPSi นั้นจะทำให้ปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางเพิ่มสูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากค่าความแตกต่างของแรงบิดในภาพที่ 48 โดยค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดนั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink density) สำหรับยางในระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi พบว่า เมื่อเติม TPSi ในปริมาณ 10 phr (ปริมาณซิลิกาโดยรวม 40 phr) จะส่งผลให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมในปริมาณ 20 และ 30 phr (ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 50 และ 60 phr ตามลำดับ) จะเห็นว่าค่าความต้านทานการฉีกขาดไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากอิทธิพลของแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โพลิเมอร์ที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ที่เกิด Interconnected กันภายในยาง

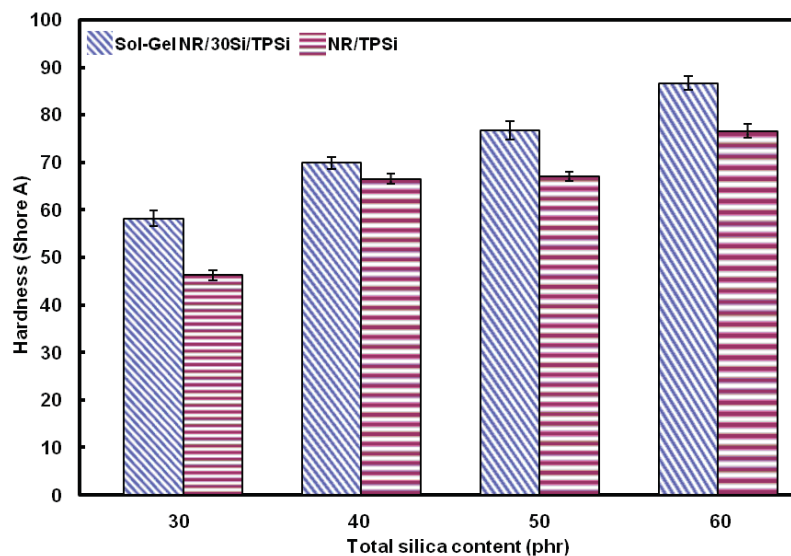


ภาพที่ 52 ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi

4.11.3 สมบัติความแข็งที่ผิว (Hardness)

สมบัติความแข็ง คือความสามารถในการต้านทานการกดที่ผิวหน้าของยาง โดยในงานวิจัยใช้หัวกด (Indenter) ประเภท Shore A ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 53 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความแข็งที่ผิวของยางทั้งระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ TPSi ในยาง เนื่องจากสารตัวเติมจัดเป็นอนุภาคของแข็งที่มีความแข็งสูงกว่ายางค่อนข้างมาก ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมจึงส่งผลให้สัดส่วนของยางลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ยางมีความแข็งที่ผิวสูงขึ้น เรียกผลกระทบในลักษณะเช่นนี้ว่าผลของการเจือจางหรือ "Dilution effect"

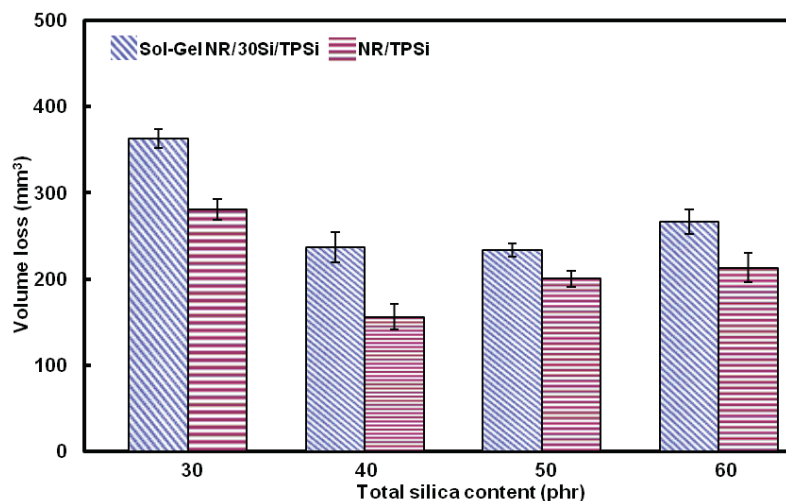
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบยาง NR/TPSi และ Sol-Gel NR/30Si/TPSi พบว่า ระบบยาง Sol-Gel NR/30Si/TPSi มีค่าความแข็งมากกว่า เนื่องจากระบบยาง Sol-Gel NR/30Si/TPSi นั้นมีแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่งที่เกิด Interconnected กันภายในยาง ส่งผลให้ยางสูตรนี้มีความแข็งที่ผิวสูงกว่า



ภาพที่ 53 ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าความแข็งที่ผิวของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi

4.11.4 สมบัติการต้านทานต่อขูดถู (Abrasion Resistance)

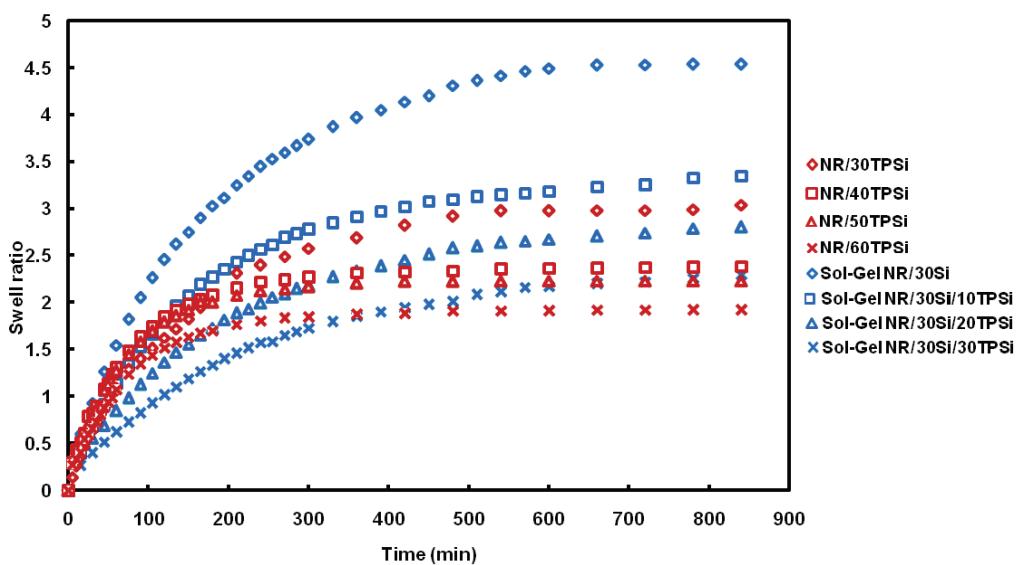
ค่าการต้านทานการขูดถู คือความสามารถของพื้นผิววัสดุในการต้านทานต่อการสึกหรอ เนื่องจากการสัมผัสเสียดสีกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากปริมาณของตัวอย่างที่สูญหายไป (Volume loss) [29] โดยยางที่มีปริมาณของตัวอย่างสูญหายไปสูง มีค่าการต้านทานการขูดถูที่ต่ำ จากผลการทดสอบแสดงได้ดังภาพที่ 54 พบว่ายาง Sol-Gel NR/30Si ที่ยังไม่มีการเติม TPSi ลงไป จะมีค่า volume loss ที่สูง เนื่องจากมีปริมาณความหนาแน่นของการเชื่อมขวางต่ำ แต่เมื่อเติม TPSi ลงไปในยาง Sol-Gel NR/30Si จะส่งผลให้ volume loss ลดลง กล่าวคือค่าความต้านทานการขูดถูมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก TPSi ที่เติมลงไปนั้นมีการกระจายตัวในเฟสของยางได้อย่างทั่วถึงทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางนั้นมีมากขึ้น แต่เมื่อเติม TPSi ปริมาณ 30 phr (ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 60 phr) ลงในระบบยาง Sol-Gel NR/30Si จะส่งผลให้ค่าความต้านทานการขูดถูมีค่าลดลง เนื่องจากซิลิกานั้นกระจายตัวไม่ดีทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ส่งผลให้เฟสของยางกับเฟสของตัวเติมนั้นแยกจากกัน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางนั้นมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างยางระบบ NR/TPSi และยางระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi พบว่ายางระบบ NR/TPSi มีค่าความต้านทานการขูดถูที่สูงกว่าเนื่องจากยางระบบ NR/TPSi เกิดอันตรกิริยาระหว่าง TPSi กับยางได้ดีกว่า



ภาพที่ 54 ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อปริมาณของตัวอย่าง Hybrid composite ที่สูญเสียไปของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และ NR/TPSi

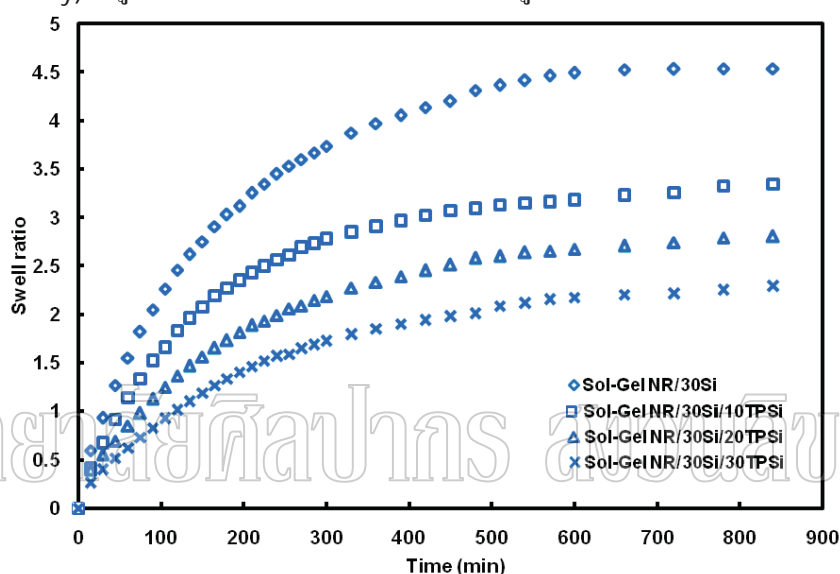
4.12 สมบัติทางกายภาพของคอมพอลิเมอร์ที่ผ่านการบ่ม (Vulcanized rubber)

การบวมตัว (Swelling) บ่งบอกถึงสมบัติทางกายภาพของยางระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และยางระบบ NR/TPSi ได้ ซึ่งจากภาพที่ 55-57 พบว่าทั้งยางระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และยางระบบ NR/TPSi เมื่อปริมาณของ TPSi เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดบวมตัวน้อยลง เนื่องจากปริมาณของ TPSi ที่เพิ่มขึ้นนั้น ทำให้สัดส่วนปริมาณเนื้อยางในชิ้นงานลดลง จึงทำให้สามารถดูดซับตัวทำละลายได้น้อยจึงเกิดการบวมตัวน้อยลง

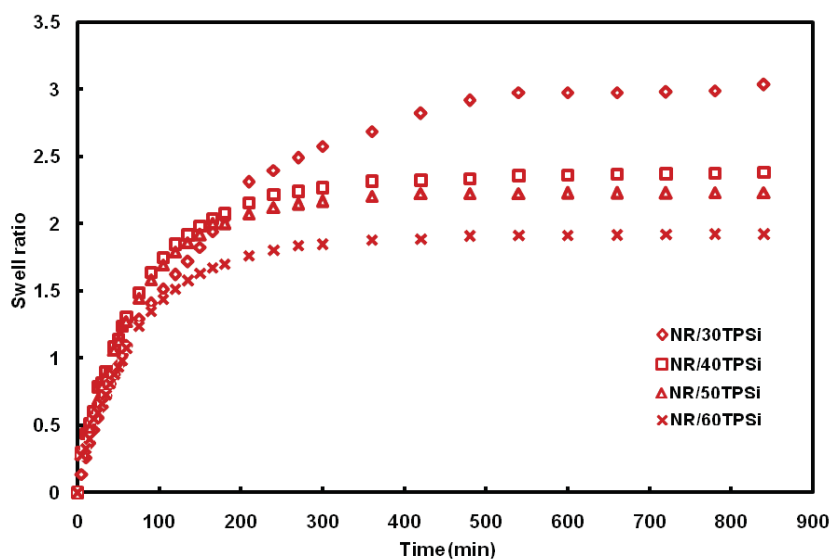


ภาพที่ 55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัวกับปริมาณซิลิกาโดยรวม

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราเร็วในการบวมตัวของยางระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi กับยางระบบ NR/TPSi พบว่ายางระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi เกิดการบวมตัวช้ากว่ายางระบบ NR/TPSi เนื่องจากผลของแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางระหว่าง Silica gel กลุ่มหนึ่งกับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่งที่เกิด Interconnected กันภายในยางระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการบวมตัวจะพบว่า ยางระบบ NR/TPSi เกิดการบวมตัวที่น้อยกว่ายางระบบ Sol-Gel NR/30Si/TPSi เนื่องจากยางระบบ NR/TPSi มีปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink density) ที่สูงกว่าซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าโมดูลัสดึง



ภาพที่ 56 ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าการบวมตัวของ Sol-Gel NR/30Si/TPSi



ภาพที่ 57 ผลของปริมาณ TPSi ที่มีต่อค่าการบวมตัวของ NR/TPSi

ตอนที่ 4 การศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมแบบคู่ (Hybrid filler) ระหว่าง Silica gel ที่เสริมแรงในยางธรรมชาติกับเส้นใยที่ไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวหรือเส้นใยที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ Si-69 ที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอสิต

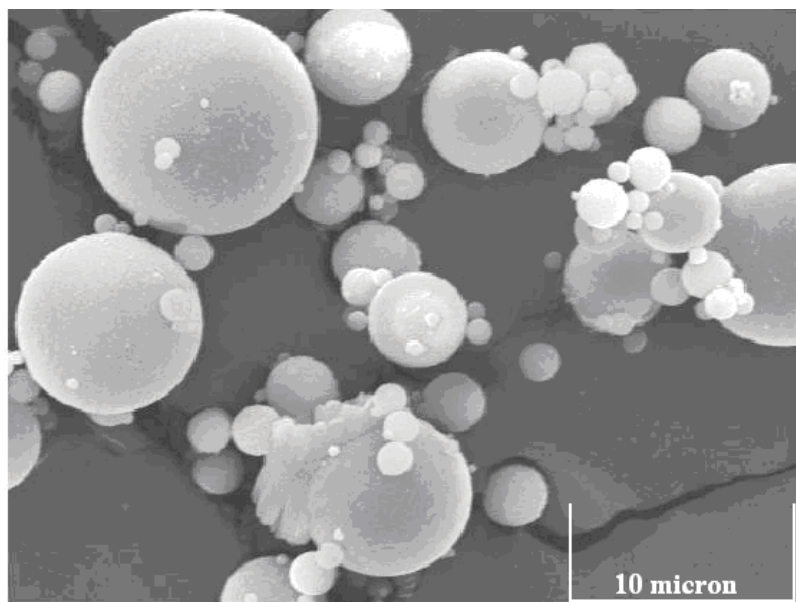
4.13 การตรวจสอบและศึกษาลักษณะทางกายภาพของ FA

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวเติม ทำให้สามารถคาดเดาผลของการเสริมแรงได้ โดยงานวิจัยนี้ตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของ FA จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ของบริษัท BrukerAXS รุ่น S4 Pioneer จากตารางที่ 17 พบว่า FA มีส่วนประกอบของซิลิกาอยู่เป็นส่วนใหญ่ในปริมาณมากถึง 30.1 % โดยโมล ส่วนประกอบที่สำคัญของ FA ได้แก่ ซิลิกอน, อลูมิเนียม, เหล็ก และแคลเซียม และส่วนประกอบย่อยคือ แมกนีเซียม, โซเดียม, โพแทสเซียม, ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส

ตารางที่ 17 แสดงองค์ประกอบธาตุที่เป็นส่วนประกอบอยู่ใน FA

ส่วนประกอบ	%
SiO ₂	30.1
Al ₂ O ₃	18.4
CaO	21.4
Fe ₂ O ₃	18.4
K ₂ O	2.75
SO ₃	6.63
MgO	2.04
Na ₂ O	2.31
TiO ₂	0.379
P ₂ O ₅	0.266
BaO	0.148
SrO	0.117
MnO	0.11
ZnO	0.0287
ZrO ₂	0.024
CuO	0.0167

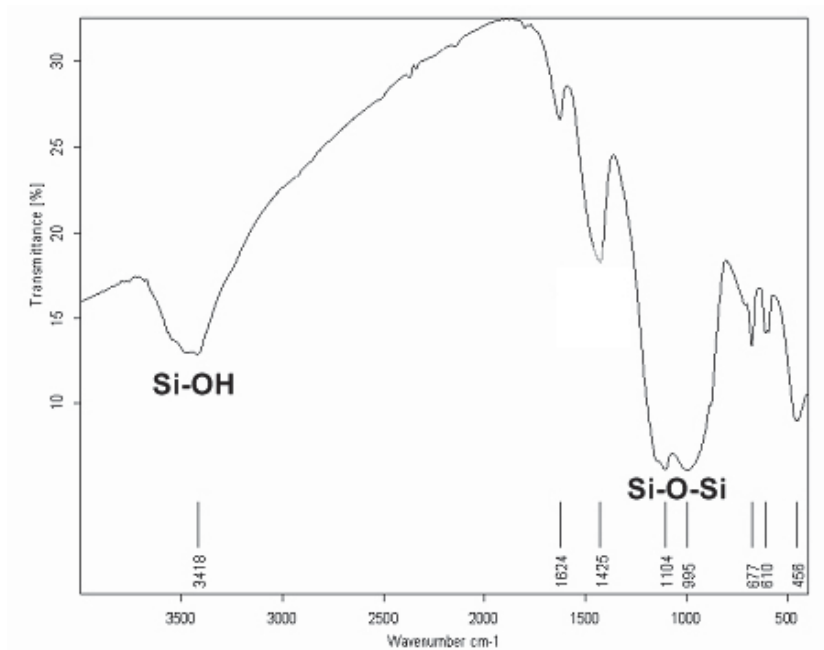
ลักษณะรูปร่างของ FA สามารถศึกษาได้โดยใช้เทคนิค SEM จากภาพที่ 58 แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของ FA มีลักษณะเป็นทรงกลม โดยมีขนาดแตกต่างกันไป ซึ่งโดยรวมมีขนาดน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร



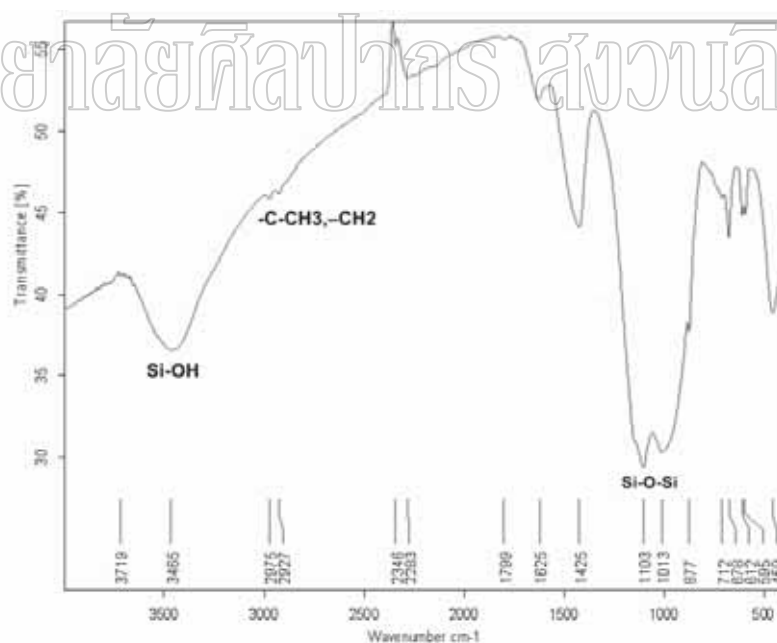
ภาพที่ 58 ลักษณะของรูปร่างของ FA จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ [38]

มหาวิทยาลัยศิลปากร สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

ปัจจุบันมีการวิจัย นำ FA มาเป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ[7,39] ซึ่งพบว่าการเติม FA นั้น ทำให้เวลาในการคงรูปลดลงได้ แต่สมบัติเชิงกลมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากบริเวณพื้นผิว FA มีหมู่ไฮดรอกซิล (-Si-OH) อยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นผิวของ FA จึงมีความเป็นขี้ผึ้ง เมื่อนำ FA ไปผสมกับยางธรรมชาติ ทำให้แรงกระทำระหว่างยางธรรมชาติกับสารตัวเติมน้อยลง [7,39] ดังนั้นจึงใช้สารคู่ควบ Si-69 ลดความเป็นขี้ผึ้งบริเวณผิว FA เพื่อให้เกิดแรงกระทำระหว่างยางธรรมชาติกับสารตัวเติมมากขึ้น [6,40] โดยโครงสร้างของ Si-69 แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนหนึ่งจะประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและซิลเฟออร์ (ดูภาพที่ 64) ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสามารถเข้ากันได้กับวัฏภาคของยางธรรมชาติ อีกทั้งอาจมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการคงรูปของยางธรรมชาติได้อีกด้วย อีกส่วนหนึ่งของ Si-69 มีส่วนประกอบของ $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ Si-OH ของ FA จากการปรับปรุง FA ด้วย Si-69 ได้มีการพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ผิวของ TFA โดยเทคนิค FTIR ดังแสดงในภาพที่ 59 และ 60 ซึ่งแสดงสเปกตรัมของ FA และ TFA



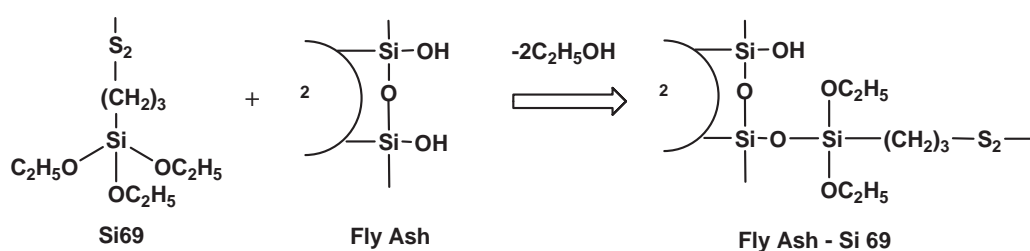
ภาพที่ 59 กราฟ FTIR สเปกตรัมของ FA



ภาพที่ 60 กราฟ FTIR สเปกตรัมของ TFA

จากการตรวจสอบพบว่าทั้ง FA และ TFA แสดงแถบการดูดกลืนที่ประมาณ 3418 cm⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) บนพื้นผิวของ FA ขณะที่แถบการดูดกลืนที่ประมาณ

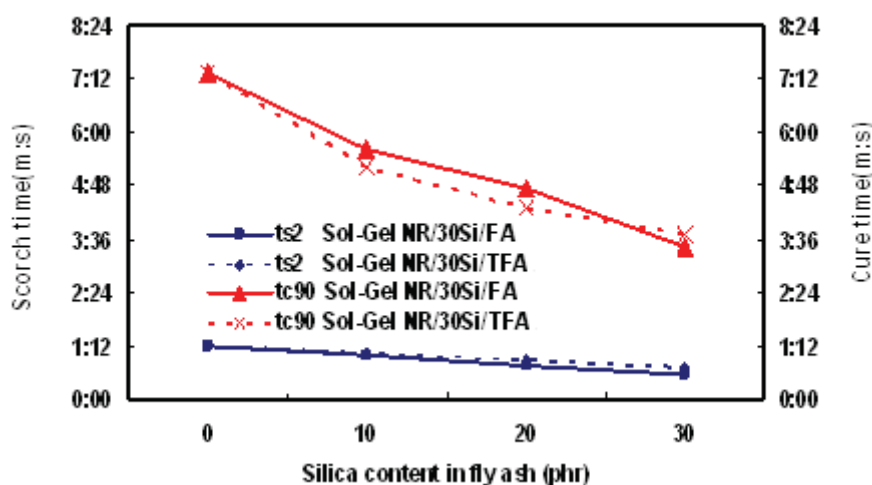
1103 และ 1104 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบยืดของหมู่ซิลอกเซน (Si-O-Si) [7] สำหรับแถบการดูดกลืนที่ 2975 และ 2927 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดของ -C-CH₃ และ -CH₂ ซึ่งแถบการดูดกลืนที่เกิดขึ้นเหล่านี้เป็นการสั่นของ CH₂ ใน Si-69 ที่อยู่บนพื้นผิวของ FA และพบว่าแถบการดูดกลืนของหมู่ซิลทานอลมีการเลื่อนไปที่เลขคลื่นสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า FA เกิดปฏิกิริยากับ Si-69 เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่แอลคอกซี (Alkoxy) ของสารคู่ควบกับหมู่ซิลินอลบนผิว FA โดยแสดงภาพที่ 61



ภาพที่ 61 ปฏิกิริยาขึ้นในการปรับปรุงผิวของ FA ด้วย Si-69 [7]

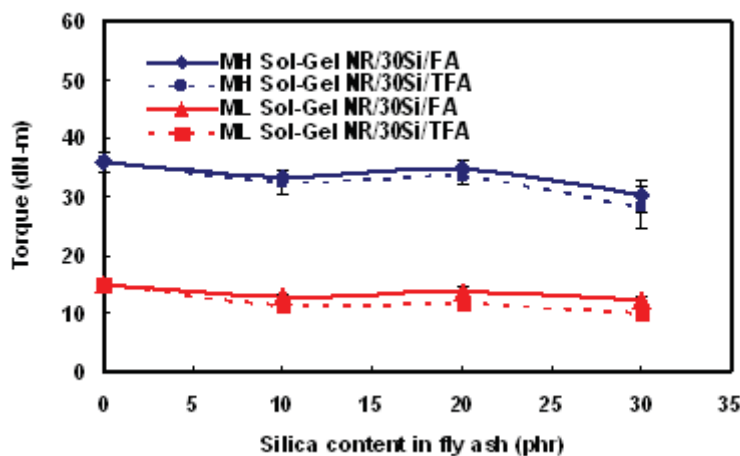
4.14 สมบัติการบ่มของยางคอมพาวด์ Sol-Gel NR/30Si ที่ผสม FA และ TFA

โดยปกติแล้ว คุณลักษณะการบ่มของยางขึ้นอยู่กักับ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวกระตุ้น รวมไปถึงอุณหภูมิในการคงรูป โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของ FA ที่มีต่อคุณลักษณะการคงรูปของยางคอมพาวด์ ด้วยเทคนิค MDR ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 62 พบว่าปริมาณ FA และ TFA ส่งผลต่อเวลาสกอร์ชและเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณ FA และ TFA เพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาสกอร์ชและเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์ลดลง เนื่องจากใน FA มีส่วนประกอบของ Metal oxide ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น ช่วยกระตุ้นให้ตัวเร่งทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น [41] ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ FA จึงส่งผลเวลาสกอร์ชและเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์ลดลง



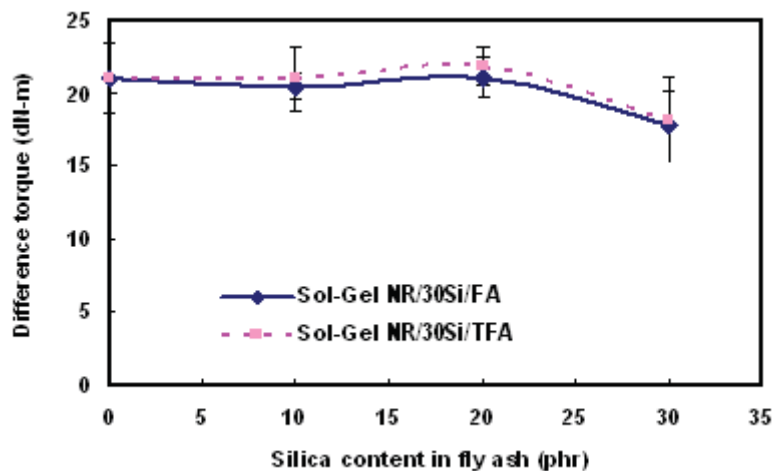
ภาพที่ 62 ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อ Scorch time และ Cure time ของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA

ผลการทดสอบคุณลักษณะการบ่ม ค่าแรงบิดต่ำสุด (ML) คือค่าความหนืดต่ำสุด เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความหนืดของ Hybrid composite ที่ยังไม่คงรูป หรือความสามารถในการไหลของสารประกอบ Hybrid composite ที่อุณหภูมิการทดสอบ ค่าแรงบิดสูงสุด (MH) จะเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความแข็งแรงหรือค่ามอดูลัสเฉือนของ Hybrid composite คงรูป ณ อุณหภูมิการทดสอบ ส่วนค่าความแตกต่างระหว่างแรงบิด (ΔS) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงผลต่างระหว่างค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุด [29,33] ซึ่งค่าแรงบิดเหล่านี้จะสอดคล้องกับค่าความหนืดของสารประกอบยาง จากภาพที่ 63 พบว่า เมื่อใส่ FA ลงใน Sol-Gel NR/30Si ค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุด มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจาก แรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลยาง ที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่งกับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) มีอิทธิพลมากกว่า ผลจากการเติม FA เพื่อไปช่วยให้ยางไหลง่ายขึ้น ดังนั้น การมีอยู่ของ FA จึงไม่ทำให้ แรงบิดต่ำสุดและสูงสุดเปลี่ยนไป หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น [24,41] และแม้จะมีการปรับสภาพผิว FA ก็ยังพบว่า อิทธิพลของ การเกิด การ Penetration ของโมเลกุลยาง กับกลุ่มซิลิกาเจลยังมีเหนือว่าการไหลได้ง่ายด้วย FA

