

การศึกษาดัชนีการดูดน้ำเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

STUDY OF BLACK RICE HUSK ASH (BRHA)
AS FILLER IN NATURAL RUBBER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของวารสารศึกษานิตยสารปริทัศน์วารสารศาสตร์มหาวิทยาลัย

สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-SC-M-014-032

การศึกษาเถ้าแกลบดำเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

**STUDY OF BLACK RICE HUSK ASH (BRHA)
AS FILLER IN NATURAL RUBBER**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-SC-M-014-032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY OF BLACK RICE HUSK ASH (BRHA)
AS FILLER IN NATURAL RUBBER**



RASIMA CHANCHAMPA

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

KMITL-2013-SC-M-014-032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเถ้าแกลบดำเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ
Study of Black Rice Husk Ash (BRHA) as Filler in Natural Rubber

นักศึกษา

นางสาวรสิมา จันทร์จำปา

รหัสประจำตัว

52651204

ปริญญา


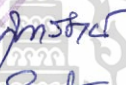

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

เทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจืด

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ	มนตรีพิเศษ	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี	รักชลธี	
รศ.ดร.สมบัติ ธนะวันต์	ธนะวันต์	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจืด	แจ่มจืด	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2556 เวลา 13.00 - 16.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 316 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภณี ธีระประวีร์พัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 19 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเถ้าแกลบดำเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ
นักศึกษา	นางสาวรสิมา จันทร์จำปา
รหัสประจำตัว	52651204
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. อธิธิพล แจ่มชัด

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำ (Black rice husk ash, BRHA) จากโรงไฟฟ้าพลังชีวมวล เป็นสารตัวเติมในยาง โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของยาง ได้แก่ ผลของปริมาณการเติม (5-100 phr), ผลของการใช้สารคู่ควบเมอร์แคปโทไซเลน (Si-69) 3% โดยน้ำหนักของ BRHA, การเคลือบผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG 400 2.4 phr และผลของขนาดอนุภาค ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ยางธรรมชาติ (RSS 3) เป็นตัวแทนยาง เตรียมตัวอย่างโดยการผสมยางธรรมชาติกับเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จากนั้นทำการหาลักษณะการเชื่อมโยงแล้วเตรียมแผ่นยางตัวอย่างด้วยการอัดขึ้นรูป เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลและศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM จากการตรวจสอบและวิเคราะห์ BRHA พบว่า BRHA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอยู่ในช่วง 41-279 μm และมีพื้นที่ผิว 0.024-0.212 m^2/g มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก 74% การใช้ PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 มีผลต่อเวลาเชื่อมโยงของยางผสม BRHA ไม่แตกต่างกัน แต่ BRHA ในสูตรที่มีการเติม Si-69 จะให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงยางที่สั้นกว่าและมีค่ามอดูลัสของยางที่ 100% ดึงยืด (M100) และค่าความแข็งแรงกดสูงกว่า แต่ค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากภาพ SEM จะเห็นว่า BRHA มีการกระจายตัวได้ดีเหมือนกันทุกสูตร เมื่อเพิ่มปริมาณ BRHA (5-100 phr) พบว่าเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง เวลาเชื่อมโยงของยาง ค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ M100 และค่าความแข็งแรงกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น BRHA แสดงสมบัติเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรงในยางธรรมชาติ ขนาดอนุภาคของ BRHA ช่วงต่างๆ (ใหญ่กว่า 100, 100-150, 150-200, 200-250 และเล็กกว่า 250 mesh) ส่งผลต่อการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่เพียงเล็กน้อย แต่ค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของ BRHA เล็กลง เมื่อเทียบกับสารตัวเติมทางการค้า พบว่า BRHA ให้การเสริมแรงที่ด้อยกว่าเขม่าดำและให้สมบัติใกล้เคียงกับแคลไซนเคลย์

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ, เถ้าแกลบดำ, สารคู่ควบ, สารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Study of Black Rice Husk Ash (BRHA) as Filler in Natural Rubber
Student	Miss Rasima Chanchampa
Student ID	52651204
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Ittipol Jangchud

ABSTRACT

In this work, Black Rice Husk Ash (BRHA) from biomass power plant was studied as a rubber filler. Factors affecting filled rubber properties were studied, such as, BRHA loading (5-100 phr), 3% of mercapto silane coupling agent (Si-69) by BRHA weight, PEG 400 2.4 phr and particle sizes of BRHA. In this study, natural rubber (RSS 3) was selected as the model rubber. Samples were prepared by mixing NR with BRHA and additives by a two-roll mill. After that cure characteristics were characterized. Then, rubber sheet was prepared by compression molding. Mechanical properties and morphology by SEM of rubber vulcanizates were carried out. It was found that particle sizes of BRHA were in a range of 41 - 279 μm . Specific surface area of BRHA was in a range of 0.024 - 0.212 m^2/g and silica content of BRHA was about 74%. Effects of PEG and silane coupling agent (Si-69) to cure characteristics of rubber compounds were not different. However, scorch time of the rubbers with BRHA using Si-69 was faster than those without Si-69. Their rubber modulus at 100% (M100) and hardness were also higher than the others. The results of tensile strength and %elongation at break of all the samples were not different. The morphology of rubber with BRHA was confirmed that BRHA was dispersed well in natural rubber matrix. Increasing BRHA loading (5-100 phr) resulted in reduction of scorch time, cure time, tensile strength and %elongation at break but increased in M100 and hardness. BRHA seemed to be a non – reinforcing filler in NR. In the study of effects of BRHA particle size, BRHA with different particle sizes (<100, 100 – 150, 150 – 200, 200 – 250 and >250 meshes) showed insignificant changes in cure characteristics and mechanical properties of rubber compounds, but compression set of those was increased when decreasing particle size of BRHA.

By comparing BRHA with commercial fillers, BRHA showed less reinforcing effect for NR compared to carbon black (N 330), but possessed similar properties compared to calcined clay.

Keywords : natural rubber, black rice husk ash (BRHA), coupling agent, filler



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่กรุณาอบรมสั่งสอนให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และความเอาใจใส่เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภัทธราช มนต์วิเศษ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ และ รศ.ดร.สมบัติ ธาระวันต์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบริษัท ไทยรับเทค จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์สารเคมีสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ โรงไฟฟ้าชีวมวล บริษัท ไบโอบีโอส เพาเวอร์ จำกัด จ.ชัยนาท ที่กรุณาอนุเคราะห์ไฟฟ้าแกลบค้ำสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ คุณสุคดี สอนสะอาด คุณปราณี บุญวัฒน์และเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ชาวพอลิเมอร์ทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ การชี้แนะ และเป็นกำลังใจ และบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือและให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ พี่แดง น้องตองที่เป็นกำลังใจอันยิ่งใหญ่ คอยช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในทุกๆ เรื่อง และให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ทำให้มีทุกสิ่งทุกอย่างจนถึงทุกวันนี้

รสิมา จันทร์จำปา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	6
2.1.1 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ	6
2.1.2 การจัดเกรดยางธรรมชาติ	9
2.2 การเชื่อมโยงยาง (Rubber vulcanization)	10
2.3 สารตัวเติมและการเสริมแรงของยาง	12
2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสริมแรงของสารตัวเติม	12
2.3.2 เขม่าดำ (Carbon black)	14
2.3.3 ดินขาว (Clay)	17
2.3.4 ซิลิกา (Silica)	18
2.4 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)	22
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	32
3.1 แผนการดำเนินงาน	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 สารเคมี	33
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ	34
3.4 วิธีการทดลอง	35
3.4.1 การเตรียมแก้วเคลือบดำ	35
3.4.2 การตรวจสอบและวิเคราะห์แก้วเคลือบดำ	36
3.4.3 การเตรียมแก้วเคลือบดำที่ปรับปรุงผิวด้วย Si-69 ด้วยวิธีสเปรย์	36
3.4.4 การเตรียมยางผสมสูตร	36
3.5 การทดสอบยาง	37
3.5.1 การหาเวลาเชื่อม โยงยางผสมสูตร (Cure time)	37
3.5.2 การขึ้นรูปยางเชื่อม โยง	39
3.5.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเชื่อม โยง	40
3.5.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMTA	43
3.5.5 การศึกษาความหนาแน่นเชื่อม โยง (Crosslink density, n)	43
3.5.6 การศึกษาสัณฐานวิทยา	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	45
4.1 การตรวจสอบและวิเคราะห์แก้วเคลือบดำ	46
4.2 ผลของการปรับปรุงผิวแก้วเคลือบดำด้วย PEG และ/หรือ Si-69	49
4.2.1 การปรับปรุงผิวแก้วเคลือบดำด้วย PEG และ/หรือ Si-69 ที่มีต่อลักษณะการเชื่อม โยงของยาง เชื่อม โยง	49
4.2.2 การปรับปรุงผิวแก้วเคลือบดำด้วย PEG และ/หรือ Si-69 ที่มีต่อความหนาแน่นเชื่อม โยงของยางเชื่อม โยง	52
4.2.3 การปรับปรุงผิวแก้วเคลือบดำด้วย PEG และ/หรือ Si-69 ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยางเชื่อม โยง	54
4.2.4 การปรับปรุงผิวแก้วเคลือบดำด้วย PEG และ/หรือ Si-69 ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของยางเชื่อม โยง	57
4.2.5 การปรับปรุงผิวแก้วเคลือบดำด้วย PEG และ/หรือ Si-69 ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของยางเชื่อม โยง	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลของปริมาณเก่ากลับคำ	61
4.3.1 ผลของปริมาณเก่ากลับคำที่มีผลต่อสมบัติการเชื่อมโยงของยางเชื่อมโยง	61
4.3.2 ผลของปริมาณเก่ากลับคำที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยง	63
4.3.3 ผลของปริมาณเก่ากลับคำที่มีต่อสัญญาณวิทยาของยางเชื่อมโยง	66
4.4 ผลของขนาดอนุภาคเก่ากลับคำ	67
4.4.1 ผลของขนาดอนุภาคของเก่ากลับคำที่มีผลต่อสมบัติการเชื่อมโยงของยางเชื่อมโยง	68
4.4.2 ผลของขนาดอนุภาคของเก่ากลับคำที่มีผลต่อสัญญาณวิทยาของยางเชื่อมโยง	69
4.4.3 ผลของขนาดอนุภาคของเก่ากลับคำที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยง	72
4.5 ผลของการใช้เก่ากลับคำในยางธรรมชาติเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น	75
4.5.1 ผลของการใช้เก่ากลับคำในยางธรรมชาติเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นที่มีต่อสมบัติการเชื่อมโยงของยางเชื่อมโยง	75
4.5.2 ผลของการใช้เก่ากลับคำในยางธรรมชาติเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยง	78
4.5.3 ผลของการใช้เก่ากลับคำในยางธรรมชาติเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นที่มีต่อสัญญาณวิทยาของยางเชื่อมโยง	82
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	85
5.1 สรุปผลการทดลอง	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารอ้างอิง	87
ภาคผนวก	91
ประวัติผู้เขียน	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจัดกลุ่มของยางตามค่าความทนทานต่อการขาด	7
2.2 องค์ประกอบของซิลิกาจากธรรมชาติชนิดต่างๆ	19
2.3 สมบัติบางประการของซิลิกาจากธรรมชาติชนิดต่างๆ	19
2.4 องค์ประกอบของซิลิกาจากการสังเคราะห์ชนิดต่างๆ	21
2.5 สมบัติบางประการของซิลิกาจากการสังเคราะห์ชนิดต่างๆ	21
2.6 องค์ประกอบของแกลบ	24
2.7 ลักษณะการเผาและความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของเถ้าแกลบชนิดต่างๆ	26
2.8 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ	27
3.1 สมบัติบางประการของแคลไซต์เคลย์ (Calcined clay, Iceberg [®])	33
3.2 สมบัติบางประการของซิลิกา (Tokusil [®] 255)	34
3.3 สมบัติบางประการของเขม่าดำ (N 330)	34
3.4 ขนาดช่องตะแกรงร่อนในหน่วยต่างๆ	35
3.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ	37
4.1 อักษรย่อที่ใช้ในงานวิจัย	45
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำจากโรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวล (จังหวัดชัยนาท)	48
4.3 ขนาดโดยเฉลี่ย (μm) และพื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g) ของ BRHA ในแต่ละขนาด (mesh)	49

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กระบวนการผลิตแกลบ	1
1.2 กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวล	2
1.3 ปริมาณการผลิต การส่งออก การใช้ และสต็อกยางธรรมชาติของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536 - 2555 (*เดือนมกราคม – กันยายน 2555)	3
2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (Cis-1,4 polyisoprene)	6
2.2 การเกิดพันธะเชื่อมโยงในโมเลกุลยาง	11
2.3 โครงสร้างของเขม่าดำ	15
2.4 ภาพวาดแสดงโครงสร้างของเขม่าดำ, Bound rubber และ Occluded rubber รวมเป็นส่วนเสริมแรง (Reinforcing entity)	16
2.5 โครงสร้างโมเลกุลของดินขาว (Kaolin)	17
2.6 ลักษณะของหมู่ไซลันอลบนพื้นผิวของซิลิกา	18
2.7 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน Si-69	22
2.8 โครงสร้างของเมล็ดข้าว	24
2.9 โครงสร้างของเซลลูโลส	25
2.10 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	25
2.11 โครงสร้างของลิกนิน	26
3.1 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางผสมสูตร แสดงเวลาเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) และเวลาก่อนการเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2})	38
3.2 ลักษณะขึ้นทศสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด	39
3.3 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน (MDR)	39
3.4 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM)	40
3.5 ตัวอย่างกราฟความเค้น – ความเครียด (Stress-strain curve) ของการดึงตัวอย่างประเภทยาง	41
3.6 เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์	42
3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด	42
4.1 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นแกลบดำขนาดต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า	46
4.2 ภาพแสดงการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นแกลบดำ โดยเทคนิค FT-IR	48
4.3 กราฟแสดงการเชื่อมโยงของยางเชื่อมโยงที่มีเส้นแกลบดำเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ผลของการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อเวลาเริ่มเชื่อม โยง (Scorch time, t_{s2}) ของยางเชื่อม โยง	51
4.5 ผลของการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อเวลาเชื่อม โยง (Cure time, $t_{c(90)}$) ของยางเชื่อม โยง	51
4.6 ผลของการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อดัชนีอัตราการเชื่อม โยง (CRI) ของยางเชื่อม โยง	52
4.7 ผลของการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อการบวมตัว (Swelling) ของยางเชื่อม โยง	53
4.8 ผลของการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อความหนาแน่นเชื่อม โยง (Crosslink density) ของยางเชื่อม โยง	53
4.9 ผลของการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของยางเชื่อม โยง	55
4.10 ผลของการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของยางเชื่อม โยง	55
4.11 ผลของการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืด (M100) ของยางเชื่อม โยง	56
4.12 ผลของการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าความแข็งกด (Hardness) ของยางเชื่อม โยง	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ผลของการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) ของยางเชื่อม โยงเป็นเวลา 22 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 °C	57
4.14 เทอร์โมแกรม DMTA ของยางเชื่อม โยงแสดงผลการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr และยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติม	58
4.15 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางเชื่อม โยงแสดงผลการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	60
4.16 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางเชื่อม โยงแสดงผลการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	61
4.17 ผลของปริมาณเก่าเคลือบดำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อเวลาเริ่มการเชื่อม โยงยาง (Scorch time, t_{s2}) ของยางเชื่อม โยง	62
4.18 ผลของปริมาณเก่าเคลือบดำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อเวลาเชื่อม โยงยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) ของยางเชื่อม โยง	62
4.19 ผลของปริมาณเก่าเคลือบดำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อดัชนีอัตราการเชื่อม โยง (CRI) ของยางเชื่อม โยง	63
4.20 ผลของปริมาณเก่าเคลือบดำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของยางเชื่อม โยง	64
4.21 ผลของปริมาณเก่าเคลือบดำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของยางเชื่อม โยง	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ผลของปริมาณเถ้าเคลือบคำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเถ้าเคลือบคำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อค่ามอดูลัสของยางที่ 100% ดึงยืด (M100) ของยางเชื่อมโยง	65
4.23 ผลของปริมาณเถ้าเคลือบคำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเถ้าเคลือบคำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อค่าความแข็งกด (Hardness) ของยางเชื่อมโยง	65
4.24 ผลของปริมาณเถ้าเคลือบคำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเถ้าเคลือบคำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C ของยางเชื่อมโยง	66
4.25 SEM micrographs แสดงลักษณะพื้นผิวของยางเชื่อมโยงเมื่อใช้เถ้าเคลือบคำที่ทำการปรับปรุงผิวด้วย Si-69 และ PEG ที่ปริมาณ 20, 60 และ 100 phr เป็นสารตัวเติมที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	67
4.26 ผลของขนาดเถ้าเคลือบคำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) ของยางเชื่อมโยง	68
4.27 ผลของขนาดเถ้าเคลือบคำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อเวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) ของยางเชื่อมโยง	69
4.28 ผลของขนาดเถ้าเคลือบคำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ต่อดัชนีอัตราเชื่อมโยง (CRI) ของยางเชื่อมโยง	69
4.29 SEM micrographs แสดงลักษณะพื้นผิวการกระจายตัวของขนาดเถ้าเคลือบคำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ในยางเชื่อมโยงที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	70
4.30 SEM micrographs แสดงลักษณะพื้นผิวการกระจายตัวของขนาดเถ้าเคลือบคำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ในยางเชื่อมโยงที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	71
4.31 ผลของขนาดเถ้าเคลือบคำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของยางเชื่อมโยง	72
4.32 ผลของขนาดเถ้าเคลือบคำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของยางเชื่อมโยง	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 ผลของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่ามอดูลัสของยางที่ 100 % ดึงยืด (M100) ของยางเชื่อมโยง	73
4.34 ผลของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าความแข็งกด (Hardness) ของยางเชื่อมโยง	74
4.35 ผลของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C ของยางเชื่อมโยง	74
4.36 กราฟแสดงการเชื่อมโยงของยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม	76
4.37 ผลของยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{2}) เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม	76
4.38 ผลของยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อเวลาเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม	77
4.39 ผลของยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (CRI) เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม	77
4.40 ผลยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม	79
4.41 ผลยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม	79
4.42 ผลยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อค่ามอดูลัสของยางที่ 100 % ดึงยืด (M100) เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม	80
4.43 ผลยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 60 phr ที่มีต่อค่าความแข็งกด (Hardness) ของยางเชื่อมโยงเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติม	80
4.44 ผลยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 °C เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม	81
4.45 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางเชื่อมโยงสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติมที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.46 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางเชื่อมโอยงสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr เทียบกับยางเชื่อม โอยงที่ไม่เติมสารตัวเติมที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