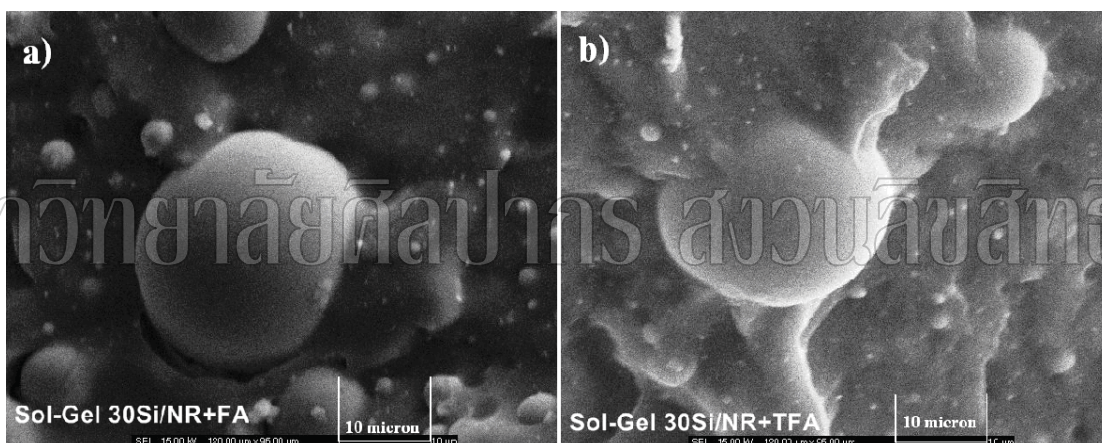


ภาพที่ 63 แสดงผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่าแรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุดของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA

ค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) แสดงดังภาพที่ 64 จากการทดลองพบว่าเมื่อเติม FA ลงไปใน Sol-Gel NR/30Si ปริมาณ 10 และ 20 phr (Silica content) ค่าความแตกต่างของแรงบิดมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลยาง ที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) มีอิทธิพลมากกว่า ผลจากการเติม FA เพื่อไปช่วยให้ Hybrid composite ไหลง่ายขึ้น แต่เมื่อเติม FA ลงไปที่ปริมาณ 30 phr (Silica content) พบว่าค่าความแตกต่างของแรงบิด มีค่าลดลง นั้นสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลสองประการ คือ ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง [34,41] เมื่อเติม FA ในปริมาณมาก ทำให้ปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวางลดลง เนื่องจากอนุภาค FA เข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะเชื่อมขวาง และเหตุผลอีกประการหนึ่งคือการที่ FA มีอนุภาคทรงกลมทำให้ Hybrid composite สามารถไหลได้ง่ายขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณ FA ใน Hybrid composite มากจนเหนืออิทธิพลของแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลยาง ที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ในเนื้อ Hybrid composite จะทำให้ Hybrid composite มีสมบัติการไหลดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลของการปรับสภาพผิว FA ระหว่าง Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA พบว่า เมื่อปรับสภาพผิว FA ค่าความแตกต่างของแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจาก TFA เกิดการยึดเกาะกับเฟสของ Sol-Gel NR/30Si ได้มากกว่า FA โดยดูได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงใน ภาพที่ 65



ภาพที่ 64 ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) ของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA



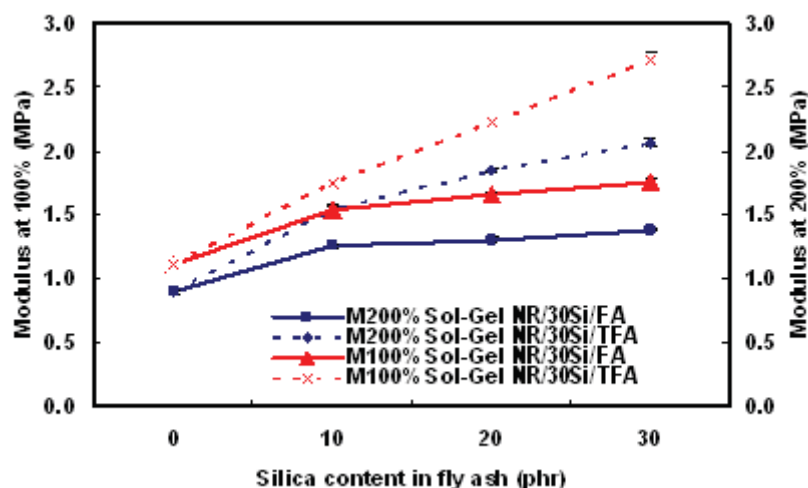
ภาพที่ 65 ภาพ SEM ของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

4.15 สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนเซต Sol-Gel NR/30Si ที่ผสม FA และ TFA

4.15.1 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile properties)

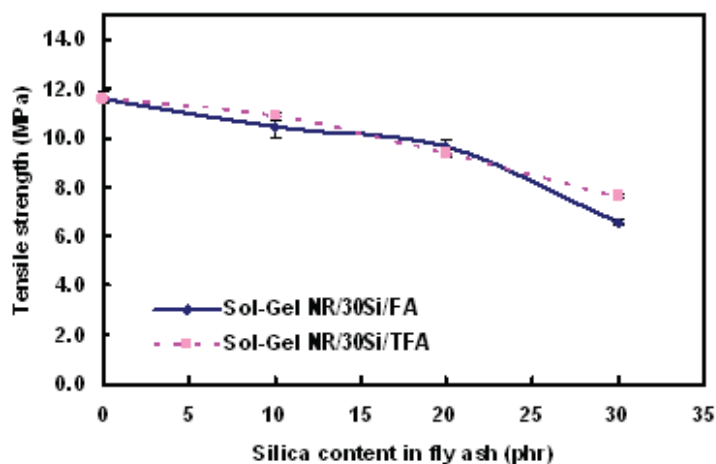
ค่ามอดูลัสตั้ง (Initial's modulus) เป็นค่าที่แสดงถึงสมบัติการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ จากภาพที่ 66 พบว่า เมื่อมีการเติมปริมาณซิลิกาที่มีในอนุภาค FA ลงไป 10 phr (Silica content) ทำให้ Sol-Gel NR/30Si มีค่ามอดูลัสตั้งสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาที่มีในอนุภาค FA 20 และ 30 phr (Silica content) พบว่าค่าเริ่มไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิมมากนัก [24] เนื่องจากไม่เกิด Interaction ระหว่าง Sol-Gel NR/30Si กับ FA เมื่อพิจารณาผลของ TFA พบว่ามอดูลัสตั้งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากผิวหน้าของ TFA มีหมู่สารอินทรีย์จาก Si-69 ทำให้ TFA ยึดเกาะ

กับ Sol-Gel NR/30Si ได้มากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ TFA พบว่า ค่ามอดูลัสมีดิ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน



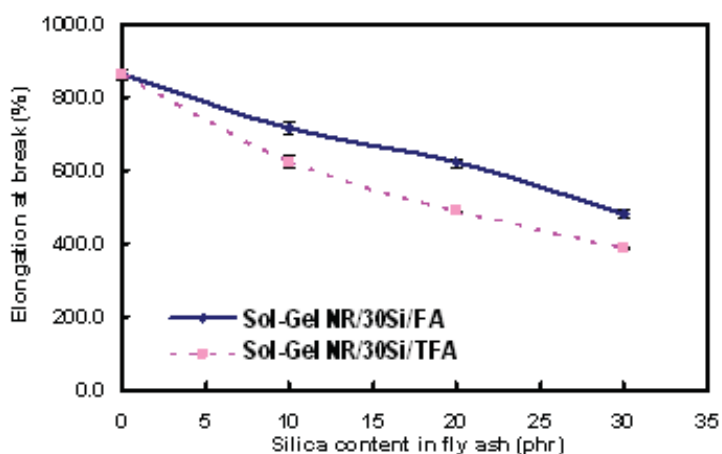
ภาพที่ 66 ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่ามอดูลัสที่ 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานแรงดึงยืด มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มปริมาณ FA เป็น 10 และ 20 phr (Silica content) เนื่องจากเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่งกับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ซึ่งมีอิทธิพลมากกว่า ผลจากการเติม FA แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 30 phr (Silica content) ค่าความต้านทานแรงดึงยืด ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน [24,41] ดังภาพที่ 67 เนื่องจากอนุภาคของ FA ไปขัดขวางการเกิดพันธะเชื่อมขวางของ Sol-Gel NR/30Si และปริมาณของ FA เพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนของเนื้อ Sol-Gel 30Si/NR ซึ่งเป็นเมทริกซ์เฟสลดลง ดังนั้นส่วนที่ทำให้ชิ้นงานดึงยืดได้จึงลดลงด้วย จากการเปรียบเทียบ Sol-Gel NR/30Si/FA กับ Sol-Gel NR/30Si/TFA พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ FA 10 และ 20 phr (Silica content) การปรับสภาพผิวไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงยืด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 30 phr (Silica content) พบว่า Sol-Gel NR/30Si/TFA มีมอดูลัสมากกว่า Sol-Gel NR/30Si/FA เนื่องจากการปรับสภาพผิว FA ด้วย Si-69 (TFA) ทำให้ Interaction ระหว่าง Sol-Gel NR/30Si และ TFA มีค่าสูงขึ้น จึงมีความเข้ากันกับ Sol-Gel NR/30Si และกระจายตัวได้ดีมากกว่า FA



ภาพที่ 67 ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA

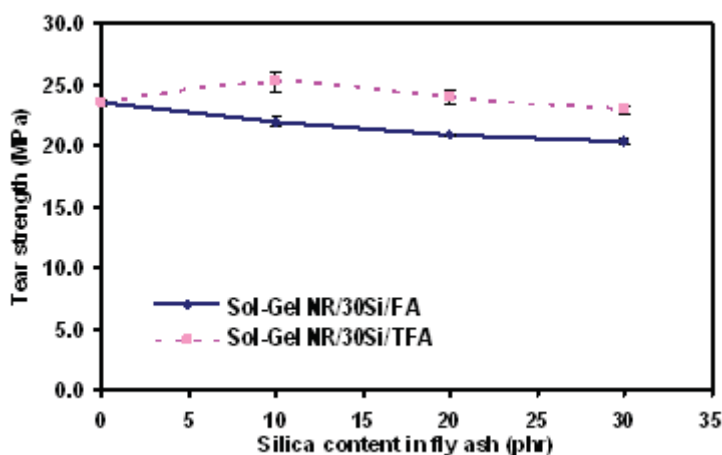
สำหรับผลของ FA ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของ Hybrid composite ภาพที่ 68 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณซิลิกาใน FA มากขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของปริมาณซิลิกาใน FA ที่มากขึ้นย่อมทำให้อนุภาคสารตัวเติมใกล้ชิดกันมากขึ้น จน Interaction ระหว่าง Sol-Gel 30Si/NR กับสารตัวเติมลดลง [24] ทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดลดลง เมื่อพิจารณาผลจากการปรับสภาพผิว FA พบว่า เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของ Sol-Gel NR/30Si/TFA มีค่าน้อยกว่า Sol-Gel NR/30Si/FA เนื่องจากอนุภาค TFA มีการกระจายตัวได้ดีในเนื้อ Sol-Gel NR/30Si ทั้งยังถูกปรับสภาพผิวทำให้เข้ากับ Sol-Gel NR/30Si ได้ดี จึงไปขัดขวางการยึดตัว



ภาพที่ 68 ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA

4.15.2 สมบัติความต้านทานแรงฉีก (*Tear strength*)

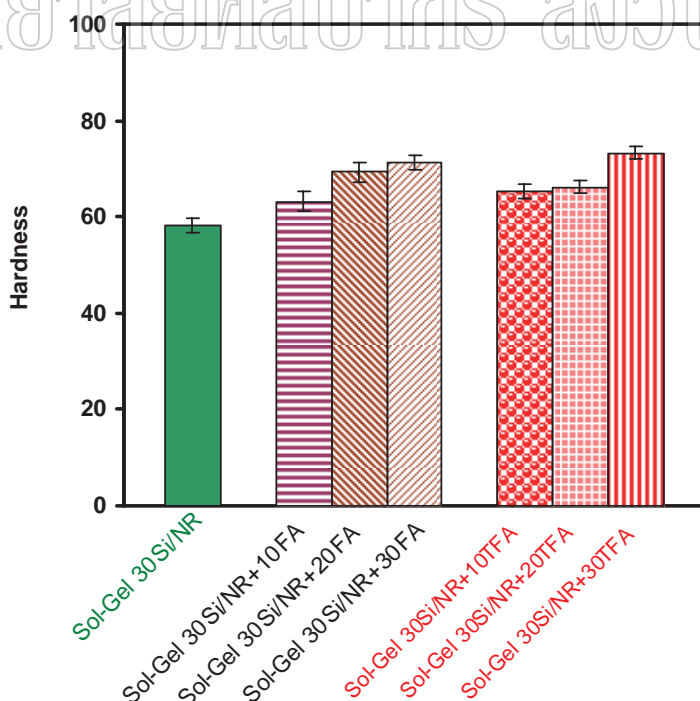
ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดคือค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ Hybrid composite เกิดการฉีกขาด จากการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของ Hybrid composite จะลดลงตามปริมาณของ FA [24] สอดคล้องกับความต้านทานแรงดึงยึดของวัสดุ สำหรับผลของปริมาณ FA ที่มีต่อความต้านทานแรงฉีกขาด แสดงในภาพที่ 69 จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาที่มีใน FA ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณซิลิกาที่มีใน FA เพิ่มขึ้น เวลาเกิดการฉีกขาดจะเกิดแรงเฉือน เมื่อเจออนุภาค FA ซึ่งไม่มีอันตรกิริยาระหว่าง Sol-Gel NR/30Si เลย จึงทำให้เกิดการฉีกขาดได้ง่าย เมื่อพิจารณาผลของการปรับสภาพผิวพบว่า เมื่อปรับสภาพผิว FA ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง Sol-Gel NR/30Si และ TFA มีค่ามากขึ้น ทั้งอนุภาค TFA ยังกระจายตัวได้ดีอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ TFA ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากค่าความต้านทานแรงฉีกขาด มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง ซึ่งโดยปกติแล้วเมื่อเพิ่มปริมาณ TFA ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางจะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก ค่าเวลาในการคงรูปมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะเห็นว่า ในงานวิจัยนี้ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเพิ่มปริมาณ TFA ก็เนื่องมาจากสาเหตุที่ว่า แรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่งกับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ซึ่งมีอิทธิพลมากกว่า ผลจากการเติม TFA



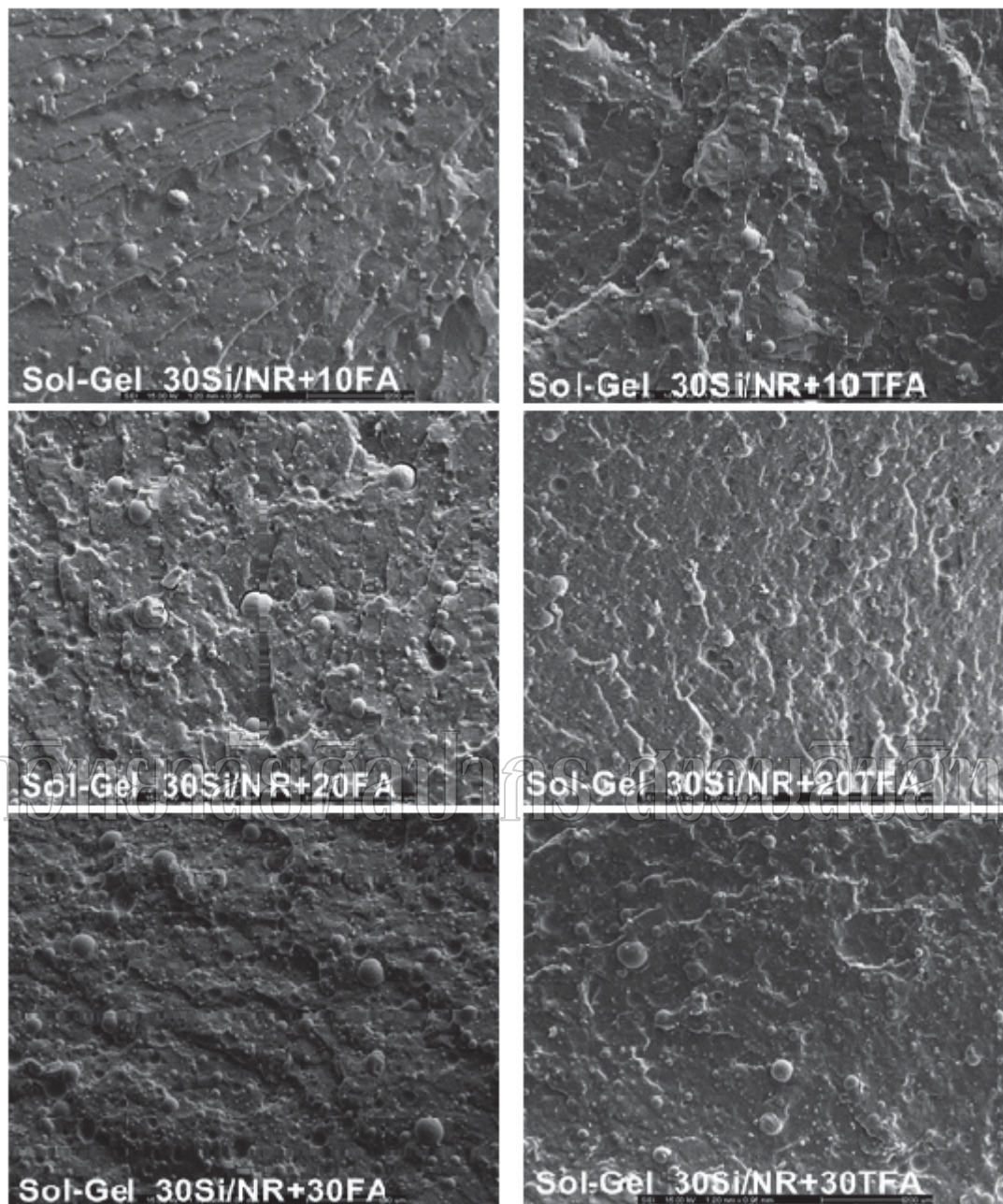
ภาพที่ 69 ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA

4.15. 3สมบัติความแข็งที่ผิว (Hardness)

สำหรับผลของ FA ที่มีต่อความแข็งที่ผิวของ Hybrid composite พบว่า ความแข็งที่ผิวของ Hybrid composite จะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณ FA ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับผลมอดูลัสที่การยึดตัว 200 เปอร์เซนต์การดึงยึด [24,41] ดังใน ภาพที่ 70 แสดงผลการวัดค่าความแข็งที่ผิวของ Hybrid composite สูตรต่างๆ ซึ่งใช้หัวกด Shore A หัวทุ้ น้ำหนักกด 1 กิโลกรัม พบว่าเมื่อเติมเถ้าลอยเป็น สารเสริมแรง ส่งผลให้ค่าความแข็งที่ผิวของ Sol-Gel NR/30Si เพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจาก การเติม เถ้าลอยเป็นการเติมของแข็งลงไปนั่นเอง โดยดูได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในภาพ ที่ 71 จึงทำให้ค่าความแข็งที่ผิวของ Sol-Gel NR/30Si เพิ่มขึ้น จากการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ผิว ของ Sol-Gel NR/30Si/FA กับ Sol-Gel NR/30Si/TFA พบว่า Sol-Gel NR/30Si/FA มีค่าความแข็งที่ ฝิวน้อยกว่า Sol-Gel NR/30Si/TFA เนื่องจากเถ้าลอยไม่เกิดการยึดเกาะกับเฟสของ Sol-Gel NR/30Si ทำให้การกระจายตัวของเถ้าลอยเกิดได้ไม่ดีนัก ดังในภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคภาพที่ 65 จึงทำให้ค่าความแข็งที่ผิวมีค่าต่ำ ส่วน Sol-Gel NR/30Si/TFA นั้น การปรับสภาพพื้นผิวทำให้เกิด พันธะทางเคมีที่เชื่อมระหว่างเถ้าลอยกับ Sol-Gel NR/30Si ดังนั้นเถ้าลอยจึงกระจายตัวในเฟสของ Sol-Gel NR/30Si ได้ดีขึ้น โดยดูได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในภาพที่ 65



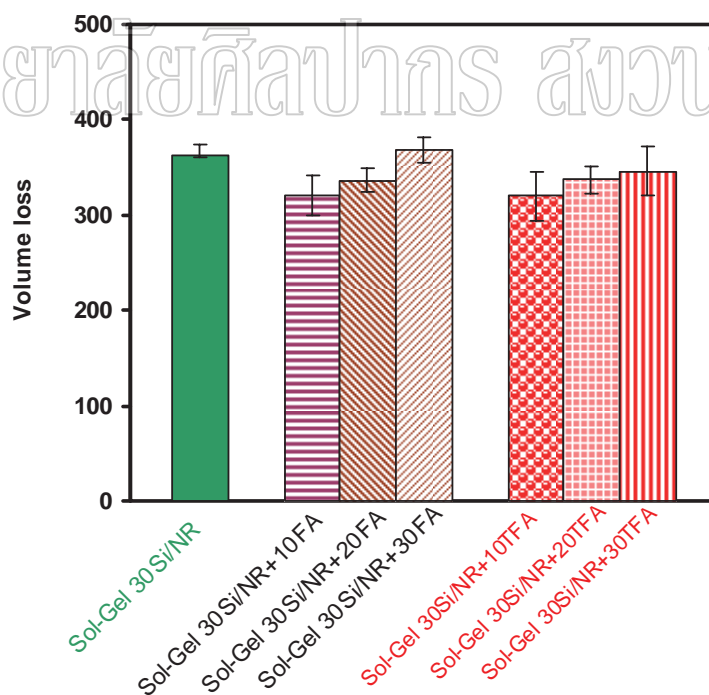
ภาพที่ 70 ผลของปริมาณ FA และ TFA ที่มีต่อค่าความแข็งที่ผิวของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA



ภาพที่ 71 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA ในปริมาณต่างๆที่กำลึงขยาย 100 เท่า บริเวณ fractured surface

4.15.4 สมบัติความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance)

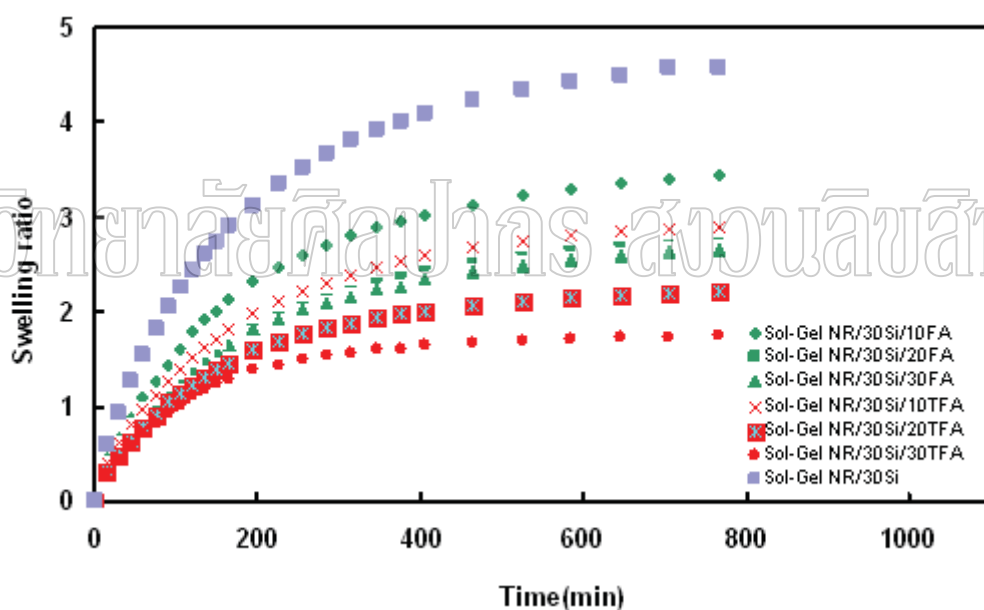
จากผลการทดสอบ ดังในภาพที่ 72 จะพบว่า เมื่อเติม FA ลงใน Sol-Gel NR/30Si ส่งผลให้ค่าความต้านทานการขัดถูเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่มากขึ้น โดยดูจากค่าโมดูลัสที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณ FA เพิ่มขึ้นเป็น 20, 30 phr (Silica content) ทำให้ค่าความต้านทานการขัดถูลดลงตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณ FA ทำให้สัดส่วนของ Sol-Gel NR/30Si ที่เป็นองค์ประกอบหลักลดลง สัดส่วนปริมาณของ FA เพิ่มขึ้น อีกทั้งรูปร่างของ FA ยังมีอนุภาคทรงกลม จึงส่งผลให้หลุดออกง่ายเมื่อเติมลงไปปริมาณมาก และเมื่อพิจารณาผลของการปรับสภาพผิว พบว่า การปรับสภาพผิวส่งผลต่อค่าความต้านทานต่อการขัดถูเล็กน้อย ในการเติม TFA ปริมาณ 10 และ 20 phr (Silica content) แต่ในการเติม TFA ปริมาณ 30 phr (Silica content) พบว่าค่าความต้านทานการขัดถูของ Sol-Gel NR/30Si/TFA มีค่าความต้านทานการขัดถูสูงกว่า Sol-Gel NR/30Si/FA เนื่องจาก การปรับสภาพผิว FA ส่งผลให้ Interaction ระหว่าง Sol-Gel NR/30Si และ TFA มีมากขึ้น จึงส่งผลให้ต้านทานการขัดถูได้ดีกว่า



ภาพที่ 72 ผลของปริมาณ FA และ TFA ที่มีต่อปริมาตรของตัวอย่าง Hybrid composite ที่สูญเสียไปของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA

4.16 สมบัติทางกายภาพของ Hybrid composite ที่ผ่านการบ่ม (Vulcanized rubber)

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญประการหนึ่ง คือ การบวมตัว (Swelling) จากภาพที่ 73 แสดงผลของปริมาณ FA และ TFA ที่มีต่อการบวมตัวของ Hybrid composite จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ FA ส่งผลให้ Hybrid composite บวมตัวน้อยลง [42] เนื่องจากปริมาณ FA ที่เพิ่มขึ้นนั้น ทำให้ปริมาณเนื้อยางในชิ้นงานทดสอบลดลง จึงทำให้ดูดซับตัวทำละลายได้น้อย จึงเกิดการบวมตัวน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบผลของการปรับสภาพผิว FA พบว่า Sol-Gel NR/30Si/TFA เกิดการบวมตัวน้อยกว่า Sol-Gel NR/30Si/FA เนื่องจากเมื่อทำการปรับสภาพผิว FA แล้ว จะทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดี เนื่องจาก Interaction ระหว่าง Sol-Gel NR/30Si และ FA มีค่าสูงขึ้น จึงทำให้โมเลกุลของ Sol-Gel NR/30Si/TFA เคลื่อนไหวยากขึ้น ตัวทำละลายจึงเข้าไปในช่องว่างระหว่างสายโซ่ได้ยากขึ้น



ภาพที่ 73 ผลของ FA และ TFA ที่มีต่อค่าการบวมตัวของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการเตรียม Silica gel ที่มีรูพรุน โดยกระบวนการ Sol-Gel ซึ่งกระบวนการ Sol-Gel นี้ต้องเกิดไปพร้อมกับการเกิดการจับตัวเป็นก้อนของเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติ ยางแห้งที่ได้จากการจับตัวกันของเนื้อยางในน้ำยาง จะเป็นยางแห้งที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกาเจล (in-situ nanoporous silica gel/NR reinforcement) โดยมุ่งเน้นไปที่ลักษณะการกระจายตัวของ Silica gel จากแก้วเคลือบ ในเนื้อยางธรรมชาติ

และศึกษาอิทธิพลของสารคู่ควบ Si-69 แบบมากเกินพอ (13 ส่วนใน 100 ส่วนของ Precipitated silica) ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวของซิลิกาแบบตกตะกอน (TPSi) ที่เติมลงในยางซึ่งมี Silica gel แบบ *in-situ* ผสมอยู่ (30Sol-Gel NR/30Si+TPSi) โดยจะศึกษาอิทธิพลของ Excess silane ที่มีต่อการคงรูปของยาง (Cure characteristics) นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของยางวัลคาไนเซตด้วย โดยทำการเปรียบเทียบกับยางที่เติม Precipitated silica ที่ปรับปรุงผิว (NR/TPSi)

พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของถั่วลอซซึ่งเป็นสารเสริมแรงชนิดที่สอง ที่มีต่อ Sol-Gel Si/NR ทั้งถั่วลอซที่ไม่ได้ถูกปรับสภาพผิว (FA) และถั่วลอซที่ปรับสภาพผิว (TFA) ด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane69 (Si-69)) โดยจะศึกษาอิทธิพลของ Excess silane ที่มีต่อการคงรูปของยาง (Cure characteristics) นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของยางวัลคาไนเซตด้วย โดยทำการเปรียบเทียบกับยาง 30Sol-Gel NR/30Si ที่เติม FA และ TFA

ตอนที่ 1 การเตรียมสารละลายไซเดียมซิลิเกต

5.1.1 ปริมาณซิลิกาในสารละลายไซเดียมซิลิเกต

1. จากการปรับค่า pH ของสารละลายไซเดียมซิลิเกตปริมาตร 25 มิลลิลิตร ให้มีค่า pH เป็นกลาง เพื่อให้เกิดเป็น Silica gel ขึ้นมาอย่างสมบูรณ์ และเมื่อนำ Silica gel ดังกล่าวไปทำการล้างด้วยน้ำให้สะอาดแล้วนำไปเผาในเตาเผาให้แห้ง พบว่าปริมาณของซิลิกาต่อสารละลายไซเดียมซิลิเกตนั้นคิดเป็น 0.0399 กรัมต่อมิลลิลิตร

2. รูปร่างทางกายภาพของ Silica gel จากถ้ำเกลือที่ได้เมื่อนำไปทดสอบด้วย Scanning electron microscope (SEM) พบว่ามีความคล้ายคลึงกันกับ Precipitated silica

5.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Sol-Gel Si เทียบกับ Precipitated Si

Silica gel จากถ้ำเกลือ และ PSi ที่ไม่ปรับปรุงผิวมีหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซิล (Si-OH), หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่ซิลอกเซน (Si-O-Si) อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลเหมือนกันทุกประการ

5.1.3 การวิเคราะห์หาปริมาณ Silica gel ที่เกิดขึ้นภายในยาง Sol-Gel NR/Si

จากการปรับปริมาณของสารละลายโซเดียมซิลิเกตในนำยางธรรมชาติแล้วตกตะกอนด้วยกระบวนการ Sol-Gel จึงสามารถเตรียมยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Silica gel จากถ้ำเกลือที่มีปริมาณซิลิกาในอัตราส่วนที่ต้องการคือ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 phr ได้

5.1.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Sol-Gel NR/Si ที่ยังไม่คอมพาวด์ด้วยเทคนิค SEM

ทำให้ทราบถึงลักษณะการกระจายตัวของ Silica gel ที่ทั่วถึงในเมทริกซ์ของยาง โดยที่สังเกตเห็นได้ชัดว่ามีการเชื่อมกันของกลุ่มก้อน Silica gel ผลิตกลุ่มด้วยอนุภาคของยาง (Silica gel-rubber-silica gel cluster)

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของ Sol-gel Silica เปรียบเทียบกับ Precipitated silica ที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอสิต

5.2.1 สมบัติการบ่มของยางคอมพาวด์ Sol-Gel NR/Si และ NR/PSi

1. เมื่อปริมาณการเติม Precipitated silica ในยางธรรมชาติมากขึ้น (มากกว่า 15 phr) มีผลทำให้เวลาสกอรัชและเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์เพิ่มขึ้น

2. ยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Silica gel จากถ้ำเกลือ พบว่าแนวโน้มของเวลาสกอรัชและเวลาในการคงรูปเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ปริมาณ Silica gel เป็น 15 phr

3. ค่าแรงบิดต่ำสุดของยางผสม Silica gel จากถ้ำเกลือจะมีค่ามากกว่ายางผสม Precipitated silica

4. ยางผสมที่มี Silica gel จากเถ้าแกลบในช่วงปริมาณ Silica gel ตั้งแต่ 0-10 phr มีค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าลดลง และในช่วงปริมาณ Silica gel ตั้งแต่ 15-25 phr จะส่งผลให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นจนเทียบเท่ากับยางผสมที่มี Precipitated silica ผสมอยู่ และที่ปริมาณซิลิกาเป็น 30-40 phr พบว่ามีค่าแรงบิดสูงสุดมากกว่ายางผสมที่มี Precipitated silica ผสมอยู่

5. ค่าความแตกต่างแรงบิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ Silica gel จากเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 0-10 phr และเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Silica gel จากเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 15-40 phr

5.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

1. ยาง Sol-Gel NR/Si ในช่วงปริมาณ Silica gel ตั้งแต่ 0-10 phr พบว่าค่ามอดูลัสมีค่าต่ำลง และเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Silica gel เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 15-25 phr และเมื่อปริมาณ Silica gel เพิ่มขึ้นถึง 40 phr ค่ามอดูลัสของยางผสมที่มี silica gel จากเถ้าแกลบผสมอยู่จะสูงกว่ายางผสมที่มี Precipitated silica ผสมอยู่

2. การเติม Precipitated silica พบว่าค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น

3. ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Precipitated silica มีค่าตั้งแต่ 0-10 phr และลดลงปริมาณการเติม Precipitated silica มากกว่า 10 phr

4. เมื่อปริมาณ Silica gel เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 5 – 10 phr นั้นค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง และเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ Silica gel ตั้งแต่ 10 – 30 phr และลดลงอีกครั้งที่ปริมาณ Silica gel ตั้งแต่ 30-40 phr

5. ยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Silica gel จากเถ้าแกลบมีค่าความต้านทานแรงฉีกขาดลดลงที่ปริมาณ Silica gel ตั้งแต่ 0-10 phr และเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ Silica gel เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 15-25 phr ที่ปริมาณ Silica gel ตั้งแต่ 30-40 phr ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของยางในระบบที่เติม Silica gel จากเถ้าแกลบมีค่ามากกว่ายางในระบบที่เติม Precipitated silica

6. ที่ปริมาณซิลิกาตั้งแต่ 15-40 phr ค่าความแข็งที่ผิวของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Silica gel จากถ้ำเกลือมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าความแข็งที่ผิวสูงกว่ายางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย Precipitated silica

7. เมื่อปริมาณ Silica gel จากถ้ำเกลือเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0-15 phr พบว่าค่า Volume loss มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับที่ปริมาณ Silica gel จากถ้ำเกลือเพิ่มขึ้นมากกว่า 15 phr ค่า Volume loss มีค่าเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณ Silica gel จากถ้ำเกลือตั้งแต่ 30-40 phr ค่า Volume loss นั้นมีค่าต่ำกว่าในระบบที่เติม Precipitated silica

5.2.3 สมบัติทางกายภาพของยางวัลคาไนเซต

1. พบว่าเมื่อปริมาณของ Precipitated silica เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการบวมตัวน้อยลง เนื่องจากปริมาณของ Precipitated silica ที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้สัดส่วนปริมาณเนื้อยางในชิ้นงานลดลง จึงทำให้สามารถดูดซับตัวทำละลายได้น้อยจึงเกิดการบวมตัวน้อยลง

2. เกิดการบวมตัวมากขึ้นเมื่อปริมาณ Silica gel เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0-20 phr และที่ปริมาณ Silica gel เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 25-40 phr การบวมตัวมีค่าลดลงเนื่องจากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับตัวทำละลายของชิ้นงานลดลง

ตอนที่ 3 การศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมแบบคู่ (hybrid filler) ระหว่าง Silica gel จากถ้ำเกลือ ที่เสริมแรงในยางธรรมชาติกับ Precipitated silica ที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ Si-69 ที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอสิต

5.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์ซิลิกาแบบตกตะกอนที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงผิว

1. ซิลิกาแบบตกตะกอนทั้งที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงผิวมีหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซิล (Si-OH), หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่ซิลอกเซน (Si-O-Si) อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล

2. ซิลิกาแบบตกตะกอนที่ผ่านการปรับปรุงผิว (TPSi) นั้นนอกจากจะพบทั้งสามหมู่ที่กล่าวมาแล้ว ยังพบหมู่ $-C-CH_3$ และ $-CH_2-$ นอกจากนี้ยังพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของหมู่ไฮดรอกซิล (Si-O-Si) เนื่องจากการปรับปรุงผิวด้วย Si-69

5.3.2 สมบัติการบ่มของยางคอมพาวด์ Sol-Gel NR/Si/TPSi และ NR/TPSi

1. ผลของการเพิ่มปริมาณ TPSi ส่งผลให้ยางระบบ NR/TPSi ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแต่ส่งผลให้ยางระบบ NR/30Sol-GelSi/TPSi มีค่าลดลงเนื่องจาก TPSi ที่เติมลงไปนั้นช่วยลดความเป็นรูปนูนของซิลิกา จึงส่งผลให้เวลาสกอ์ชนั้นลดลง

2. ยางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi มีเวลาสกอ์ชสูงกว่ายางระบบ NR/TPSi เพราะความเป็นรูปนูนของซิลิกาที่สูงกว่า

3. ยางระบบ NR/TPSi มีเวลาในการคงรูปของยางเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณของ TPSi เพิ่มขึ้น

4. ยางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi มีเวลาในการคงรูปเพิ่มขึ้น เมื่อเติม TPSi ลงในปริมาณ 10 และ 20 phr แต่ให้ผลตรงกันข้ามเมื่อเติม TPSi ลงในปริมาณ 30 phr เนื่องจากซิลิกาเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนในเฟสของยาง จึงส่งผลให้สารเคมีสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับยางได้ง่าย

5. ที่ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 30 phr พบว่ายางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi มีเวลาในการคงรูปสูงกว่ายางระบบ NR/TPSi เนื่องจากซิลิกาเจลที่อยู่ในยางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi นั้นมีความเป็นรูปนูนสูงและยังมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาทำให้เกิดการดูดซับตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ที่ผิว

6. ผลของการเพิ่มปริมาณ TPSi ส่งผลให้ค่าแรงบิดต่ำสุดของยางทั้งสองระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก TPSi ที่เติมลงไปนั้นจะเกิดการขัดขวางการไหลของสายโซ่โมเลกุลของยาง

7. ยางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi มีค่าแรงบิดต่ำสุดสูงกว่ายางระบบ NR/TPSi เนื่องจากผลของแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีก

กลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ที่เกิด Interconnected กันภายในยางทำให้ขัดขวางการไหลของสายโซ่ได้มาก

8. ผลของการเพิ่มปริมาณ TPSi ส่งผลให้ค่าแรงบิดสูงสุดของยางทั้งสองระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

9. ที่ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 60 phr พบว่ายางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi มีค่าแรงบิดสูงสุดลดลง เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของสารตัวเติมที่ใช้ส่งผลให้ทั้งสองเฟสแยกออกจากกัน

10. ยางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi มีค่าแรงบิดสูงสุดสูงกว่ายางระบบ NR/TPSi เนื่องจากผลของแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ที่เกิด Interconnected กันภายในยางทำให้ขัดขวางการไหลของสายโซ่ได้มาก

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

5.3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

1. ยางระบบ NR/TPSi และระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi มีค่ามอดูลัสดึงที่เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ TPSi สูงขึ้น เนื่องจาก TPSi ที่เติมลงไปมีความแข็งสูงกว่าค่าความแข็งของโมเลกุลยาง

2. ยางระบบ NR/TPSi มีค่ามอดูลัสดึงสูงกว่ายางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi

3. ผลของการเพิ่มปริมาณ TPSi ส่งผลให้ยางระบบ NR/TPSi มีค่าความต้านทานแรงดึงยึดที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากอิทธิพลของการคอมพาวด์ยางเหนือกว่าอิทธิพลของปริมาณ TPSi

4. ผลของการเพิ่มปริมาณ TPSi ที่มีต่อยางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi พบว่า เมื่อเติม TPSi ในปริมาณ 10 phr จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงยึดเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคของ TPSi เกิดการกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของยาง แต่ให้ผลตรงกันข้ามเมื่อเติม TPSi ในปริมาณ 20 และ 30 phr

5. ที่ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 30 phr พบว่า ยางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi มีค่าความต้านทานแรงดึงยึดที่สูงกว่ายางระบบ NR/TPSi เนื่องจากอิทธิพลของแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica

gel cluster) ที่เกิด Interconnected กันภายในยาง แต่ที่ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 40, 50 และ 60 phr นั้นผลที่ได้ตรงกันข้าม เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลิกา

6. ยางทั้งสองระบบมีเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดลดลง เมื่อปริมาณของ TPSi เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคสารตัวเติมใกล้ชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้ Interaction ระหว่างยางกับสารตัวเติมลดลง

7. ที่ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 30 phr พบว่ายางระบบ NR/TPSi มีเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดต่ำกว่ายางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi เนื่องจากปริมาณความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (Crosslink density) ที่มากกว่า

8. ผลของการเพิ่มปริมาณ TPSi ส่งผลให้ยางระบบ NR/TPSi มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น เพราะการเติม TPSi ส่งผลให้ปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางเพิ่ม (Crosslink density) สูงขึ้น

9. สำหรับยางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi พบว่าผลของการเพิ่มปริมาณ TPSi นั้นส่งผลให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากอิทธิพลของแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่ง (Silica gel-rubber-silica gel cluster) ที่เกิด Interconnected กันภายในยาง

10. ความแข็งที่ผิวของยางทั้งสองระบบมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติม TPSi ในปริมาณที่สูงขึ้น

11. ยางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi มีค่าความแข็งที่ผิวสูงกว่ายางระบบ NR/TPSi เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลยางที่แทรกอยู่ใน Silica gel กลุ่มหนึ่ง กับ Silica gel อีกกลุ่มหนึ่งที่เกิด Interconnected กันภายในยาง

12. ผลของการเพิ่มปริมาณ TPSi ลงไปในยาง Sol-Gel NR/Si ส่งผลให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อเติม TPSi ปริมาณ 30 phr (ปริมาณซิลิกาโดยรวมเท่ากับ 60 phr) จะส่งผลให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดมีค่าลดลง เนื่องจากซิลิกานั้นกระจายตัวไม่ดีทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน

13. ยางระบบ NR/TPSi มีค่าความต้านทานการฉีกขาดที่สูงกว่ายางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi

5.3.4 สมบัติทางกายภาพของยางวัลคาไนเซต

1. ผลของการเพิ่มปริมาณของ TPSi นั้นส่งผลให้ยางทั้งสองระบบเกิดบวมตัวน้อยลง

2. ขางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi เกิดการบวมตัวช้ากว่าขางระบบ NR/TPSi เนื่องจากผลของแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่โมเลกุลขางระหว่าง Silica gel กลุ่มหนึ่งกับ Silica gel อีกลุ่มหนึ่งที่เกิด Interconnected กันภายในขางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi

3. ขางระบบ NR/TPSi เกิดการบวมตัวที่น้อยกว่าขางระบบ Sol-Gel NR/Si/TPSi เนื่องจากขางระบบ NR/TPSi มีปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขาง (Crosslink density)

ตอนที่ 4 การศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมแบบคู่ (hybrid filler) ระหว่าง Silica gel ที่เสริมแรงในขางธรรมชาติกับเส้นลวยที่ไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวหรือเส้นลวยที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ Si-69 ที่มีต่อสมบัติของขางคอมพอลิต

5.4.1 การเตรียม Si-69 Treated FA

1. จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค พบว่ารูปร่างของเส้นลวยมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยมีขนาดแตกต่างกันไป ซึ่งโดยรวมมีขนาดน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร

2. การปรับปรุงสภาพผิวของเส้นลวย ทำให้อันตรกิริยาระหว่างเส้นลวยกับ Sol-Gel 30Si/NR มีค่ามากขึ้น

5.4.2 สมบัติการบวมของขางคอมพาวด์ Sol-Gel NR/Si/FA และ Sol-Gel NR/Si/TFA

1. เมื่อปริมาณ FA และ TFA เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เวลาสกอรัชและเวลาในการคงรูปของขางคอมพาวด์ลดลง

2. เมื่อเพิ่มปริมาณ FA และ TFA ไม่ทำให้แรงบิดต่ำสุด และแรงบิดสูงสุดเปลี่ยนแปลง

3. เมื่อเติม FA หรือ TFA ลงไปใน Sol-Gel NR/Si ปริมาณ 10 และ 20 phr (Silica content) พบว่าค่าความแตกต่างของแรงบิดมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

4. เมื่อเติม FA หรือ TFA ลงไปใน Sol-Gel NR/Si ปริมาณ 30 phr (Silica content) ทำให้ค่าความแตกต่างของแรงบิดลดลง

5. Sol-Gel NR/Si/TFA มีค่าความแตกต่างของแรงบิดมากกว่า Sol-Gel NR/Si/FA เล็กน้อย

5.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

1. เมื่อเติม FA ลงไปใน Sol-Gel NR/Si ปริมาณ 10 phr (Silica content) ทำให้ค่ามอดูลัสดึงสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ FA เป็น 20, 30 phr (Silica content) พบว่าค่ามอดูลัสดึงเปลี่ยนแปลงจากเดิมไม่มากนัก

2. เมื่อเติม TFA ลงไปใน Sol-Gel NR/Si ทำให้ค่ามอดูลัสดิ่งเพิ่มขึ้น ตามปริมาณ TFA
3. Sol-Gel NR/Si/FA มีมอดูลัสน้อยกว่า Sol-Gel NR/Si/TFA
4. เมื่อเติม FA หรือ TFA ลงไปใน Sol-Gel NR/Si ปริมาณ 10 และ 20 phr (Silica content) พบว่าค่าความต้านทานแรงดิ่งยึด มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 30 phr (Silica content) ทำให้ค่าความต้านทานแรงดิ่งยึด ลดลงอย่างเห็นได้ชัด
5. หากเปรียบเทียบ Sol-Gel NR/Si/FA กับ Sol-Gel NR/Si/TFA เมื่อเติม FA หรือ TFA ปริมาณ 10 และ 20 phr (Silica content) พบว่า การปรับสภาพผิวไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดิ่งยึด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 30 phr (Silica content) พบว่า Sol-Gel NR/Si/TFA มีมอดูลัสมากกว่า Sol-Gel NR/Si/FA
6. เมื่อปริมาณ FA หรือ TFA ที่เติมลงไปใน Sol-Gel NR/Si เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดิ่งยึดที่จุดขาดของ Hybrid composite มีค่าลดลง
7. Sol-Gel NR/Si/FA มีเปอร์เซ็นต์การดิ่งยึดที่จุดขาดมากกว่า Sol-Gel NR/Si/TFA
8. เมื่อปริมาณ FA ที่เติมลงไปใน Sol-Gel NR/Si เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของ Hybrid composite มีค่าลดลง
9. เมื่อเติม TFA ลงไปใน Sol-Gel NR/Si ทำให้ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของ Hybrid composite มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ TFA เป็น 20, 30 phr (Silica content) ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก
10. เมื่อปริมาณ FA หรือ TFA ที่เติมลงไปใน Sol-Gel NR/Si เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรง Hybrid composite มีค่าเพิ่มขึ้น
11. Sol-Gel NR/Si/FA มีค่าความแข็งแรงน้อยกว่า Sol-Gel NR/Si/TFA
12. เมื่อเติม FA หรือ TFA ลงไปใน Sol-Gel NR/Si ทำให้ค่าความต้านทานการขัดถูของ Hybrid composite มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ TFA เป็น 20, 30 phr (Silica content) ส่งผลให้ค่าความต้านทานการขัดถูลดลงตามลำดับ
13. หากเปรียบเทียบ Sol-Gel NR/Si/FA กับ Sol-Gel NR/Si/TFA เมื่อเติม FA หรือ TFA ปริมาณ 10 และ 20 phr (Silica content) พบว่า การปรับสภาพผิวไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการขัดถู แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 30 phr (Silica content) พบว่า Sol-Gel NR/Si/TFA มีค่าความต้านทานการขัดถูมากกว่า Sol-Gel NR/Si/FA
14. เมื่อเติม FA หรือ TFA ในปริมาณ 10, 20 phr (Silica content) พบว่า Sol-Gel NR/Si/FA และ Sol-Gel NR/Si/TFA มีค่าความต้านทานต่อการขัดถูใกล้เคียงกัน

15. เมื่อเติม FA หรือ TFA ในปริมาณ 30 phr (Silica content) พบว่า Sol-Gel NR/Si/FA มีค่าความต้านทานต่อการขีดข่วนน้อยกว่า Sol-Gel NR/Si/TFA

5.4.4 สมบัติทางกายภาพของยางวัลคาไนเซต

1. เมื่อปริมาณ FA และ TFA เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ Hybrid composite บวมตัวในสารละลายได้น้อยลง

2. Sol-Gel NR/Si/FA เกิดการบวมตัวในสารละลายได้มากกว่า Sol-Gel NR/Si/TFA

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. Silica gel มีคุณสมบัติดูดความชื้น ดังนั้น ในการทดลองครั้งต่อไปควรหาวิธีป้องกันความชื้นที่เกิดจาก Silica gel

2. ในการสังเคราะห์ Sol-Gel NR/Si ควรมีการคำนวณปริมาณยางที่ต้องการใช้ ในการทดสอบเพื่อไม่ให้สังเคราะห์ยางมากเกินไปจนความจำเป็น

3. หลังจากทำการคอมพาวด์ยาง ควรเก็บยางคอมพาวด์ไว้ในตู้เย็น เพื่อลดการเกิดการสะสมความร้อนภายในเนื้อยาง

4. ในการผสมสารเคมียางบนเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) นั้นจะต้องใส่สารเสริมแรง (Reinforcing agent) เป็นสารเคมีตัวแรก เพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวของซิลิกาในยางอย่างทั่วถึง

บรรณานุกรม

1. U. Kalapathy , A. Proctor and J. Shultz. "An improved method for production of silica from rice hull ash." Bioresource Technology 85 (2002): 285-289.
2. T. Li and T. Wang. "Preparation of silica aerogel from rice hull ash by drying at atmospheric Pressure." Materials Chemistry and Physics 112 (2008): 398-401.
3. P. Narayan, S. Singhanian, S. Consultants. บทความ Adding to the mix [online]. Accessed 30 April 2009. Available from <http://www.ricehuskash.com/index.htm>.
4. Z. A. M. Ishak and A. A. Bakar. "An investigation on the potential of rice husk ash as fillers for epoxidized natural rubber (ENR)." Polymer 31 (1995): 259-269.
5. Y. Ikeda and S. Kohjiya. "In situ formed silica particles in rubber vulcanizate by the sol-gel method." Journal of Polymer 38 (1977): 4417-4423.
6. พงษ์ธร แซ่ฮุย. การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมในยาง [online]. Accessed 30 April 2009. Available from <http://www.rubbercenter.org/rubbertech/Silica.pdf>.
7. S. Thongsang, and N. Sombatsompop. "Effect of NaOH and Si69 Treatment on the Properties of Fly ash Filled NR Composites." Polymer Composites 27 (2006): 30-40.
8. M. L Hall and W. R Livingston. "Fly ash quality, past, present and future, and the effect of ash on the development of novel products." Journal of Chemical Technology and Biotechnology 77 (2002): 234-239.
9. อาภา สรณเสาวภาคย์, ปริญญา จินดาประเสริฐ. "การศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของสารซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบ." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2544
10. พงษ์ธร แซ่ฮุย. "ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน." ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), กรุงเทพฯ, 2548, 7-41.
11. วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. ยางธรรมชาติ [online]. Accessed 30 April 2009. Available from <http://th.wikipedia.org/wiki/ยางธรรมชาติ>.
12. เสาวณีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี, "การผลิตยางธรรมชาติ." คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2547, 5-25.
13. อธิพิล แจ้งซัด. "เอกสารประกอบการสอนวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง." ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551, 27-35.

14. พรทิพย์ ศรีโสภณ. สารเคมีสำหรับยาง [online]. Accessed 15 August 2009. Available from http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_11_2547_additives_rubber.pdf.
15. พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. "สารเคมียาง." ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(เอ็มเทค), กรุงเทพฯ, 2550, 57-101.
16. Y. Wu, Y. Wang, H. Zhang, D. Yu, L. Zhang and J. Yang. "Rubber-pristine clay nanocomposites prepared by co-coagulating rubber latex and clay aqueous suspension." *Composites Science and Technology* 65 (2005): 1195-1202.
17. U. Kalapathy, A. Proctor and J. Shultz. "A simple method for production of pure silica from rice hull ash." *Bioresource Technology* 73 (2000): 257-262.
18. Y. Hsieh, Y. Du, F. Jin, Z. Zhou and H. Enomoto. "Alkaline pre-treatment of rice hulls for hydrothermal production of acetic acid." *chemical engineering research and design* 17 (2008): 559-569.
19. M. Arroyo, M.A. López-Manchado and B. Herrero, "Organo-montmorillonite as substitute of carbon black in natural rubber compounds.", *Journal of Polymer* 44 (2003): 2447-2453.
20. J. Karger Kocsis, "Thermoset Rubber/Layered Silicate Nanocomposites. Status and Future Trends." *Polymer Engineering and Science* 44 (2004): 1083-1093.
21. D. G. Hundiwale, U. R. Kapadi, M. C. Desai and S. H. Bidkar. "Mechanical Properties of Natural Rubber Filled with Flyash." *Journal of Applied Polymer Science* 85 (2002): 995-1001.
22. N. A. N. Alkadasi, D. G. Hundiwale and U. R. Kapadi. "Effect of Coupling Agent on the Mechanical Properties of Fly Ash-Filled Polybutadiene Rubber." *Journal of Applied Polymer Science* 91 (2004): 1322-1328.
23. N. Sombatsompop, S. Thongsang, T. Markpin and E. Wimolmala. "Fly Ash Particles and Precipitated Silica as Fillers in Rubbers. I. Untreated Fillers in Natural Rubber and Styrene Butadiene Rubber Compounds." *Journal of Applied Polymer Science* 93 (2004): 2199-2130.
24. S. Thongsang and N. Sombatsompop. "Reinforcement of Natural Rubber with Fly Ash from Different Local Sources." *Suranaree Journal of Science & Technology* 14 (2007): 77-89.
25. A. R. R. Menon, T. A. Sonia and J. D. Sudha. "Studies on Fly-Ash-Filled Natural Rubber Modified with Cardanol Derivatives: Processability, Mechanical Properties, Fracture Morphology, and Thermal Decomposition Characteristics." *Journal of Applied Polymer*

- Science 102 (2006): 4801-4808.
26. K. Grade, W. J. McGill and C. D. Woolard. "Surface Modification of Fly Ash-Characterisation and Evaluation as Reinforcing Filler in Polyisoprene." Plastic, Rubber and composites 28 (1999): 1-10.
 27. H.M. Da Costa, L. L. Y. Visconte, R. C. R. Nunes and C. R. G. Furtado. "The Effect of Coupling Agent and Chemical Treatment on Rice Husk Ash-Filled Natural Rubber Composites." Journal of Applied Polymer Science 76 (2000): 1019-1027.
 28. S. Chuayjuljit, S. Eiumoh and P. Potiyaraj. "Using Silica from Rice Husk as a Reinforcing Filler in Natural Rubber." Journal of Scientific Research Chulalongkorn University 26 (2001): 127-138.
 29. พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. "ยาง กระบวนการผลิตและการทดสอบ" ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(เอ็มเทค), กรุงเทพฯ, 2550, 107-141.
 30. P. Sae-oui. "Roles of silane coupling agents on properties of silica-filled polychloroprene," European Polymer Journal 42(2006): 479-486.
 31. ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด [online]. Accessed 19 May 2009. Available from <http://www.kmitl.ac.th/sisc/SEM/SEMtheory.htm>.
 32. J. L. Leblanc. "rubber filler interaction and rheological properties in filled compounds." Progress in Polymer Science 27 (2002) 627-687.
 33. P. Sae-oui, C. Sirisinha, U. Thepsuwan and K. Hatthapanit. "Dependence of mechanical and aging properties of chloroprene rubber on silica and ethylene thiourea loadings." European Polymer Journal 43 (2007): 185-193.
 34. M.A. Lopez-Manchado, B. Herrero and M. Arroyo. "Preparation and characterization of organoclay nanocomposites based on natural rubber." Polymer International 52 (2003): 1070-1077.
 35. K.N. Pandey. "Material behavior Fracture topography of rubber surfaces: an SEM study." Polymer Testing 22 (2003): 353-359.
 36. R.J. Young and P. Lovell. Introduction to polymers, London: CHAPMAN & HALL, Inc., 1991.
 37. P. Sae-oui, "Comparison of reinforcing efficiency between Si-69 and Si-264 in a conventional vulcanization system." Polymer Testing 23(2004): 871-879.