84

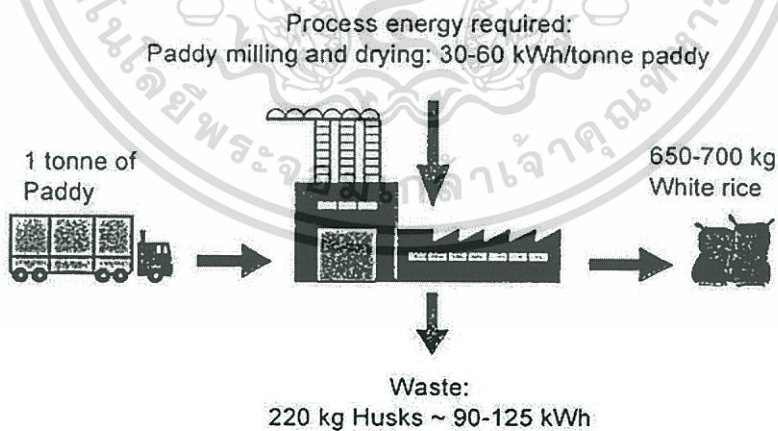


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

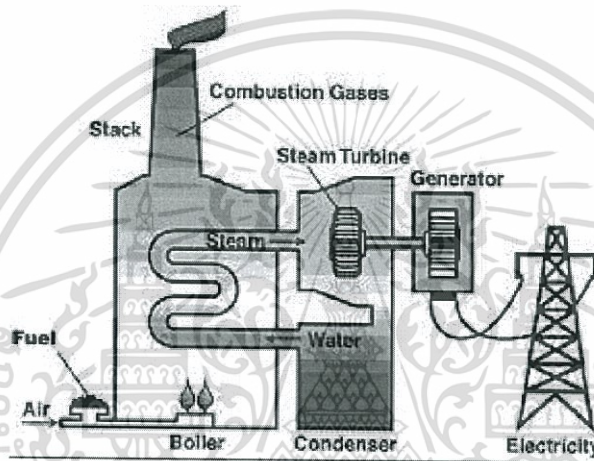
ปัจจุบันแม้ข้าวจะไม่ใช่อินค้าที่ทำรายได้หลักเข้าประเทศเหมือนเช่นในอดีต แต่ประเทศไทยยังคงเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าประเทศไทยมีผลผลิตข้าวมากเพียงใด ข้าวเปลือก 1 ตัน ผ่านกระบวนการแปรรูปต่างๆ แล้วจะต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น 30-60 kWh เพื่อให้ได้ข้าวประมาณ 650-700 kg และจะมีแกลบเป็นวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตประมาณ 220 kg หรือเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้าได้ 90-125 kWh [1] โดยแกลบจะมีน้ำหนักประมาณ 22.5-25.2% ของข้าวเปลือก โดยทั่วไปแล้วมักนำแกลบไปทำเป็นปุ๋ย ใช้เป็นส่วนผสมในการทำอิฐและซีเมนต์ การใช้ประโยชน์จากแกลบอีกวิธีหนึ่ง คือ การใช้เป็นเชื้อเพลิงเพราะแกลบมีค่าความร้อนเฉลี่ย 3880 kcal/kg ขณะที่ค่าความร้อนเฉลี่ยของไม้พืชมีค่า 4475 kcal/kg อย่างไรก็ตามสิ่งที่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างการเผาแกลบกับไม้พืชมคือปริมาณเถ้า โดยแกลบจะให้เถ้าแกลบออกมาประมาณ 17.4% มากกว่าเถ้าจากไม้พืชมถึง 7 เท่า ในการผลิตไฟฟ้าต่อ 1 เมกกะวัตต์/ปี ปริมาณแกลบที่ใช้คือ 9,800 ตัน/ปี ในประเทศไทยมีการใช้แกลบเป็นชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานประมาณ 3.5 ล้านตัน จากการสำรวจโรงไฟฟ้าชีวมวลทั่วประเทศทั้งหมด 52 แห่ง เป็นโรงไฟฟ้าชีวมวลจากแกลบทั้งหมด 10 แห่ง [2]



รูปที่ 1.1 กระบวนการผลิตแกลบ [1]

ในขณะที่เกิดวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันสูงขึ้น เนื่องด้วยเหตุปัจจัยต่างๆ ดังนั้นการเลือกใช้พลังงานหมุนเวียนอันได้แก่ แสงอาทิตย์ น้ำ ลม ไม้พืชม แกลบข้าว ชานอ้อย ชีวมวล ซึ่งเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่ใช้ไม่หมด (Renewable resources) มีแหล่งพลังงานอยู่ในประเทศและมีผลกระทบต่อสถานะแวดล้อมน้อย จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ต้องเร่งให้ความสำคัญในการพัฒนาศักยภาพและสร้างความเชื่อมั่นกับการใช้พลังงานจากแหล่งภายในประเทศ เพื่อลดความเสี่ยงต่อการพึ่งพาพลังงานเชิงพาณิชย์ แกลบถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่ดีที่สุดที่ในบรรดาชีวมวลทั้งหมด เพราะมีความชื้นต่ำไม่ต้องผ่านเครื่องย่อยก่อนนำไปเผาไหม้ ประกอบกับมีสัดส่วนที่เข้ามามากกว่าชีวมวลชนิดอื่นสามารถนำไปทดแทนดินเพื่อปลูกพันธุ์ไม้ต่างๆ ได้ดี ส่งขายต่างประเทศได้อีกด้วย การนำแกลบมาเป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าจะมีปัญหาอยู่ที่การรวบรวมแกลบจากโรงสีที่มีแหล่งอยู่กระจัดกระจายทั่วไปหลายๆ แห่งมารวมกัน เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตให้สูงขึ้นและเงินลงทุนต่อเมกะวัตต์จะลดลง



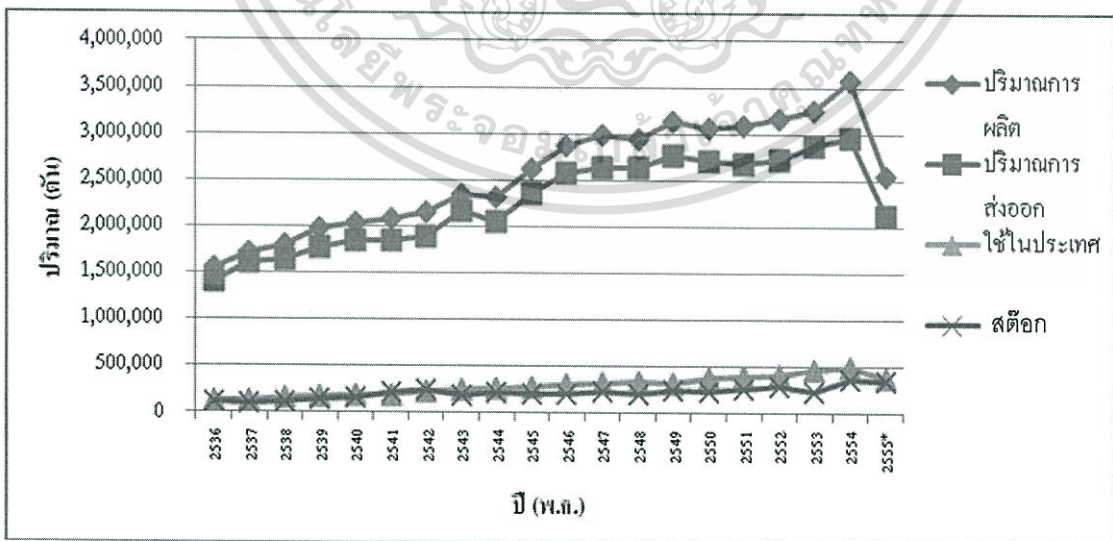
รูปที่ 1.2 กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวล [3]

แกลบ (Rice husk) จัดเป็นวัสดุชีวมวลที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนในการอบข้าวและใช้ในการผลิตไฟฟ้า กระบวนการเผาแกลบจะทำให้เกิดของเสียเป็นเถ้าแกลบ (Rice husk ash) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีเทาดำ สามารถฟุ้งกระจายได้ ปัจจุบันเถ้าแกลบกลายเป็นปัญหาสำคัญสำหรับโรงงานสีข้าวและโรงไฟฟ้าที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและเป็นภาระในการบำบัด อย่างไรก็ตามเถ้าแกลบสามารถนำไปใช้ทำปุ๋ยและวัสดุเสริมแรงคอนกรีต แต่มีมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ไม่สูงนักเมื่อเทียบกับมูลค่าของธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าแกลบ โดยทั่วไปเถ้าที่หลงเหลือจากการเผาวัสดุไม่ใช่สิ่งที่น่าสนใจนักยกเว้นเถ้าแกลบ เพราะนักวิทยาศาสตร์พบว่าในเถ้าแกลบมีซิลิกา (Silica, SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักและเถ้าแกลบมีความพรุน (Porosity) มาก น้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวมาก มีสมบัติดูดซับ (Absorbent) ดี อีกทั้งมีสมบัติเป็นฉนวนด้วย แกลบที่เผาในระบบเปิดจะได้เถ้าแกลบ 2 ชนิด คือ เถ้าแกลบขาว (White Rice Husk Ash, WRHA) และเถ้าแกลบดำ (Black Rice Husk Ash, BRHA) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเตาเผาและสถานะการเผาที่มีต่อความสมบูรณ์ของการสันดาปในเตาเผา โดยเถ้าแกลบดำเกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาที่อุณหภูมิต่ำ จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ในขณะที่เมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้น จะให้เถ้าแกลบขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นและสามารถพบปริมาณซิลิกาที่สูงกว่าเถ้าแกลบดำ [4] อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้สนใจเฉพาะเถ้าแกลบที่เกิดจากการเผาในโรงสีข้าวทั่วไป ที่มีการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300°C ซึ่งที่อุณหภูมินี้จะให้เถ้าแกลบดำ (BRHA) เพราะปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กที่มีจำนวนมากที่นำเถ้าแกลบมาเป็นเชื้อเพลิง ใช้เถ้าเผาที่มีราคาไม่แพงมาก อุณหภูมิของเถ้าเผาจึงไม่สูงมาก (อุณหภูมิไม่ถึง 600°C) ต่างจากในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีเถ้าเผาอุณหภูมิสูง เถ้าแกลบที่ได้จึงเป็นเถ้าแกลบดำ เมื่อรวมจากหลายๆ โรงงานที่มีขนาดเล็กจึงมีเถ้าแกลบดำจำนวนมาก จึงต้องการนำวัสดุเหลือใช้จำนวนมากเหล่านี้ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกามาใช้งานเพื่อเพิ่มมูลค่า โดยในอุตสาหกรรมยางนิยมใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) เป็นพืชอุตสาหกรรมที่สำคัญยิ่งของประเทศไทยและภูมิภาคอาเซียน ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกอันดับหนึ่งของโลก ก่อให้เกิดกิจกรรมต่อเนื่องทั้งภาคการผลิต ภาคอุตสาหกรรม และภาคการตลาด เกี่ยวข้องกับทุกภาคส่วนทั้งเกษตรกร ผู้ประกอบการ และภาครัฐ กระจายอยู่ทั่วประเทศ แม้ว่าที่ผ่านมาไทยจะประสบปัญหาด้านพลังงาน โดยเฉพาะน้ำมันและก๊าซที่ปรับตัวสูงขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อการลงทุนด้านการผลิตทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม แต่ยางพารายังสามารถเป็นสินค้าหลักที่นำรายได้เข้าสู่ประเทศอย่างต่อเนื่อง มีปริมาณการส่งออกเป็นสินค้าหลักของประเทศไทย แต่ปริมาณการใช้ในประเทศมีเพียง 10% (ประมาณ 4 แสนตัน) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งปริมาณการใช้ยังน้อยเมื่อเทียบกับการส่งออก



รูปที่ 1.3 ปริมาณการผลิต การส่งออก การใช้ และสต็อกยางธรรมชาติของประเทศไทยตั้งแต่ปี

พ.ศ. 2536 - 2555 (*เดือนมกราคม – กันยายน 2555) [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงพาณิชย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นในเรื่องของความยืดหยุ่น แต่มีความนุ่มหรือมีค่ามอดุลัสต่ำ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีหรือวัสดุบางอย่างลงไปเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของยางดิบให้ดีขึ้น เช่น สารเชื่อมโยงหรือสารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) จะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความยืดหยุ่นและสมบัติเชิงกล การเติมสารตัวเติม (Filler) จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นและยังมีส่วนช่วยในด้านการลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบัน คือ เขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica, SiO_2) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) และเคลย์ (Clay) เป็นต้น โดยเขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่มีการใช้งานในทางอุตสาหกรรมมากที่สุด เนื่องจากมีสมบัติการเสริมแรงที่ดีที่สุดและมีขี้ดำสามารถเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติที่มีขี้ดำเช่นเดียวกันได้นิยมนำไปผลิตเป็นยางรถยนต์ แต่เขม่าดำได้มาจากการเผาของน้ำมันปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หมดไป (Non-renewable source) และใช้พลังงานในการผลิตสูง มีราคาลงตามราคาน้ำมัน ในขณะที่ซิลิกาจัดเป็นสารเสริมแรงอีกตัวหนึ่งที่มีการใช้งานมาก เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลที่ดีรองจากเขม่าดำและสามารถปรับแต่งสีขึ้นงานได้ง่าย แต่ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีขี้ดำสูงก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องความเข้ากันได้ยากกับพอลิเมอร์ซึ่งส่วนใหญ่ไม่มีขี้ดำ ทั้งยังมีราคาต่อหน่วยที่ค่อนข้างสูง ซึ่งจากโครงสร้างของเม็ดแกลบดำที่มีองค์ประกอบหลักทางเคมีที่มีขี้ดำสูงอย่างซิลิกา ทำให้เข้ากับยางธรรมชาติได้ยากและเกิดปัญหาการเกาะกลุ่มกันของสารเสริมแรง นอกจากนี้ผิวของซิลิกายังประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถดูดซับสารตัวเร่งและซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่เติมลงไปเพื่อเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Cure) ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของสารตัวเร่งลดลง ส่งผลให้ระบบต้องใช้เวลาในการเชื่อมโยงยาวนานขึ้น และไม่สามารถควบคุมความสม่ำเสมอของเวลาในการเชื่อมโยงอย่างที่แน่นอนได้ ทั้งยังลดความหนาแน่นเชื่อมโยงของชิ้นงานส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง [6] มีผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับซิลิกาเสริมแรงมากมายโดยพยายามหาวิธีการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของซิลิกาทั้งการใช้ความร้อน [7] สารเคมี [8] หรือการใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) [8] ซึ่งจากวิธีดังกล่าวข้างต้นการใช้สารคู่ควบเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดและการใช้ไซเลนเป็นสารคู่ควบได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมยาง

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเม็ดแกลบดำจากโรงไฟฟ้าชีวมวล จ.ชัยนาท มาทำการปรับปรุงด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) เพื่อป้องกันการดูดสารเคมีเชื่อมโยงที่มีขี้ดำและสารคู่ควบ Si-69 ที่นิยมนำใช้ในอุตสาหกรรมยางเพื่อช่วยในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคสารตัวเติมกับยางธรรมชาติ และศึกษาผลของขนาดเม็ดแกลบดำที่มีต่อการเสริมแรง นอกจากนี้ยังทำการศึกษาเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้าด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาการใช้เม็ดแกลบดำ (Black rice husk ash, BRHA) เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ (NR) ให้สามารถเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยทำการปรับปรุงผิวด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ หรือมีการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอล (PEG) และสารคู่ควบไซเลนชนิดเมอร์แคปโท (Coupling agent, Si-69) นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบผลของการใช้ BRHA ในยางเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น ได้แก่ เคลย์ เขม่าดำและซิลิกา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการวิเคราะห์เถ้าแกลบดำ ได้แก่ ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวจำเพาะ และองค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition)
2. ศึกษาผลของการเคลือบผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG เปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่เติม PEG
3. ศึกษาผลของสารคู่ควบชนิดเมอร์แคปโท (Coupling agent, Si-69)
4. ศึกษาผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่ใช้เป็นสารตัวเติม ได้แก่ 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80 และ 100 phr
5. ศึกษาผลของขนาดของเถ้าแกลบดำ (ใหญ่กว่า 100, 100-150, 150-200, 200-250 และ เล็กกว่า 250 mesh)
6. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของยางที่เตรียมได้ ได้แก่
 - ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) ได้แก่ เวลาเริ่มเชื่อมโยงยางหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time, t_{90}) เวลาเชื่อมโยงยาง (Cure time, t_{90}) และดัชนีความเร็วเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI)
 - สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break), มอดูลัสของยางที่ 100% ดึงยืด (Rubber modulus, M100), ความแข็งกด (Hardness) และการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set)
 - ความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density)
 - สมบัติความร้อนเชิงกลด้วย Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA)
 - สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) (SEM)
7. นำไปศึกษาเปรียบเทียบกับยางที่ใส่ตัวเติมอื่นๆ (เคลย์ เขม่าดำ และซิลิกา)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเพิ่มมูลค่าและพัฒนาการใช้ประโยชน์เถ้าแกลบดำในประเทศ
2. เพื่อเป็นแนวทางที่ใช้ในการศึกษาสารตัวเติมเถ้าแกลบดำ (Black Rice Hush Ash, BRHA) ในการนำไปประยุกต์ใช้ในยางและพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ต่อไป
3. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาความรู้เกี่ยวกับผลของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางและพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

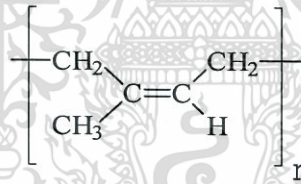
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน ทำให้มีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมัน แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ใน 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C₅H₈) มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแบบเส้นตรง มีพันธะคู่และหมู่อัลฟาเมทิลีนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถเชื่อมโยงยางได้ด้วยกำมะถัน ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงอยู่ในช่วง 100,000 ถึง 1,000,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องมีการบดยาง (Mastication) ก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการบดยางทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไปจะใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปยางธรรมชาตินอกจากมีสารไฮโดรคาร์บอนแล้ว ยังมีสิ่งเจือปนอื่นด้วยประมาณ 5% ได้แก่ โปรตีน เถ้า สารที่สกัดได้ด้วยอะซิโตน (Acetone extractables) และความชื้น



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (cis-1,4 polyisoprene) [9]

2.1.1 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ [10]

- ความยืดหยุ่น (Elasticity) สมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นประการหนึ่งของยางธรรมชาติ กล่าวคือ ยางธรรมชาติที่เชื่อมโยงแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อมีแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว
- ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่เชื่อมโยง) มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น
- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความแข็งแรงดิ่งสูงมาก การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปจะช่วยทำให้ค่าความแข็งแรงดิ่งสูงขึ้น

- ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (Tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความแข็งแรงต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปจะช่วยทำให้ค่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

- สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วย

- ความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติที่มีค่าความทนทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังคงน้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ พบว่ายางธรรมชาติมีค่าความทนทานต่อการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจัดกลุ่มของยางตามค่าความทนทานต่อการขัดถู [10]

กลุ่มที่	ความต้านทานต่อการขัดถู	ยาง
1	สูงมาก	ยางพอลิยูรีเทน (AU/EU), ยางบิวทาไดอิน (BR), ยางสไตรีนบิวทาไดอิน (SBR), ยางไนไตรล์ (NBR) และยางธรรมชาติ (NR)
2	สูง – สูงมาก	ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM), ยางคลอโรพรีน (CR) และยางคลอซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (CSM)
3	สูง	ยางบิลไทล์ (IIR), ยางเอทิลีนอะคริลิก (Ethylene acrylic elastomer) และยางเอทิลไวนิลอะซิเตต (Ethyl vinyl acetate elastomer)
4	ต่ำ	ยางซิลิโคน (Q)

- ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Electrical insulation) ยางธรรมชาติมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} ohm.cm

- ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางจึงละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการเชื่อมโยงแล้ว เนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติในยางเชื่อมโยงจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางเชื่อมโยงจึงเกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางลดลง ด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายต่างๆ ที่ไม่มีขี้ แต่ยางธรรมชาติจะทนทานต่อของเหลวที่มีขี้ เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

- การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนโอโซนและแสงแดด (Aging properties)

เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางธรรมชาติไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซน เมื่อยางถูกยึดและได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยึดตัวของยาง ด้วยเหตุนี้ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Anti-degradants) และไข (Wax) เป็นต้น ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งาน

- การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งยางที่มีสมบัตินี้ที่ดีกว่ายางธรรมชาติมีเพียง 2 ชนิด คือ ยางซิลิโคน (Q) และยางบิวทาไดอีน (BR)

- การเสีรูปถาวรหลังกดอัด (Compression set) ยางธรรมชาติมีค่าการเสีรูปถาวรหลังกดอัดค่อนข้างต่ำที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามค่าการเสีรูปถาวรหลังกดอัดที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่าการเสีรูปถาวรหลังกดอัดที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพซึ่งจะทำให้สมบัติการเสีรูปถาวรหลังกดอัดค่อยๆ ลดลง

- การกระเต็งกระดอน (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระเต็งกระดอนสูง (สูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ทั้งหมด ยกเว้นยาง BR) และในระหว่างเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางจะเสีพลังงานในรูปความร้อนน้อย (มี Hysteresis ต่ำ) ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุกหรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงจะทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

- อุณหภูมิของการทำงาน (Service temperature) ยางธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20°C สามารถใช้งานได้ทั้งที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55°C จนถึง 77°C มีอุณหภูมิของการเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; Tg) ประมาณ -72°C อย่างไรก็ตามหากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไปสมบัติเชิงกลต่างๆ จะด้อยลง เนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในบางกรณีที่มีการออกสูตรผสมเคมียางได้อย่างเหมาะสม (มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลง) ยางธรรมชาติอาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90°C หรืออาจสูงถึง 100°C (ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วงๆ เท่านั้น)

2.1.2 การจัดการยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ผลิตในประเทศไทยทั้งยางแท่งและยางแผ่นมีวัตถุดิบและวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน ซึ่งวัตถุดิบและวิธีการเตรียมอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงมีความสำคัญที่ต้องมีการจัดการยางประเภทต่างๆ เพื่อความสะดวกในการพิจารณาเลือกนำไปใช้งาน [11]

ยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheet) เรียกย่อๆ ว่า RSS เป็นยางที่ทำมาจากน้ำยางโดยตรง ทำให้แห้งโดยวิธีการรมควันเพื่อป้องกันเชื้อรา ไม่มีมาตรฐานการตรวจสอบที่แน่นอนเหมือนยางแท่ง

การจัดชั้นยางแผ่นรมควันตามหนังสือ The Green Book ได้กำหนดชั้นยางชนิดต่างๆ กระทำโดยใช้สายตาในการพิจารณา ซึ่งต้องอาศัยความชำนาญและประสบการณ์พอสมควร ทั้งนี้สามารถจำแนกยางแผ่นรมควันได้เป็น 6 ชั้นดังนี้

- ยางแผ่นรมควันชั้น 1 พิเศษ (RSS 1X) ต้องเป็นยางแผ่นใสที่มีคุณภาพดีและมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น สะอาดและแห้งสนิท ไม่มีรอยตำหนิ จุดดำงดำหรือรอยเปื้อน ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ไม่มีราสนิมหรือราแดงบนผิวของยางแผ่น ยางแผ่นต้องไม่รมควันมากเกินไปจนมีสีคล้ำ และไม่เหนียวตรงจุดใดจุดหนึ่ง สำหรับแผ่นยางที่ใช้ห่อตรงผิวนอกของก้อนยางอาจมีฟองอากาศเล็กๆ ขนาดเท่าหัวเข็มหมุดกระจายอยู่เล็กน้อยได้

- ยางแผ่นรมควันชั้น 1 (RSS 1) แผ่นยางต้องแห้งและสะอาด ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งเจือปนบนแผ่นยาง ไม่มีสนิมหรือราขึ้นบนยาง แผ่นยางอาจรมควันไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยได้แต่ต้องไม่มีสีคล้ำจนเกินไป และไม่เหนียวตรงจุดใดจุดหนึ่ง บนผิวยางแผ่นที่ใช้ห่อก้อนยางหรือตรงผิวก้นของยางที่อยู่ติดกับยางที่ใช้ห่อ อาจมีราแห้งปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อย มีฟองอากาศเล็กๆ ขนาดเท่าหัวเข็มหมุดกระจายอยู่เล็กน้อยได้

- ยางแผ่นรมควันชั้น 2 (RSS 2) แผ่นยางต้องแห้งและสะอาด ไม่มีตำหนิการรอยเปื้อนหรือฟอง ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งเจือปนบนแผ่นยาง อาจมีฟองอากาศ สีของยางแผ่นรมควันอาจไม่สม่ำเสมอได้ บนผิวยางแผ่นที่ใช้ห่อก้อนยางหรือผิวก้นของยางที่อยู่ติดกับยางที่ใช้ห่ออาจมีรา

สนิมหรือราแห่งปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อยแต่ไม่เกิน 5% ของตัวอย่างที่ตรวจ สีของยางแผ่นรมควัน อาจไม่สม่ำเสมอได้

- ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (RSS 3) แผ่นยางต้องแห้ง สีอาจไม่ใส มีฟองอากาศเล็กๆ มีเศษผง สิ่งสกปรกหรือเศษเปลือกต้นยางปะปนได้เล็กน้อย แต่ต้องไม่มีรอยฟุพอง ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่ง สกปรกขณะห่อก้อนยาง บนยางแผ่นที่ใช้ห่อ หรือภายในยางแผ่นอาจมีราสนิมหรือราแห่ง ราแดง ขึ้นได้เล็กน้อยแต่ไม่เกิน 10% ของตัวอย่างที่ตรวจ ไม่มีจุลกรมควันที่ไม่แห้ง หรือจุดเหนียวบนยาง แผ่นยางอาจมีสีคล้ำบ้างแต่สีต้องไม่ทึบจนดำ

- ยางแผ่นรมควันชั้น 4 (RSS 4) ยางแผ่นต้องแห้ง มีฟองอากาศเศษผงสิ่งสกปรก หรือเศษ เปลือกต้นยางขนาดกลางปะปนอยู่บนยางแผ่นบ้าง มีรอยเปื้อนจางๆ เหนียวเล็กน้อยบนยางแผ่นที่ ใช้ห่อหรือภายในยางแผ่นอาจมีราสนิมหรือราแห่ง ราแดงขึ้นได้เล็กน้อยแต่ไม่เกิน 20% ของ ตัวอย่างที่ตรวจ ไม่มีตำหนิจากรอยฟุพองไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกอื่นปน ยางแผ่นอาจมีสีคล้ำ ได้แต่สีต้องไม่ทึบจนดำแบบถูกไฟไหม้

- ยางแผ่นรมควันชั้น 5 (RSS 5) ยางแผ่นต้องแห้ง มีฟองอากาศเศษผงสิ่งสกปรกหรือเศษ เปลือกต้นยางค่อนข้างใหญ่ มีรอยฟองเล็กๆ รอยเปื้อนสีคล้ำบนยางแผ่นที่ใช้ห่อหรือภายในยาง แผ่นอาจมีราสนิมหรือราแห่ง ราแดงขึ้นได้เล็กน้อยแต่ไม่เกิน 30% ของตัวอย่างที่ตรวจมีราแห่ง แผ่นยางต้องไม่ฟุพองมากและไม่เหนียวจนเกินไป นอกจากสิ่งปะปนที่กล่าวมาแล้ว ยางแผ่นต้อง ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ยางแผ่นอาจมีสีคล้ำได้แต่ต้องไม่ทึบจนไหม้ดำ

การใช้งาน ยางแผ่นรมควันใช้เป็นวัตถุดิบในการทำผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่ใช่ยางสี ซึ่งต้องการ ให้ทนการเสียดสีและมีความยืดหยุ่นดี ได้แก่

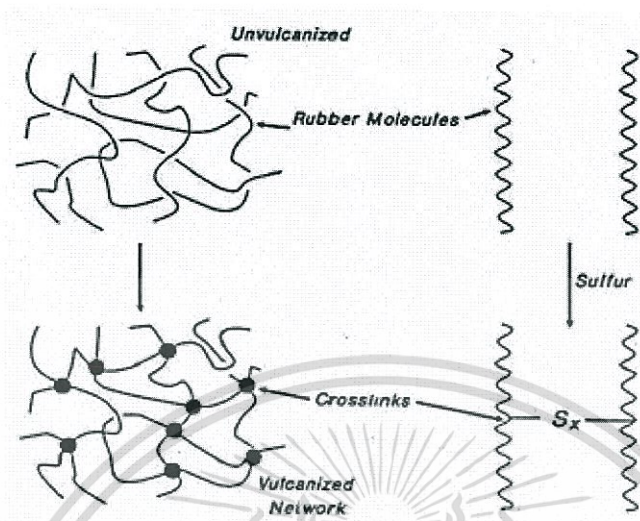
- ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น ยางล้อรถยนต์
- ใช้ในอุตสาหกรรมวิศวกรรม เช่น ยางรองคอสพาน ยางกันเขื่อน
- ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น ยางลูกกลิ้ง ยางสายพานลำเลียง
- ใช้ในอุตสาหกรรมครัวเรือน เช่น ยางปะเก็นท่อน้ำ

2.2 การเชื่อมโยงยาง (Rubber vulcanization)

กระบวนการเชื่อมโยงยาง คือ กระบวนการเปลี่ยนยางที่อยู่ในสภาพที่ไม่คงตัวให้เป็นอย่างที่ รักษารูปทรงได้ในลักษณะยืดหยุ่น (Elastic) หรือแข็ง (Stiffness) โดยการใช้สารเชื่อมโยงหรือ สารวัลคาไนซ์ (Crosslinking agent หรือ Vulcanizing agents) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง ของโมเลกุลตรงจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา สารเชื่อมโยงที่สำคัญ คือ กำมะถัน เมื่อนำกำมะถันใส่เข้าไป ในยางธรรมชาติแล้วนำยางนั้นมาให้ความร้อนจะเกิดการเชื่อมโยงขึ้น ซึ่งจะทำให้ยางมีสมบัติที่ ดีขึ้น คือ เมื่อร้อนไม่เหลว เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่เหนียว ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น เพราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำมะถันทำให้โมเลกุลยางมาเชื่อมต่อกัน ซึ่งการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลนี้เรียกว่าการเกิดพันธะเชื่อมโยง (Crosslink) [12]



รูปที่ 2.2 การเกิดพันธะเชื่อมโยงใน โมเลกุลยาง [13]

สารเชื่อมโยงที่สำคัญสำหรับยาง ได้แก่ กำมะถัน (Sulfur) สารประเภทที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ เปอร์ออกไซด์ (Peroxides) เช่น ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide; DCP) เป็นต้น และส่วนสารประกอบออกไซด์ของโลหะบางชนิด นิยมใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง และสารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยงผสมเข้ากับยาง แล้วให้อุณหภูมิสูงภายหลังการขึ้นรูปเป็นรูปร่างผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ อุณหภูมิสูงจะทำให้สารเชื่อมโยงต่างๆ เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) เชื่อม โยง โครงสร้าง โมเลกุลยางแล้วเปลี่ยน โครงสร้าง เส้นตรงเป็น โครงสร้าง ร้างแหสามมิติ มีเสถียรภาพของรูปร่าง และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น การเชื่อม โยงทำให้ยางมีสมบัติ เปลี่ยนไปกล่าวคือ

- มีค่าความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
- มีมอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
- มีความยืดหยุ่น (Elasticity) ดีขึ้น
- มีฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis) ลดลง
- มีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Permanent set) ลดลง หรือมีเสถียรภาพของรูปร่างเพิ่มขึ้น
- เหนียวติด (Sticky) น้อยลง
- เปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซต ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ทนต่ออุณหภูมิ แสง และการใช้งาน นานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สารตัวเติมและการเสริมแรงของยาง

สารเติมแต่ง (Additive) [12] ของยางมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีหน้าที่และสมบัติแตกต่างกัน ทั้งชนิดและปริมาณการใส่สารเติมแต่งในยางแต่ละสูตรจะแตกต่างกัน ขึ้นกับความต้องการของผู้ผลิตและสมบัติของยางผสมสูตรที่ต้องการ จุดประสงค์ของการใส่สารเติมแต่ง คือ “3P” ได้แก่ Properties, Price และ Processability กล่าวคือเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของยาง (Property enhancement) เพื่อลดต้นทุน (Price หรือ Cost) และเพื่อช่วยกระบวนการผลิต (Processability) ให้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ง่าย

สารตัวเติม (Filler) คือ สารเคมีที่เติมเข้าไปในพอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนเป็นจุดประสงค์หลัก และอาจเพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางผสมสูตรมีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ ตามประสิทธิภาพของการเสริมแรง คือ สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing fillers) และสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) หรืออาจแบ่งตามสีของสารตัวเติมได้เป็น 2 กลุ่มเช่นกัน ได้แก่ สารตัวเติมสีดำและสารตัวเติมสีไม่ดำ

การเสริมแรง (Reinforcement) หมายถึง ความสามารถของสารตัวเติมในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับยางและอาจปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของยางเชื่อมโยง เช่น มอดูลัส ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขูดถู เป็นต้น ในทำนองเดียวกันค่ามอดูลัสและความแข็งของยางจะเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่การยืด ณ จุดขาดและสมบัติการกระด้างกระดอนของยางจะลดลง ดังนั้น สารตัวเติมเสริมแรง คือ สารตัวเติมที่เมื่อใส่ลงไปยางแล้วจะทำให้สมบัติของยางเกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวข้างต้น แต่สำหรับสารตัวเติมบางชนิดที่เมื่อใส่ลงไปยางแล้วทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ของยางคงรูปด้อยลงหรือเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย จะเรียกสารตัวเติมประเภทนี้ว่าสารตัวเติมไม่เสริมแรง

ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของสารตัวเติมจะขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาหรือแรงกระทำระหว่างยางกับสารตัวเติม โดยที่อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในรูปของแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีค่าค่อนข้างต่ำ หรืออาจอยู่ในรูปของพันธะเคมีซึ่งมีความแข็งแรงค่อนข้างสูง เมื่อเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม ยางจะมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงขึ้นเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลยางจะมีความสามารถในการเคลื่อนที่น้อยลง

2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสริมแรงของสารตัวเติม

ในการเติมสารตัวเติมเพื่อเสริมแรงให้กับยาง มีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณา เนื่องจากจะมีผลอย่างมากต่อสมบัติของยาง [14] ปัจจัยที่สำคัญได้แก่

1. ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ (Particle size and specific surface area)

สารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะให้การเสริมแรงแก่ยางได้ดี เพราะสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยของน้ำหนัก (หรือเรียกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ) สูง จึงทำให้พื้นที่ที่จะเกิดแรงกระทำระหว่างยางกับสารตัวเติมเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความแข็งกด และความต้านทานต่อการขัดถูจึงสูงขึ้นตามพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติม โดยทั่วไปแล้วสารตัวเติมเสริมแรง เช่น เขม่าดำจะมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กมากและขนาดอนุภาคปฐมภูมิเหล่านี้จะไม่อยู่กันอย่างเดี่ยวๆ แต่จะหลอม (Fused) หรืออยู่รวมกันเป็นก้อนที่เรียกว่าแอกกรีเกต (Aggregate) อย่างไรก็ตามเนื่องจากแอกกรีเกตแต่ละกลุ่มจะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ดังนั้น แอกกรีเกตจึงจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่าแอกโกลเมอเรต (Agglomerate)

2. โครงสร้างของสารตัวเติม (Filler structure)

นอกจากขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะแล้ว โครงสร้างของสารตัวเติมมีอิทธิพลต่อการเสริมแรงด้วยเช่นกัน ดังที่ได้กล่าวไว้ว่าอนุภาคของสารตัวเติมบางชนิดเช่นเขม่าดำจะไม่อยู่กันอย่างเดี่ยวๆ แต่จะอยู่รวมกันเป็นก้อนแอกกรีเกต ซึ่งการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนดังกล่าวทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของสารตัวเติมที่เรียกว่าโครงสร้างสารตัวเติมปฐมภูมิ (Primary filler structure) โครงสร้างสารตัวเติมปฐมภูมิที่เกิดขึ้นนี้จะมีความแข็งแรงสูงมากและไม่สามารถถูกทำลายได้ด้วยแรงเชิงกลในระหว่างกระบวนการผสม การรวมกลุ่มกันของก้อนแอกกรีเกตทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของสารตัวเติมที่เรียกว่าโครงสร้างของสารตัวเติมทุติยภูมิ (Secondary filler structure) ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะไม่แข็งแรงและสามารถถูกทำลายได้ง่ายด้วยแรงเชิงกล

3. ความว่องไวทางปฏิกิริยาของพื้นผิว (Specific surface activity)

ปกติสารตัวเติมจะมีหมู่ฟังก์ชันเคมีชนิดต่างๆ เกาะติดหรือถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิว เช่น บนพื้นผิวของเขม่าดำจะมีหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมาย เช่น ฟีนอลิก (Phenolic) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ควิโนน (Quinone) คาร์บอกซิล (Carboxyl) และแลคโตน (Lactone) รวมถึงอนุมูลอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับโมเลกุลของยางได้ แต่สำหรับสารตัวเติมที่มีสีขาว เช่น ซิลิกา ส่วนใหญ่จะมีหมู่ฟังก์ชันเคมีจำพวกออกไซด์ของโลหะหรือหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นองค์ประกอบอยู่บนพื้นผิวยางที่มีความเป็นขั้วสูง เช่น ยาง NBR และ ยาง CR เป็นต้น จะทำปฏิกิริยาได้ดีกับพื้นที่ผิวของสารตัวเติมที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่น หมู่ไฮดรอกซิลหรืออะตอมของคลอรีน เป็นต้น ถ้าความว่องไวทางปฏิกิริยาของสารตัวเติมลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงด้อยลง เช่น เมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวของเขม่าดำด้วยกระบวนการที่เรียกว่า “Graphitization” โดยการนำเขม่าดำไปเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1600-3000°C เป็นเวลาหลายชั่วโมง ความร้อนที่สูงมากเช่นนี้จะทำให้หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำสลายตัวไป เขม่าดำจะสูญเสียความว่องไวทางปฏิกิริยาซึ่งจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงของเขม่าดำลดลง โดยค่าความว่องไวทางปฏิกิริยาของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวบ่งบอกด้วยปริมาณของยางบาวด์ (Bound rubber) ซึ่งยางบาวด์ คือ ส่วนของยางที่ไม่สามารถถูกสกัดออกมาจากสารตัวเติมได้โดยใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม (ตัวทำละลายที่สามารถละลายยางได้ดี) ยางส่วนนี้จะเกาะติดอยู่กับสารตัวเติมในลักษณะคล้ายเจล

4. ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH value)

แม้ว่าค่าความเป็นกรด – ด่างของสารตัวเติมจะไม่ได้มีอิทธิพลโดยตรงต่อการเสริมแรงในยาง แต่เนื่องจากค่าความเป็นกรด – ด่างของสารตัวเติมส่งผลกระทบต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยาง (สารตัวเติมที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะหน่วงปฏิกิริยาเชื่อมโยง) ดังนั้น ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารตัวเติมจึงส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของยางเชื่อมโยง

2.3.2 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำได้จากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Incompleted combustion) หรือการแตกตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ เขม่าดำจัดเป็นสารตัวเติมที่สำคัญที่สุดและมีปริมาณการใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากเขม่าดำมีราคาถูก สามารถใส่เขม่าดำในยางได้ในปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) และที่สำคัญที่สุดคือเขม่าดำสามารถช่วยเสริมแรงให้กับยางอย่างมาก อาจทำให้ความแข็งแรง (Strength) ของยางเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น การใช้เขม่าดำมีข้อเสีย คือ ผลิตภัณฑ์ยางที่ใส่สารตัวเติมเขม่าดำจะมีสีดำ เช่น ยางรถยนต์ สายพาน เป็นต้น [10]

ชนิดและวิธีการผลิตเขม่าดำ

1. เขม่าดำชนิดเฟอ์เนส (Furnace blacks) เป็นชนิดที่นิยมใช้แพร่หลายทั่วไปและมีปริมาณการใช้งานมากที่สุด เขม่าดำชนิดนี้ผลิตได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน เชื้อเพลิง คือ ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel oil) เผาไหม้ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนที่มากเกินไป เกิดเป็นอากาศร้อนหมุนวนภายในเตาเผาบริเวณเผาไหม้ (Combustion zone) น้ำมันวัตถุดิบนิยมใช้เป็นน้ำมันหนักที่เหลือจากกระบวนการกลั่นน้ำมัน (Refinery heavy oil) ที่มีสารอะโรมาติกปริมาณมาก จะถูกฉีดเข้าไปเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เกิดกลายเป็นกากคาร์บอนลักษณะเป็นก้อนเขม่าดำปริมาณมาก ซึ่งจะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว (Quench) ด้วยน้ำ เขม่าดำชนิดเฟอ์เนส จะมีโครงสร้างเป็นก้อนกลมติดกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า “แอ็กกรีเกต” มีโครงสร้างขนาดเล็ก (ประมาณ 10 - 100 nm) มีปริมาณออกซิเจนต่ำ (มักจะน้อยกว่า 1%) เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวเกิดเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่

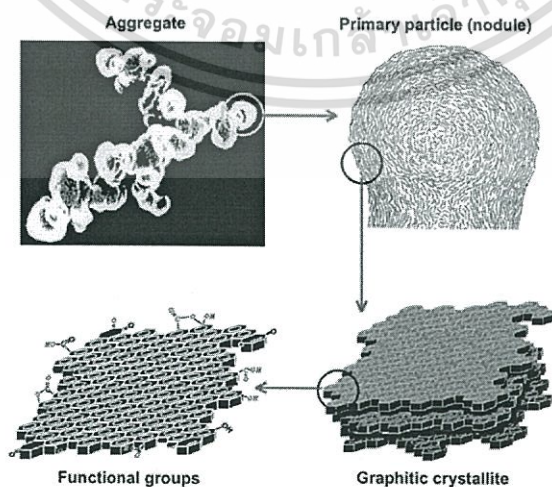
มีหมู่ฟังก์ชันอะตอมออกซิเจนบางประเภทหรือออกซีไฮโดรคาร์บอน (Oxyhydrocarbons) ปริมาณเล็กน้อย พื้นผิวของเขม่าดำเป็นกลางหรือเป็นด่างเล็กน้อย (pH ประมาณ 8)

2. เขม่าดำชนิดเทอร์มอล (Thermal blacks) เขม่าดำชนิดนี้เกิดจากการแตกตัว (Cracking) ของน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนที่บริเวณผิวร้อนภายในเตาเผา อุณหภูมิสูงได้เป็นเขม่าดำที่ไม่ถูกออกซิไดซ์ (Unoxydized blacks) เขม่าดำชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่ (ประมาณ 100 - 150 nm) ลักษณะเป็นก้อนกลม โครงสร้างน้อยและมีพื้นที่ผิวน้อย