38. N. Tangchantra. "Mechanical and thermal characterization of MMT filled natural rubber fly ash composites", Thesis advisors: Asst. Prof. Dr. Chanchai Thongpin, Ph.D., and Prof. Narongrit Sombatsompop, Ph.D. 152
39. N. Sombatsompop, E. Wimolmala and C. Kantala. "Materials Development for NR-NBR Blends Containing Fly-Ash Particles as a Filler for O-ring Products, Thailand Research Fund (TRF) Compound Professional Co. Ltd, 158-168.
40. S. Thongsang and N. Sombatsompop, "Effect of Filler Surface Treatment on Properties of Fly Ash/NR Blends", The Society of Plastics Engineers: Annual Technical Conference, SPE ANTEC Technical Papers, 1-5 May 2005, Boston USA, 51, 2248-2252.
41. N. Sombatsompop, E. Wimolmala, T. Treatment, "Mechanical properties and Thermal ageing of NR/SBR blend-Fly ash Composites using Si69 Silane Coupling Agent for Surface Treatment." Qualitative Characteristics and Citation Behavior of Thai Academic Journals – KMUTT Research & Development Journal, 205-212.
42. C. Kumnuantip and N. Sombatsompop. "Dynamic mechanical properties and swelling behavior of NR/reclaimed rubber blends." Materials Letters 57 (2003): 3167-3174.
43. Y. Ikeda and S. Kohjiya. "*In situ* formed silica particles in rubber vulcanizate by the sol-gel method." Polymer 38 (1997): 4417-4423.
44. S. Kohjiya, K. Murakami, S. Iio, T. Tanahashi and Y. Ikeda. "In situ filling of silica onto green natural rubber by the sol-gel process." Rubber chemistry and technology 74 (2001): 16-27.

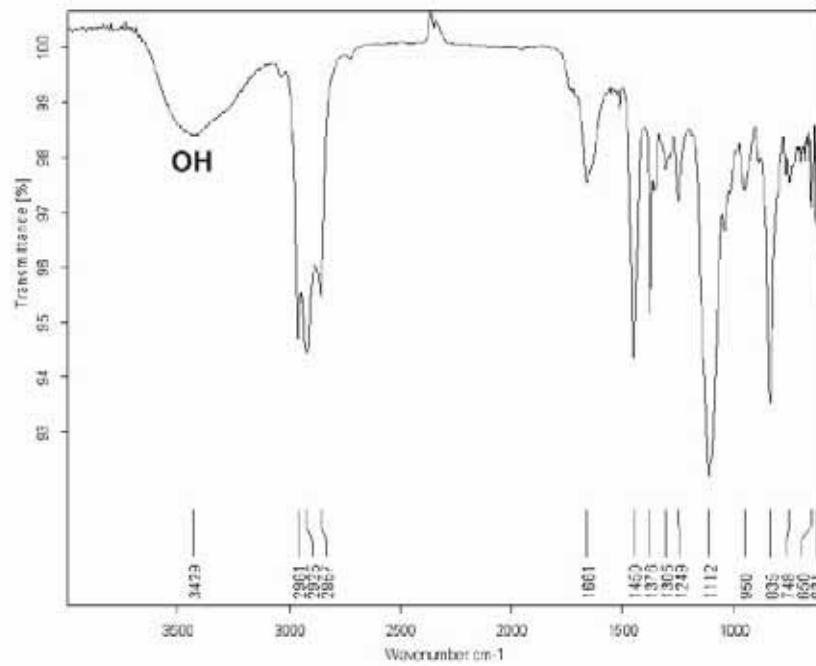
มหาวิทยาลัยศิลปากร ภาคผนวก สงวนลิขสิทธิ์

ภาคผนวก ก

FT-IR spectra ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกา

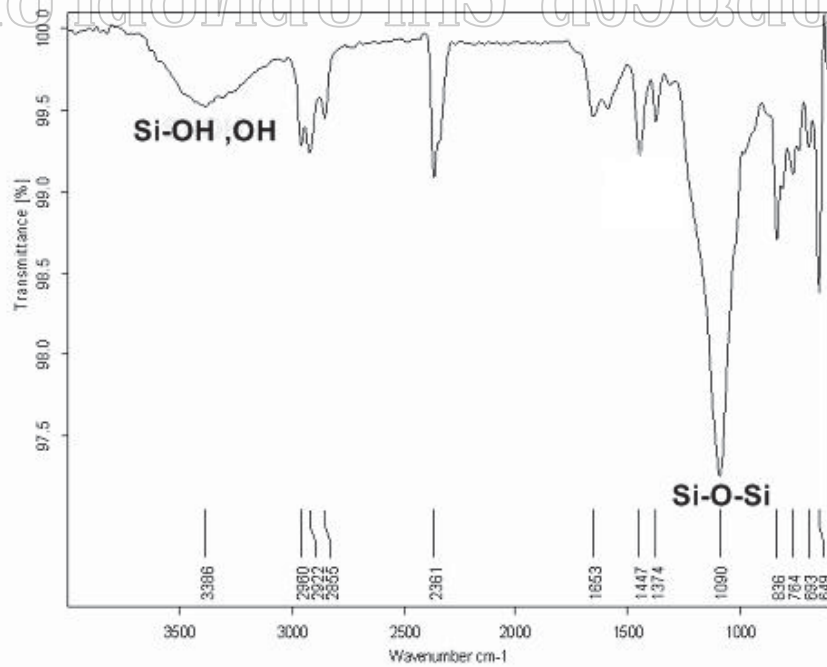
จากเส้นกราฟโดยกระบวนการโซลเจล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



ภาพที่ 74 กราฟ FTIR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



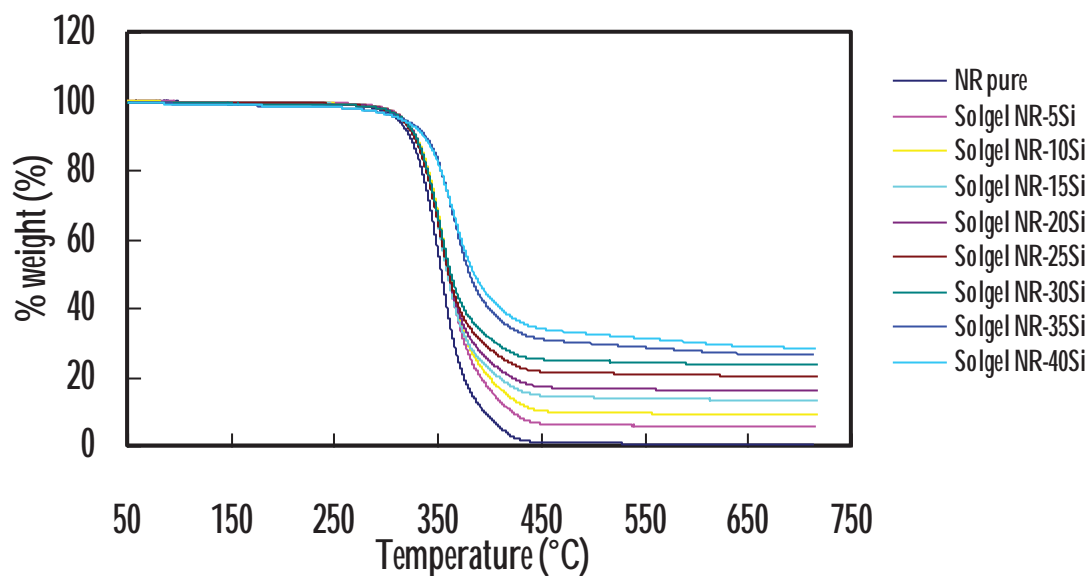
ภาพที่ 75 กราฟ FTIR สเปกตรัมของ Sol-Gel NR/Si

ภาคผนวก ข

กราฟ TGA และข้อมูลดิบของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกา

จากเส้นกราฟโดยกระบวนการโซลเจด ในสูตรต่างๆ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 76 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของสาร

และอุณหภูมิจากการทดสอบน้ำหนักที่เหลือของ Sol-Gel NR/Si

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางที่ 18 แสดงข้อมูลปริมาณน้ำหนักของซิลิกาที่มีอยู่ใน Sol-Gel Si/NR จากการทดสอบ TGA

Material	No.	(1) เปอร์เซนต์น้ำหนัก สุดท้ายจากเทคนิค TGA	(2) เปอร์เซนต์ น้ำหนักของส่วน ที่เป็นยางที่หายไป ในแต่ละสูตร คำนวณจาก 100 - (1)	ปริมาณซิลิกา (phr) คำนวณจาก ความสัมพันธ์ของ (1) และ (2)
Sol-Gel NR/5Si	1	4.785752	95.21425	5.026298
	2	4.957395	95.04261	5.215971
	3	5.106656	94.89334	5.381469
			Avg.	5.207913
			SD	0.177723
Sol-Gel NR/10Si	1	9.104563	90.89543	10.016523

	2	9.671409	90.32859	10.70692
	3	9.017033	90.98297	9.910683
			Avg.	10.21138
			SD	0.432405
Sol-Gel NR/15Si	1	13.43667	86.56333	15.522358
	2	13.15113	86.84887	15.14255
	3	13.18908	86.81092	15.19288
			Avg.	15.28593
			SD	0.206294
Sol-Gel NR/20Si	1	16.608	83.392	19.91558
	2	16.66914	83.33086	20.00356
	3	16.78735	83.21265	20.17404
			Avg.	20.03106
			SD	0.131406
Sol-Gel NR/25Si	1	20.35748	79.64252	25.561069
	2	19.90045	80.09955	24.84465
	3	20.11649	79.88351	25.18228
			Avg.	25.196
			SD	0.358406
Sol-Gel NR/30Si	1	23.89446	76.10554	31.396479
	2	22.7631	77.2369	29.47179
	3	22.64792	77.35208	29.27901
			Avg.	30.04909
			SD	1.170845
Sol-Gel NR/35Si	1	25.97453	74.02547	35.08864
	2	25.98343	74.01657	35.10488
	3	25.99556	74.00444	35.12703

			Avg.	35.10685
			SD	0.019271
Sol-Gel NR/40Si	1	29.02659	70.97341	40.89784
	2	28.53849	71.46151	39.93547
	3	28.77635	71.22365	40.4028
			Avg.	40.41204
			SD	0.481251

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาคผนวก ค

ข้อมูลจากการทดสอบ MDR ของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาแบบตกตะกอน ใ้ล้อย และซิลิกา

จากเ้าแกลบโดยกระบวนการโซลเจล ในสูตรต่างๆ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางที่ 19 แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ NR

No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	NR	0:35	2:51	27.34	1.08	26.26
2	NR	0:36	2:59	27.35	1.1	26.25
3	NR	0:35	2:53	27.74	1.18	26.57
4	NR	0:36	2:47	27.58	1.13	26.45
5	NR	0:36	2:55	27.67	1.15	26.53
Avg.		0:35	2:53	27.536	1.128	26.412
SD		0.00038	0.003106	0.183385	0.039623	0.1497331

ตารางที่ 20 แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ NR/PSi สูตรต่างๆ

No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	NR/5PSi	0:40	2:42	28.14	1.2	26.94
2	NR/5PSi	0:41	2:41	28.37	1.15	27.22
3	NR/5PSi	0:41	2:38	28.06	1.17	26.89
4	NR/5PSi	0:41	2:37	27.92	1.15	26.77
5	NR/5PSi	0:41	2:23	28.31	1.15	27.16
Avg.		0:40	2:36	28.16	1.164	26.996
SD		0.000311	0.005321	0.183439	0.021909	0.1887591
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	NR/10PSi	0:47	2:34	27.27	1.31	25.96
2	NR/10PSi	0:43	2:37	30.2	1.63	28.58
3	NR/10PSi	0:47	2:36	28.21	1.34	26.87
4	NR/10PSi	0:46	2:35	28	1.39	26.61

5	NR/10PSi	0:46	2:36	27.75	1.36	26.39
Avg.		0:45	2:35	28.286	1.406	26.882
SD		0.001141	0.000792	1.125891	0.128569	1.006166
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	NR/15PSi	0:50	2:52	27.4	1.68	25.72
2	NR/15PSi	0:51	3:01	27.98	3.71	24.27
3	NR/15PSi	0:49	2:51	29.45	1.88	27.57
4	NR/15PSi	0:51	2:53	27.42	1.65	25.77
5	NR/15PSi	0:51	2:53	27.34	1.63	25.71
Avg.		0:50	2:54	27.918	2.11	25.808
SD		0.000621	0.002778	0.894606	0.899972	1.1714179
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	NR/20PSi	0:55	3:31	26.69	2.28	24.41
2	NR/20PSi	0:56	3:37	26.83	2.22	24.61
3	NR/20PSi	0:56	3:32	26.49	2.26	24.23
4	NR/20PSi	0:58	3:39	26.5	2.24	24.26
5	NR/20PSi	0:57	3:34	26.34	2.15	24.19
Avg.		0:56	3:34	26.57	2.23	24.34
SD		0.000792	0.002334	0.191181	0.05	0.1723369
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	NR/25PSi	1:05	5:28	23.08	3.17	19.92
2	NR/25PSi	1:09	5:30	22.72	3.12	19.6
3	NR/25PSi	1:10	5:35	21.92	2.99	18.93
4	NR/25PSi	1:10	5:40	22.18	3.06	19.12

5	NR/25PSi	1:09	5:34	22.01	3.03	18.98
Avg.		1:08	5:33	22.382	3.074	19.31
SD		0.00144	0.003242	0.498518	0.071624	0.4317407
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	NR/30PSi	1:17	7:58	23.53	4.94	18.58
2	NR/30PSi	1:22	9:04	22.4	4.53	17.87
3	NR/30PSi	1:23	9:11	22.33	4.54	17.79
4	NR/30PSi	1:22	8:24	22.03	5.09	16.94
5	NR/30PSi	1:24	9:45	21.93	4.34	17.58
Avg.		1:21	8:52	22.444	4.688	17.752
SD		0.001876	0.029078	0.638342	0.31348	0.5894659
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	NR/35PSi	1:26	9:08	26.38	8.81	17.57
2	NR/35PSi	1:31	10:22	26.91	8.73	18.18
3	NR/35PSi	1:34	10:48	26.16	8.89	17.27
4	NR/35PSi	1:34	10:51	26.97	8.85	18.12
5	NR/35PSi	1:32	10:49	26.78	8.3	18.49
Avg.		1:31	10:23	26.64	8.716	17.926
SD		0.002282	0.030487	0.353341	0.239958	0.4942975
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	NR/40PSi	1:41	10:43	31.78	13.14	18.64
2	NR/40PSi	1:56	10:06	32.29	13.43	18.87
3	NR/40PSi	1:43	10:44	30.77	12.86	17.92
4	NR/40PSi	1:13	10:51	31.38	13.65	17.73

5	NR/40PSi	1:48	10:45	30.56	12.09	18.47
Avg.		1:40	10:37	31.356	13.034	18.326
SD		0.011298	0.012533	0.712341	0.605995	0.4835597

ตารางที่ 21 แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ

No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	Sol-Gel NR/5Si	1:06	3:05	19.2	1.37	17.83
2	Sol-Gel NR/5Si	1:04	3:03	19.25	1.41	17.84
3	Sol-Gel NR/5Si	1:04	2:59	19.22	1.39	17.83
4	Sol-Gel NR/5Si	1:04	3:03	19.46	1.37	18.08
5	Sol-Gel NR/5Si	1:05	3:06	19.58	1.56	18.02
Avg.		1:04	3:03	19.342	1.42	17.92
SD		0.000621	0.001863	0.168879	0.08	0.1206234
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	Sol-Gel NR/10Si	2:20	8:58	8.3	2.36	5.93
2	Sol-Gel NR/10Si	2:24	8:32	8.31	2.45	5.85
3	Sol-Gel NR/10Si	2:18	8:16	8.17	2.29	5.87
4	Sol-Gel NR/10Si	2:21	8:11	8.07	2.35	5.72
5	Sol-Gel NR/10Si	2:19	8:04	7.91	2.28	5.64
Avg.		2:20	8:24	8.152	2.346	5.802
SD		0.001599	0.014946	0.16769	0.068044	0.118617
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	Sol-Gel NR/15Si	4:30	14:29	9.64	3.61	6.03
2	Sol-Gel NR/15Si	4:42	15:07	9.91	3.59	6.33

3	Sol-Gel NR/15Si	4:32	14:31	9.66	3.48	6.18
4	Sol-Gel NR/15Si	4:50	14:18	9.41	3.62	5.8
5	Sol-Gel NR/15Si	4:49	15:01	9.85	3.63	6.22
Avg.		4:40	14:41	9.694	3.586	6.112
SD		0.00647	0.01493	0.197307	0.061074	0.2048658
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	Sol-Gel NR/20Si	2:57	14:51	15.87	6.12	9.75
2	Sol-Gel NR/20Si	3:07	14:17	15.47	6.03	9.44
3	Sol-Gel NR/20Si	2:47	14:29	16.08	6.16	9.92
4	Sol-Gel NR/20Si	3:05	14:28	15.54	5.82	9.73
5	Sol-Gel NR/20Si	2:51	14:12	15.6	5.63	9.97
Avg.		2:57	14:27	15.712	5.952	9.762
SD		0.006006	0.010447	0.25548	0.222868	0.2080144
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	Sol-Gel NR/25Si	2:26	12:26	23.91	9.38	14.52
2	Sol-Gel NR/25Si	2:29	12:37	24.76	9.42	15.34
3	Sol-Gel NR/25Si	2:29	12:35	24.71	9.72	14.99
4	Sol-Gel NR/25Si	2:17	12:30	24.65	9.55	15.1
5	Sol-Gel NR/25Si	2:11	12:36	22.56	8.97	13.58
Avg.		2:22	12:32	24.118	9.408	14.706
SD		0.00559	0.003235	0.937587	0.278514	0.6964768
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	Sol-Gel NR/30Si	2:07	12:54	27.85	12.48	15.37
2	Sol-Gel NR/30Si	1:44	10:42	27.02	11.94	15.07

3	Sol-Gel NR/30Si	1:45	10:44	27.15	12.13	15.02
4	Sol-Gel NR/30Si	1:53	11:56	27.45	11.92	15.52
5	Sol-Gel NR/30Si	1:42	11:00	27.63	11.88	15.75
Avg.		1:50	11:27	27.42	12.07	15.346
SD		0.00714	0.039609	0.340147	0.248596	0.3068061
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	Sol-Gel NR/35Si	2:01	10:50	29.75	13.35	16.41
2	Sol-Gel NR/35Si	2:06	12:05	31.02	13.91	17.11
3	Sol-Gel NR/35Si	1:59	11:33	29.52	12.87	16.65
4	Sol-Gel NR/35Si	1:48	10:35	30.66	13.79	16.87
5	Sol-Gel NR/35Si	1:43	10:24	29.87	13.2	16.67
Avg.		1:55	11:05	30.164	13.424	16.742
SD		0.006635	0.029441	0.642518	0.427995	0.2625262
No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	Sol-Gel NR/40Si	1:27	9:57	38.07	19.72	18.35
2	Sol-Gel NR/40Si	2:20	9:59	38.89	19.38	19.52
3	Sol-Gel NR/40Si	1:48	9:56	39.51	18.79	20.72
4	Sol-Gel NR/40Si	1:07	8:15	32.1	17.74	14.36
5	Sol-Gel NR/40Si	1:47	9:57	39.85	18.78	21.07
Avg.		1:41	9:36	37.684	18.882	18.804
SD		0.018874	0.031764	3.194148	0.75387	2.7052597

ตารางที่ 22 แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ

No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	NR/30TPSi	1:08	4:31	27.03	2.17	24.86
2	NR/30TPSi	1:09	4:27	27.17	2.2	24.98
3	NR/30TPSi	1:09	4:33	26.93	2.18	24.75
4	NR/30TPSi	1:08	4:26	26.44	2.21	24.23
5	NR/30TPSi	1:09	4:30	26.93	2.16	24.77
Avg.		1:04	4:26	22:21	4:28	17:55
SD		0.0008705	0.002891	0.25818	0.019664	0.26658332
1	NR/40TPSi	1:05	4:27	41.53	5.72	35.81
2	NR/40TPSi	1:03	4:23	42.02	5.67	36.35
3	NR/40TPSi	1:04	4:21	41.99	6.05	35.94
4	NR/40TPSi	1:04	4:24	41.76	5.79	35.97
5	NR/40TPSi	1:05	4:24	41.26	5.68	35.58
Avg.		1:07	4:44	41.65714	5.777143	35.88
SD		0.0006211	0.004049	0.50986	0.129321	0.47979162
1	NR/50TPSi	1:07	4:39	42.36	6.26	36.11
2	NR/50TPSi	1:07	4:54	42.45	6.14	36.31
3	NR/50TPSi	1:07	4:43	42.34	6.29	36.05
4	NR/50TPSi	1:08	4:41	42.79	6.34	36.44
5	NR/50TPSi	1:09	4:43	42.21	6.27	35.94
Avg.		1:07	4:44	42.43	6.26	36.17
SD		0.0006211	0.004049	0.218746	0.073824	0.202113
1	NR/60TPSi	1:12	5:22	49.06	12.99	36.07
2	NR/60TPSi	1:13	5:17	47.93	12.68	35.25
3	NR/60TPSi	1:10	5:05	47.01	12.42	34.59

4	NR/60TPSi	1:14	5:54	51.22	13.38	37.84
5	NR/60TPSi	1:15	5:59	52.43	13.52	38.91
Avg.		1:14	5:14	50.90333	13.29667	37.60666
SD		0.0006944	0.006067	1.707171	0.274651	1.434305

ตารางที่ 23 แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ Sol-Gel NR/30Si+TPSi สูตรต่างๆ

No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	0:47	10:56	53.37	26.65	26.72
2	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	0:50	10:52	53.1	26.31	26.79
3	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	0:51	11:41	53.34	26.22	27.12
4	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	0:49	11:19	50.72	23.41	27.31
5	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	0:49	9:42	52.99	26.36	26.63
Avg.		0:49	11:12	53.2	24.0475	26.7325
SD		0.000567	0.0157646	0.1849324	0.5365554	0.079739158
1	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	0:39	19:14	73.05	36.36	36.69
2	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	0:25	21:36	74.7	35.2	39.5
3	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	0:24	17:07	75.84	41.18	34.66
4	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	0:23	18:27	76.67	41.63	35.04
5	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	0:37	18:11	75.7	37.54	38.16
Avg.		0:24	17:55	40.116667	35.463333	40.116667
SD		0.000694	0.0293972	2.2427736	1.0791817	2.2427736
1	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	0:17	8:37	71.12	43.05	28.07
2	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	0:24	14:16	63.74	45.15	18.59
3	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	0:22	13:24	50.47	38.79	11.68
4	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	1:25	22:26	85.95	46.89	39.07
5	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	0:20	14:54	63.26	40.14	23.12

Avg.	0:22	14:11	46.756667	20.093333	46.756667
SD	0.001388	0.0313758	1.5443229	2.6211892	1.5443229

ตารางที่ 24 แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ Sol-Gel NR/30Si+FA สูตรต่างๆ

No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	Sol-Gel NR/30Si+10FA	0:59	5:24	32.75	12.98	19.77
2	Sol-Gel NR/30Si+10FA	0:59	5:43	33.27	13.13	20.14
3	Sol-Gel NR/30Si+10FA	1:00	5:33	34.80	13.18	21.62
4	Sol-Gel NR/30Si+10FA	1:02	5:33	34.24	12.94	21.30
5	Sol-Gel NR/30Si+10FA	0:58	5:46	32.85	13.31	19.54
Avg.		0:59	5:35	33.58	13.11	20.47
SD		0.0010532	0.0061214	0.900261	0.150897	0.932083687
1	Sol-Gel NR/30Si+20FA	0:47	4:51	35.37	13.28	22.09
2	Sol-Gel NR/30Si+20FA	0:52	4:46	35.61	13.41	22.20
3	Sol-Gel NR/30Si+20FA	0:40	5:15	33.20	12.92	20.28
4	Sol-Gel NR/30Si+20FA	0:40	4:41	36.46	14.75	21.71
5	Sol-Gel NR/30Si+20FA	0:42	4:11	33.85	14.75	19.10
Avg.		0:44	4:44	34.90	13.82	21.08
SD		0.0036218	0.015945	1.337075	0.86595	1.344592875
1	Sol-Gel NR/30Si+30FA	0:33	3:21	29.76	12.23	17.53
2	Sol-Gel NR/30Si+30FA	0:33	3:26	30.92	12.89	18.03
3	Sol-Gel NR/30Si+30FA	0:32	3:36	34.39	12.74	21.65
4	Sol-Gel NR/30Si+30FA	0:31	3:30	27.12	11.95	15.17
5	Sol-Gel NR/30Si+30FA	0:33	3:19	28.90	12.55	16.35
Avg.		0:32	3:26	30.22	12.47	17.75
SD		0.0006211	0.004776	2.713065	0.381995	2.447096238

ตารางที่ 25 แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ Sol-Gel NR/30Si+TFA สูตรต่างๆ

No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	1:03	5:37	30.33	11.21	19.12
2	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	0:59	5:05	30.80	11.30	19.50
3	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	0:57	5:15	33.59	12.52	21.07
4	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	1:00	4:59	35.34	10.58	24.76
5	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	1:08	5:12	32.38	11.90	20.48
Avg.		1:01	5:13	32.49	11.50	20.99
SD		0.0029707	0.0100587	2.053429	0.736695	2.247015799
1	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	0:54	4:01	31.28	11.57	19.71
2	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	0:54	4:09	34.42	12.36	22.06
3	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	0:51	4:34	34.36	12.77	21.59
4	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	0:50	4:29	33.94	10.90	23.04
5	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	0:56	4:22	33.82	10.97	22.85
Avg.		0:53	4:19	33.56	11.71	21.85
SD		0.001701	0.0095597	1.302874	0.832064	1.332985371
1	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	0:42	3:17	29.13	10.48	18.65
2	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	0:44	3:26	33.34	10.77	22.57
3	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	0:45	3:40	28.61	9.89	18.72
4	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	0:40	4:02	25.21	10.04	15.17
5	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	0:44	4:04	25.22	9.66	15.56
Avg.		0:43	3:41	28.30	10.17	18.13
SD		0.0013889	0.0146032	3.362331	0.450411	2.987411923

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาแบบตกตะกอน etailoy

และซิลิกาจากเถ้าแกลบโดยกระบวนการโซลเจล ในสูตรต่างๆ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางที่ 26 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ NR

No.	Material	Modulus 100% (MPa)	Modulus 200% (MPa)	Max stress (MPa)	Break strain (%)
1	NR	1.01912	0.85401	18.327	940.549
2	NR	1.06023	0.88259	18.7851	891.958
3	NR	1.03612	0.86281	18.0738	883.705
4	NR	1.06543	0.88495	18.1015	874.737
5	NR	1.00982	0.83737	18.1029	895.646
Avg.		1.038144	0.864346	18.27806	897.319
SD		0.024497833	0.019964125	0.301272838	25.47380944

ตารางที่ 27 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ NR/PSi สูตรต่างๆ

No.	Material	Modulus 100% (MPa)	Modulus 200% (MPa)	Max stress (MPa)	Break strain (%)
1	NR/5PSi	1.02406	1.01478	24.2065	919.395
2	NR/5PSi	1.04808	0.92854	21.5288	915.054
3	NR/5PSi	1.00975	0.94615	24.397	936.065
4	NR/5PSi	1.03639	0.95737	18.5524	854.129
5	NR/5PSi	1.03102	0.90906	24.6193	952.302
Avg.		1.02986	0.95118	22.6608	915.389
SD		0.014265404	0.039985125	2.617234979	37.27939916
1	NR/10PSi	1.06651	0.94332	23.8226	934.354
2	NR/10PSi	1.09481	1.00776	23.3866	983.068
3	NR/10PSi	1.00981	0.90565	23.0946	947.132
4	NR/10PSi	1.03957	0.99595	24.3895	941.378
5	NR/10PSi	1.04939	0.9389	24.0281	962.145
Avg.		1.052018	0.958316	23.74428	953.6154

SD		0.031561637	0.042534091	0.513082778	19.38426996
1	NR/15PSi	1.05035	0.87407	19.0665	914.368
2	NR/15PSi	1.04077	0.88226	18.3294	927.74
3	NR/15PSi	1.07344	0.87962	18.3709	894.552
4	NR/15PSi	1.05972	0.90453	19.9872	903.503
5	NR/15PSi	1.06949	0.83582	18.6612	918.769
Avg.		1.058754	0.87526	18.88304	911.7864
SD		0.013471497	0.024908192	0.683894088	12.99594142
1	NR/20PSi	1.01648	0.81813	13.1831	845.671
2	NR/20PSi	0.99445	0.78976	12.9102	829.755
3	NR/20PSi	0.98898	0.83896	15.5964	861.266
4	NR/20PSi	1.03061	0.87196	13.4868	797.591
5	NR/20PSi	1.04442	0.80794	12.9084	826.406
Avg.		1.014988	0.82535	13.61698	832.1378
SD		0.023509259	0.03154207	1.131914949	23.78871684
1	NR/25PSi	1.01172	0.84714	12.3882	835.412
2	NR/25PSi	1.01576	0.84712	12.0847	817.552
3	NR/25PSi	1.01486	0.78757	12.1344	838.603
4	NR/25PSi	1.01088	0.78961	12.2919	845.157
5	NR/25PSi	1.08952	0.83947	12.1654	822.694
Avg.		1.028548	0.822182	12.21292	831.8836
SD		0.034146079	0.030832638	0.124322995	11.44144437
1	NR/30PSi	1.15112	0.94689	10.2714	762.968
2	NR/30PSi	1.16679	0.95274	10.3014	752.789
3	NR/30PSi	1.15571	0.94268	10.4946	764.283
4	NR/30PSi	1.18178	0.97116	10.9098	768.8
5	NR/30PSi	1.17294	0.96408	10.7716	775.354

Avg.		1.165668	0.95551	10.54976	764.8388
SD		0.012495434	0.011884376	0.283306985	8.295586519
1	NR/35PSi	1.21227	1.01236	10.3185	742.625
2	NR/35PSi	1.22803	1.0373	9.88686	712.548
3	NR/35PSi	1.05097	0.91411	8.98226	709.885
4	NR/35PSi	1.24057	1.03455	9.89598	719.443
5	NR/35PSi	1.09755	0.94569	8.57559	675.742
Avg.		1.165878	0.988802	9.531838	712.0486
SD		0.085829115	0.055761668	0.723519753	24.04523423
1	NR/40PSi	1.28357	1.1088	9.78757	673.251
2	NR/40PSi	1.28571	1.11776	8.87904	635.515
3	NR/40PSi	1.24845	1.10658	9.77495	651.586
4	NR/40PSi	1.2379	1.09493	9.2009	636.146
5	NR/40PSi	1.12521	1.00355	8.33262	627.086
Avg.		1.236168	1.086324	9.195016	644.7168
SD		0.065511229	0.046982168	0.618677218	18.23707298

ตารางที่ 28 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ

No.	Material	Modulus 100% (MPa)	Modulus 200% (MPa)	Max stress (MPa)	Break strain (%)
1	Sol-Gel NR/5Si	0.71349	0.58276	14.9261	1047.8
2	Sol-Gel NR/5Si	0.73226	0.59157	14.727	1027.85
3	Sol-Gel NR/5Si	0.7322	0.59181	14.5374	1015.69
4	Sol-Gel NR/5Si	0.73311	0.59933	14.73	1022.57
5	Sol-Gel NR/5Si	0.73789	0.60811	15.3469	1013.07
Avg.		0.72979	0.594716	14.85348	1025.396
SD		0.009410518	0.009512838	0.308175286	13.80293737

1	Sol-Gel NR/10Si	0.51917	0.39101	2.07617	533.297
2	Sol-Gel NR/10Si	0.55163	0.4169	1.8846	474.04
3	Sol-Gel NR/10Si	0.49066	0.37082	1.96993	528.339
4	Sol-Gel NR/10Si	0.58999	0.44304	1.89509	461.845
5	Sol-Gel NR/10Si	0.53895	0.40799	2.1821	529.063
Avg.		0.53808	0.405952	2.001578	505.3168
SD		0.037031244	0.027189394	0.126666197	34.44136653
1	Sol-Gel NR/15Si	0.56144	0.4453	2.50614	500.315
2	Sol-Gel NR/15Si	0.55617	0.43567	3.0782	580.414
3	Sol-Gel NR/15Si	0.56286	0.44519	2.07752	441.905
4	Sol-Gel NR/15Si	0.61189	0.477	3.0223	556.56
5	Sol-Gel NR/15Si	0.60833	0.48339	2.86775	520.634
Avg.		0.580138	0.45731	2.710382	519.9656
SD		0.027502672	0.021373386	0.418203513	53.55653388
1	Sol-Gel NR/20Si	0.80522	0.63923	6.5205	747
2	Sol-Gel NR/20Si	0.78214	0.53253	5.84949	809.752
3	Sol-Gel NR/20Si	0.77133	0.60186	5.27248	717.488
4	Sol-Gel NR/20Si	0.76848	0.66612	5.79044	685.349
5	Sol-Gel NR/20Si	0.83367	0.57485	4.65435	645.117
Avg.		0.792168	0.602918	5.617452	720.9412
SD		0.027334388	0.052574844	0.697465647	62.43888582
1	Sol-Gel NR/25Si	1.00405	0.78814	9.90374	850.955
2	Sol-Gel NR/25Si	0.98345	0.77639	9.7031	829.215
3	Sol-Gel NR/25Si	1.03467	0.73671	9.87479	850.143
4	Sol-Gel NR/25Si	1.01667	0.82978	9.65953	773.971
5	Sol-Gel NR/25Si	1.00857	0.74365	9.96014	827.689
Avg.		1.009482	0.774934	9.82026	826.3946

SD		0.018668865	0.037497883	0.131405331	31.32516447
1	Sol-Gel NR/30Si	1.09447	0.89109	11.8565	847.768
2	Sol-Gel NR/30Si	1.08804	0.84354	11.5191	857.894
3	Sol-Gel NR/30Si	1.11891	0.86697	11.0527	807.178
4	Sol-Gel NR/30Si	1.09995	0.8047	11.1878	832.871
5	Sol-Gel NR/30Si	0.93127	0.90711	11.9668	816.397
Avg.		1.066528	0.862682	11.51658	832.4216
SD		0.076483907	0.040396711	0.400478135	21.08663238
1	Sol-Gel NR/35Si	1.1597	1.0155	11.3262	733.615
2	Sol-Gel NR/35Si	1.16631	0.97272	11.5678	752.029
3	Sol-Gel NR/35Si	1.1253	0.943	10.0302	700.149
4	Sol-Gel NR/35Si	1.08886	0.90182	10.9686	750.168
5	Sol-Gel NR/35Si	1.11195	0.95362	10.5982	725.268
Avg.		1.130424	0.957332	10.8982	732.2458
SD		0.032557639	0.041596496	0.608261523	21.17397711
1	Sol-Gel NR/40Si	1.4573	1.23608	11.868	730.092
2	Sol-Gel NR/40Si	1.56199	1.23705	11.6701	714.989
3	Sol-Gel NR/40Si	1.54258	1.36705	10.1168	607.017
4	Sol-Gel NR/40Si	1.51727	1.31273	11.758	687.554
5	Sol-Gel NR/40Si	1.50469	1.24841	11.5102	705.28
Avg.		1.516766	1.280264	11.38462	688.9864
SD		0.039980813	0.057922802	0.72071242	48.35370013

ตารางที่ 29 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ

No.	Material	Modulus 100% (MPa)	Modulus 200% (MPa)	Max stress (MPa)	Break strain (%)
1	NR/30TPSi	1.07618	0.96647	10.4675	680.883
2	NR/30TPSi	1.19908	1.05382	11.0615	691.372
3	NR/30TPSi	1.20526	1.07753	10.2949	653.371
4	NR/30TPSi	1.12316	1.00217	10.8248	687.302
5	NR/30TPSi	1.13904	1.01148	12.6833	746.529
Avg.		1.148544	1.022294	11.0664	691.8914
SD		0.054179825	0.043826765	0.952188747	33.95440247
1	NR/40TPSi	2.2775	2.12263	15.0024	549.042
2	NR/40TPSi	2.25599	2.09625	15.4203	560.606
3	NR/40TPSi	2.22004	2.07308	15.2128	559.332
4	NR/40TPSi	2.20623	2.0254	15.6851	579.603
5	NR/40TPSi	2.26156	2.11614	15.0382	550.768
Avg.		2.244264	2.0867	15.27176	559.8702
SD		0.029894271	0.039344871	0.284383303	12.14819345
1	NR/50TPSi	2.43166	2.36352	16.5494	548.442
2	NR/50TPSi	2.39958	2.24566	16.0888	565.617
3	NR/50TPSi	2.50532	2.17063	14.9899	529.8
4	NR/50TPSi	2.42991	2.31279	17.404	564.365
5	NR/50TPSi	2.26437	2.2472	15.193	536.246
Avg.		2.40618	2.26796	16.04502	548.894
SD		0.08831417	0.073387395	0.992768705	16.15369628
1	NR/60TPSi	3.6714	3.31932	16.4909	459.869
2	NR/60TPSi	3.49693	3.18574	16.9291	482.955
3	NR/60TPSi	3.45891	3.12324	16.0222	475.298

4	NR/60TPSi	3.48988	3.1529	16.8727	486.077
5	NR/60TPSi	3.6217	3.24176	16.0311	466.165
Avg.		3.547764	3.204592	16.4692	474.0728
SD		0.092981287	3.31932	16.4909	459.869

ตารางที่ 30 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ Sol-Gel NR/30Si+TPSi สูตรต่างๆ

No.	Material	Modulus 100% (MPa)	Modulus 200% (MPa)	Max stress (MPa)	Break strain (%)
1	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	2.02294	1.73883	14.9876	659.242
2	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	1.9201	1.68856	15.1249	691.258
3	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	1.93153	1.68614	14.5807	675.142
4	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	1.92843	1.70846	15.4058	685.389
5	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	1.88826	1.66963	15.1792	685.503
Avg.		1.938252	1.698324	15.05564	679.3068
SD		0.050354765	0.026507573	0.30531684	12.63090447
1	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	2.3088	2.09869	13.8447	568.129
2	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	2.37502	2.12381	13.7554	573.92
3	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	2.35192	2.1351	13.7985	561.688
4	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	2.45684	2.20636	13.7417	541.898
5	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	2.33463	2.09297	13.7846	574.537
Avg.		2.365442	2.131386	13.78498	564.0344
SD		0.056537316	0.045379257	0.040303685	13.41940052
1	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	3.01864	2.65245	11.3461	456.135
2	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	3.12271	2.7302	11.2361	438.118
3	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	3.09721	2.67744	11.3699	456.755
4	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	3.14152	2.76624	11.938	457.398
5	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	2.8865	2.54791	11.6872	477.709

Avg.	3.053316	2.674848	11.51546	457.223
SD	0.10434577	0.083722736	0.289804767	14.0188321

ตารางที่ 31 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ Sol-Gel NR/30Si+FA สูตรต่างๆ

No.	Material	Modulus 100% (MPa)	Modulus 200% (MPa)	Max stress (MPa)	Break strain (%)
1	Sol-Gel NR/30Si+10FA	1.55695	1.23051	10.3593	734.929
2	Sol-Gel NR/30Si+10FA	1.57195	1.24538	10.7277	714.389
3	Sol-Gel NR/30Si+10FA	1.55108	1.27089	10.2231	696.972
4	Sol-Gel NR/30Si+10FA	1.54978	1.2522	10.9873	728.374
5	Sol-Gel NR/30Si+10FA	1.48459	1.281	9.78021	702.742
Avg.		1.54287	1.255996	10.415522	715.4812
SD		0.033747605	0.020147435	0.465884552	16.20580003
1	Sol-Gel NR/30Si+20FA	1.64106	1.2906	9.18925	611.152
2	Sol-Gel NR/30Si+20FA	1.64405	1.28805	9.80211	625.769
3	Sol-Gel NR/30Si+20FA	1.65079	1.303	9.82282	614.335
4	Sol-Gel NR/30Si+20FA	1.67771	1.31897	9.49265	618.937
5	Sol-Gel NR/30Si+20FA	1.67637	1.32641	9.80532	638.562
Avg.		1.657996	1.305406	9.62243	621.751
SD		0.017744655	0.016966049	0.278557699	10.88586811
1	Sol-Gel NR/30Si+30FA	1.77351	1.38061	6.62101	490.066
2	Sol-Gel NR/30Si+30FA	1.79059	1.38625	6.50505	485.374
3	Sol-Gel NR/30Si+30FA	1.72471	1.38743	6.65565	487.965
4	Sol-Gel NR/30Si+30FA	1.75189	1.37621	6.63484	476.651
5	Sol-Gel NR/30Si+30FA	1.76315	1.37233	6.44823	465.634
Avg.		1.76077	1.380566	6.572956	481.138
SD		0.024679862	0.006446525	0.091028723	10.05942337

ตารางที่ 32 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ Sol-Gel NR/30Si+TFA สูตรต่างๆ

No.	Material	Modulus 100% (MPa)	Modulus 200% (MPa)	Max stress (Mpa)	Break strain (%)
1	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	1.73317	1.56295	10.8794	611.694
2	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	1.7669	1.50122	10.6247	637.506
3	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	1.75887	1.56126	11.0127	625.242
4	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	1.74088	1.55412	11.0519	605.3
5	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	1.74088	1.51797	10.9377	641.532
Avg.		1.74814	1.539504	10.90128	624.2548
SD		0.014111933	0.028133804	0.1683764	15.74903683
1	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	2.26189	1.86539	9.39288	499.666
2	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	2.20015	1.86447	9.34154	483.578
3	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	2.22422	1.85153	9.21909	482.262
4	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	2.26472	1.82206	9.46745	488.152
5	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	2.17933	1.83466	9.55365	494.978
Avg.		2.226062	1.847622	9.394922	489.7272
SD		0.037539283	0.018949002	0.12671384	7.456101072
1	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	2.73762	2.08495	7.64637	386.211
2	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	2.71762	2.00414	7.73301	394.982
3	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	2.72831	2.07424	7.60483	380.9
4	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	2.76415	2.08021	7.67736	388.608
5	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	2.63278	2.0991	7.4916	389.914
Avg.		2.716096	2.068528	7.630634	388.123
SD		0.049662686	0.037145793	0.09070293	5.155488823

ตารางที่ 33 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ NR

No.	Material	tear strength(kN/m)
1	NR	32.7586
2	NR	35.6038
3	NR	36.1502
4	NR	34.8824
5	NR	34.057
Avg.		34.6904
SD		1.335592228

ตารางที่ 34 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ NR/PSi สูตรต่างๆ

No.	Material	tear strength(kN/m)
1	NR/5PSi	31.351
2	NR/5PSi	31.5903
3	NR/5PSi	31.2732
4	NR/5PSi	32.3242
5	NR/5PSi	32.9766
Avg.		31.90306
SD		0.729582023
1	NR/10PSi	29.6452
2	NR/10PSi	29.5743
3	NR/10PSi	27.9355
4	NR/10PSi	29.317
5	NR/10PSi	29.1175
Avg.		29.1179
SD		0.693551905
1	NR/15PSi	25.485

2	NR/15PSi	25.0041
3	NR/15PSi	25.36
4	NR/15PSi	26.2299
5	NR/15PSi	28.2652
Avg.		26.06884
SD		1.30641993
1	NR/20PSi	25.3262
2	NR/20PSi	22.5425
3	NR/20PSi	23.1642
4	NR/20PSi	25.9352
5	NR/20PSi	25.6296
Avg.		24.51954
SD		1.551826381
1	NR/25PSi	19.8289
2	NR/25PSi	20.926
3	NR/25PSi	18.6301
4	NR/25PSi	19.07
5	NR/25PSi	20.152
Avg.		19.7214
SD		0.903229127
1	NR/30PSi	20.2712
2	NR/30PSi	20.7437
3	NR/30PSi	21.922
4	NR/30PSi	21.596
5	NR/30PSi	20.7574
Avg.		21.05806
SD		0.678995411

1	NR/35PSi	21.6753
2	NR/35PSi	20.8418
3	NR/35PSi	21.8931
4	NR/35PSi	22.1839
5	NR/35PSi	22.567
Avg.		21.83222
SD		0.646692065
1	NR/40PSi	25.5347
2	NR/40PSi	24.6842
3	NR/40PSi	25.1433
4	NR/40PSi	27.4047
5	NR/40PSi	27.4414
Avg.		26.04166
SD		1.296524864

ตารางที่ 35 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ

No.	Material	tear strength(kN/m)
1	Sol-Gel NR/5Si	18.9402
2	Sol-Gel NR/5Si	19.8976
3	Sol-Gel NR/5Si	18.1655
4	Sol-Gel NR/5Si	20.8567
5	Sol-Gel NR/5Si	19.1853
Avg.		19.40906
SD		1.018659979
1	Sol-Gel NR/10Si	10.9609
2	Sol-Gel NR/10Si	9.40695
3	Sol-Gel NR/10Si	10.5943

4	Sol-Gel NR/10Si	9.14063
5	Sol-Gel NR/10Si	10.5384
Avg.		10.128236
SD		0.802246627
1	Sol-Gel NR/15Si	11.211
2	Sol-Gel NR/15Si	11.3887
3	Sol-Gel NR/15Si	11.8652
4	Sol-Gel NR/15Si	11.4311
5	Sol-Gel NR/15Si	11.7286
Avg.		11.52492
SD		0.266073236
1	Sol-Gel NR/20Si	14.8217
2	Sol-Gel NR/20Si	14.3978
3	Sol-Gel NR/20Si	14.6503
4	Sol-Gel NR/20Si	15.6098
5	Sol-Gel NR/20Si	14.7615
Avg.		14.84822
SD		0.455598032
1	Sol-Gel NR/25Si	20.2901
2	Sol-Gel NR/25Si	21.122
3	Sol-Gel NR/25Si	22.167
4	Sol-Gel NR/25Si	22.7696
5	Sol-Gel NR/25Si	19.7493
Avg.		21.2196
SD		1.258505548
1	Sol-Gel NR/30Si	22.7178
2	Sol-Gel NR/30Si	22.2753

3	Sol-Gel NR/30Si	22.4084
4	Sol-Gel NR/30Si	22.9142
5	Sol-Gel NR/30Si	22.3637
Avg.		22.53588
SD		0.269267501
1	Sol-Gel NR/35Si	23.9721
2	Sol-Gel NR/35Si	21.3591
3	Sol-Gel NR/35Si	23.2231
4	Sol-Gel NR/35Si	23.0727
5	Sol-Gel NR/35Si	23.2873
Avg.		22.98286
SD		0.97129585
1	Sol-Gel NR/40Si	23.2327
2	Sol-Gel NR/40Si	26.6322
3	Sol-Gel NR/40Si	24.6468
4	Sol-Gel NR/40Si	23.4412
5	Sol-Gel NR/40Si	23.388
Avg.		24.26818
SD		1.437252174

ตารางที่ 36 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ

No.	Material	tear strength(kN/m)
1	NR/30TPSi	17.8184
2	NR/30TPSi	18.0363
3	NR/30TPSi	17.2193
4	NR/30TPSi	18.261
5	NR/30TPSi	17.2455

Avg.		17.7161
SD		0.468557344
1	NR/40TPSi	46.8931
2	NR/40TPSi	43.9408
3	NR/40TPSi	42.1732
4	NR/40TPSi	42.3189
5	NR/40TPSi	42.0538
Avg.		43.47596
SD		2.058605871
1	NR/50TPSi	45.9629
2	NR/50TPSi	46.6023
3	NR/50TPSi	47.8488
4	NR/50TPSi	44.7086
5	NR/50TPSi	46.5633
Avg.		46.33718
SD		1.140040814
1	NR/60TPSi	55.0561
2	NR/60TPSi	53.7875
3	NR/60TPSi	49.2303
4	NR/60TPSi	64.639
5	NR/60TPSi	59.2644
Avg.		56.39546
SD		5.833558666

ตารางที่ 37 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ Sol-Gel NR/30Si+TPSi สูตรต่างๆ

No.	Material	tear strength(kN/m)
1	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	31.9249
2	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	31.4359
3	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	33.9188
4	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	32.0189
5	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	32.8065
Avg.		32.421
SD		0.970854871
1	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	32.5631
2	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	32.3221
3	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	34.372
4	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	34.7291
5	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	34.7297
Avg.		33.7432
SD		1.199242649
1	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	33.5749
2	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	34.0656
3	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	34.3276
4	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	34.8257
5	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	34.9979
Avg.		34.35834
SD		0.576168867

ตารางที่ 38 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ Sol-Gel NR/30Si+FA สูตรต่างๆ

No.	Material	tear strength(kN/m)
1	Sol-Gel NR/30Si+10FA	21.7085
2	Sol-Gel NR/30Si+10FA	21.9515
3	Sol-Gel NR/30Si+10FA	21.3931
4	Sol-Gel NR/30Si+10FA	21.8072
5	Sol-Gel NR/30Si+10FA	22.5423
Avg.		21.88052
SD		0.422946772
1	Sol-Gel NR/30Si+20FA	20.7088
2	Sol-Gel NR/30Si+20FA	20.7673
3	Sol-Gel NR/30Si+20FA	20.9867
4	Sol-Gel NR/30Si+20FA	20.593
5	Sol-Gel NR/30Si+20FA	20.8892
Avg.		20.789
SD		0.153658924
1	Sol-Gel NR/30Si+30FA	20.1904
2	Sol-Gel NR/30Si+30FA	20.407
3	Sol-Gel NR/30Si+30FA	19.7665
4	Sol-Gel NR/30Si+30FA	20.477
5	Sol-Gel NR/30Si+30FA	20.4325
Avg.		20.25468
SD		0.29440582

ตารางที่ 39 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ Sol-Gel NR/30Si+TFA สูตรต่างๆ

No.	Material	Tear strength(kN/m)
1	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	25.7732
2	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	24.0182
3	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	24.9281
4	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	24.7197
5	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	26.2786
Avg.		25.14356
SD		0.891246006
1	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	23.0544
2	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	24.3959
3	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	23.6432
4	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	23.916
5	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	24.437
Avg.		23.8893
SD		0.573357428
1	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	22.532
2	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	22.691
3	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	22.8252
4	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	23.0497
5	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	23.2602
Avg.		22.87162
SD		0.288455823

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดสอบ Hardness ของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาแบบตกตะกอน ใ้ลย และซิลิกา

จากเ้าเคลือบโดยกระบวนการโซลเจล ในสูตรต่างๆ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางที่ 40 แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ NR

Sol-Gel 30Si/NR	
Sample position	Hardness (type A)
1	47
2	48
3	48
4	47.5
5	47.5
6	47.5
7	46.5
8	47.5
9	47.5
10	47.5
11	48.5
12	47
13	47
14	49
15	47
Avg.	47.53
SD	0.64

ตารางที่ 41 แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ NR/PSi สูตรต่างๆ

NR/5PSi		NR/10PSi		NR/15PSi	
Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)
1	46	1	49	1	43

2	48.5	2	48.5	2	42.5
3	49	3	49.5	3	43
4	47	4	49	4	42.5
5	47	5	49	5	44
6	45	6	48	6	42
7	46	7	48	7	42.5
8	46	8	49	8	44
9	47	9	49.5	9	43
10	49	10	48	10	43
11	49	11	49	11	43.5
12	49	12	48	12	43.5
13	47.5	13	49.5	13	43
14	47	14	49	14	43
15	47.5	15	48	15	44
Avg.	47.37	Avg.	48.73	Avg.	43.10
SD	1.30	SD	0.59	SD	0.60
NR/20PSi		NR/25PSi		NR/30PSi	
Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)
1	43	1	46.5	1	49
2	43	2	46	2	50
3	42	3	44	3	50
4	43	4	43.5	4	50
5	43	5	44	5	49
6	42.5	6	45.5	6	49

7	44	7	45.5	7	48
8	43	8	46	8	48
9	44	9	44	9	49
10	44	10	47	10	48
11	43	11	46	11	49
12	43	12	44	12	50
13	45	13	45	13	50
14	43	14	47	14	50
15	45	15	46	15	49
Avg.	43.37	Avg.	45.33	Avg.	49.2
SD	0.85	SD	1.18	SD	0.77
NR/35PSi		NR/40PSi			
Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)		
1	54	1	64		
2	58	2	64		
3	56	3	65		
4	56	4	62		
5	58	5	63		
6	58	6	64		
7	56	7	67		
8	55	8	64		
9	53	9	65.5		
10	58	10	68		
11	56	11	64		

12	58	12	66
13	56	13	66
14	58	14	67
15	56.5	15	65
Avg.	56.43	Avg.	64.97
SD	1.59	SD	1.63

ตารางที่ 42 แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ

Sol-Gel NR/5Si		Sol-Gel NR/10Si		Sol-Gel NR/15Si	
Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)
1	32	1	31	1	37
2	32	2	30	2	36.5
3	30	3	30	3	36
4	31	4	30	4	34
5	32	5	31.5	5	34
6	31	6	30.5	6	34
7	32	7	29	7	36
8	31	8	30	8	38
9	29.5	9	30	9	39
10	30	10	29	10	40
11	32	11	29	11	36
12	31.5	12	29	12	35
13	30	13	29	13	39
14	31	14	28	14	34

15	32	15	29	15	34
Avg.	31.13	Avg.	29.66666667	Avg.	36.17
SD	0.90	SD	0.919368313	SD	2.07
Sol-Gel NR/20Si		Sol-Gel NR/25Si		Sol-Gel NR/30Si	
Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)
1	49	1	54	1	59
2	50	2	56	2	59
3	49	3	58	3	59
4	48	4	56	4	60
5	49	5	56	5	58
6	47	6	54	6	58
7	50	7	54	7	58
8	53	8	56	8	59
9	53	9	55	9	57
10	48	10	52	10	55.5
11	49	11	51	11	60
12	48	12	54	12	56
13	48	13	54	13	56
14	49	14	54	14	59
15	48	15	58	15	59
Avg.	49.2	Avg.	54.8	Avg.	58.17
SD	1.74	SD	1.93	SD	1.44
Sol-Gel NR/35Si		Sol-Gel NR/40Si			
Sample	Hardness	Sample	Hardness		

position	(type A)	position	(type A)
1	64	1	69
2	64	2	67
3	64	3	69
4	65	4	69
5	65	5	69
6	64	6	69
7	63	7	69
8	64	8	67
9	63	9	67
10	62.5	10	69
11	62.5	11	68
12	62	12	73
13	64	13	67
14	62	14	67
15	62	15	69
Avg.	63.4	Avg.	68.53
SD	1.04	SD	1.55

ตารางที่ 43 แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ

NR/30TPSi		NR/40TPSi		NR/50TPSi	
Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)
1	46	1	67	1	68
2	46	2	68	2	66

3	46	3	66	3	66
4	46	4	69	4	67
5	46	5	66	5	68
6	46	6	66	6	68
7	46	7	67	7	67
8	43	8	66	8	68
9	46	9	66	9	67
10	47	10	65	10	65
11	47	11	67	11	67
12	47	12	65	12	68
13	47.5	13	66	13	66
14	48	14	66	14	67
15	46.5	15	67	15	67
Avg.	46.266667	Avg.	66.47	Avg.	67
SD	1.1159024	SD	1.06	SD	0.93

NR/60TPSi

Sample position	Hardness (type A)
1	75
2	74
3	76
4	77
5	77
6	78
7	76

8	79
9	78
10	75
11	78
12	77
13	75
14	76
15	78
Avg.	76.6
SD	1.45

ตารางที่ 44 แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ Sol-Gel NR/30Si+TPSi สูตรต่างๆ

Sol-Gel NR/30Si+10TPSi		Sol-Gel NR/30Si+20TPSi		Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	
Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)
1	71	1	79	1	86
2	69	2	74	2	86
3	70	3	78	3	88
4	71	4	79	4	86
5	69	5	78	5	89
6	71	6	74	6	88
7	70	7	76	7	85
8	71	8	74	8	86
9	67	9	74	9	86
10	71	10	76	10	88

11	71	11	78	11	85
12	69	12	76	12	88
13	69	13	77	13	84
14	68	14	78	14	88
15	71	15	79	15	86
Avg.	69.87	Avg.	76.67	Avg.	86.6
SD	1.30	SD	1.95	SD	1.45

ตารางที่ 45 แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ Sol-Gel NR/30Si+FA สูตรต่างๆ

Sol-Gel NR/30Si +10FA		Sol-Gel NR/30Si +20FA		Sol-Gel NR/30Si +30FA	
Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)
1	61	1	70	1	70
2	64	2	69	2	69
3	60	3	70	3	73
4	64	4	69	4	72
5	59	5	70	5	73
6	64	6	74	6	71
7	62	7	70	7	73
8	63	8	70	8	70
9	63	9	69	9	70
10	64	10	67	10	74
11	64	11	67	11	71
12	63	12	66	12	71
13	65	13	68	13	71

14	65	14	69	14	71
15	67	15	72	15	71
MEAN	63.2	MEAN	69.33	MEAN	71.33
SD	2.04	SD	1.99	SD	1.40

ตารางที่ 46 แสดงข้อมูลการทดสอบ Hardness testing ของ Sol-Gel NR/30Si+TFA สูตรต่างๆ

Sol-Gel NR/30Si+10TFA		Sol-Gel NR/30Si+20TFA		Sol-Gel NR/30Si+30TFA	
Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)	Sample position	Hardness (type A)
1	65	1	66	1	74
2	68	2	67	2	74
3	64	3	69	3	73
4	66	4	68	4	74
5	68	5	66	5	74
6	64	6	65	6	72
7	64	7	67	7	74
8	64	8	66	8	72
9	65	9	64	9	70
10	67	10	64	10	73
11	65	11	67	11	72
12	66	12	65	12	76
13	65	13	66	13	75
14	65	14	66	14	73
15	64	15	66	15	73
MEAN	65.33	MEAN	66.13	MEAN	73.27