3. เขม่าดำชนิดซัลแนล (Channal blacks) กระบวนการผลิตเขม่าดำชนิดนี้ค่อนข้างเก่า ล้าสมัย จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติที่ตะกียงเผาทำให้เกิดเขม่าเกาะสะสมที่ผิวภายในท่อเหล็ก (Channel iron) เย็นที่ต่อยาวไปมาเป็นอนุกรม ทำให้ได้เขม่าดำชนิดซัลแนลมีพื้นผิวที่ถูกออกซิไดซ์มีความเป็นกรด (pH ต่ำ) ขนาดเล็กมาก (ประมาณ 1-3 nm) การใช้เขม่าดำชนิดนี้จะมีผลหน่วงปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของยางเนื่องจากมีความเป็นกรด

รูปร่างและโครงสร้างของเขม่าดำ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเขม่าดำที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) จะเห็นว่าเขม่าดำมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนกลมติดกันอย่างไม่เป็นระเบียบ มีรูปร่างคล้ายองุ่น (Grape-like structure) กลุ่มก้อนของอนุภาคที่ติดกันนี้คือ “แอกริเกต” เกิดจากการหลอมติดของอนุภาคขนาดเล็กๆ ที่เรียกว่า “โนดูล” (Nodules) ซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของเขม่าดำ แต่ละโนดูลเกิดจากการเรียงตัวหลายๆ ชั้นของแผ่นแกรไฟต์ (Graphitic layer planes) เป็นผลึกเรียงเป็นวงขยายออกตามแนวรัศมี โครงสร้างผลึกของเขม่าดำจะไม่เป็นระเบียบเหมือนแกรไฟต์ เช่น มีระยะห่างระหว่างชั้นมากกว่า (ประมาณ 3.5 Å) มีอะตอมที่หายไป (Missing atoms) และอาจมีหมู่ฟังก์ชันหรืออะตอมของธาตุอื่นด้วย เช่น ออกซิเจน แสดงโครงสร้างของเขม่าดำดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเขม่าดำ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางบาวด์ (Bound Rubber)

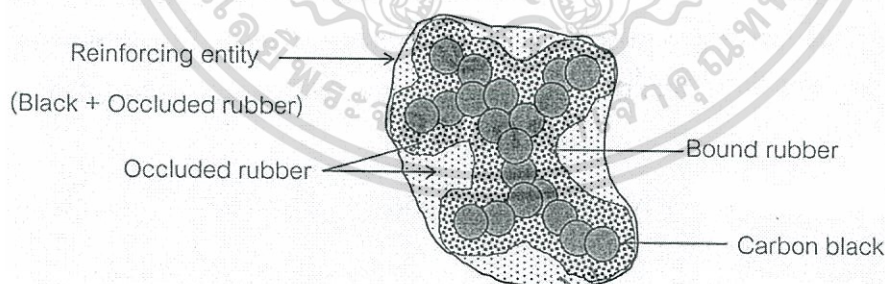
ยางบาวด์ คือ ยางส่วนที่ติดอยู่กับโครงสร้างของเขม่าดำ ยางบาวด์จะยึดติดกับโครงสร้างเขม่าดำอย่างแข็งแรงมาก จะไม่หลุดออกแม้ว่าทำการสกัดยางผสมเขม่าดำด้วยตัวทำละลายที่ดี

การเกิดยางบาวด์เป็นหลักฐานที่เด่นชัดว่ายางเกิดอันตรกิริยากับเขม่าดำ เช่น เกิดการยึดเกาะทางกายภาพ (Physical adhesion) เกิดพันธะเคมี (Chemical bonding) เกิดการยึดเกาะทางเคมีหรือเคมีซอร์พชัน (Chemisorption) ฯลฯ ทำให้ยางเกิดการยึดเกาะที่ติดบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของโครงสร้างเขม่าดำ ไม่ถูกตัวทำละลายที่ดีสกัดออก

ปริมาณยางบาวด์ในยางผสมเขม่าดำจะสัมพันธ์กับลักษณะของเขม่าดำ กล่าวคือ เขม่าดำที่มีโครงสร้างมากและมีขนาดเล็กหรือพื้นที่ผิวสูงจะเกิดยางบาวด์ปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดการเสริมแรงของเขม่าดำมากขึ้น [12]

ยางออกคลูด (Occluded Rubber)

ยางออกคลูด (Occluded Rubber) คือยางส่วนที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่าง (Voids) ในโครงสร้างแอกกรีเกตของเขม่าดำดังรูปที่ 2.4 ยางออกคลูดมีความหมายกว้างและครอบคลุมส่วนของยางบาวด์ กล่าวคือยางออกคลูดมีความหมายรวมยางที่อยู่ภายในช่องว่างของเขม่าดำที่ไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ รวมกับยางที่เกิดอันตรกิริยา เช่น พันธะเคมี การยึดเกาะเชิงกล ฯลฯ ข้อดีของยางออกคลูดคือ ยางออกคลูดที่แทรกอยู่ในช่องว่างของเขม่าดำในยางมากขึ้นหรือเพิ่มอัตราส่วนโดยปริมาตรของเขม่าดำในยาง (Effective volume fraction of carbon black) ทำให้ยางผสมเขม่าดำมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ปริมาณยางออกคลูดจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาตรช่องว่างในเขม่าดำ ดังนั้นเขม่าดำที่มีโครงสร้างมากจะเกิดยางออกคลูดมาก [12]

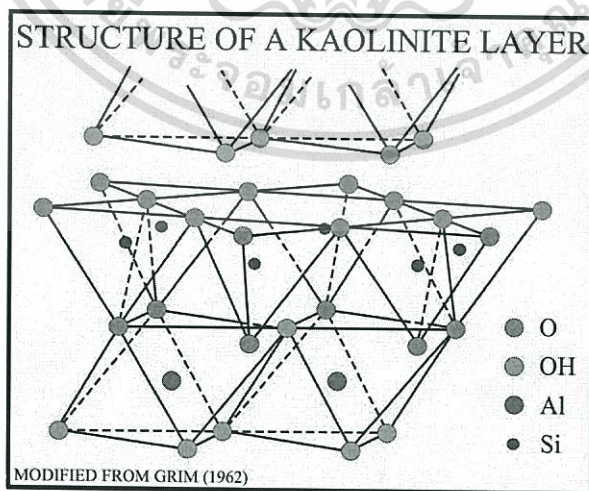


รูปที่ 2.4 ภาพวาดแสดง โครงสร้างของเขม่าดำ, Bound rubber และ Occluded rubber รวมเป็นส่วนเสริมแรง (Reinforcing entity) [12]

2.3.3 ดินขาว (Clay)

ดินขาวหรือเคลย์เป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้กันมาก เพราะมีราคาถูก หาได้ง่าย มีคุณภาพค่อนข้างสม่ำเสมอ ให้การเสริมแรงได้เล็กน้อยถึงปานกลาง และทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้โดยง่าย โดยเฉพาะกระบวนการอัดผ่านคานและการรีดด้วยเครื่องคาร์เลนเดอร์ (Calender) แม้ว่าเคลย์จะมีอยู่หลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางคือเกาลิน (Kaolin) หรือ ไชน่าเคลย์ (China clay) ซึ่งคือไฮเดรตอะลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrated aluminium silicate, $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) เคลย์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่จะมีสีขาวหรือสีครีม มีค่า pH ประมาณ 5 และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.6 g/cm^3 เคลย์มีโมเลกุลของน้ำ (Bound water) ติดอยู่ในโครงผลึก ลักษณะผลึกเป็นแผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal platelets) ซ้อนกันเป็นชั้นๆ ขนาดใหญ่ซึ่งแตกต่างจากเขม่าดำที่มีรูปร่างเป็นรูปทรงกลม มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) แตกต่างกันมาก คือ 12:1 ถึง 1:1 ในบางกระบวนการผลิตอาจมีการแยกชั้นของโครงสร้างให้แยกออกจากกันเป็นแผ่น (Layers, Stacks หรือ Platelets) หรือที่เรียกว่าดีลามีเนชัน (Delamination) ทำให้เคลย์เกรดดีลามีเนชันมี Aspect ratio สูง มีความสามารถในการเสริมแรงได้ดี

เคลย์เป็นสารตัวเติมที่ได้จากธรรมชาติ คือ การขุดจากแร่ดินขาวหรือเคลิไนต์ (Kaolinite) แล้วทำให้บริสุทธิ์ นิยมใช้มากที่สุดเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำชนิดอื่น เนื่องจากมีราคาถูก หาได้จากธรรมชาติ สีขาว เป็นผงขนาดเล็ก มีความแข็งสูงและพื้นผิวที่ละเอียด นิยมใช้ผสมเพื่อเพิ่มความแข็ง (Stiffness) ให้กับพอลิเมอร์ สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นสารตัวเติมได้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก ยาง สีทา ปูน เซรามิกส์ หมึกพิมพ์ กาว สิ่งทอและยา แต่มีความหนาแน่นค่อนข้างสูง เมื่อใส่ปริมาณมากจะทำให้ผลิตภัณฑ์อย่างหนัก เคลย์เป็นสารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง (Semi-reinforcing fillers) หรือไม่เสริมแรง ช่วยลดต้นทุนอย่างเดียว [12,14]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของดินขาว (Kaolin) [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

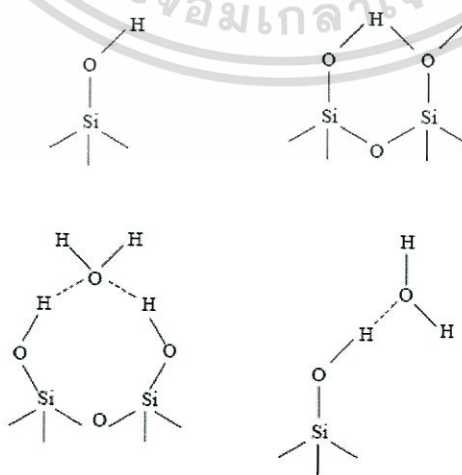
2.3.4 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำอื่นๆ โดยเฉพาะซิลิกาที่ขนาดอนุภาคเล็ก ซิลิกามีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ข้อดีของซิลิกา คือ ช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่น เพิ่มความแข็งแรงลึกลับ ลดความร้อนสะสม เพิ่มความต้านทานการขาด และเพิ่มการยึดเกาะกับองค์ประกอบอื่นๆ ในยาง เป็นต้น เมื่อเทียบกับเขม่าดำที่มีพื้นที่ผิวเท่ากันแล้ว ซิลิกาจะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเขม่าดำ โดยเฉพาะค่ามอดูลัสและค่าความต้านทานต่อการขาด เนื่องจากซิลิกามีอันตรกิริยากับยางธรรมชาติต่ำกว่าเขม่าดำ การใช้งานซิลิกาจึงนิยมใช้สารคู่ควบ (Coupling agents) เดิมลงไปด้วย เช่น สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ทำหน้าที่เคลือบผิวอนุภาคซิลิกาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัฏภาค ทำให้สมบัติของยางดีขึ้น [12]

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ได้จากทั้งธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ สมบัติของซิลิกาขึ้นกับหลายปัจจัย ได้แก่

- ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิว
- ปริมาณน้ำในโครงสร้าง (Extent of hydration)
- สมบัติทางกายภาพ เช่น pH องค์ประกอบทางเคมี การดูดซับน้ำมัน ฯลฯ

เนื่องจากซิลิกาประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจน จึงมีหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol group, $-\text{Si}-\text{OH}$) ชนิดต่างๆ บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำที่สามารถเกาะติดบนพื้นผิวและยังมีผลต่อความเป็นกรดบนพื้นผิวของซิลิกาอีกด้วย จากความมีขี้หรือความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของซิลิกา ทำให้สารตัวเติมชนิดนี้สามารถเสริมแรงได้ดีในยางที่มีขี้ เช่น ยางไนไตรล์ (NBR) หรือยางคลอโรพรีน (CR) มากกว่ายางที่ไม่มีขี้ เช่น ยางธรรมชาติ (NR) และยางเอสบีอาร์ (SBR)



รูปที่ 2.6 ลักษณะของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกา [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกาสามารถแบ่งได้หลายชนิดดังนี้

1. ซิลิกาจากธรรมชาติหรือซิลิกาชนิดบด (Ground silica) เป็นซิลิกาที่ได้จากธรรมชาติ โดยการขุดจากเหมืองแล้วทำการบดให้มีขนาดเล็ก เป็นผลึกโดยธรรมชาติ ซิลิกาชนิดบดนิยมใช้เติมเพื่อลดต้นทุน เนื่องจากมีราคาถูกและช่วยเพิ่มสมบัติการทนความร้อน สามารถแบ่งย่อยได้ 3 ชนิด คือ ซิลิกาผลึก (Crystalline silica) ซิลิกาผลึกเล็ก (Microcrystalline silica) และซิลิกาไดอะตอมเมเชียส (Diatomaceous silica)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของซิลิกาจากธรรมชาติชนิดต่างๆ [12]

องค์ประกอบ	Crystalline silica	Microcrystalline silica	Diatomaceous silica
SiO ₂	99.7	99.9	86.9
Al ₂ O ₃	0.101	0.18	3.1
Fe ₂ O ₃	0.023	0.02	1.1
CaO	<0.01	0.04	0.41
MgO	<0.01	0.01	0.65
TiO ₂	0.019	-	0.18
LiO	0.25	0.25	3.8

ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของซิลิกาจากธรรมชาติชนิดต่างๆ [12]

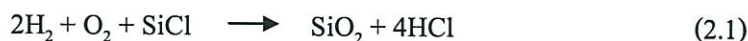
สมบัติ	Crystalline silica	Microcrystalline silica	Diatomaceous silica
Average particle size (μm)	1.9-8.8	2.1-8.2	3.0-8.0
Density (g/cm ³)	2.65	2.05	-
Surface area, BET N ₂ (m ² /g)	0.54-2.06	3.6-6.0	-
Oil absorption, ASTM D-281	24.1-36.2	26.0-30.0	105-135
Mohs hardness	6.5-7.0	6.5-7.0	6.5-7.0

2. ซิลิกาชนิดสังเคราะห์ (Synthetic silica) มีลักษณะเป็นผงสีขาวขนาดเล็ก สามารถแบ่งย่อยได้ 3 ชนิด คือ ซิลิกาชนิดไอ (Fumed silica) ซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica) และซิลิกาชนิดเจล (Gel silica)

- ซิลิกาชนิดไอ (Fumed silica) หรือซิลิกาชนิดไพโรเจนิค (Pyrogenic silica) เตรียมได้จากปฏิกิริยาเคมีในสถานะเป็นไอที่อุณหภูมิสูง เกิดจากซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (Silicon tetrachloride;

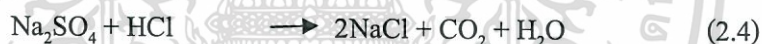
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SiCl_2) เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ในตะกิ้งของไฮโดรเจนและออกซิเจน คำน หรือไอของผลิตภัณฑ์จะควบแน่นกลายเป็นก้อนซิลิกาขนาดเล็กมาก (ประมาณ 20 nm) ดัดที่ผิว ลูกกลิ้งหมุน สรุปลงเป็นสมการเคมีดังนี้



อนุภาคซิลิกาชนิดนี้จะเกิดการหลอมรวมกันเป็นกลุ่มก้อนแอกกรีเกตและอาจเกิดการรวมกลุ่มเป็นก้อนแอกโกลเมอเรต ขนาดและพื้นที่ผิวของซิลิกาชนิดนี้สามารถควบคุมได้จาก อัตราส่วนของสารตั้งต้นจากปฏิกิริยา จากนั้นเป็นขั้นตอนการแยกขนาดโดยลมหมุน (Cyclone) หรือตะแกรงร่อน กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ตกค้างจากปฏิกิริยาอาจดูดซับติดที่ผิวของอนุภาค สามารถกำจัดออกได้ด้วยการผ่านอากาศร้อนชื้น (Humid hot-air) ซิลิกาชนิดนี้มีความบริสุทธิ์หรือ ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์สูงมีปริมาณความชื้นต่ำ (ประมาณ 1–2%) และมีอนุภาคขนาดเล็ก จึงมี ประสิทธิภาพการเสริมแรงสูง

- ซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica) สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาในสภาวะ ของเหลวซึ่งมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าในสภาวะไอ ซิลิกาชนิดนี้ได้จากการตกตะกอนสารละลาย โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) ด้วยสารละลายซัลฟิวริก (Sulfuric acid) หรือของผสมของกรด เหลือแอมโมเนียมคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังสมการ



สมบัติของซิลิกาชนิดนี้สามารถควบคุมได้จากหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นสารตั้งต้น อัตราการใส่สารตั้งต้น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง ฯลฯ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกกรอง ล้างทำความสะอาด ทำให้แห้ง และบดให้มีขนาดที่ต้องการ ซิลิกาชนิดตกตะกอนจะมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์น้อยกว่าและมีปริมาณความชื้นสูง

- ซิลิกาชนิดเจล (Gel silica) การตกตะกอนซิลิกาในสภาวะกรดเป็นเวลานานจะได้สาร ไฮโดรเจล (Hydrogel) หรือซิลิกาเจล (Silica gel) ที่เป็น โครงสร้างของอนุภาคคอลลอยด์ของซิลิกา ต่อกันคล้ายร่างแหสามมิติ (3-dimensional network) จากนั้นจะทำการชะล้าง ทำให้แห้ง และบด ให้มีขนาดเล็ก ขั้นตอนการทำให้แห้งมีความสำคัญ ถ้าทำให้แห้งอย่างรวดเร็วโดยไม่เกิดการยุบตัวของโครงสร้างจะได้ “แอโรเจล” (Aerogel) แต่ถ้าทำให้โมเลกุลของน้ำหลุดออกช้าๆ ทำให้เกิดการยุบตัวของโครงสร้างจะเรียกว่า “ซีโรเจล” (Xerogel)

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของซิลิกาจากการสังเคราะห์ชนิดต่างๆ [12]

องค์ประกอบ	Fumed silica	Precipitated silica	Gel silica
SiO ₂	> 98.3	94.0	99.6
Al ₂ O ₃	0.3 – 1.3	-	0.06
CaO	-	0.63	0.08
Na ₂ O	-	0 – 1.5	0.1
NaCl	-	1.7	-
LiO	2	5	5.14

ตารางที่ 2.5 สมบัติบางประการของซิลิกาจากการสังเคราะห์ชนิดต่างๆ [12]

สมบัติ	Fumed silica	Precipitated silica	Gel silica
Primary particle size (μm)	0.007 – 0.04	0.01 – 0.3	-
Average particle size (μm)	0.8	8 – 10	4 – 8
Density (g/cm ³)	2.2	2.2	2.2
Surface area, BET N ₂ (m ² /g)	50 – 400	60 – 300	100 – 800
Oil absorption, ASTM D-281	150 – 250	160 – 200	150 – 250
Mohs hardness	6.5 – 7	6.5 – 7	6.5 - 7
% Moisture	< 1.5	6	5
Silanol group (no./nm ²)	2.4	1.5 - 10	4 – 10

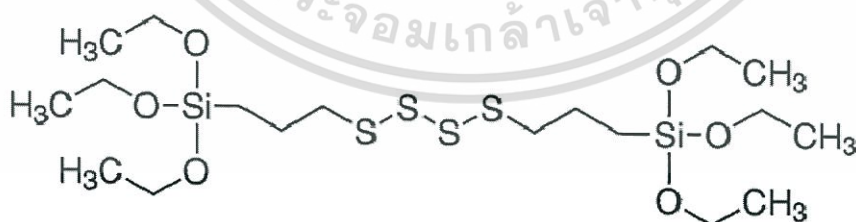
จากการเปรียบเทียบสมบัติของซิลิกาจากธรรมชาติ (ตารางที่ 2.3) และซิลิกาจากการสังเคราะห์ (ตารางที่ 2.5) จะเห็นได้ว่าซิลิกาจากการสังเคราะห์มีพื้นที่ผิวมากกว่าเพราะมีขนาดเล็ก จึงมีประสิทธิภาพการเสริมแรงดีกว่า แต่ดูความชื้นจากบรรยากาศมากกว่า

สารคู่ควบ (Coupling agents)