SD	1.40	SD	1.36	SD	1.44
----	------	----	------	----	------

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดสอบการขัดถู (Abrasion) ของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาแบบตกตะกอน ใต้อายุ

และซิลิกาจากถ้ำแกลบโดยกระบวนการโซลเจล ในสูตรต่างๆ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางที่ 47 แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ NR

No.	Material	before (g)	after (g)	density (g/cm ³)	volume loss (mm ³)
1	NR	2.2483	2.0448	0.959	214.57
2	NR	2.2812	2.0804	0.967	211.72
3	NR	2.2675	2.0521	0.964	227.12
4	NR	2.257	2.0789		187.79
5	NR	2.282	2.0819		210.99
6	NR	2.2683	2.0705		208.56
Avg.		2.2674	2.0681	0.963	210.13
SD		0.0132	0.0159	0.004	12.75

ตารางที่ 48 แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ NR/PSi สูตรต่างๆ

No.	Material	before (g)	after (g)	density (g/cm ³)	volume loss (mm ³)
1	NR/5PSi	2.3179	2.1493	0.99	172.93
2	NR/5PSi	2.3275	2.1705	0.992	161.03
3	NR/5PSi	2.3163	2.1474	0.989	173.23
4	NR/5PSi	2.3314	2.17		165.54
5	NR/5PSi	2.3244	2.1594		169.23
6	NR/5PSi	2.332	2.1395		197.44
Avg.		2.3249	2.1560	0.990	173.23
SD		0.0067	0.0127	0.002	12.73
1	NR/10PSi	2.3764	2.2162	1.014	160.37
2	NR/10PSi	2.3614	2.1936	1.013	167.98
3	NR/10PSi	2.3643	2.2081	1.017	156.37
4	NR/10PSi	2.3518	2.1726		179.39

5	NR/10PSi	2.3479	2.1721		175.99
6	NR/10PSi	2.3699	2.2117		158.37
Avg.		2.3620	2.1957	1.015	166.41
SD		0.0108	0.0196	0.002	9.64
1	NR/15PSi	2.4124	2.2454	1.032	164.26
2	NR/15PSi	2.3955	2.2696	1.035	123.84
3	NR/15PSi	2.4161	2.2784	1.031	135.44
4	NR/15PSi	2.399	2.2350		161.31
5	NR/15PSi	2.4165	2.2302		183.25
6	NR/15PSi	2.4071	2.2368		167.51
Avg.		2.4078	2.2492	1.0327	155.94
SD		0.0089	0.0200	0.0021	22.04
1	NR/20PSi	2.4553	2.2942	1.055	310.60
2	NR/20PSi	2.4765	2.2563	1.052	424.55
3	NR/20PSi	2.4778	2.3485	1.054	249.29
4	NR/20PSi	2.4615	2.2992		312.92
5	NR/20PSi	2.4585	2.2529		396.40
6	NR/20PSi	2.4662	2.2407		434.77
Avg.		2.4660	2.2820	1.054	354.76
SD		0.0094	0.0402	0.002	74.61
1	NR/25PSi	2.5358	2.1829	1.073	667.52
2	NR/25PSi	2.5123	2.173	1.074	641.79
3	NR/25PSi	2.5194	2.1715	1.075	658.06
4	NR/25PSi	2.5291	2.2108		602.07
5	NR/25PSi	2.5234	2.2093		594.13
6	NR/25PSi	2.5136	2.1731		644.06
Avg.		2.5223	2.1868	1.074	634.60

	SD	0.0091	0.0185	0.001	29.90
1	NR/30PSi	2.5597	2.1324	1.09	796.38
2	NR/30PSi	2.5555	2.1514	1.09	753.14
3	NR/30PSi	2.5559	2.1541	1.09	748.85
4	NR/30PSi	2.5488	2.1464		749.97
5	NR/30PSi	2.5539	2.1247		799.92
6	NR/30PSi	2.5637	2.1691		735.44
	Avg.	2.5563	2.1464	1.09	763.95
	SD	0.0051	0.0159	0.000	27.20
1	NR/35PSi	2.602	2.2528	1.112	638.52
2	NR/35PSi	2.6077	2.2945	1.111	572.69
3	NR/35PSi	2.5869	2.2819	1.11	557.70
4	NR/35PSi	2.5874	2.2813		559.71
5	NR/35PSi	2.6104	2.3073		554.23
6	NR/35PSi	2.6204	2.3088		569.77
	Avg.	2.6025	2.2878	1.111	575.44
	SD	0.0133	0.0208	0.001	31.72
1	NR/40PSi	2.6266	2.2831	1.132	617.90
2	NR/40PSi	2.6544	2.3291	1.128	585.16
3	NR/40PSi	2.6728	2.3184	1.128	637.51
4	NR/40PSi	2.658	2.3267		595.96
5	NR/40PSi	2.6567	2.3308		586.24
6	NR/40PSi	2.6598	2.3097		629.77
	Avg.	2.6547	2.3163	1.129	608.76
	SD	0.0152	0.0181	0.002	22.71

ตารางที่ 49 แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ

No.	Material	before (g)	after (g)	density (g/cm ³)	volume loss (mm ³)
1	Sol-Gel NR/5Si	2.3095	2.0612	0.991	511.06
2	Sol-Gel NR/5Si	2.2861	2.0447	0.982	496.86
3	Sol-Gel NR/5Si	2.3017	2.0695	0.988	477.92
4	Sol-Gel NR/5Si	2.3033	2.0692		481.84
5	Sol-Gel NR/5Si	2.291	2.0585		478.54
6	Sol-Gel NR/5Si	2.3011	2.0551		506.33
Avg.		2.2988	2.0597	0.987	492.09
SD		0.0086	0.0093	0.005	14.66
1	Sol-Gel NR/10Si	4.3461	3.8151	1.004	1079.08
2	Sol-Gel NR/10Si	4.8516	4.1849	0.998	1354.84
3	Sol-Gel NR/10Si	4.8701		0.997	
4	Sol-Gel NR/10Si	4.3527	3.8475		1026.65
5	Sol-Gel NR/10Si	4.8658			
6	Sol-Gel NR/10Si	4.8873	4.3587		1074.20
Avg.		4.6956	4.0516	1.000	1133.69
SD		0.2684	0.2644	0.004	149.32
1	Sol-Gel NR/15Si	4.9244	4.3494	1.029	1136.29
2	Sol-Gel NR/15Si	4.3431	3.7762	1.025	1120.28
3	Sol-Gel NR/15Si	4.9231	4.3571	1.030	1118.50
4	Sol-Gel NR/15Si				
5	Sol-Gel NR/15Si	4.9425	4.2357		1396.75
6	Sol-Gel NR/15Si	4.8869	4.1880		1314.93
Avg.		4.8040	4.1880	1.028	1217.35
SD		0.2584	0.2385	0.003	129.87

1	Sol-Gel NR/20Si	2.5284	2.0501	1.058	921.01
2	Sol-Gel NR/20Si	2.5203	2.0603	1.052	885.77
3	Sol-Gel NR/20Si	2.5254	2.0984	1.055	
4	Sol-Gel NR/20Si	2.5093	2.0417		900.40
5	Sol-Gel NR/20Si	2.5421	2.0739		901.56
6	Sol-Gel NR/20Si	2.5057	2.1044		
Avg.		2.5057	2.0715	1.0550	902.18
SD		0.133	0.0256	0.0030	14.46
1	Sol-Gel NR/25Si	2.5561	2.2664	1.004	550.19
2	Sol-Gel NR/25Si	2.5549	2.2729	1.076	535.57
3	Sol-Gel NR/25Si	2.5519	2.2614	1.069	551.71
4	Sol-Gel NR/25Si	2.5528	2.2876		
5	Sol-Gel NR/25Si	2.5499	2.3032		
6	Sol-Gel NR/25Si	2.5484	2.2435		579.06
Avg.		2.5523	2.2725	1.070	554.13
SD		0.0029	0.0208	0.006	18.14
1	Sol-Gel NR/30Si	2.5339	2.2825	1.094	467.97
2	Sol-Gel NR/30Si	2.5582	2.2027	1.09	
3	Sol-Gel NR/30Si	2.5478	2.3052	1.09	451.59
4	Sol-Gel NR/30Si	2.5526	2.3159		440.61
5	Sol-Gel NR/30Si	2.5141	2.2777		440.05
6	Sol-Gel NR/30Si	2.5588	2.2993		483.05
Avg.		2.5442	2.2806	1.091	456.66
SD		0.0173	0.0407	0.002	18.60
1	Sol-Gel NR/35Si	2.7127	2.2989	1.119	376.06
2	Sol-Gel NR/35Si	2.7043	2.3359	1.12	334.80
3	Sol-Gel NR/35Si	2.6831	2.302	1.114	346.35

4	Sol-Gel NR/35Si	2.6829	2.3755		2.79.37
5	Sol-Gel NR/35Si	2.7335	2.3840		317.63
6	Sol-Gel NR/35Si	2.7182	2.3819		305.63
Avg.		2.7058	2.3464	1.118	326.64
SD		0.0201	0.0396	0.003	33.63
1	Sol-Gel NR/40Si	2.7472	2.4261	1.13	288.97
2	Sol-Gel NR/40Si	2.7174	2.3751	1.125	308.05
3	Sol-Gel NR/40Si	2.7048	2.4126	1.131	262.97
4	Sol-Gel NR/40Si	2.7246	2.3948		293.56
5	Sol-Gel NR/40Si	2.7228	2.4057		285.37
6	Sol-Gel NR/40Si	2.7353	2.4207		283.12
Avg.		2.7254	2.4064	1.129	287.01
SD		0.0146	0.0183	0.003	14.73

มหาวิทยาลัยศิลปากร สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

ตารางที่ 50 แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ NR+TPSi สูตรต่างๆ

No.	Material	before (g)	after (g)	density (g/cm ³)	volume loss (mm ³)
1	NR+40TPSi	2.5998	2.4618	1.117	
2	NR+40TPSi	2.5768	2.3785	1.113	
3	NR+40TPSi	2.5954	2.4318	1.123	148.68
4	NR+40TPSi	2.6075	2.4301		161.22
5	NR+40TPSi	2.5843	2.3936		173.31
6	NR+40TPSi	2.5851	2.4317		139.41
Avg.		2.5915	2.4213	1.118	155.66
SD		0.0114	0.0301	0.005	14.78
1	NR+50TPSi	2.6376	2.3986	1.12	216.43
2	NR+50TPSi	2.6269	2.4197	1.126	187.63

3	NR+50TPSi	2.5905	2.3734	1.119	196.6
4	NR+50TPSi	2.6055	2.3862		198.59
5	NR+50TPSi	2.6481	2.4263		200.85
6	NR+50TPSi	2.6621	2.4421		199.22
Avg.		2.6285	2.4077	1.122	199.89
SD		0.0267	0.0261	0.004	9.36
1	NR+60TPSi	2.785	2.5197	1.174	229.28
2	NR+60TPSi	2.7691	2.5189	1.178	216.23
3	NR+60TPSi	2.8058	2.566	1.174	207.24
4	NR+60TPSi	2.8301	2.5759		219.68
5	NR+60TPSi	2.8277	2.5704		222.36
6	NR+60TPSi	2.8103	2.5997		182
Avg.		3.5201	2.5584	1.175	212.8
SD		0.0239	0.0325	0.002	16.74

ตารางที่ 51 แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ Sol-Gel NR/30Si+TPSi สูตรต่างๆ

No.	Material	before (g)	after (g)	density (g/cm ³)	volume loss (mm ³)
1	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	2.7544	2.4651	1.145	257.77
2	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	2.7335	2.4614	1.141	242.44
3	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	2.7313	2.4577	1.134	243.78
4	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	2.7163	2.4423		244.13
5	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	2.7226	2.49		207.25
6	Sol-Gel NR/30Si+10TPSi	2.7499	2.499		223.55
Avg.		2.7347	2.4693	1.14	236.49
SD		0.0149	0.0212	0.006	18.01
1	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	2.8573	2.5857	1.173	235.12

2	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	2.8562	2.5874	1.174	232.7
3	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	2.8613	2.5949	1.173	230.62
4	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	2.804	2.5397		228.8
5	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	2.8635	2.5773		247.76
6	Sol-Gel NR/30Si+20TPSi	2.8307	2.5699		225.77
Avg.		2.8455	2.5758	1.173	233.46
SD		0.0235	0.0197	0.001	7.7
1	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	2.8692	2.5417	1.196	277.75
2	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	2.906	2.6114	1.197	249.85
3	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	2.8759	2.5715	1.2	258.16
4	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	2.8568	2.5165		288.61
5	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	2.8909	2.5827		261.39
6	Sol-Gel NR/30Si+30TPSi	2.9068	2.6006		259.69
Avg.		2.8843	2.5707	1.198	265.91
SD		0.0204	0.036	0.002	14.37

ตารางที่ 52 แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ Sol-Gel NR/30Si+FA สูตรต่างๆ

No.	Material	before (g)	after (g)	density (g/cm ³)	volume loss (mm ³)
1	Sol-Gel NR/30Si+10FA	2.9792	2.5848	1.245	321.69
2	Sol-Gel NR/30Si+10FA	2.9599	2.5442	1.249	339.06
3	Sol-Gel NR/30Si+10FA	2.935	2.5927	1.242	279.19
4	Sol-Gel NR/30Si+10FA	2.9771	2.5775		325.93
5	Sol-Gel NR/30Si+10FA	2.9975	2.6004		323.89
6	Sol-Gel NR/30Si+10FA	2.9938	2.5869		331.88
Avg.		2.9738	2.5811	1.245	320.27
SD		0.0232	0.0196	0.004	21.08

1	Sol-Gel NR/30Si+20FA	3.2798	2.8368	1.359	330.46
2	Sol-Gel NR/30Si+20FA	3.3164	2.8892	1.362	318.67
3	Sol-Gel NR/30Si+20FA	3.2911	2.8158	1.364	354.55
4	Sol-Gel NR/30Si+20FA	3.2965	2.8497		333.29
5	Sol-Gel NR/30Si+20FA	3.3072	2.8441		345.45
6	Sol-Gel NR/30Si+20FA	3.2553	2.8052		335.75
Avg.		3.2911	2.8401	1.362	336.36
SD		0.0216	0.0295	0.003	12.42
1	Sol-Gel NR/30Si+30FA	3.5269	3.0324	1.439	346.64
2	Sol-Gel NR/30Si+30FA	3.4759	2.9267	1.452	348.99
3	Sol-Gel NR/30Si+30FA	3.5324	2.992	1.456	378.82
4	Sol-Gel NR/30Si+30FA	3.5239	3.0079		361.71
5	Sol-Gel NR/30Si+30FA	3.5115	2.9857		368.58
6	Sol-Gel NR/30Si+30FA	3.5509	3.0288		365.99
Avg.		3.5203	2.9956	1.449	367.79
SD		0.0253	0.0386	0.009	13.46

ตารางที่ 53 แสดงข้อมูลการทดสอบ Abrasion testing ของ Sol-Gel NR/30Si+TFA สูตรต่างๆ

No.	Material	before (g)	after (g)	density (g/cm ³)	volume loss (mm ³)
1	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	2.9938	2.5725	1.247	343.17
2	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	2.9842	2.5705	1.247	336.98
3	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	2.9848	2.5556	1.247	349.6
4	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	3.0017	2.6381		296.17
5	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	2.9927	2.6193		304.15
6	Sol-Gel NR/30Si+10TFA	3.0139	2.6551		292.26
Avg.		2.9952	2.6019	1.247	320.39

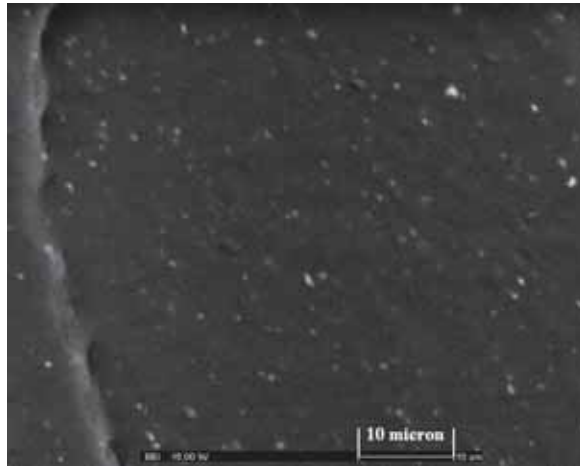
SD		0.0112	0.0411	0	25.65
1	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	3.2885	2.8385	1.361	335.52
2	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	3.2886	2.8047	1.363	360.79
3	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	3.2593	2.8281	1.363	321.5
4	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	3.2456	2.8103		324.56
5	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	3.2999	2.8363		345.66
6	Sol-Gel NR/30Si+20TFA	3.2869	2.8335		338.05
Avg.		3.2781	2.8252	1.362	337.68
SD		0.0209	0.0143	0.001	14.4
1	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	3.4943	3.0382	1.449	319.06
2	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	3.5355	3.0031	1.454	372.44
3	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	3.5256	3.0574	1.453	327.53
4	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	3.5186	2.9731		381.6
5	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	3.5077	3.0158		344.11
6	Sol-Gel NR/30Si+30TFA	3.5201	3.0491		329.49
Avg.		3.5201	3.0228	1.452	345.71
SD		0.0144	0.0317	0.003	25.73

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบ SEM ของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาแบบตกตะกอน ใ้ลอย และซิลิกาจาก

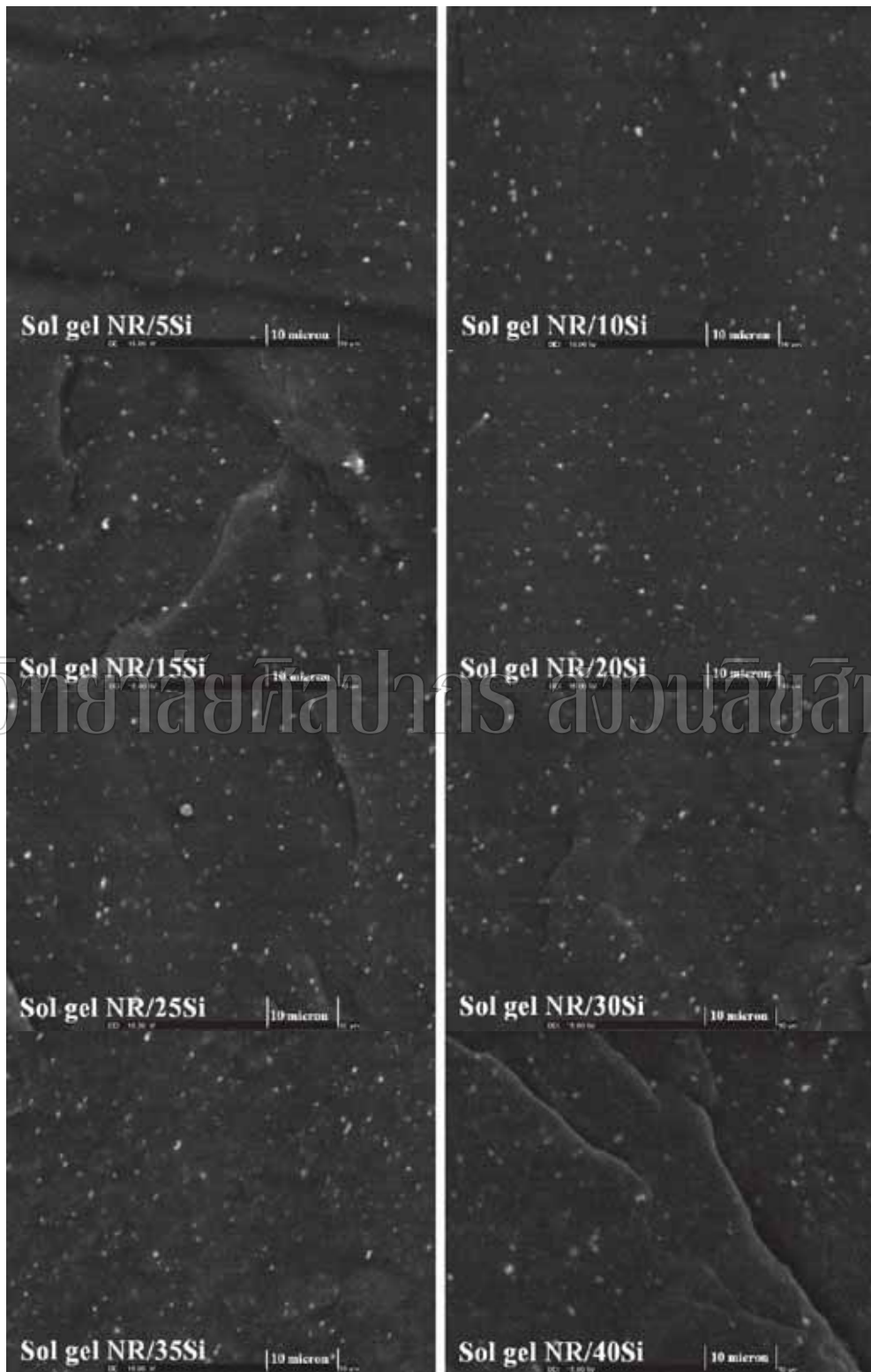
เถ้าแกลบโดยกระบวนการโซลเจล ในสูตรต่างๆ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

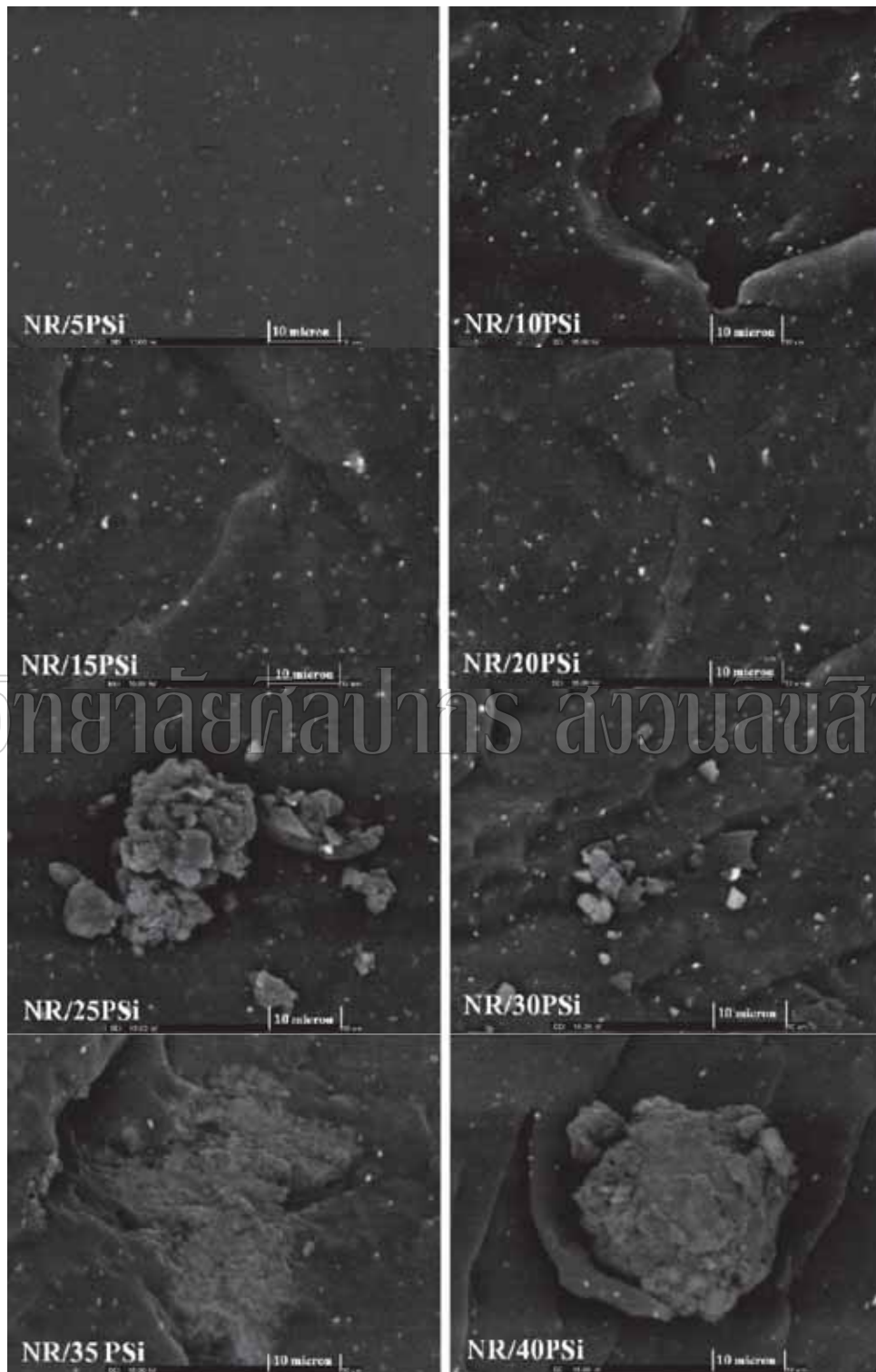


ภาพที่ 77 ภาพ SEM ของ NR ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

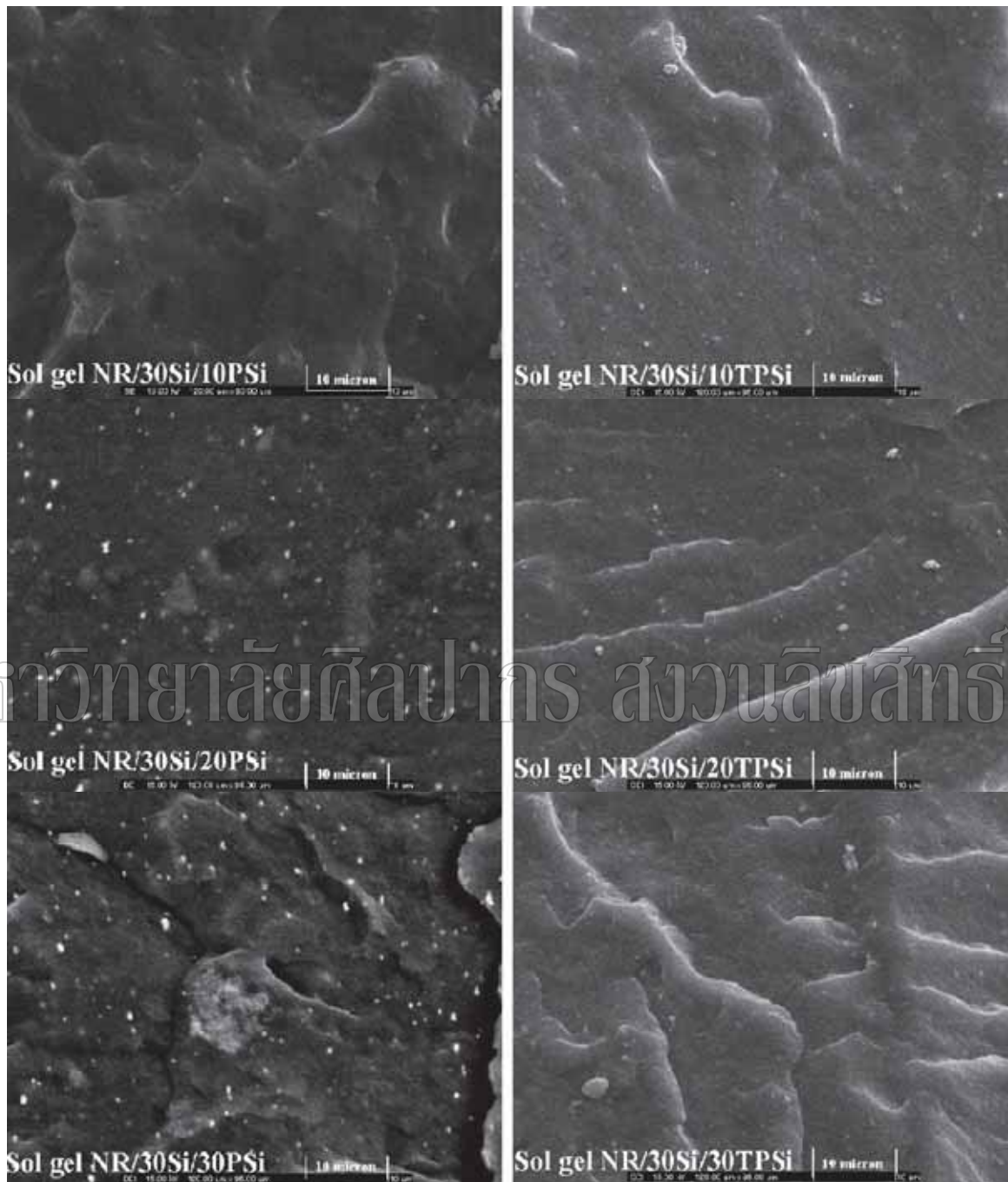
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