การเติมสารคู่ควบ [14,17] ลงไปจะทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติที่ไม่มีขั้วและซิลิกาสูงขึ้น เพราะสารคู่ควบประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมี 2 หมู่ที่แตกต่างกัน คือ หมู่อัลคอกซี (Alkoxy group) เช่น หมู่เมทอกซี (-OCH₃) หรือ หมู่เอทอกซี (-OC₂H₅) และหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ (Organo functional group) เมื่อเติมสารคู่ควบลงไปหมู่อัลคอกซีซึ่งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของโมเลกุล จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกา ในระหว่างกระบวนการผสมเกิดเป็นพันธะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะชนิดใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไซลอคเซนที่มีความเสถียรและมีการปลดปล่อยแอลกอฮอล์ออกมา ทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยา ระหว่างกันลดลง ซิลิกาจึงสามารถแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายยิ่งขึ้น ยางผสมสูตรที่ได้จะ มีความหนืดลดลง สามารถไหลและขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ส่วนหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งอยู่ที่ปลายอีก ด้านหนึ่งจะช่วยทำให้ซิลิกาเข้ากับยางได้ง่ายในระหว่างกระบวนการผสม เพราะหมู่ที่เป็น สารอินทรีย์นี้มีความเป็นขั้วต่ำจึงเข้ากับยางที่ไม่มีขั้วได้ง่าย นอกจากนี้หมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ของ สารคู่ควบยังมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งในระหว่างการเชื่อมโยงกำมะถันในสารคู่ควบจะเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization reaction) เกิดเป็นการ เชื่อมโยงทางเคมีขึ้น ด้วยเหตุนี้สารคู่ควบจึงทำหน้าที่เปรียบเสมือนสะพานเชื่อมระหว่างซิลิกากับ ยางธรรมชาติ ทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของ ซิลิกาจึงสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้การเติมสารคู่ควบลงไปจึงส่งผลทำให้ยางธรรมชาติที่ผ่านการ เชื่อมโยงมีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น โดยเฉพาะค่ามอดุลัส ความแข็งแรงดึง ความทนทานต่อการ ฉีกขาด และความต้านทานต่อการขูดถู เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วการเติมสารคู่ควบลงไป ปริมาณเล็กน้อยจะช่วยทำให้ยางเชื่อมโยงมีความ ต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตก (Cut growth resistance) สูงสุด แต่ในกรณีที่ต้องการยาง เชื่อมโยงที่มีความต้านทานต่อการขูดถูสูงสุดจำเป็นต้องเติมสารคู่ควบลงไป ปริมาณมากขึ้น นอกจากสมบัติเชิงกลแล้วสารคู่ควบยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ของยาง เชื่อมโยงอีกด้วย โดยเฉพาะการลดความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน ตัวอย่างของ สารคู่ควบที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ ไตรเอทอกซีไซลิทโรพพิเทอเรซัลไฟด์ (bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide, Si-69) เมอร์แคปโตพริโพรพิลไตรเมทอกซีซิลเลน (mercaptopropyl-trimethoxysilane, A-189) และไทโอไซยานาโทพริโพรพิลไตรเอทอกซีซิลเลน (3-thiocyanato-propyl-triethoxysilane, Si-264) เป็นต้น



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน Si-69 [18]

2.4 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)

แกลบข้าว (Rice Husk, RH) คือ ผลผลิตที่ได้จากการสีข้าว เป็นเปลือกของข้าวสาร เป็น ส่วนที่เหลือจากการผลิตข้าวสาร ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่สำคัญชนิดหนึ่ง ในการสี แอกลบนี้เป็นแอสสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าวจะได้ปริมาณแกลบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเปลือกข้าว ในข้าวเปลือกมีแกลบประมาณ 25.92 – 26.28% [19] เมล็ดมีลักษณะเป็นรูปทรงรี เม็ดยาวสีเหลืองอมน้ำตาลหรือเหลืองนวลแล้วแต่ภูมิภาคที่มีการปลูกข้าว แกลบเมื่อนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวลแล้วจะกลายเป็นเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกา (SiO_2) โดยสามารถนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมีและการเผาที่อุณหภูมิสูง ซิลิกาในเถ้าแกลบมีทั้งที่เป็นซิลิกาผลึก (Crystalline silica) ซิลิกาผลึกสามารถแบ่งย่อยเป็นหลายชนิดตามความแตกต่างของรูปร่าง ลักษณะผลึกและความหนาแน่นของซิลิกา รูปร่างของผลึกมีหลายแบบ เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม สี่เหลี่ยมลูกบาศก์และเส้นยาว และซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) ซึ่งเป็นซิลิกาที่มีรูปร่างไม่เป็นผลึก (Non-crystalline silica) [20]

ลักษณะวิทยาของแกลบ

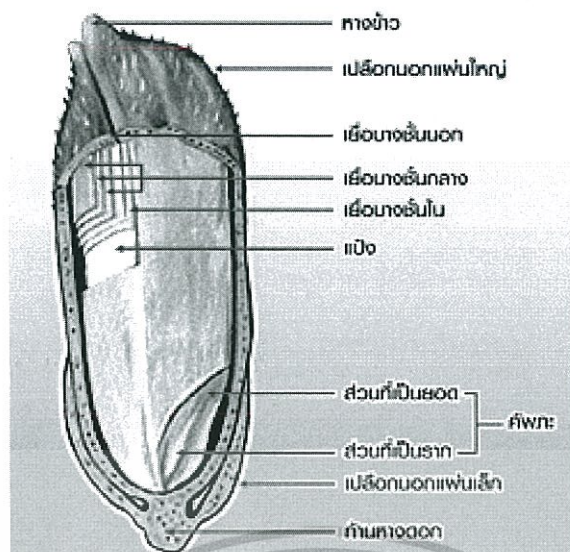
ผิวนอกของแกลบมีลักษณะเป็นเซลล์ที่เป็นรูปเหลี่ยม ซึ่งมีความเข้มข้นของซิลิกาสูง ถูกปิดทับด้วยคิวติเคิล (Cuticle) หนาและมีขนสั้นๆ อยู่บนผิว ภายในประกอบด้วยเส้นใยและเซลล์ที่ประกอบด้วยเส้นใยต่างๆ ชั้นกลางมีปริมาณซิลิกาอยู่ต่ำกว่าชั้นนอก โดยทั่วไปอาจสรุปโครงสร้างเนื้อเยื่อของแกลบได้ดังนี้

- ผนังเซลล์ชั้นนอก (Primary cell wall) ประกอบด้วยเซลล์ลักษณะเป็นปุ่มที่มีปริมาณซิลิกาอยู่สูง

● สเคอเรนไคมา (Sclerenchyma) ประกอบด้วยเส้นใยต่างๆ อันประกอบด้วยลิกนินและซิลิกา

● พาราเรนไคมา (Parenchyma) เป็นเซลล์ลักษณะคล้ายฟองน้ำมีรูพรุนและมีรูปร่างแตกต่างกันไป

- ผนังเซลล์ชั้นใน (Secondary cell wall) ประกอบด้วยเส้นใยที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน [20]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเมล็ดข้าว [21]

องค์ประกอบของแกลบ

แกลบมีลักษณะเหนียว แข็งคล้ายไม้ มีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ และมีปริมาณเถ้าสูง โดยทั่วไปแกลบจะมีขนาด 5-10 mm กว้างประมาณ 1-2 mm หนาประมาณ 0.5 mm แกลบมีองค์ประกอบตามตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของแกลบ [22]

สมบัติ	ร้อยละ
ความชื้น	7.6-10.2
โปรตีน	1.9-3.7
ไขมัน	0.3-0.8
เส้นใยหยาบ	35.0-46.0
คาร์โบไฮเดรตที่ใช้ประโยชน์ได้	26.5-29.8
เถ้า	13.2-21.0
เส้นใยอาหาร (สกัดโดยสารฟอกเป็นกลาง)	66.0-74.0
เส้นใยอาหาร (สกัดโดยสารฟอกเป็นกรด)	58.0-62.0
ลิกนิน	9.0-20
เซลลูโลส	28.0-36.0
เพนโทเซน	21.0-22.0
เฮมิเซลลูโลส	12.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกลบมีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้

1. คาร์โบไฮเดรต ส่วนใหญ่จะเป็นเซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เฮมิเซลลูโลส คือ กลูโคไซแลน (Glucosylan) ที่สามารถสลายตัวด้วยน้ำ (Hydrolysis) ไปเป็นไซโลส (Xylose) ได้ ส่วนแป้งนั้นมีอยู่ในแกลบเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2.6 โครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสแสดงได้ดังในรูปที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ

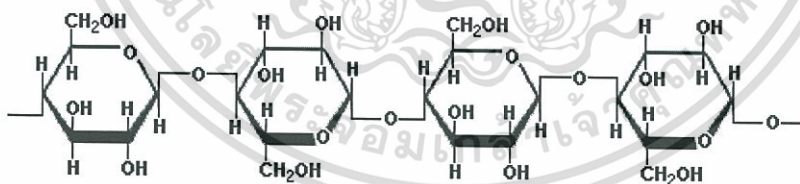
2. โปรตีน โปรตีนในแกลบมีอยู่ประมาณ 1.9-3.7%

3. ไขมัน ปริมาณที่พบอยู่ในแกลบมีอยู่ตั้งแต่ 0.3-0.8% โดยปกติแล้วส่วนของแกลบมีไขมันเป็นองค์ประกอบอยู่ไม่เกิน 1% ไขมันส่วนเกินนั้นพบว่ามาจากรำข้าวที่ติดอยู่หลังจากผ่านกระบวนการสีข้าว แต่ในแกลบมีปริมาณกรดอิสระมากกว่าในรำข้าวถึง 4 เท่า

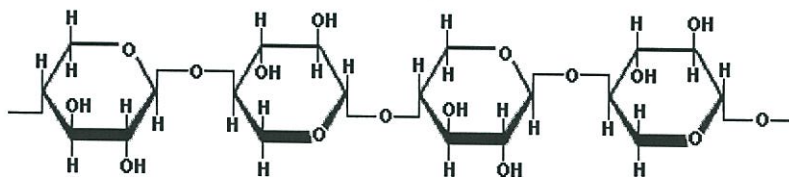
4. ลิกนินและควิติน ส่วนใหญ่จะพบลิกนินอยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส พบมากในบริเวณผนังเซลล์ ซึ่งโครงสร้างของลิกนินแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ควิตินเป็นสารพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีชื่อเรียกว่า กรดไฮดรอกซีมอนอคาร์บอกไซลิก (Hydroxymonocarboxylic acid) มีสมบัติเป็นสารที่มีความลื่นและสามารถกั้นน้ำได้ จะปกคลุมอยู่บริเวณผิวภายนอกของแกลบ

5. วิตามินและกรดอินทรีย์ วิตามินที่พบในแกลบ ได้แก่ ไทอามิน (Thiamin) ไรโบฟลาวิน (Riboflavin) และไนอาซิน (Niacine) กรดอินทรีย์ที่พบมาก ได้แก่ กรดออกซาลิก และกรดซิตริก ส่วนกรดอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟูมาลิก กรดมาลิก และกรดของสารประกอบวงแหวน

6. สารประกอบอนินทรีย์ ในเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาไหม้สารอนินทรีย์อยู่ในเถ้าแกลบจะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ที่เหลือจะเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะอีกหลายชนิด

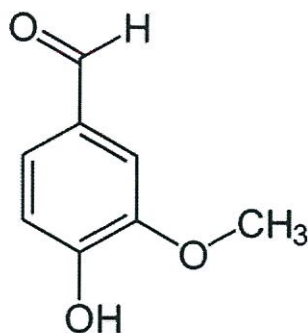


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเซลลูโลส [23]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของลิกนิน [24]

การแบ่งประเภทของเถ้าแกลบ

เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่ำและมีความชื้นพอประมาณ มีซิลิกาอยู่ในรูปของอสัณฐาน (Amorphous) แต่ถ้าได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่ำแล้วไปเผาที่อุณหภูมิสูงอีกครั้งจะได้เถ้าแกลบขามีซิลิกาอยู่ในรูปของอสัณฐานเป็นจำนวนน้อยและอยู่ในรูปของ Cristobalite มาก ส่วนเถ้าแกลบเทาจะอยู่ในรูปของอสัณฐาน และเถ้าแกลบดำจะอยู่ในรูปของ Cristobalite เป็นส่วนมาก (Cristobalite เป็น Polyamorphous)

จากการหาค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) เถ้าแกลบขาวจะมีค่าความหนาแน่นจำเพาะน้อยกว่าเถ้าแกลบเทา และเถ้าแกลบเทาจะมีความหนาแน่นจำเพาะน้อยกว่าเถ้าแกลบดำ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ลักษณะการเผาและความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของเถ้าแกลบชนิดต่างๆ [22]

ชนิด	ลักษณะการเผา	Bulk density (g/cm ³)
1. เถ้าแกลบดำ	- เผาที่อุณหภูมิต่ำ	0.8876
	- เผาที่อุณหภูมิต่ำจนได้เป็นสีเทา แล้วจึงปรับอุณหภูมิให้สูง	0.8126
2. เถ้าแกลบเทา	- เผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 600°C	0.7573
3. เถ้าแกลบขาว	- เผาแกลบจากโรงสีข้าว	0.5837

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ [25]

องค์ประกอบ	ร้อยละ	
	เถ้าแกลบขาว	เถ้าแกลบดำ
SiO ₂	97.00	74.85
K ₂ O	1.05	1.22
Na ₂ O	0.30	0.13
MgO	0.53	0.38
Fe ₂ O ₃	0.25	0.13
CaO	0.77	0.40
MnO	0.14	0.16
TiO ₂	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	0.27	0.23
P ₂ O ₅	1.00	0.96
Loss on ignition (LOI)	0.20	21.00

ประโยชน์ของแกลบ

ประโยชน์ของแกลบส่วนใหญ่จะนำมาใช้ประโยชน์โดยตรง [22] เช่น

1. ใช้เป็นเชื้อเพลิง แกลบจะให้พลังงานความร้อนประมาณ 3800 kcal/kg ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านไม้ (4500-5000 kcal/kg) จึงใช้แกลบแทนถ่านไม้ได้
2. ใช้ผสมกับดินเหนียวทำอิฐ จะทำให้อิฐที่ได้แข็งแรงและสามารถตัดเจาะรูหรือตอกตะปูได้
3. ใช้ผสมกับดิน ทำให้ดินร่วนซุย ไม่แน่นทึบ และช่วยให้ดินอุ้มน้ำดีขึ้น
4. ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น ไก่หรือสุกร โดยใช้แกลบรองพื้น ทำให้พื้นไม่แฉะและไม่มีกลิ่นเหม็น
5. ใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ เช่น เบ็ด ไก่ วัว ควาย เพื่อลดต้นทุน
6. เป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช โดยใช้ผสมกับปุ๋ยแอมโมเนียมฟอสเฟต ช่วยให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นจากการใช้ปุ๋ยอย่างเดียว 5 - 24%
7. ใช้เป็นฉนวนความร้อน เช่น คลุมน้ำแข็งไม่ให้ละลายง่าย แกลบที่ใช้งานแล้วสามารถนำไปคลุมโคนต้นไม้ เพื่อช่วยให้ความชุ่มชื้น และช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำจากดินได้
8. ใช้เป็นสารตัวเติมและสารเติมแต่ง
9. ใช้ทำกระดาษแต่ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากเส้นใยมีขนาดสั้นเกินไปทำให้ได้กระดาษที่มีคุณภาพไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ใช้เป็นตัวพาและสารดูดซับ แกลบที่มีความละเอียดแตกต่างกันสามารถนำมาใช้งาน เป็นสารตัวพาและสารดูดซับสำหรับวิตามิน ยาฆ่าแมลง ยาปฏิชีวนะ และแร่ธาตุได้

11. เป็นแหล่งของซิลิกา ในแกลบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบประมาณ 18% ซึ่งเป็นซิลิกาที่มี สารปนเปื้อนต่ำ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดี

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

H. Ismail และคณะ [26] ศึกษาผลของ Multifunction additive (MFA) ในยางธรรมชาติโดยใช้ถั่วแกลบขาวเป็นสารตัวเติม โดยปริมาณถั่วแกลบขาวที่สามารถใส่ได้มากที่สุดคือ 10 phr ซึ่งถ้าใส่ถั่วแกลบขาวมากเกินไปจะทำให้สมบัติด้อยลง เมื่อเติม MFA ลงในยางผสมสูตรจึงทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและการเชื่อมโยงของยางที่มีถั่วแกลบขาวเป็นสารตัวเติม โดยให้ปริมาณถั่วแกลบขาวคงที่ที่ 10 phr และทำการเติม MFA ลงไปที่ปริมาณ 3 phr จะทำให้มีสมบัติทางกายภาพของยางเชื่อมโยงดีที่สุด เมื่อทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า MFA สามารถปรับปรุงการกระจายตัวของสารตัวเติมได้ เพราะหน้าที่ที่หลากหลายของ MFA ที่มีสมบัติช่วยเรื่องการผสม การกระจายตัวของสารตัวเติม ช่วยเร่งการเชื่อมโยง และช่วยไม่ให้ยางติดแม่พิมพ์

H. Ismail และคณะ [27] ศึกษาผลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่อัตราส่วน 30:70 (NR/LLDPE) โดยใช้ถั่วแกลบขาว (WRHA) เป็นสารตัวเติมและพอลิพรอพิลีนเอทิลีนอะคริลิกแอซิด (Poly (propylene-ethylene-acrylic acid : PPEAA) เป็นสารช่วยผสมทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด โรลเลอร์เบลด (Roller blade mixer) ที่อุณหภูมิ 150°C ความเร็วรอบ โรเตอร์ 55 รอบต่อนาที ผสมเป็นเวลา 15 นาที ซึ่งทำการทดสอบสมบัติต่างๆ เมื่อปริมาณถั่วแกลบขาวเพิ่มขึ้นโดยไม่เติมสารช่วยผสมพบว่า ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและการบวมตัวในน้ำมันมีค่าลดลง แต่ค่ามอดูลัสและค่าความแข็งกดมีค่าเพิ่มขึ้น จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าการกระจายตัวและการเข้ากันของสารตัวเติมค่อนข้างต่ำ เนื่องจาก WRHA เป็นสารตัวเติมมีขั้วจึงยากที่จะผสมเข้ากันกับ NR/LLDPE ซึ่งไม่มีขั้ว เมื่อใช้สารช่วยผสม PPEAA 3% โดยน้ำหนักของ LLDPE พบว่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัส เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่าความแข็งกดมีค่าสูงขึ้น แต่การบวมตัวในน้ำมันมีค่าลดลง ซึ่ง PPEAA จะไปช่วยปรับปรุงการเกิดพันธะยึดเกาะระหว่างวัฏภาค (Interfacial bonding) ระหว่าง WRHA กับ NR/LLDPE เนื่องจากหมู่เอทิลีนใน PPEAA ช่วยให้เกิดอันตรกิริยา และการเข้ากันได้ของ NR/LLDPE ซึ่งเป็นเมทริกซ์ นอกจากนี้หมู่อะคริลิกใน PPEAA ยังเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับหมู่ไฮดรอกซิลของ WRHA อีกด้วย สรุปได้ว่าถ้าอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับส่วนของพอลิเมอร์และการเข้ากันได้ของสารตัวเติมในพอลิเมอร์มีค่าต่ำจะทำให้สมบัติของพอลิเมอร์มีค่าต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วย และเมื่อเติมสารช่วยผสมลงไปจะสามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสม NR/LLDPE ที่มี WRHA เป็นสารตัวเติมให้มีสมบัติดีขึ้น

S. Chuayjuljit และคณะ [28] ศึกษาการใช้ซิลิกาจากแกลบเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยนำแกลบที่ล้างด้วยน้ำแล้วไปทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.4 M. ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำแกลบไปเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้เถ้าแกลบสีขาวที่มีปริมาณซิลิกาสูงถึงประมาณ 99.6% จากนั้นนำเถ้าแกลบขาวที่ได้ไปบดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดแบบใช้กำลังลม เมื่อทดสอบสมบัติของซิลิกาที่เตรียมได้จากแกลบ พบว่านอกจากจะมีปริมาณซิลิกาและพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าซิลิกาทางการค้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ยังมีปริมาณความชื้นต่ำกว่าด้วย และเมื่อนำซิลิกาที่เตรียมจากแกลบนี้ไปใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ แล้วทดสอบการเชื่อมโยงยางด้วยเครื่องวัดการไหลแบบออสซิลेटติงดิสก์และเครื่องวัดความหนืดแบบหมุนนี้รวมทั้งทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความทนทานต่อการสึกหรอ ค่าการเสียดรูปถาวรหลังการกดอัด และการกระด้าง กระดองเทียบเคียงกับยางเชื่อมโยงที่เสริมแรงด้วยซิลิกาทางการค้า พบว่ายางธรรมชาติสูตรที่ใช้ซิลิกาจากแกลบมีสมบัติเชิงกลโดยทั่วไปดีกว่ายางธรรมชาติที่ใช้ซิลิกาทางการค้า และใช้เวลาในการเชื่อมโยงยางน้อยกว่าด้วย แต่ยางเชื่อมโยงที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบจะมีความแข็งแรงต่ำกว่ายางเชื่อมโยงที่เสริมแรงด้วยซิลิกาทางการค้า ยางเชื่อมโยงที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบจึงเหมาะที่จะนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติเชิงกลด้านอื่นนอกจากความแข็งแรง