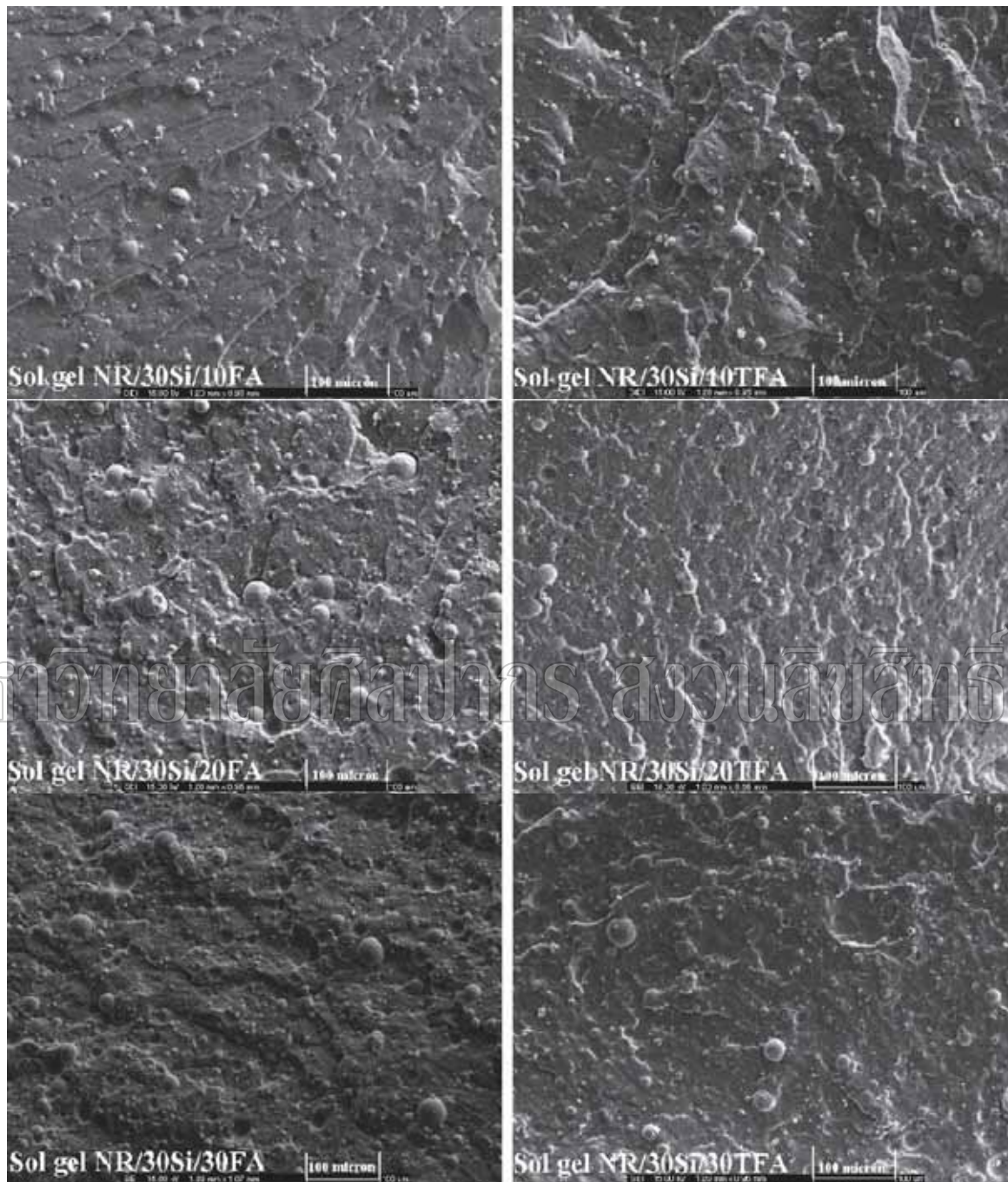
ภาพที่ 78 ภาพ SEM ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



ภาพที่ 79 ภาพ SEM ของ NR/PSi สูตรต่างๆ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



ภาพที่ 80 ภาพ SEM ของ Sol-Gel NR/30Si/PSi และ Sol-Gel NR/30Si/TPSi ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาพที่ 81 ภาพ SEM ของ Sol-Gel NR/30Si/FA และ Sol-Gel NR/30Si/TFA ที่กำลังขยาย 100 เท่า

ภาคผนวก ซ

ข้อมูลการทดสอบการบวมตัว (Swelling) ของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาแบบตกตะกอน

ถั่วลอย และซิลิกาจากถั่วแกลบโดยกระบวนการโซลเจล ในสูตรต่างๆ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางที่ 54 แสดงข้อมูลการทดสอบ Swelling ของ NR/PSi สูตรต่างๆ

NR		NR/5PSi		NR/10PSi		NR/15PSi	
min	(wt-w ₀)/w ₀	min	(wt-w ₀)/w ₀	min	(wt-w ₀)/w ₀	min	(wt-w ₀)/w ₀
0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.8602243	15	0.7230738	15	0.738691	15	0.7425528
30	1.2836497	30	1.0735745	30	1.09895	30	1.1335569
45	1.6184211	45	1.416309	45	1.44689	45	1.442099
60	1.9262295	60	1.702432	60	1.706987	60	1.7289406
75	2.1766609	75	1.9484979	75	1.941438	75	1.9648846
90	2.3813632	90	2.1426528	90	2.129443	90	2.1799171
105	2.5526316	105	2.2987942	105	2.283724	105	2.3349773
120	2.6716997	120	2.4422645	120	2.434774	120	2.4815545
135	2.8099655	135	2.5608011	135	2.550889	135	2.6042612
150	2.8962468	150	2.6454118	150	2.637722	150	2.6977708
165	2.9758412	165	2.729205	165	2.711834	165	2.783192
180	3.0429249	180	2.806867	180	2.800687	180	2.8532255
210	3.1490509	210	2.9123237	210	2.911349	210	2.9711975
240	3.1982312	240	2.9742489	240	2.985258	240	3.058986
270	3.2791199	270	3.0609033	270	3.074111	270	3.1163938

300	3.3157895	300	3.1144492	300	3.109653	300	3.1467745
330	3.3375755	330	3.1295729	330	3.147011	330	3.2398895
360	3.4078947	360	3.1563458	360	3.19891	360	3.2493588
390	3.9374461	390	3.1720826	390	3.200525	390	3.2817124
420	3.3884814	420	3.1972205	420	3.237076	420	3.3065693
480	3.4057377	480	3.2141835	480	3.255654	480	3.3268889
540	3.4104832	540	3.2217454	540	3.276454	540	3.3373446
600	3.4130716	600	3.2282853	600	3.278069	600	3.3479976
660	3.4137187	660	3.2321684	660	3.279887	660	3.3821267
720	3.4143658	720	3.2346209	720	3.282916	720	3.3837049
780	3.4147972	780	3.2358471	780	3.284935	780	3.3850858
NR/20PSi		NR/25PSi		NR/30PSi		NR/35PSi	
min	(wt-w0)/w0	min	(wt-w0)/w0	min	(wt-w0)/w0	min	(wt-w0)/w0
0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.7028571	15	0.6752022	15	0.60521	15	0.6370329
30	1.1064039	30	1.0506353	30	0.966428	30	0.9690779
45	1.4774384	45	1.4004621	45	1.293157	45	1.2886067
60	1.7592118	60	1.6842511	60	1.571638	60	1.5554942
75	2.0066995	75	1.9303042	75	1.831591	75	1.7769188

90	2.213202	90	2.125722	90	1.996698	90	1.9644763
105	2.3907389	105	2.290335	105	2.162906	105	2.1225842
120	2.5361576	120	2.4489796	120	2.303064	120	2.2536352
135	2.6772414	135	2.5752792	135	2.427995	135	2.3692251
150	2.773399	150	2.6719291	150	2.531462	150	2.466409
165	2.8638424	165	2.7660762	165	2.60998	165	2.5440825
180	2.9418719	180	2.8530997	180	2.693451	180	2.6143935
210	3.0636453	210	2.9805545	210	2.830306	210	2.7310878
240	3.1635468	240	3.0739315	240	2.937993	240	2.795877
270	3.2366502	270	3.1659607	270	3.033572	270	2.8761274
300	3.2835468	300	3.2258375	300	3.084205	300	2.9361311
330	3.3255172	330	3.2676165	330	3.133003	330	2.9554574
360	3.3590148	360	3.2941856	360	3.178132	360	2.9826983
390	3.3907389	390	3.3276858	390	3.192442	390	3.0127002
420	3.4124138	420	3.3561802	420	3.226747	420	3.0351555
480	3.4374384	480	3.3941086	480	3.263438	480	3.0690226
540	3.4644335	540	3.4100886	540	3.271143	540	3.0752807
600	3.4673892	600	3.4166346	600	3.297744	600	3.082459
660	3.4691626	660	3.432037	660	3.305632	660	3.0876127

720	3.4705419	720	3.4437813	720	3.307467	720	3.091478
780	3.4715271	780	3.4505198	780	3.309484	780	3.0936867
NR/40PSi							
min	(wt-wo)/wo						
0	0						
15	0.495128						
30	0.792003						
45	1.056116						
60	1.298891						
75	1.500672						
90	1.673555						
105	1.814348						
120	1.94254						
135	2.047715						
150	2.142305						
165	2.212198						
180	2.28545						
210	2.40793						
240	2.504704						

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

270	2.573589
300	2.633569
330	2.677755
360	2.719926
390	2.736559
420	2.758569
480	2.799563
540	2.789315
600	2.812836
660	2.824093
720	2.824261
780	2.824429

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางที่ 55 แสดงข้อมูลการทดสอบ Swelling ของ Sol-Gel NR/Si สูตรต่างๆ

Sol-gel NR/5Si		Sol-gel NR/10Si		Sol-gel NR/15Si		Sol-gel NR/20Si	
min	(wt-w0)/w0	min	(wt-w0)/w0	min	(wt-w0)/w0	min	(wt-w0)/w0
0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.6572409	15	0.776978	15	0.963939	15	0.9045301
30	0.9882314	30	1.162289	30	1.3447593	30	1.2910895
45	1.2932331	45	1.426301	45	1.77234	45	1.6815799

60	1.5619483	60	1.75824	60	2.1042203	60	2.036316
75	1.7958483	75	2.043165	75	2.438082	75	2.3266567
90	2.0217391	90	2.290781	90	2.7057658	90	2.6048297
105	2.2186989	105	2.505772	105	2.9340202	105	2.8435043
120	2.3935927	120	2.700519	120	3.1351298	120	3.034444
135	2.566525	135	2.889242	135	3.3071131	135	3.2283789
150	2.7018634	150	3.03045	150	3.4794928	150	3.3944216
165	2.8396535	165	3.186214	165	3.6231425	165	3.5499813
180	2.9561948	180	3.326585	180	3.7543095	180	3.7699364
210	3.1696633	210	3.533713	210	3.9716663	210	3.9350431
240	3.3479895	240	3.735988	240	4.1565286	240	4.115687
270	3.4900294	270	3.942111	270	4.3077075	270	4.2916511
300	3.6319059	300	4.079471	300	4.4188627	300	4.4258705
330	3.7481203	330	4.219843	330	4.5149594	330	4.536316
360	3.8345865	360	4.332608	360	4.6154151	360	4.6351554
390	3.9168029	390	4.417099	390	4.6784228	390	4.7250094
420	3.9826741	420	4.508282	420	4.724787	420	4.7892175
480	4.0895718	480	4.665886	480	4.8377254	480	4.884313
540	4.1884603	540	4.769282	540	4.8880523	540	4.9812804

600	4.2428898	600	4.86515	600	4.9367941	600	5.0144141
660	4.2737823	660	4.932575	660	4.9395681	660	5.0325721
720	4.3213468	720	4.961017	720	4.9746384	720	5.0591539
780	4.3551814	780	4.967877	780	4.989895	780	5.0720704
Sol-gel NR/25Si		Sol-gel NR/30Si		Sol-gel NR/35Si		Sol-gel NR/40Si	
min	(wt-w0)/w0	min	(wt-w0)/w0	min	(wt-w0)/w0	min	(wt-w0)/w0
0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.5153634	15	0.5651	15	0.5282451	15	0.438914
30	0.8967801	30	0.86675	30	0.8406233	30	0.7323613
45	1.2406624	45	1.191356	45	1.1368868	45	1.0224568
60	1.5637534	60	1.501973	60	1.4023375	60	1.2781967
75	1.8329347	75	1.741033	75	1.6332566	75	1.5126529
90	2.05023	90	1.966284	90	1.8314149	90	1.728004
105	2.2662374	105	2.160689	105	2.0122189	105	1.9029663
120	2.4413983	120	2.32604	120	2.1615017	120	2.0656947
135	2.5974241	135	2.477582	135	2.2962635	135	2.205631
150	2.7379945	150	2.608501	150	2.4049938	150	2.3226077
165	2.8566697	165	2.712339	165	2.5151408	165	2.3958438
180	2.9735051	180	2.818329	180	2.6042146	180	2.5250545

210	3.150138	210	2.996055	210	2.7641225	210	2.7005195
240	3.2851886	240	3.126435	240	2.8701966	240	2.8092844
270	3.424471	270	3.235115	270	2.9566141	270	2.9386626
300	3.5080037	300	3.299677	300	3.0265628	300	3.0068711
330	3.6088316	330	3.390423	330	3.0896051	330	3.0517848
360	3.6855566	360	3.458034	360	3.1365327	360	3.0992123
390	3.7291628	390	3.506098	390	3.1804498	390	3.1466399
420	3.7792088	420	3.540172	420	3.2213565	420	3.1977543
480	3.8198712	480	3.60043	480	3.2585444	480	3.2475281
540	3.8701012	540	3.638809	540	3.2797946	540	3.2652924
600	3.924747	600	3.661047	600	3.2735966	600	3.3102061
660	3.9378105	660	3.678264	660	3.3145033	660	3.3338361
720	3.949402	720	3.658357	720	3.3286701	720	3.3448969
780	3.9729531	780	3.708034	780	3.3330972	780	3.3586392

ตารางที่ 56 แสดงข้อมูลการทดสอบ Swelling ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ

NR/30TPSi		NR/40TPSi		NR/50TPSi		NR/60TPSi	
min	(wt-w0)/w0	min	(wt-w0)/w0	min	(wt-w0)/w0	min	(wt-w0)/w0
0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.135876666	5	0.298763	5	0.287497	5	0.275423

10	0.257381761	10	0.438629	10	0.447632	10	0.328743
15	0.365560491	15	0.513016	15	0.479957	15	0.401551
20	0.465116279	20	0.604328	20	0.574234	20	0.547632
25	0.55709433	25	0.787327	25	0.694329	25	0.594231
30	0.639534884	30	0.815654	30	0.791593	30	0.661328
35	0.721060883	35	0.898784	35	0.856873	35	0.727651
40	0.806898354	40	0.902134	40	0.901415	40	0.809863
45	0.876143193	45	1.082345	45	1.061015	45	0.878456
50	0.945649334	50	1.138763	50	1.128754	50	0.935721
55	1.023517115	55	1.238962	55	1.258733	55	0.983412
60	1.090932846	60	1.307951	60	1.272437	60	1.075691
75	1.292461458	75	1.48787	75	1.446435	75	1.239211
90	1.407825974	90	1.637684	90	1.582299	90	1.348449
105	1.510517377	105	1.74907	105	1.695814	105	1.438638
120	1.620394565	120	1.848946	120	1.79248	120	1.513486
135	1.717859943	135	1.918895	135	1.860057	135	1.580411
150	1.825450745	150	1.983885	150	1.918233	150	1.630647
165	1.943428273	165	2.037542	165	2.006385	165	1.674646
180	2.040305723	180	2.081282	180	2.002128	180	1.699764

210	2.310883199	210	2.156366	210	2.072366	210	1.763992
240	2.398288477	240	2.2187	240	2.122384	240	1.805125
270	2.489417298	270	2.242784	270	2.144732	270	1.839177
300	2.578912987	300	2.271294	300	2.165662	300	1.848449
360	2.686438464	360	2.318576	360	2.203264	360	1.878456
420	2.820747322	420	2.326014	420	2.223306	420	1.888233
480	2.91945388	480	2.336108	480	2.225967	480	1.911328
540	2.977842958	540	2.35946908	540	2.226835127	540	1.914003859
600	2.978140742	600	2.36418802	600	2.227703593	600	1.916683465
660	2.978438556	660	2.36891639	660	2.228572397	660	1.919366821
720	2.981416995	720	2.37365423	720	2.22944154	720	1.922053935
780	2.990361246	780	2.37840154	780	2.230311023	780	1.924744811
840	3.036974131	840	2.38548	840	2.231382	840	1.925682

ตารางที่ 57 แสดงข้อมูลการทดสอบ Swelling ของ Sol-Gel NR/30Si+TPSi สูตรต่างๆ

NR/30Sol-GelSi		NR/30Sol-GelSi/10TPSi		NR/30Sol-GelSi/20TPSi		NR/30Sol-GelSi/30TPSi	
mi	(wt-w0)/w0	mi	(wt-w0)/w0	mi	(wt-w0)/w0	mi	(wt-w0)/w0
0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.59479379	15	0.4122169	15	0.393396	15	0.266414

30	0.930845225	30	0.6752231	30	0.550823	30	0.403518
45	1.263760389	45	0.9122855	45	0.689768	45	0.51384
60	1.546808844	60	1.1419355	60	0.846969	60	0.623164
75	1.819507605	75	1.3369938	75	0.979378	75	0.730489
90	2.049082641	90	1.5257378	90	1.124408	90	0.827121
105	2.263289948	105	1.6620453	105	1.245887	105	0.931548
120	2.455700172	120	1.8323953	120	1.361393	120	1.018587
135	2.618472636	135	1.9658202	135	1.466757	135	1.103428
150	2.747373373	150	2.0771448	150	1.557471	150	1.188468
165	2.906539125	165	2.1949211	165	1.652017	165	1.266913
180	3.027442371	180	2.2738504	180	1.72842	180	1.333467
195	3.116826094	195	2.353466	195	1.815754	195	1.404117
210	3.252156186	210	2.431709	210	1.885283	210	1.463775
225	3.347812451	225	2.5032258	225	1.932838	225	1.519237
240	3.449114003	240	2.5670556	240	1.991323	240	1.572699
255	3.529716167	255	2.6142759	255	2.056795	255	1.58579
270	3.597773248	270	2.6978723	270	2.088235	270	1.653143
285	3.668025717	285	2.7364447	285	2.147059	285	1.689118
300	3.737807747	300	2.7839396	300	2.181204	300	1.72869

330	3.872510585	330	2.8513384	330	2.273158	330	1.79984
360	3.968480477	360	2.9126973	360	2.330741	360	1.851304
390	4.053316607	390	2.9691146	390	2.3881	390	1.901969
420	4.134859652	420	3.0205903	420	2.450755	420	1.945738
450	4.201191783	450	3.0749485	450	2.512508	450	1.981913
480	4.313574826	480	3.0955388	480	2.579146	480	2.012891
510	4.364683498	510	3.1283459	510	2.600518	510	2.087649
540	4.414041085	540	3.1482498	540	2.638721	540	2.119874
570	4.463396723	570	3.1652164	570	2.651282	570	2.159873
600	4.494215632	600	3.1847212	600	2.671232	600	2.173278
660	4.525671821	660	3.23173221	660	2.705414	660	2.203748
720	4.531297985	720	3.2568347	720	2.738751	720	2.217656
780	4.537827642	780	3.327385	780	2.788556	780	2.258368
840	4.538827642	840	3.345032	840	2.803126	840	2.295693

ตารางที่ 58 แสดงข้อมูลการทดสอบ Swelling ของ Sol-Gel 30Si/NR+FA สูตรต่างๆ

Sol-Gel 30Si/NR+10FA		Sol-Gel 30Si/NR+20FA		Sol-Gel 30Si/NR+30FA	
min	(wt-wo)/wo	min	(wt-wo)/wo	min	(wt-wo)/wo
0	0	0	0	0	0
15	0.407501443	15	0.361819435	15	0.353902602

30	0.62677438	30	0.556742476	30	0.551256393
45	0.82135026	45	0.74339536	45	0.735379142
60	1.013848817	60	0.912589019	60	0.917500556
75	1.188690133	75	1.069836894	75	1.052368245
90	1.357299481	90	1.215253848	90	1.188681343
105	1.504558569	105	1.337353549	105	1.313542362
120	1.641084824	120	1.450149322	120	1.412941961
135	1.756837853	135	1.550769584	135	1.51167445
150	1.882054241	150	2.222490237	150	1.593284412
165	1.993075591	165	1.73822651	165	1.677006893
180	2.085054818	180	1.788996095	195	1.836780076
195	2.192267744	195	1.794279807	225	1.950411385
210	2.251240623	210	1.938548128	255	2.0496998
225	2.331102135	225	2.00206754	285	2.118968201
240	2.4050779	240	2.076154376	315	2.19179453
255	2.497980381	255	2.134619802	345	2.265955081
270	2.536641662	270	2.164599127	375	2.31265288
285	2.480553953	285	2.214909258	405	2.36957972
300	2.625851125	300	2.229841489	465	2.45474761

315	2.669936526	315	2.272915231	525	2.509450745
330	2.72186959	330	2.307489088	585	2.573159884
345	2.764223889	345	2.347920974	645	2.61151879
360	2.817541835	360	2.380427292	705	2.646542139
375	2.85966532	375	2.413278199	765	2.639092728
390	2.886901327	390	2.440730531		
405	2.935372187	405	2.470594992		
420	2.972648586	420	2.501148633		
435	3.009232545	435	2.51803354		
450	3.03000577	450	2.544566965		
465	3.062896711	465	2.558120836		
480	3.085631852	480	2.582816448		
495	3.111598384	495	2.5936136		
510	3.139757646	510	2.614403859		
525	3.165954991	525	2.638869745		
540	3.183496826	540	2.646795314		
555	3.196191575	555	2.672869286		
570	3.237507213	570	2.692855502		
585	3.253317946	585	2.701355387		

มหาวิทยาลัยศิลปากร - สงวนลิขสิทธิ์

600	3.277899596	600	2.72122674
645	3.295895345	645	2.74120945
705	3.315987865	705	2.761129747
765	3.337839849	765	2.789857883

ตารางที่ 59 แสดงข้อมูลการทดสอบ Swelling ของ Sol-Gel NR/30Si+TFA สูตรต่างๆ

Sol-Gel 30Si/NR+10TFA		Sol-Gel 30Si/NR+20TFA		Sol-Gel 30Si/NR+30TFA	
min	(wt-wo)/wo	min	(wt-wo)/wo	min	(wt-wo)/wo
0	0	0	0	0	0
15	0.332413031	15	0.316790648	15	0.298604758
30	0.559801215	30	0.503294368	30	0.449565416
45	0.724351187	45	0.639213603	45	0.585544373
60	0.903920486	60	0.794686504	60	0.726326624
75	1.040309221	75	0.909032944	75	0.82605215
90	1.179348426	90	1.025717322	90	0.93446935
105	1.313307565	105	1.141870351	105	1.032250686
120	1.445168415	120	1.251222104	120	1.13689387
135	1.550414136	135	1.339532412	135	1.199336688
150	1.647266703	150	1.408289054	150	1.252172919
165	1.732413031	165	1.480340064	165	1.304894785

195	1.914853672	195	1.610733262	195	1.393641354
225	2.04240751	225	1.69936238	225	1.457113449
255	2.159580342	255	1.780233794	255	1.506861848
285	2.251242408	285	1.840595112	285	1.536253431
315	2.343125345	315	1.901594049	315	1.575937786
345	2.426173385	345	1.943783209	345	1.602584629
375	2.475648813	375	1.984590861	375	1.623513266
405	2.546327996	405	2.024654623	405	1.645928637
465	2.64240751	465	2.079914984	465	1.675434584
525	2.719933738	525	2.134006376	525	1.697964318
585	2.783986748	585	2.163761955	585	1.714547118
645	2.825510768	645	2.18629118	645	1.729757548
705	2.864715627	705	2.207863974	705	1.742566331
765	2.895196024	765	2.226248672	765	1.74862763

ภาคผนวก ฅ
ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติม

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

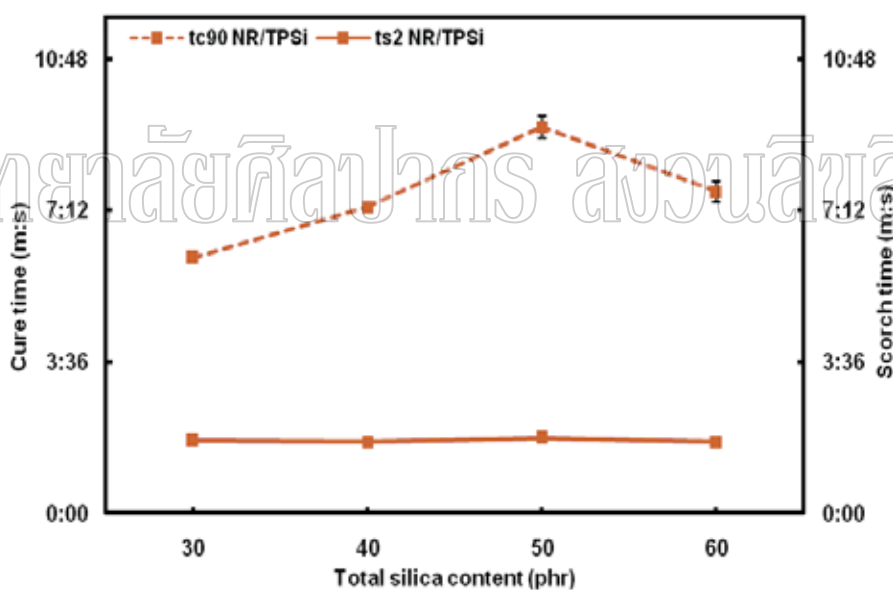
ในการทดลองเพิ่มเติมนั้นได้ทำการศึกษา NR/30TPSi โดยยางธรรมชาติที่ใช้เป็นยางแท่ง (ต่างจากในภาคผนวก ก ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ) เพื่อศึกษาถึงผลของลำดับในการใส่ TPSi

1. ข้อมูลตารางและกราฟศึกษา Cure characteristic ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer

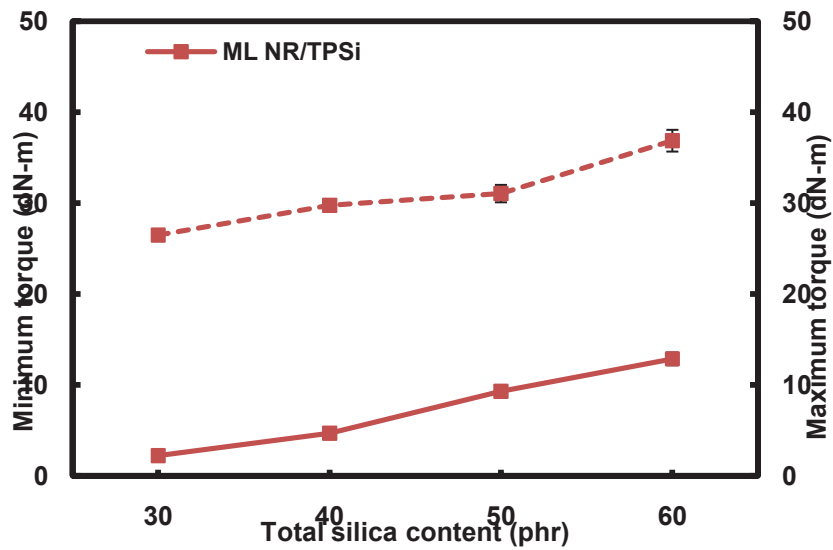
ตารางที่ 60 แสดงข้อมูลการทดสอบ MDR ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ

No.	Material	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	MH (dN-m)	ML (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
1	NR/30TPSi	1:43	6:04	26.75	2.27	24.49
2	NR/30TPSi	1:43	6:04	26.58	2.27	24.31
3	NR/30TPSi	1:43	6:05	26.58	2.16	24.42
4	NR/30TPSi	1:44	6:04	26.33	2.2	24.13
5	NR/30TPSi	1:45	6:06	26.14	2.18	23.97
Avg.		26.476	2.216	24.264	1:43	6:04
SD		0.2402706	0.0512835	0.2132604	0.0006211	0.0006211
1	NR/40TPSi	1:39	7:14	30.21	4.77	25.45
2	NR/40TPSi	1:41	7:19	29.56	4.58	24.98
3	NR/40TPSi	1:41	7:14	29.45	4.64	24.81
4	NR/40TPSi	1:42	7:17	29.9	4.73	25.17
5	NR/40TPSi	1:43	7:18	29.68	4.65	25.04
Avg.		29.76	4.674	25.09	1:41	7:16
SD		0.3019105	0.0756967	0.2392697	0.0010300	0.0015987
1	NR/50TPSi	1:52	9:08	30.68	9.3	21.39
2	NR/50TPSi	1:43	9:11	31.13	9.43	21.69
3	NR/50TPSi	1:44	9:14	32.2	9.68	22.53
4	NR/50TPSi	1:49	9:11	29.81	8.78	21.04
5	NR/50TPSi	1:45	9:09	31.46	9.3	22.16
Avg.		31.056	9.298	21.762	1:46	9:10