วีรยา วรคันธีและคณะ [29] ศึกษาการเสริมแรงของยางธรรมชาติด้วยซิลิกาผสมระหว่างเถ้าลอยและซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica) โดยทำการปรับปรุงผิวเถ้าลอยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด Si-69 ปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของเถ้าลอย มาทำการศึกษาปริมาณเถ้าลอย 0-40 phr และขนาดอนุภาคเถ้าลอยช่วงต่างๆ ที่น้อยกว่า 150 μm จากนั้นทำการเลือกปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยและขนาดอนุภาคเถ้าลอยที่เหมาะสมไปศึกษาต่อด้วยการนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงร่วมกับซิลิกาชนิดตกตะกอนเป็นซิลิกาผสม (เถ้าลอย : ซิลิกาชนิดตกตะกอน) ด้วยสัดส่วนต่างๆ ดังนี้ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 ซึ่งทำการศึกษาทั้งระบบที่ไม่ปรับปรุงผิวและปรับปรุงซิลิกาชนิดตกตะกอนด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 ปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของซิลิกาผสม โดยทำการตรวจสอบสมบัติของยางผสมสูตรด้านลักษณะการเชื่อมโยงยาง สมบัติด้านความแข็งแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขูดถู จากการทดลองพบว่าการเติมซิลิกาผสมปริมาณ 10 phr ทั้งกรณีไม่ปรับปรุงผิวและปรับปรุงผิวซิลิกาชนิดตกตะกอนให้ลักษณะการเชื่อมโยงยางและสมบัติเชิงกลโดยรวมของยางเชื่อมโยงที่ไม่แตกต่างกันในทุกสัดส่วนของซิลิกาผสม ในขณะที่ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาผสมปริมาณ 40 phr ที่มีสัดส่วนของซิลิกาชนิดตกตะกอนมากกว่า 25% ให้สมบัติเชิงกลด้านต่างๆ แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดระหว่างระบบที่ไม่ปรับปรุงผิวกับปรับปรุงผิวซิลิกาชนิดตกตะกอน ซึ่งการปรับปรุงซิลิกาชนิดตกตะกอนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเสริมแรงของสารประกอบยางธรรมชาติให้สูงขึ้นมาก นอกจากนี้ยังพบว่ายางธรรมชาติที่เติมซิลิกาผสมด้วยเส้นใยขนาดเล็กลงกว่า $25 \mu\text{m}$ ให้ลักษณะการเชื่อมโยงยางและสมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่าการเติมด้วยเส้นใยขนาดอนุภาคในช่วง $45\text{-}74 \mu\text{m}$

W. Arayaprane และคณะ [30] ศึกษาการประยุกต์ใช้เส้นใยเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ เส้นใย (RHA) ที่ได้จากการใช้เส้นใยเป็นแหล่งพลังงาน มีส่วนประกอบของซิลิกาและคาร์บอนเหมือนเขม่าดำ ทำการผสมยางผสมสูตรด้วยระบบการเชื่อมโยงแบบดั้งเดิม ทำการเปรียบเทียบกับสารตัวเติมในเชิงการค้า (ซิลิกาและเขม่าดำ) ผลของลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย (0-40 phr) ความหนืดมูนีและเวลาเชื่อมโยงยางลดลง ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดลดลง ค่ามอดูลัสและความต้านทานต่อการขัดถูนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามเส้นใยมีสมบัติความยืดหยุ่นที่ดีกว่าซิลิกาและเขม่าดำ ลักษณะทางสัญญาณวิทยาพบว่าการกระจายตัวของสารตัวเติมเส้นใยในยางธรรมชาติเป็นไปอย่างไม่ต่อเนื่อง จากผลโดยรวมแสดงให้เห็นว่าเส้นใยสามารถใช้เป็นสารตัวเติมที่ถูกกว่าสำหรับยางเชื่อมโยงที่ไม่ต้องการการเสริมแรง

P. Sae-Oui และคณะ [31] ศึกษาการใช้เส้นใยเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติโดยเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้าอื่นๆ เส้นใยมีส่วนประกอบของซิลิกาและเหมือนเขม่าดำ เพราะเส้นใยเป็นของเหลือจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ทั้งซิลิกาและเขม่าดำได้รับการยอมรับว่าเป็นสารตัวเติมเสริมแรงหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางเพื่อเพิ่มสมบัติบางอย่างของยาง เช่น มอดูลัสและความแข็งแรงดึง ในการศึกษาครั้งนี้มีเส้นใยสองเกรด (เกรดที่มีคาร์บอนต่ำและคาร์บอนสูง) ทัลคัม เคลย์ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกาและเขม่าดำ พบว่าการใช้เส้นใยเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติทำให้ยางเชื่อมโยงมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า (ค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัส ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการขัดถูและการฉีกขาด) เมื่อเทียบกับการใช้สารตัวเติมเสริมแรงอย่างซิลิกาและเขม่าดำ จัดว่าเส้นใยเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง แม้ว่าจะทำการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยการเติมสารควบไซเลน (Si-69) แต่มีผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติของยาง เพราะเส้นใยมีอนุภาคขนาดใหญ่และบนพื้นผิวเส้นใยมีหมู่ไซลานอลน้อยกว่าบนผิวของซิลิกาทางการค้า ทำให้สารควบไซเลนที่เติมลงไปเกิดอันตรกิริยาได้ไม่ดีเท่าที่ควร

H. Ismail และคณะ [32] ศึกษาผลของสารควบไซเลนต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนและยางธรรมชาติ (PP/NR) ที่มีเส้นใยขาวเป็นสารตัวเติม ทำการผสมโดยใช้เครื่องบาร์เบลนเดอร์ที่อุณหภูมิ 180°C และความเร็วโรเตอร์อยู่ที่ 50 รอบต่อนาที ในสัดส่วน PP /NR คือ 70/30 ศึกษาสมบัติเชิงกลและการดูดซับน้ำ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยขาวเพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ฉูดขาด และความเค้นดึง ฉูดครากของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง แต่ค่าการดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเคลือบขาวที่เพิ่มขึ้น เมื่อเติมสารคู่ควบ ไฮเลน (3-aminopropyltriethoxysilane, 3-APE) ลงไปเพื่อปรับปรุงถ้าเคลือบขาว จะช่วยปรับปรุงสมบัติโมดูลัส ค่าความแข็งแรงดึง และความเค้นดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสมให้ดีขึ้น ผลการศึกษาการดูดซับน้ำแสดงให้เห็นว่าการเติมสารคู่ควบไฮเลนลงไปช่วยลดการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม PP/NR ให้น้อยลง เพราะ 3-APE เคลือบปกป้องผิว WRHA ช่วยลดการดูดซับน้ำของ WRHA และทำให้ WRHA ยึดเกาะกับพอลิเมอร์ผสมได้ดีขึ้น

H. M. Da Costa และคณะ [33] ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัตของยางธรรมชาติที่ใช้ถ้าเคลือบเป็นสารตัวเติม ทำการผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ในระบบการเชื่อมโยงแบบดั้งเดิม เมื่อนำไปทดสอบพบว่าความทนทานต่อการฉีกขาดและความแข็งแรงกดของถ้าเคลือบดำ ถ้าเคลือบขาว เขม่าดำและซิลิกาที่เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อเติมในปริมาณน้อย (10 phr) เมื่อเพิ่มปริมาณถ้าเคลือบดำจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับการใช้สารตัวเติมอย่างเขม่าดำและซิลิกา ส่วนถ้าเคลือบขาวแม้ว่าจะมีพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับเขม่าดำและซิลิกา แต่ให้ผลเชิงกลที่ดีกว่าทั้งซิลิกาและเขม่าดำ สามารถสรุปได้ว่าถ้าเคลือบขาวมีอันตรกิริยากับยางดีกว่าถ้าเคลือบดำ ถึงแม้ว่าถ้าเคลือบขาวจะกระจายตัวได้ดีกว่าถ้าเคลือบดำ แต่ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสมบัติเชิงพลวัตของถ้าเคลือบขาวเพื่อใช้เป็นสารเสริมแรง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีคนนำถ้าเคลือบมาทำการศึกษาใช้เป็นสารตัวเติมทั้งในยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ผสม ทั้งถ้าเคลือบขาว (WRHA) และถ้าเคลือบดำ (BRHA) เนื่องจากถ้าเคลือบมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา ซึ่งในทางอุตสาหกรรมยางมีการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงเป็นจำนวนมาก โดยในงานวิจัยนี้สนใจถ้าเคลือบดำซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักและยังมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบด้วย ซึ่งคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักในเขม่าดำ ในทางอุตสาหกรรมยางนิยมใช้ใช้งานเขม่าดำและซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ดีในยางธรรมชาติ และถ้าเคลือบดำยังฟุ้งกระจายน้อยกว่าถ้าเคลือบขาวขณะผสมเมื่อทำการผสมในเครื่องผสมระบบเปิด เพราะถ้าเคลือบดำมีความหนาแน่นรวมมากกว่าถ้าเคลือบขาว แต่เนื่องจากถ้าเคลือบดำมีหมู่ไฮลันอลบนพื้นผิวน้อยกว่าซิลิกา จึงได้นำมาทำการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไฮเลน (Si-69) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และยังทำการศึกษาผลของขนาดอนุภาคของถ้าเคลือบดำที่มีผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลด้วย โดยเลือกยางธรรมชาติชนิดยางแผ่นรมควันชั้น 3 (RSS 3) เป็นตัวแทนยางในงานวิจัยนี้ ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบเปิดและขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป (Compression molding)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสูตรยางที่ใช้เถ้าแกลบดำ (BRHA) เป็นสารตัวเติมเพิ่มเนื้อ (Fillers) เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในยาง โดยเลือกยางธรรมชาติชนิดยางแผ่นรมควันชั้น 3 (RSS3) ซึ่งงานวิจัยนี้มีขั้นตอนและวิธีดำเนินการของงานวิจัยดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 การตรวจสอบและวิเคราะห์เถ้าแกลบดำ

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG 400 ที่ 2.4 phr เปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ใช้ PEG 400 และผลของการเติมสารคู่ควบ (Coupling agent ; Si-69) ที่ 3% โดยน้ำหนักของเถ้าแกลบดำ

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของปริมาณเถ้าแกลบดำ (BRHA loading) ที่เหมาะสมในการเตรียมยางผสมสูตรที่ 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80 และ 100 phr

ตอนที่ 4 ศึกษาผลของขนาดเถ้าแกลบดำที่ขนาด 100, 100-150, 150-200, 200-250 และ เล็กกว่า 250 mesh ที่ปริมาณ 60 phr

ตอนที่ 5 ศึกษาผลการเสริมแรงของเถ้าแกลบดำเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นที่ 60 phr ได้แก่ เงาม้าดำ ซิลิกาและเคลย์

ทดสอบสมบัติของยางที่เตรียมได้ ดังนี้

- การทดสอบสมบัติเชิงกล
 - ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)
 - เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)
 - โมดูลัสของยางที่ 100% ดึงยืด (Rubber modulus; M100)
 - การทดสอบความแข็งกด (Hardness tests)
 - การทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set)
- การหาความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ด้วยเทคนิคการบวมตัวด้วยตัวทำ

ละลาย (Solvent swelling method)

- การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA)
- การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สารเคมี

- 1) ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ชนิดยางแผ่นรมควันชั้น 3 (RSS 3) จากส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันยาง กรมวิชาการเกษตร
- 2) เถ้าแกลบดำ (Black rice husk ash, BRHA) จากโรงไฟฟ้าชีวมวล บริษัท ไบโอบี-แมส เพาเวอร์ จำกัด จ.ชัยนาท
- 3) แคลไซน์เคลย์ (Calcined clay) ชื่อการค้า Iceberg® บริษัท เบอร์เจส ฟิกเมนต์ จำกัด
- 4) ซิลิกา (Silica) เกรด Tokusil® 255 บริษัท โตกุยามา สยามซิลิกา จำกัด
- 5) เขม่าดำ (Carbon black) เกรด N 330 บริษัท ไทยคาร์บอน จำกัด
- 6) สารเชื่อมโยงกำมะถัน (Sulfur) เกรด S Poland บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด
- 7) กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า บริษัท ยูนิตี้ อินเตอร์บิสซิเนส จำกัด
- 8) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เกรดการค้า บริษัท ยูนิตี้ อินเตอร์บิสซิเนส จำกัด
- 9) น้ำมันขาว (White oil) เกรดการค้า บริษัท ยูนิตี้ อินเตอร์บิสซิเนส จำกัด
- 10) สารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง (Antioxidant) : Wing stay® L บริษัทเบนเมเยอร์ จำกัด
- 11) พอลิเอทิลีน ไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) : PEG 400 บริษัทเบนเมเยอร์ จำกัด
- 12) MBTS (Mercaptobenzothiazole disulfide) เกรดการค้า บริษัท กิจไพบูลย์เคมี จำกัด
- 13) TMTM (Tetramethylthiuram monosulfide) เกรดการค้า บริษัท กิจไพบูลย์เคมี จำกัด
- 14) MBS (2-morpholiniothiobenzo thiazole) เกรดการค้า บริษัท กิจไพบูลย์เคมี จำกัด
- 15) Bis (3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide ชื่อทางการค้า ไชเลน (Si-69) บริษัทเบนเมเยอร์ จำกัด
- 16) โทลูอีน (Toluene) เกรดวิเคราะห้ บริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 17) ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) บริษัท แล็บ โซลูชัน แอนด์ เอ็นจิเนียริง จำกัด
- 18) เอทานอล (Ethanol) 95% เกรดการค้า จากองค์การสุรา กรมสรรพสามิต
- 19) กรดอะซิติก (Acetic acid) เข้มข้น 85% เกรดการค้า บริษัท ยูนิตี้ อินเตอร์บิสซิเนส จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของแคลไซน์เคลย์ (Calcined clay, Iceberg®)

สมบัติ	ค่าที่ได้
ความสว่าง (GE brightness)	92 %
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size)	1.4 μm
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	2.63
ค่าดัชนีการหักเห (Refractive index)	1.62
ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH @ 20% solids)	5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของซิลิกา (Tokusil® 255)

สมบัติ	ค่าที่ได้
พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area)	165 m ² /g
pH (5% suspension)	7
ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)	0.23 g/cm ³
SiO ₂ (Hydrated base)	88%
Ignition loss	4.75%

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของเขม่าดำ (N 330)

สมบัติ	ค่าที่ได้
ปริมาณคาร์บอน (Carbon content)	94.8%
ปริมาณเถ้า (Ash content)	0.7%
ปริมาณสารระเหย (Volatile matter)	2%
ความชื้น (Moisture)	2.5%
พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area)	71-85 m ² /g
ขนาดอนุภาค (Particle size)	0.026 – 0.03 μm
ความหนาแน่น (Density)	0.320 g/cm ³

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น LRM 200 บริษัท แล็บเทคเอ็นจิเนียร์ จำกัด
- 2) เครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น FOR LP-2020 บริษัท แล็บเทคเอ็นจิเนียร์ จำกัด
- 3) เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้งานหมุน (Moving Die Rheometer, MDR) รุ่น II F 150 บริษัท นิชิโกโซวจิ จำกัด
- 4) เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) รุ่น LR 5K บริษัท ลอยด์อินสทรูเมนต์ จำกัด
- 5) เครื่องวัดความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester) รุ่น SE-104DC บริษัท เอทีเอส ฟาร์เอส พี เอ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) เครื่องวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (Total Organic Carbon Analyzer, TOC) รุ่น SOLID SAMPLE MODULE SSM-5000 A บริษัท ซิมด์ซี จำกัด
- 7) เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyzer) รุ่น DMTA-V บริษัท ทีเอ อินสตรูเมนต์ จำกัด
- 8) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น S-3400N บริษัท ฮิทาชิ ไฮ-เทค โนโลยี ยุโรป จีเอ็มบีเอช จำกัด
- 9) เครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF) รุ่น SRS 3400 บริษัท บรูเคอร์ เอจี จำกัด
- 10) เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) รุ่น Mastersizer 3000 บริษัท Malvern จำกัด
- 11) เครื่องแยกขนาด (Sieve shaker) บริษัท นัมเฮง จำกัด ขนาด 100, 150, 200 และ 250 mesh
- 12) แม่แบบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด $152.4 \times 152.4 \times 2 \text{ mm}^3$
- 13) ตู้อบ
- 14) เครื่องชั่ง
- 15) อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมถ้ำแกลบดำ

นำถ้ำแกลบดำที่ได้มาจากโรงงานไฟฟ้าชีวมวล (จังหวัดชัยนาท) มาร้อนผ่านตะแกรงกรอง 4 ชั้น ดังนี้ ชั้นบนสุดมีขนาด 100 mesh ชั้นถัดลงไปมีขนาด 150, 200 และ 250 mesh ตามลำดับ ได้ถ้ำแกลบดำ 5 ขนาด ดังนี้ ใหญ่กว่า 100, 100-150, 150-200, 200-250 และเล็กกว่า 250 mesh โดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาดและอบถ้ำแกลบดำที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.4 ขนาดช่องตะแกรงร่อนในหน่วยต่างๆ [34]

Sieve size		
mesh	μm	mm
100	149	0.149
150	105	0.105
200	74	0.074
250	63	0.063

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การตรวจสอบและวิเคราะห์เส้นใยแก้วเคลือบดำ

วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยแก้วเคลือบดำที่ผ่านตะแกรงร้อนแต่ละชั้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษารูปร่างของเส้นใยแก้วเคลือบดำ วัดขนาดอนุภาคและหาพื้นที่ผิวจำเพาะของเส้นใยแก้วเคลือบดำที่ผ่านตะแกรงร้อนแต่ละชั้นด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Mastisizer 3000) วิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในเส้นใยแก้วเคลือบดำด้วยเครื่อง TOC และวิเคราะห์หาปริมาณออกไซด์ของสารประกอบในเส้นใยแก้วเคลือบดำโดยเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน โดยการนำเส้นใยแก้วเคลือบดำมาอัดเป็นเม็ดแล้วนำไปศึกษาด้วยเทคนิค XRF

3.4.3 การเตรียมเส้นใยแก้วเคลือบดำที่ปรับปรุงผิวด้วย Si-69 ด้วยวิธีสเปรย์

1. เตรียมสารละลายไฮดรอกไซด์ในแอลกอฮอล์ (95% เอทานอล + 5% น้ำ) โดยปรับ pH ให้ได้ 4.5-5.5 ด้วยกรดอะซิติก
2. คนให้เข้ากัน ให้ได้ความเข้มข้น 25% (v/v)
3. ทิ้งไว้อย่างน้อย 5 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส
4. สเปรย์สารละลายไฮดรอกไซด์บนเส้นใยแก้วเคลือบดำจนหมด
5. ล้าง 2 ครั้งด้วยเอทานอลครั้งละ 200 ml ด้วยเครื่องกรองสูญญากาศ
6. อบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 5-10 นาที เพื่อระเหยตัวทำละลาย

3.4.4 การเตรียมยางผสมสูตร

1. ชั่งยางธรรมชาติและสารเคมีต่างๆ ตามตารางที่ 3.2
2. เปิดเครื่องผสมชนิดสองลูกกิ้งแล้วใส่ยางธรรมชาติเพื่อให้แรงเฉือนระหว่างลูกกิ้งทำการบดย่อยจนสามารถพันรอบลูกกิ้งได้ เป็นเวลา 1-2 นาที
3. ใส่สารตัวเติมและสารเติมแต่งต่างๆ ยกเว้นสารเชื่อมโยยงก้ำมะถันและสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยยง (MBS, TMTM และ MBTS) โดยจะค่อยๆ ใส่ระหว่างลูกกิ้ง ทำการผสมโดยการกรีดและพับยาง (Cut-and-fold) เพื่อให้เกิดการผสมที่ดีเป็นเวลา 15 นาที ปรับระยะห่างระหว่างลูกกิ้งให้มีความหนาประมาณ 3-5 mm
4. เติมสารเชื่อมโยยงก้ำมะถันและสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยยง โดยค่อยๆ ใส่ระหว่างลูกกิ้ง ทำการผสมโดยการกรีดและพับยางต่อจนกระทั่งสารกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกับยางเป็นเวลา 10 นาที แล้วรีดยางออกเป็นแผ่นหนาประมาณ 2-3 mm