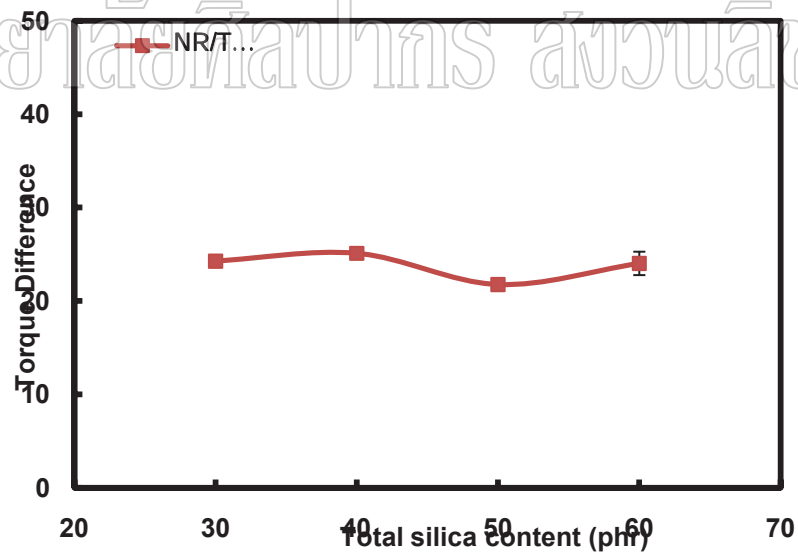
SD		0.9580488	0.3292026	0.6534602	0.0019531	0.0107821
1	NR/60TPSi	1:40	7:31	37.02	12.79	24.23
2	NR/60TPSi	1:42	7:30	37.66	13.09	24.57
3	NR/60TPSi	1:37	7:25	35.79	11.73	24.07
4	NR/60TPSi	1:42	7:47	38.35	13.1	25.25
5	NR/60TPSi	1:44	8:01	35.56	13.64	21.92
Avg.		36.876	12.87	24.008	1:41	7:38
SD		1.1957549	0.7071421	1.2521261	0.0018373	0.0103516



ภาพที่ 82 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกอช (Scorch time) และเวลาในการคงรูปยาง (Cure time) กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content)



ภาพที่ 83 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดต่ำสุด (ML) และค่าแรงบิดสูงสุด (MH) กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content)



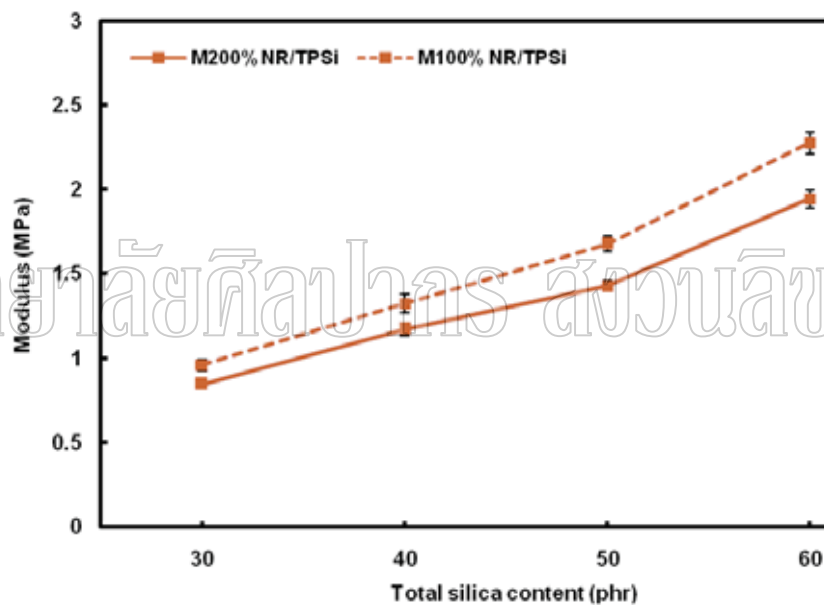
ภาพที่ 84 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างแรงบิด (ΔS) กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content)

2. ข้อมูลตารางการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal testing machine

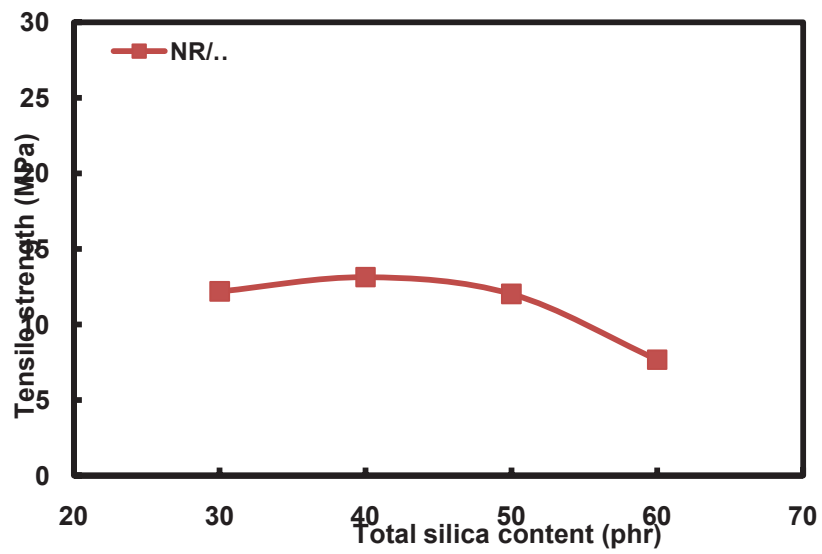
ตารางที่ 61 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tensile properties ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ

No.	Material	Modulus 100% (MPa)	Modulus 200% (MPa)	Max stress (MPa)	Break strain (%)
1	NR/30TPSi	0.89985	0.81301	12.0597	838.756
2	NR/30TPSi	0.94872	0.83347	12.2646	836.318
3	NR/30TPSi	0.97	0.86396	12.2505	827.814
4	NR/30TPSi	0.9752	0.84768	12.2822	837.948
5	NR/30TPSi	0.98478	0.85196	12.1158	839.296
Avg.		0.95571	0.842016	12.19456	836.0264
SD		0.033905489	0.01953769	0.100132427	4.726576224
1	NR/40TPSi	1.33053	1.17127	13.0766	788.604
2	NR/40TPSi	1.26152	1.13563	12.4594	764.5
3	NR/40TPSi	1.31318	1.161	13.3109	787.092
4	NR/40TPSi	1.40763	1.23165	13.8199	794.494
5	NR/40TPSi	1.2962	1.1424	13.0281	786.142
Avg.		1.321812	1.16839	13.13898	784.1664
SD		0.054328501	0.038122932	0.492753272	11.4627771
1	NR/50TPSi	1.67434	1.4386	11.9917	705.098
2	NR/50TPSi	1.63708	1.40697	12.6334	730.308
3	NR/50TPSi	1.70318	1.44874	12.3687	731.25
4	NR/50TPSi	1.7362	1.45471	11.8107	709.478
5	NR/50TPSi	1.62394	1.37792	11.334	686.15
Avg.		1.674948	1.425388	12.0277	712.4568
SD		0.046327704	0.032295844	0.503179436	18.88731466
1	NR/60TPSi	2.37044	2.01994	8.15051	416.896

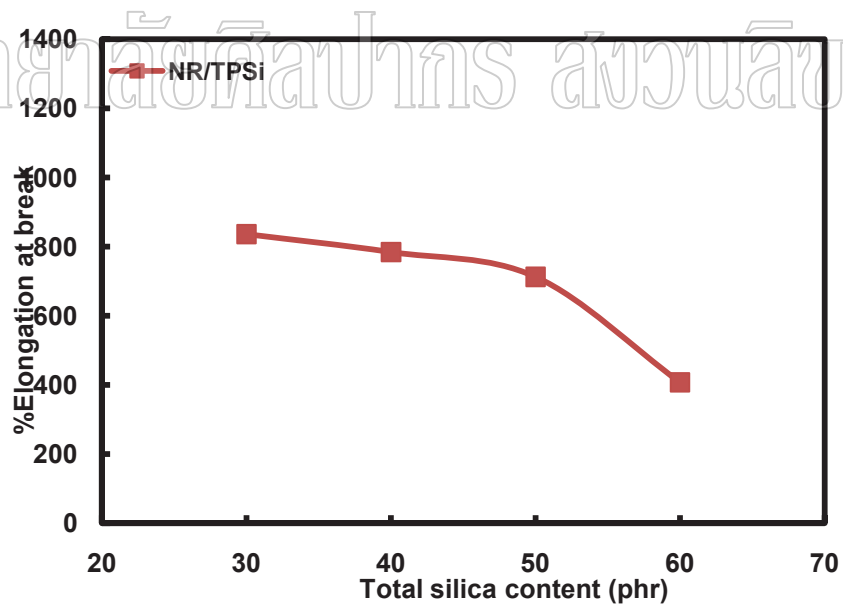
2	NR/60TPSi	2.21946	1.89542	7.33887	397.084
3	NR/60TPSi	2.30172	1.97404	7.69777	405.488
4	NR/60TPSi	2.22691	1.90446	7.51407	405.232
5	NR/60TPSi	2.25186	1.921	7.68871	411.898
Avg.		2.274078	1.942972	7.677986	407.3196
SD		0.062752093	0.052717239	0.302346431	7.502491639



ภาพที่ 85 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสตั้งแต่ 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content)



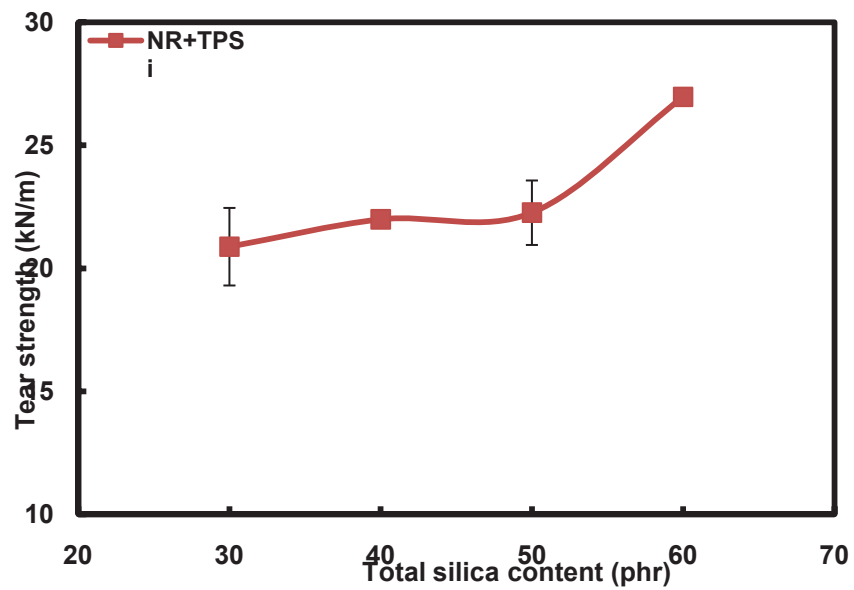
ภาพที่ 86 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงยืด กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content)



ภาพที่ 87 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content)

ตารางที่ 62 แสดงข้อมูลการทดสอบ Tear testing ของ NR/TPSi สูตรต่างๆ

No.	Material	tear strength(kN/m)
1	NR/30TPSi	21.8511
2	NR/30TPSi	19.0644
3	NR/30TPSi	21.7308
Avg.		20.8821
SD		1.575323138
1	NR/40TPSi	21.8245
2	NR/40TPSi	21.9416
3	NR/40TPSi	22.2148
Avg.		21.99363333
SD		0.200285105
1	NR/50TPSi	23.4294
2	NR/50TPSi	22.5155
3	NR/50TPSi	20.8453
Avg.		22.2634
SD		1.310365983
1	NR/60TPSi	26.7763
2	NR/60TPSi	27.0312
3	NR/60TPSi	27.0905
Avg.		26.966
SD		0.166939181



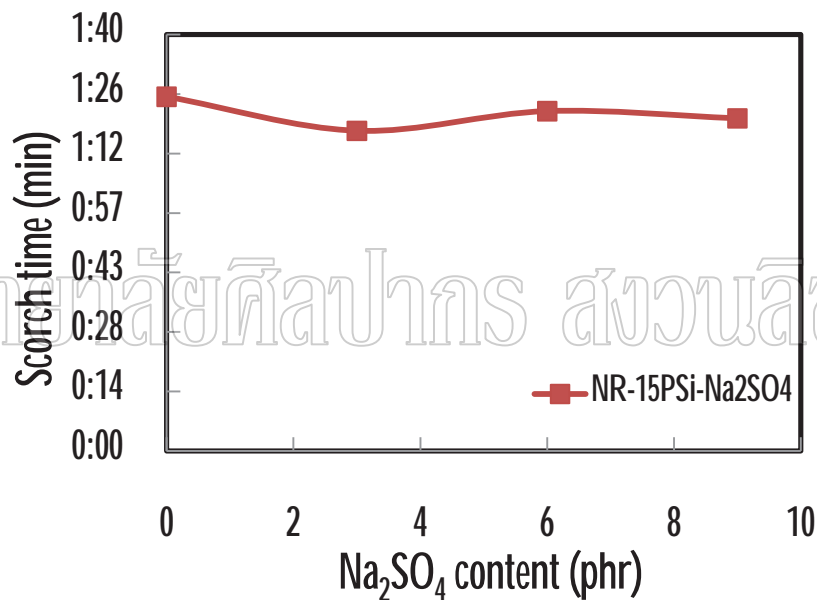
ภาพที่ 88 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด กับปริมาณซิลิกาโดยรวม (Total silica content)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

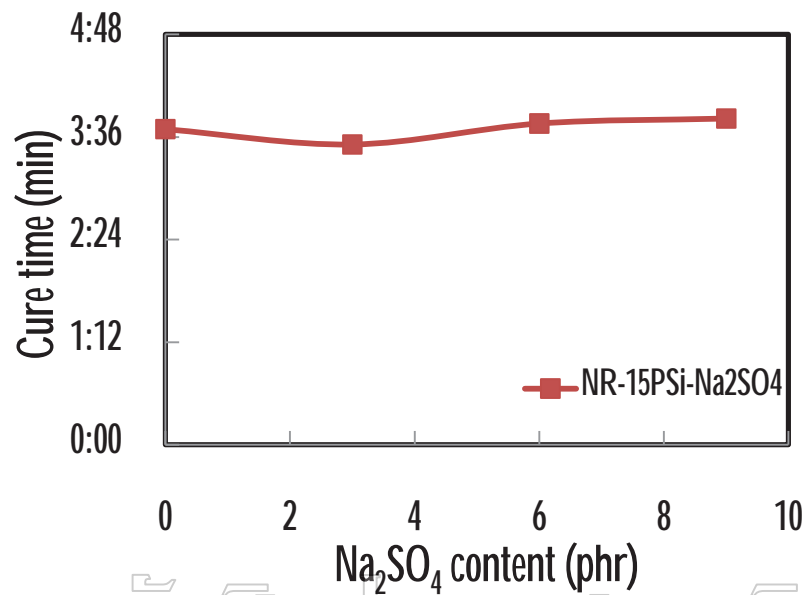
ในการทดลองเพิ่มเติมนั้นได้ทำการศึกษา NR/15PSi โดยยางธรรมชาติที่ใช้เป็นยางแท่ง (ต่างจากในภาคผนวก ก ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ) เพื่อศึกษาถึงผลของการใส่ Sodium sulfate

ข้อมูลกราฟศึกษา Cure characteristic ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer

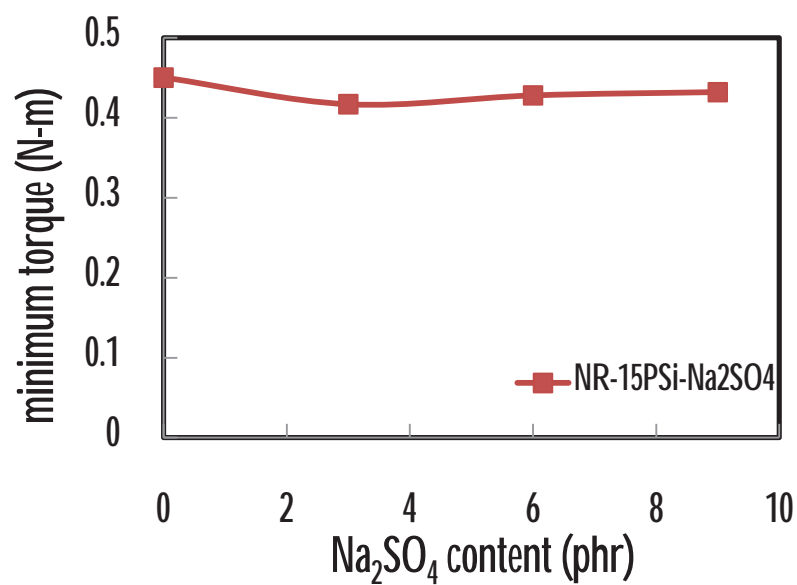
การเติมเกลือ Sodium sulfate ไม่ส่งผลกระทบต่อ Cure characteristic ของยางวัลคาไนเซต แม้ว่าปริมาณของเกลือ Sodium sulfate จะสูงขึ้น ฉะนั้นยางในระบบ Sol-Gel จึงตัดการพิจารณาในเรื่องของเกลือ Sodium sulfate ออกไป ดังแสดงในภาพที่ 89-93



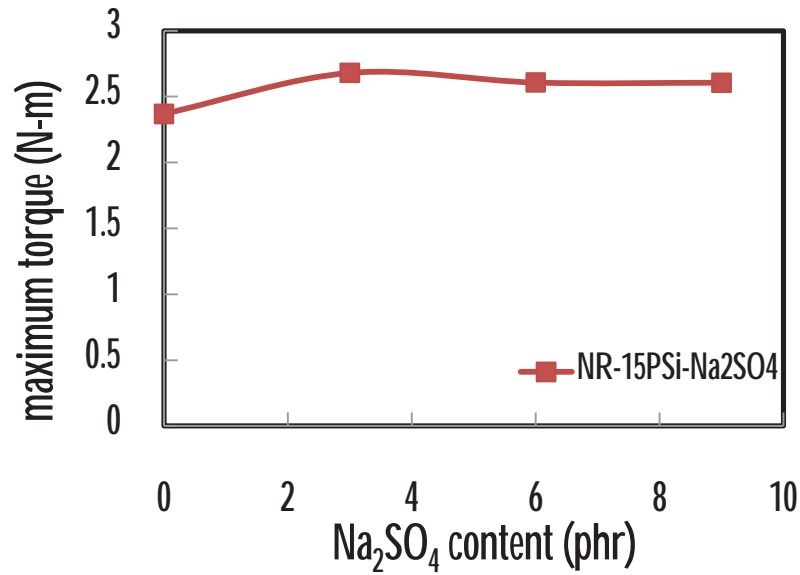
ภาพที่ 89 ผลของปริมาณ Sodium sulfate ที่มีต่อ Scorch time ของ NR/15PSi



มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนวิจัยสัตว์
 ภาพที่ 90 ผลของปริมาณ Sodium sulfate ที่มีต่อ Cure time ของ NR/15PSi

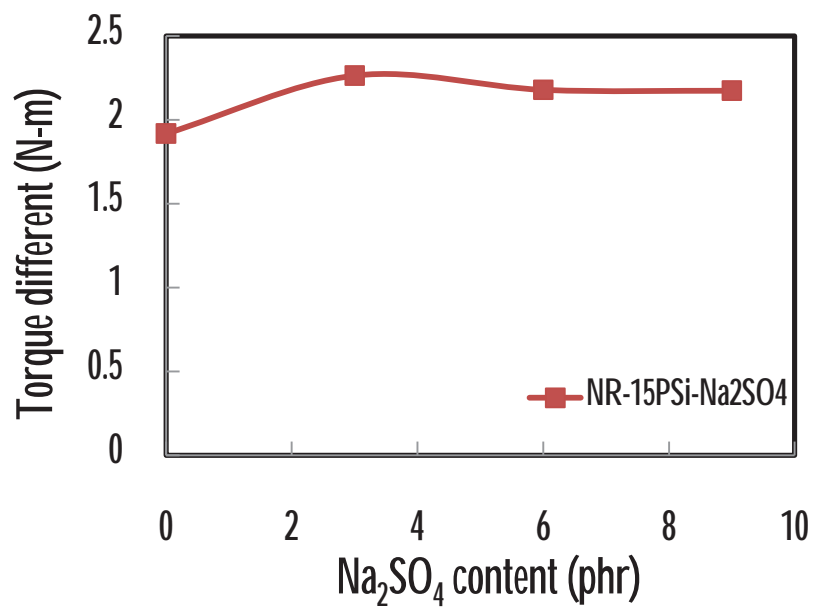


ภาพที่ 91 ผลของปริมาณ Sodium sulfate ที่มีต่อค่าแรงบิดต่ำสุดของ NR/15PSi



ภาพที่ 92 ผลของปริมาณ Sodium sulfate ที่มีต่อค่าแรงบิดสูงสุดของ NR/15PSi

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 93 ผลของปริมาณ Sodium sulfate ที่มีต่อค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) ของ NR/15PSi

ภาคผนวก ๑

การคำนวณ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

1. การหาปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เติมในยางเพื่อให้ยางมีซิลิกา 30 phr

ตารางที่ 63 การหาปริมาณซิลิกาจากสารละลาย Sodium silicate (Na_2SiO_3)

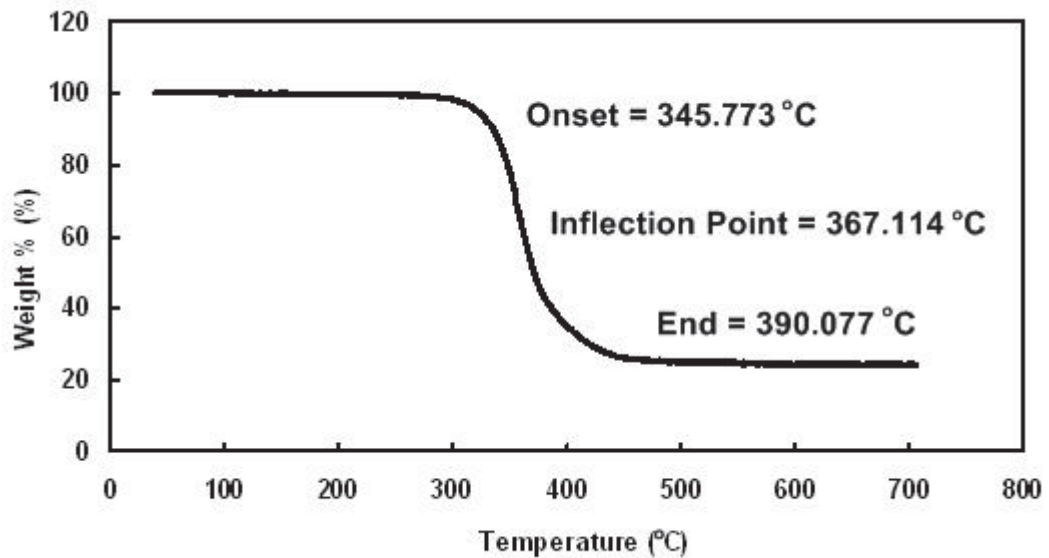
รายละเอียด	ครั้งที่				
	1	2	3	4	5
สารละลายโซเดียมซิลิเกต (cm^3)	25	25	25	25	25
น้ำหนักถ้วย Crucible (g)	27.9548	31.7077	30.6067	27.7178	32.5579
น้ำหนักถ้วย Crucible+ซิลิกา(หลังเผา) (g)	28.947	32.6981	31.6281	28.6891	33.5709
น้ำหนักซิลิกา (g)	0.9922	0.9904	1.0214	0.9713	1.013
น้ำหนักซิลิกาเฉลี่ย (g)	0.9977				

การหาปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เติมในยางเพื่อให้ยางมีซิลิกา 30 phr

ยาง 1 กิโลกรัม มีเนื้อยางอยู่ 600 กรัม ต้องการใส่สารละลายโซเดียมซิลิเกตลงไปในยางเพื่อให้มีซิลิกาอยู่ 30 phr

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น ต้องการปริมาณซิลิกา} &= 600 \text{ g NR} \left| \frac{30 \text{ g Si}}{100 \text{ g NR}} \right. \\
 &= 180 \text{ g} \\
 \text{สารละลายโซเดียมซิลิเกต } 25 \text{ cm}^3 \text{ มีซิลิกาอยู่} &= 0.9977 \text{ g} \\
 \therefore \text{ ต้องการใส่สารละลายโซเดียมซิลิเกตปริมาณ} &= 180 \text{ g Si} \left| \frac{25 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{SiO}_3}{0.9977 \text{ g Si}} \right. \\
 &= 4510 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

2. การหาปริมาณซิลิกาใน Sol-Gel NR/Si



ภาพที่ 94 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุสุดท้ายในชิ้นงานยาง Sol-Gel NR/Si โดยเทคนิค TGA

การหาปริมาณซิลิกาใน Sol-Gel NR/Si

จากภาพที่ 92 พบว่ามีเถ้าซิลิกาที่เหลือในภาชนะ (Pan) เท่ากับ 23.4 % โดยน้ำหนัก ดังนั้นมียางธรรมชาติอยู่ 75.5 % โดยน้ำหนัก

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้ว่ามีซิลิกาอยู่} &= \frac{23.4 \text{ g Si}}{76.6 \text{ g NR}} | 100 \text{ g NR} \\
 &= 30.55 \text{ g Si / 100 g NR} \\
 &= 30.55 \text{ phr}
 \end{aligned}$$

3. การหาปริมาณสารเคมียาง

ตารางที่ 64 แสดงส่วนผสมของยางสูตร Sol-Gel NR/Si

สารเคมียาง	ปริมาณ (phr)
filler	10, 20, 30 (Si content)
Zinc oxide	5
Stearic acid	3
MBT	0.5
DPG	0.2
Sulphur	3

การหาปริมาณสารเคมียางที่เติมลงไปเป็น Sol-Gel NR/30Si+10FA

จาก Sol-Gel NR/30Si ปริมาณ 772 กรัม มีเนื้อยางธรรมชาติอยู่ปริมาณ

$$= 772 \text{ g Sol-Gel} \frac{30\text{Si}}{100 \text{ g NR}} \frac{\text{NR}}{130 \text{ g Sol-Gel} \frac{30\text{Si}}{\text{NR}}}$$

$$= 594 \text{ กรัม NR}$$

ดังนั้นใช้

$$\text{FA 10 phr} = 594 \text{ g NR} \left| \frac{10 \text{ g Si}}{100 \text{ g NR}} \right| \frac{100 \text{ g FA}}{30.1 \text{ g Si}} = 197.34 \text{ g FA}$$

$$\text{ZnO} = 594 \text{ g NR} \left| \frac{5 \text{ g ZnO}}{100 \text{ g NR}} \right| = 29.70 \text{ g ZnO}$$

$$\text{Stearic acid} = 594 \text{ g NR} \left| \frac{2 \text{ g Stearic acid}}{100 \text{ g NR}} \right| = 11.88 \text{ g Stearic acid}$$

$$\text{MBT} = 594 \text{ g NR} \left| \frac{0.5 \text{ g MBT}}{100 \text{ g NR}} \right| = 2.97 \text{ g MBT}$$

$$\text{DPG} = 594 \text{ g NR} \left| \frac{0.2 \text{ g DPG}}{100 \text{ g NR}} \right| = 1.19 \text{ g DPG}$$

$$\text{Sulphur} = 594 \text{ g NR} \left| \frac{3 \text{ g Sulphur}}{100 \text{ g NR}} \right. = 17.82 \text{ g Sulphur}$$

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ประวัติผู้ทำวิจัย

ชื่อ-สกุล นายเชาวน์ ศรีเพชรดี
 ที่อยู่ 19/2 หมู่ 17 ถ.แสงชูโต ต.ท่าผา อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี 70110
 โทรศัพท์ (032) 371-172
 (084) 148-9011
 E-mail address chao_shonen@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น-ตอนปลาย
 โรงเรียนสารสิทธิ์ พิทยาลัย
 พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและ
 วัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
 และ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
 พ.ศ. 2551 ศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการ
 และวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2551-2552 ตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
 คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
 วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม

ผลงานทางวิชาการ

1. Chao Sripethdee , Chanchai Thongpin , Kitti Orasoon , Surakit Kampangkaew and Kittiwut Jaroensuk, "Effect of PSi on Cure Characteristic, Mechanical Properties and Morphology in Si-Gel in-situ reinforced NR", 7th Eco - Energy and Materials Science and Engineering Symposium, 19-22 November 2009, Chiangmai, Thailand.

2. **Chao Sripethdee** , Nattapong Papaka , Narongsak Pongsathornviwat and Chanchai Thongpin, " The Effect of Second Filler on Cure Characteristic and Mechanical Properties of Si-69 treated Precipitate Silica/NR Composite", **The 2nd International Conference on Multi-functional Materials and Structures**, 9-12 October 2009, Qingdao, China.

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์