ตารางที่ 3.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ

สารเคมี	ปริมาณ (phr)						
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5	สูตรที่ 6	สูตรที่ 7
NR (RSS 3)	100	100	100	100	100	100	100
BRHA	5-100	5-100	5-100	5-100	-	-	-
Carbon black (N 330)	-	-	-	-	60	-	-
Silica (Tokusil® 255)	-	-	-	-	-	60	-
Calcined clay	-	-	-	-	-	-	60
PEG 400	-	2.4	-	2.4	-	2.4	-
Si-69 *	-	-	3	3	-	3	-
Wing stay® L	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
White oil	8	8	8	8	8	8	8
ZnO	5	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2
Sulfur	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
MBS	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
TMTM	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
MBTS	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

หมายเหตุ * Si-69 3% โดยน้ำหนักของ BRHA หรือ Silica

- สูตรที่ 1-4 ศึกษาผลของการไม่ปรับปรุง/ปรับปรุงพื้นผิวถ้าแก่ลบดำด้วย Si-69 หรือ/และ PEG 400 (ถ้าแก่ลบดำขนาดเล็กลงกว่า 250 mesh)

- สูตรที่ 4-7 ศึกษาผลการเสริมแรงของถ้าแก่ลบดำเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นที่ 60 phr ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black, CB) ซิลิกา (Silica) และดินขาว (Clay)

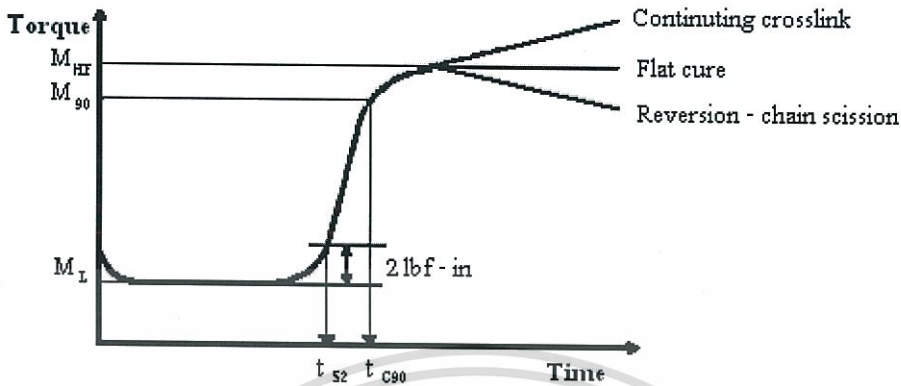
3.5 การทดสอบยาง

สมบัติของยางโดยทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ดังนี้

3.5.1 การหาเวลาเชื่อมโยงยางผสมสูตร (Cure time)

ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ $30 \times 30 \text{ mm}^2$ แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยง MDR ที่อุณหภูมิ 150°C เพื่อ

หาเวลาเริ่มเชื่อมโยงยางหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time, t_{s2}) เวลาเชื่อมโยงยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) และดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (Cure Rate Index, CRI) ของยางแต่ละสูตรซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.2



รูปที่ 3.1 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางผสมสูตรแสดงเวลาเชื่อมโยง ($t_{c(90)}$) และเวลาเริ่มเชื่อมโยงยาง (t_{s2}) [35]

เมื่อ M_L คือ ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)

M_{HF} คือ ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)

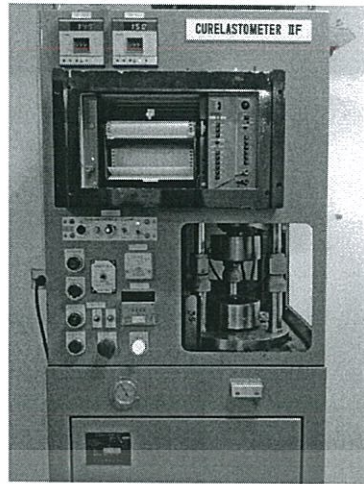
M_{90} คือ ค่าแรงบิดที่ 90% ของการเชื่อมโยง สามารถคำนวณได้จาก

$$M_{90} = M_L + 0.9 (M_{HF} - M_L) \quad (3.1)$$

t_{s2} คือ เวลาเริ่มเชื่อมโยงยางหรือเวลาสกอร์ช เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจนแรงบิดเพิ่ม 2 หน่วยแรงบิด (kgf.cm) เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด

$t_{c(90)}$ คือ เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อมโยง 90% (Optimum cure time)

$$\text{Cure Rate Index, CRI} = \frac{100}{t_{c(90)} - t_{s2}} \quad (3.2)$$

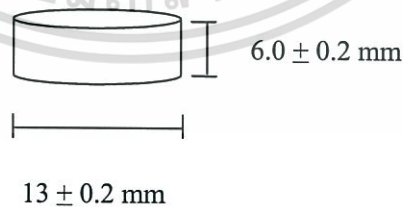


รูปที่ 3.2 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้งานหมุน (MDR)

3.5.2 การขึ้นรูปยางเชื่อมโยง

(ก) ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้ใส่แม่แบบสำหรับอัดเป็นแผ่น ($152.4 \times 152.4 \times 2 \text{ mm}^3$) แล้วนำแม่แบบใส่เครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) เพื่อทำการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น โดยทำการกดอัดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลาเท่ากับ $t_{c(90)} \times 1.2$ (คูณ 1.2 เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่แบบไปสู่ชิ้นงานยาง)

(ข) นำยางผสมสูตรที่เตรียมได้มากกดอัดขึ้นรูปในแม่แบบสำหรับชิ้นงานที่ใช้ทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกดใส่เครื่องกดอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา $t_{c(90)} + 2$ นาที (เนื่องจากแม่แบบที่ใช้มีความหนาของเหล็กที่หนามากจึงจำเป็นต้องเพิ่มเวลาให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์) ซึ่งชิ้นงานทดสอบที่ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกความหนา $6.0 \pm 0.2 \text{ mm}$ และเส้นผ่านศูนย์กลาง $13.0 \pm 0.2 \text{ mm}$ ดังรูปที่ 3.3



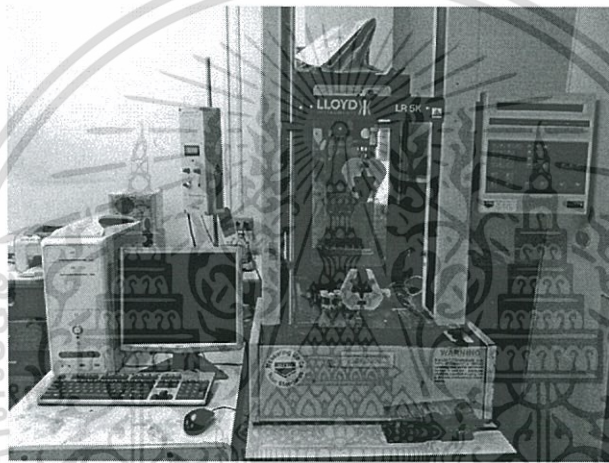
รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด [36]

3.5.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยง

1. การทดสอบแรงดึง (Tensile tests)

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ตามมาตรฐาน ASTM D 412 [37] โดยนำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.2 (ก) มาตัดเป็นรูปคัมเบลล์ (Dumbbell shape) กำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

ความเร็วในการดึงยึด	500 mm/min
ความยาวเกจหรือความยาวเริ่มต้น (Gauge length)	35 mm
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	1 kN
จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ	10 ชิ้นงาน



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM)

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุที่รับได้เมื่อให้แรงดึง (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาได้จากสมการที่ 3.3

$$\text{ความแข็งแรงดึง} = F / A \quad (3.3)$$

เมื่อ F = แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดสูงสุด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (mm^2)

- เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) หาได้จากสมการที่ 3.4

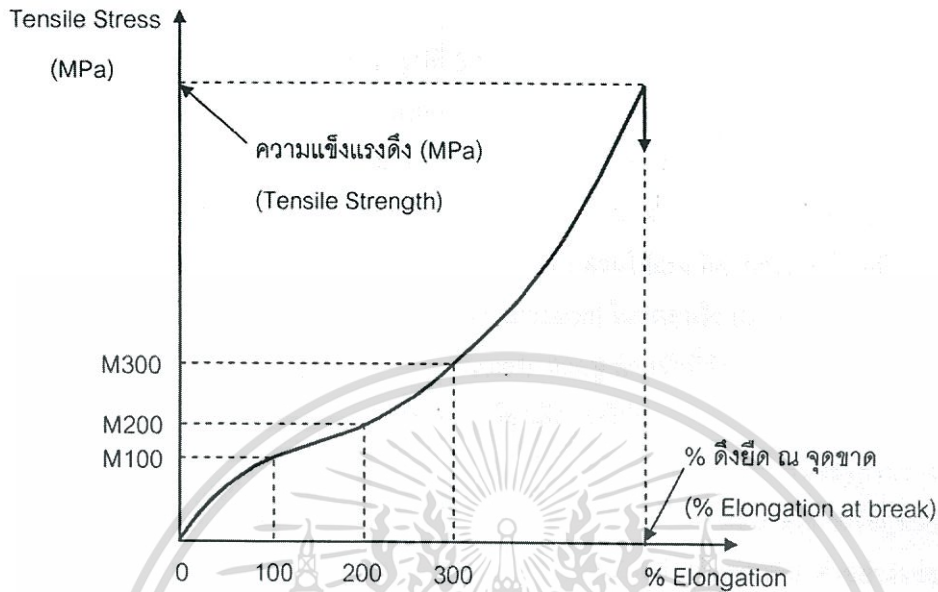
$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด} = \frac{(l - l_0)}{l_0} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ l = ความยาวสุดท้าย ณ จุดขาดของชิ้นงาน (mm)

l_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm) หรือความยาวเกจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

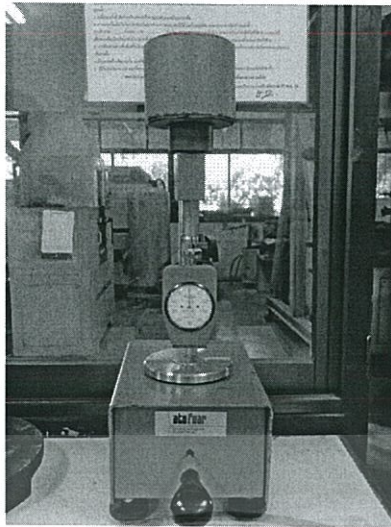
- ค่ามอดูลัสของยาง (Rubber modulus) เป็นค่าความเค้น (Stress) ที่เปอร์เซ็นต์ความเครียด
หนึ่งๆ เช่น M100 คือ ความเค้นที่ 100% ดึงยืด ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างกราฟความเค้น – ความเครียด (Stress-strain curve) ของการดึงตัวอย่าง [12]

2. การทดสอบความแข็งกด (Hardness tests)

นำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.2 (ก) มาทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ชนิด Shore A ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D 2240 [38] ซึ่งอ่านค่าความแข็งกดได้โดยตรงจากเครื่อง จากการกดที่ตัวอย่างหนาน้อย 6 mm สามารถซ้อนขึ้นชั้นทดสอบเพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการ ค่าความแข็งกดอ่านได้หลังจากกดเป็นระยะเวลา 5 sec ใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 10 ชิ้นในแต่ละสูตร โดยทำการทดสอบ 10 ครั้งคือ 10 จุดในการกดต่อหนึ่งชิ้นงานทดสอบ

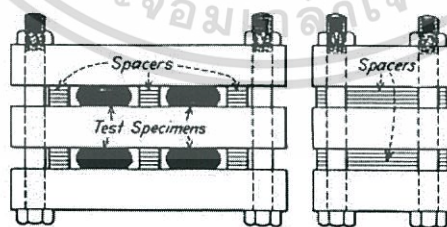


รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความแข็งแรงกดแบบคูโรมิเตอร์

3. การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 395-89 (Test Method B) [36]

นำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.2 (ข) มาวัดความหนาของชั้นทดสอบ นำไปวางระหว่างแผ่นเหล็กทั้งสองของอุปกรณ์สำหรับทดสอบการอัดที่มีแท่งเหล็กกั้น (Spacer bars) เพื่อกำหนดระยะในการอัด ยัดชั้นทดสอบให้มีความหนาเท่ากับแท่งเหล็กกั้น ซึ่งความหนาจะลดลงจากเดิมประมาณ 25% ต่อมานำอุปกรณ์สำหรับทดสอบการอัดที่มีชั้นทดสอบอยู่ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.7 เข้าไปในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 70°C นาน 22 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดนำชั้นทดสอบออกจากอุปกรณ์ทดสอบมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 30 นาที วัดความหนาของชั้นทดสอบ โดยทดสอบ 3 ชั้นต่อ 1 สูตร คำนวณผลดังสมการที่ 3.5



Device for Compression Set Test Under Constant Deflection, Test Method B

รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

$$\% C_B = [(t_0 - t_1)/(t_0 - t_n)] \times 100 \quad (3.5)$$

- เมื่อ C_B คือ การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (%)
 t_0 คือ ความหนาของชั้นทดสอบเริ่มต้น (mm)
 t_1 คือ ความหนาของชั้นทดสอบหลังอบ (mm)
 t_n คือ ความหนาของแท่งเหล็กกัน (mm)

3.5.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMTA

การเตรียมชิ้นงานยางเชื่อมโยงจะนำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.2 (ก) มาตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาด $6 \times 25 \times 2 \text{ mm}^3$ แล้วนำไปเข้าเครื่อง DMTA โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้

รูปแบบในการทดสอบ	Single cantilever bending geometry
ขนาดของกรอบยึดชิ้นงาน (Frame)	Medium Frame
ความถี่	1.0 Hz
อุณหภูมิ	-100 ถึง 25 °C
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	3 °C/min

เครื่อง DMTA รายงานผลเป็นกราฟแสดงค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus; E') ค่ามอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus; E'') และค่า $\tan \delta$

3.5.5 การศึกษาความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density, n)

ศึกษาความหนาแน่นเชื่อมโยงของยาง (n) ที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้วจากเทคนิคการบวมตัวด้วยตัวทำละลาย (Solvent swelling method) โดยนำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.2 (ก) มาตัดให้ได้ขนาด $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ นำไปแช่บีกเกอร์ที่มีสารละลายโทลูอิน 30 ml เป็นเวลา 5 วัน ทำการวัดขนาดของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังแช่ในโทลูอิน [39] นำผลที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางได้จากสมการของ ฟลอรี-ไรเนอร์ (Flory-Rehner equation) [40] ดังสมการที่ 3.6

$$-[\ln(1 - v_r) + v_r + \chi_1 v_r^2] = V_s n [v_r^{1/3} - v_r/2] \quad (3.6)$$

- เมื่อ n = ความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยาง (mol/cm^3)
 V_s = ปริมาตรโมลาร์ (Molar volume) ของตัวทำละลาย (cm^3/mol)
 v_r = สัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของยางในเจลยางที่บวมตัว (Swollen gel) (ไม่มีหน่วย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

χ_1 = ตัวแปรอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลาย (Polymer - Solvent interaction parameter) (ไม่มีหน่วย) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.39 [40]

3.5.6 การศึกษาสัณฐานวิทยา

นำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.2 (ก) ขนาด $10 \times 40 \times 2 \text{ mm}^3$ ไปแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 30 min แล้วหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) โดยระวัง不要去สัมผัสผิวหน้าที่เกิดจากการแตกหักชิ้นงาน เพื่อให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของยางได้ชัดเจน จากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมได้นำไปเคลือบทองคำ แล้วทำการศึกษาชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาพื้นผิว รูปร่างและขนาด รวมทั้งการกระจายตัวของเส้นใยดำ เขม่าดำ เกล็ด และซิลิกาในยางเชื่อมโยง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางเชื่อมโยงที่เตรียมจากยางธรรมชาติเมื่อทำการเติมเถ้าแกลบดำ (Black Rice Husk Ash, BRHA) ในขนาดและปริมาณที่แตกต่างกันและทดสอบสมบัติต่างๆ ที่มีผลต่อยางที่ผสมเถ้าแกลบดำ จากการใช้เถ้าแกลบดำเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติม (Filler) เพื่อลดต้นทุนและเสริมแรงในยาง โดยเลือกยางธรรมชาติชนิดยางแผ่นรมควันชั้น 3 โดยมีปัจจัยศึกษาดังนี้

- ผลของการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG และ Si-69
- ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำ
- ผลของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบดำ
- ผลของการใช้เถ้าแกลบดำในยางเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น ได้แก่ เหมม่าดำ เคลย์และซิลิกา

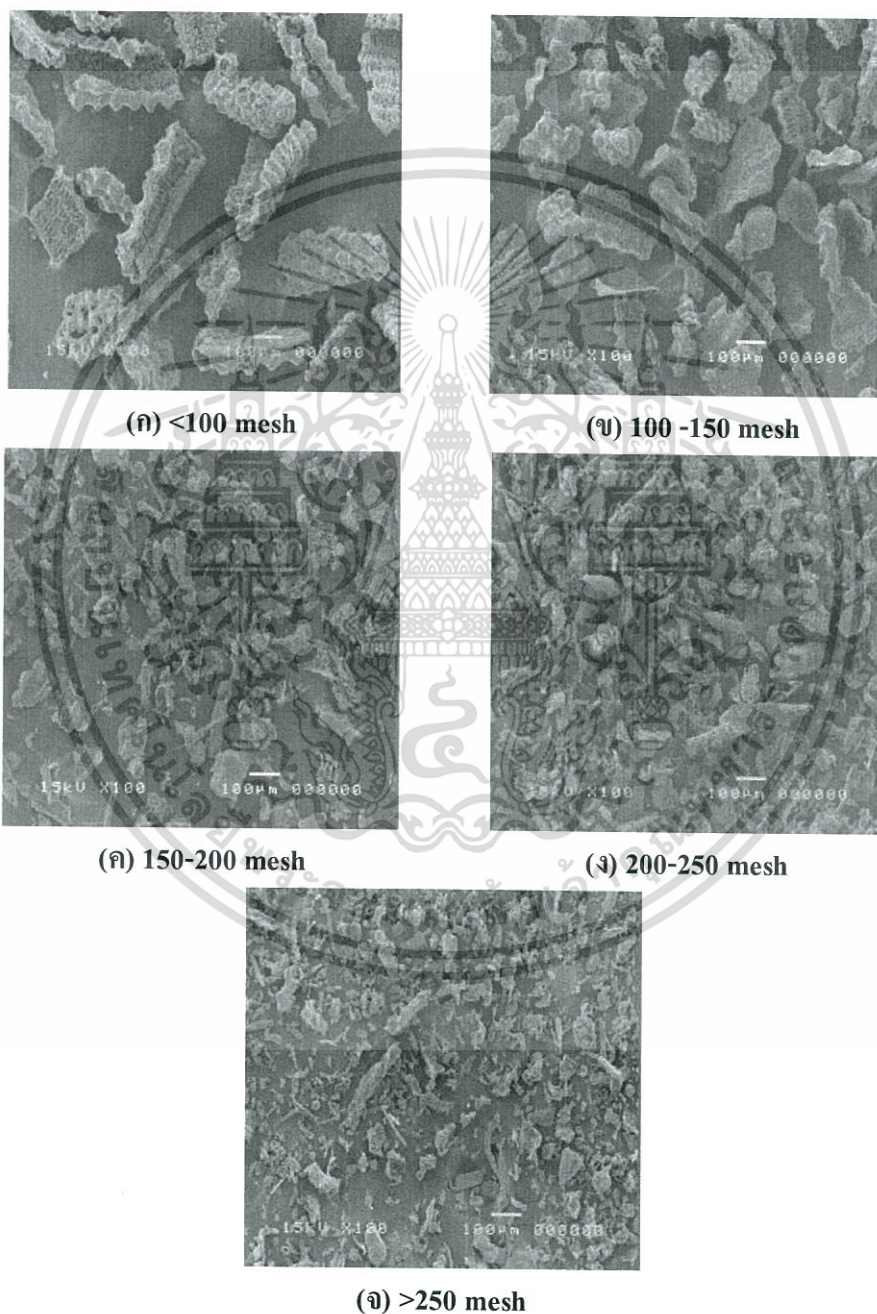
ตารางที่ 4.1 อักษรย่อที่ใช้ในงานวิจัย

อักษรย่อ	คำอธิบาย
BRHA (Untreated)	ยางเชื่อมโยงที่มีเถ้าแกลบดำ (ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิว) เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr
BRHA (PEG)	ยางเชื่อมโยงที่มีเถ้าแกลบดำ (ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย PEG 400 2.4 phr) เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr
BRHA (Si-69)	ยางเชื่อมโยงที่มีเถ้าแกลบดำ (ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย Si-69 3% โดยน้ำหนักของของเถ้าแกลบดำ) เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr
BRHA (PEG+Si-69)	ยางเชื่อมโยงที่มีเถ้าแกลบดำ (ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย Si-69 3% โดยน้ำหนักของของเถ้าแกลบดำและ PEG 400 2.4 phr) เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr
Carbon black	ยางเชื่อมโยงที่มีเหมม่าดำ (N 330) เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr
Silica (PEG+Si-69)	ยางเชื่อมโยงที่มีซิลิกา (Tokusil® 255) (ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย Si-69 3% โดยน้ำหนักของซิลิกาและ PEG 400 2.4 phr) เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr
Clay	ยางเชื่อมโยงที่มีเคลไซน์เคลย์ (Iceberg®) เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr
NR (Unfilled)	ยางเชื่อมโยงที่ไม่มีสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การตรวจสอบและวิเคราะห์เถ้าแกลบดำ

เถ้าแกลบดำ (BRHA) จากโรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวล (จังหวัดชัยนาท) เมื่อร่อนผ่านตะแกรงกรอง 4 ชั้น จะได้เถ้าแกลบดำทั้งหมด 5 ขนาด ดังนี้ ใหญ่กว่า 100 mesh (279 μm), 100-150 mesh (163 μm), 150-200 mesh (105 μm), 200-250 mesh (95 μm) และ เล็กกว่า 250 mesh (41 μm)

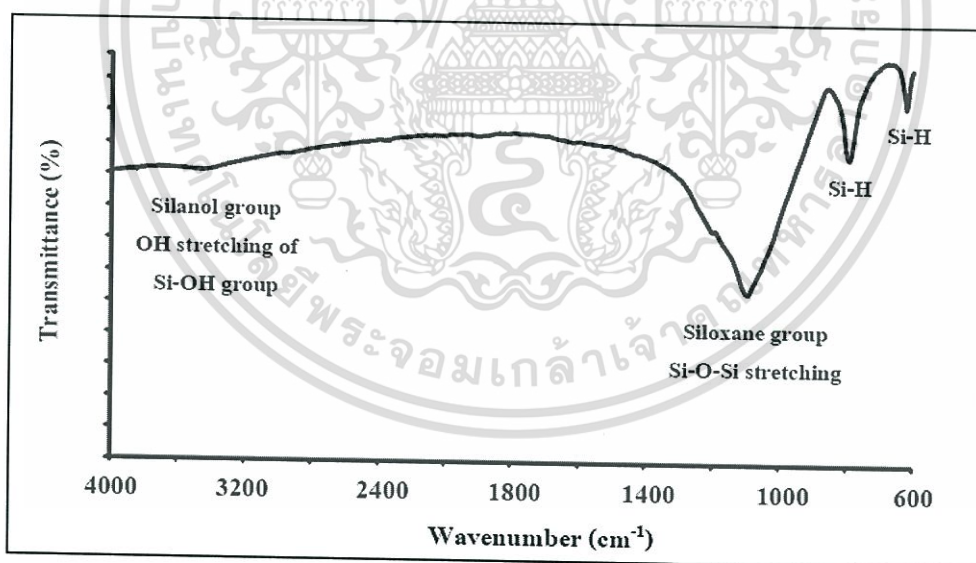


รูปที่ 4.1 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำขนาดต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่กำลังขยาย 100 เท่า รูป (ก-ข) อนุภาคของเถ้าแกลบดำมีการกระจายตัวดี ไม่จับตัวรวมกันเป็นก้อน มีรูปร่างลักษณะเป็นแผ่น มีรูพรุน ส่วนรูป (ค-จ) มีรูปร่างที่หลากหลายมีทั้งที่เป็นแท่งและแผ่นเหลี่ยม มีการกระจายตัว ไม่จับตัวรวมกันเป็นก้อน ซึ่งจะแตกต่างจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเขม่าดำและซิลิกาที่มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมและไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ แต่จะหลอมอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่าแอกกรีเกต (Aggregate) คล้ายพวงอุ้งน และแต่ละแอกกรีเกตของเขม่าดำและซิลิกาจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่เรียกว่าแอกโกลเมอเรต (Agglomerate) [12] ในโรงงานอุตสาหกรรมยางต่างๆ ไปขนาดอนุภาคเขม่าดำและซิลิกาที่ใช้จะมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิในช่วง 19-95 nm และ 10-40 nm ตามลำดับ โดยทำการตรวจสอบขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะเถ้าแกลบดำในแต่ละขนาด (mesh) ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) รุ่น Mastersizer 3000 ซึ่งมีขนาดดังตารางที่ 4.3 ซึ่งเถ้าแกลบดำที่ร่อนผ่านตะแกรงกรองเบอร์ 250 mesh จะมีขนาดเล็กที่สุด คือ 41 μm และมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด คือ 0.212 m^2/g แต่เมื่อเทียบกับเขม่าดำ (N 330) และซิลิกา (Tokusil[®] 255) ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ คือ 85 และ 175 m^2/g ตามลำดับ จึงอาจกล่าวได้ว่าเถ้าแกลบดำน่าจะมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงต่ำกว่าเขม่าดำและซิลิกาทางการค้า เนื่องจากมีอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้มีการกระจายตัวในยางธรรมชาติหลักในระดับไมครอน จากงานวิจัยของชวยากรณ์และคณะ [41] พบว่าเมื่อนำเถ้าแกลบดำไปตรวจวัดโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR (รูปที่ 4.2) ตรวจพบสัญญาณอย่างเห็นได้ชัดของหมู่ฟังก์ชัน ซิลอกเซน (Si-O-Si) ที่ความยาวคลื่น 1076 cm^{-1} ในขณะที่ปรากฏสัญญาณของหมู่ฟังก์ชัน ซิลานอล (Si-OH) ที่ความยาวคลื่น 3750 cm^{-1} เพียงเล็กน้อย สรุปได้ว่าขนาดของเถ้าแกลบดำมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าซิลิกาและเขม่าดำ ส่งผลให้พื้นที่ผิวที่ยึดเกาะกับยางมีน้อยกว่าซิลิกาและเขม่าดำ ทำให้โอกาสที่จะเป็นสารตัวเติมเสริมแรงเป็นไปได้น้อย และจากการวิเคราะห์ FTIR พบว่ามีปริมาณหมู่ซิลานอลที่น้อยกว่าซิลิกา เมื่อทำการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลนและพอลิเอทิลีน ไกลคอล เพื่อเกิดการยึดเกาะกับยางธรรมชาติได้ดีและเกิดการเสริมแรงจึงเกิดได้น้อย จากการวิเคราะห์หาสารประกอบของเถ้าแกลบดำด้วยเทคนิค XRF จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเถ้าแกลบดำที่ได้มาจากโรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวล (จังหวัดชัยนาท) นี้มีปริมาณซิลิกาถึง 74% เป็นปริมาณซิลิกาที่ถือว่ามาก และเมื่อนำไปหาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในเถ้าแกลบดำด้วยเครื่อง TOC พบว่ามีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในเถ้าแกลบดำ 4.45% จึงมีความน่าสนใจที่จะนำเถ้าแกลบดำไปเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำจากโรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวล (จังหวัดชัยนาท)

สารประกอบ	ร้อยละ
SiO ₂	74
K ₂ O	11.8
Na ₂ O	3.1
MgO	2.35
Fe ₂ O ₃	2.35
CaO	2.35
MnO	0.75
TiO ₂	1.21
Al ₂ O ₃	0.29
P ₂ O ₅	1.26
Loss on ignition (LOI)	0.54



รูปที่ 4.2 ภาพแสดงการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเถ้าแกลบดำ โดยเทคนิค FT-IR [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ขนาดโดยเฉลี่ยและพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าแกลบดำในแต่ละขนาด (mesh)

ผล	ขนาด BRHA (mesh)				
	<100	100-150	150-200	200-250	>250
ขนาดโดยเฉลี่ย (μm)	279	163	105	95	41
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	0.024	0.042	0.091	0.078	0.212

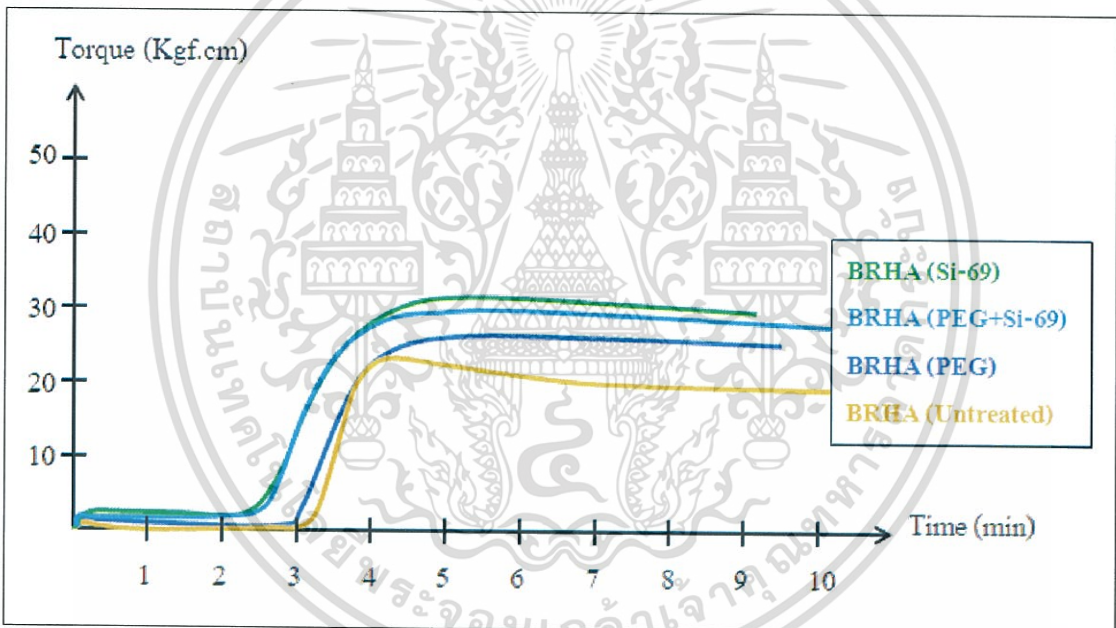
4.2 ผลของการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG และ/หรือ Si-69

เป็นที่ทราบกันว่าในอุตสาหกรรมยางที่มีการผสมยางธรรมชาติที่ไม่มีขั้วกับสารตัวเติม (Filler) ที่มีขั้ว เช่น ซิลิกา (SiO_2) ต้องมีการใช้สารคู่ควบ เช่น Mercapto silane เพื่อช่วยในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคสารตัวเติมกับยาง และการใช้สารประกอบในกลุ่มไกลคอลหรือกลุ่มเอมีน เช่น พอลิเอทิลีน ไกลคอล (PEG) เคลือบเพื่อป้องกันการดูดซับสารเคมีเชื่อมโยงที่มีขั้ว เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซึ่งจะส่งผลต่อการเชื่อมโยงยาง [12] ในขณะที่เขม่าดำไม่ต้องใช้สารคู่ควบหรือสารประกอบในกลุ่มไกลคอล ดังนั้นในการใช้ประโยชน์เถ้าแกลบดำที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนซิลิกาและสารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรม จึงศึกษาผลของการใช้สารคู่ควบชนิด Mercapto silane (Si-69) และ PEG 400 กับเถ้าแกลบดำโดยใช้เถ้าแกลบดำขนาด >250 mesh (ขนาดเล็กที่สุดที่ใช้ในงานวิจัยนี้) ควบคุมปริมาณเถ้าแกลบดำที่ 60 phr ในยางผสมสูตร ใช้ปริมาณ Si-69 ที่ 3% โดยน้ำหนักของเถ้าแกลบดำและ PEG 400 ที่ 2.4 phr

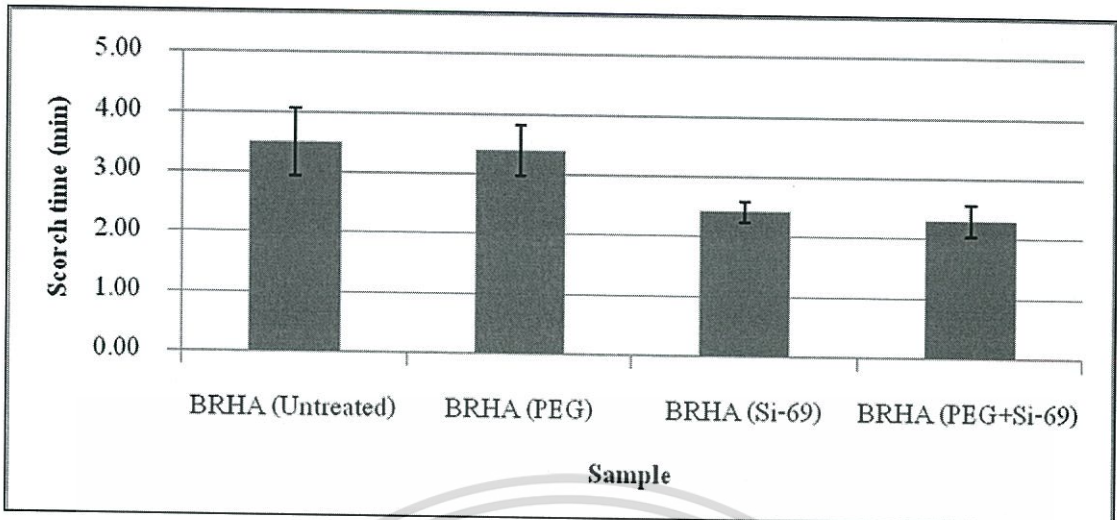
4.2.1 การปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG และ/หรือ Si-69 ที่มีต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยาง เชื่อมโยง

ในการผสมยางกับสารเคมีเพื่อเตรียมเป็นยางผสมสูตร สิ่งที่ต้องพิจารณา คือ ระยะเวลาที่ยางจะเกิดการเชื่อมโยงสมบูรณ์ ซึ่งจะทำการหาเวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยงยางหรือเวลาสกอร์ช (t_{s2}) และเวลาเชื่อมโยงยาง (t_{c90}) จากรูปที่ 4.3 - 4.5 แสดงผลของการใช้ PEG 400 และสารคู่ควบเมอร์แคปโทไซเลน (Si-69) ที่มีต่อผลลักษณะการเชื่อมโยงของยางที่ปริมาณเถ้าแกลบดำ 60 phr พบว่าเวลาเริ่มเชื่อมโยงยางของ BRHA (Si-69) และ BRHA (PEG+Si-69) มีเวลาด้านหน้า BRHA (Untreated) และ BRHA (PEG) เล็กน้อย เป็นผลเนื่องมาจากในโครงสร้างของ Si-69 มีกำมะถันอยู่ จึงทำให้เกิดการเริ่มเชื่อมโยงได้เร็วขึ้น แต่เวลาเชื่อมโยงยางในทุกสูตรมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แม้ว่ากำมะถันที่อยู่ใน Si-69 จะทำให้มีกำมะถันระบบการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นมาเพียงเล็กน้อย แต่ปริมาณกำมะถันที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางไม่ได้แตกต่างกันมากในแต่ละสูตร แตกต่างจากการใช้สารตัวเติมซิลิกาที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol group, $-\text{Si}-\text{OH}$) บนพื้นผิวมากกว่าเถ้าแกลบ-

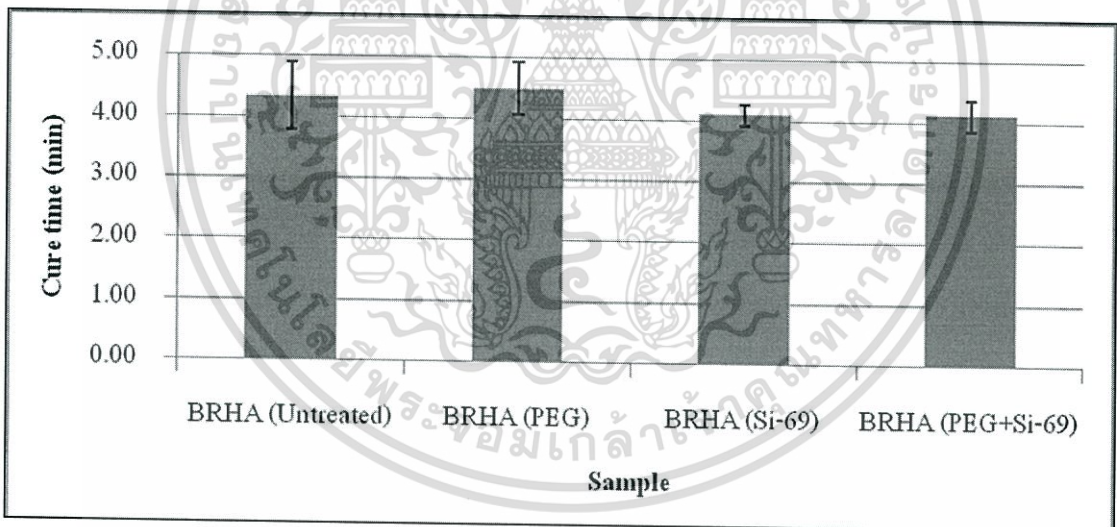
ค่า ดังนั้นเมื่อเติม PEG 400 และ Si-69 เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของเก้าแกลบค้ำจึงมีผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงยางน้อยกว่ายางที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติม จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (CRI) หมายถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง โดยส่วนใหญ่แล้วยางเชื่อมโยงที่มีค่า CRI สูงแสดงให้เห็นว่ายางเกิดการเชื่อมโยงได้ดี ซึ่ง BRHA (Untreated) ให้ค่า CRI ที่สูงที่สุด เนื่องจากเก้าแกลบค้ำที่มีการปรับปรุงผิวด้วย Si-69 นั้นให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงยางสั้นกว่าเก้าแกลบค้ำที่ไม่ปรับปรุงผิวด้วย Si-69 เนื่องจากใน Si-69 มีกำมะถันอยู่ในโครงสร้างด้วย แต่เวลาเชื่อมโยงยางมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้เมื่อนำมาคำนวณหาค่า CRI ด้วยสูตร $CRI = 100/(t_{c(90)} - t_{s2})$ จึง ส่งผลให้ค่า CRI ของ BRHA (Untreated) มีค่ามากที่สุด แต่จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ากราฟการเชื่อมโยงแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเชื่อมโยงของยางเชื่อมโยงที่มีเก้าแกลบค้ำเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr

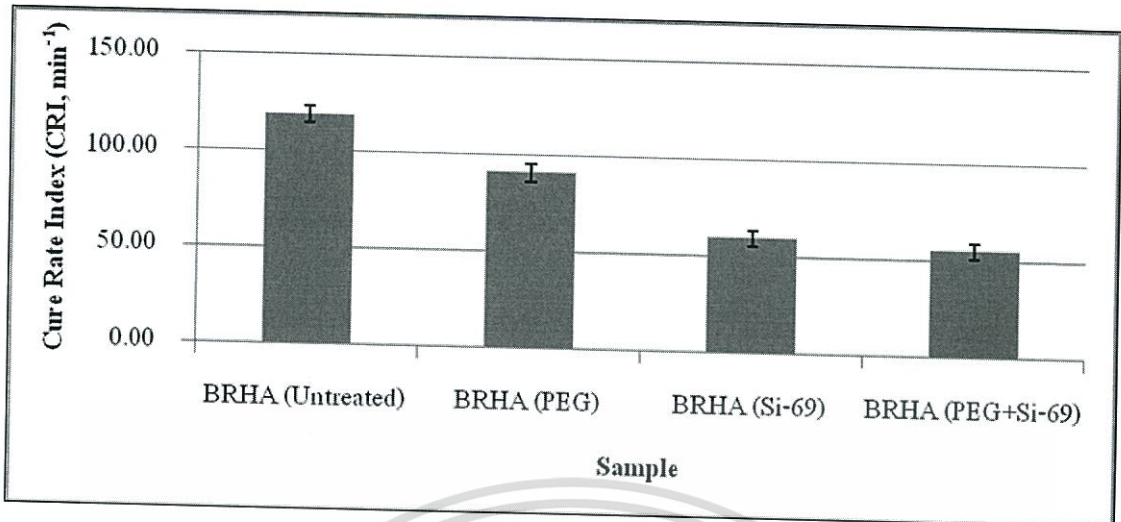


รูปที่ 4.4 ผลของการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) ของยางเชื่อมโยง



รูปที่ 4.5 ผลของการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อเวลาเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) ของยางเชื่อมโยง

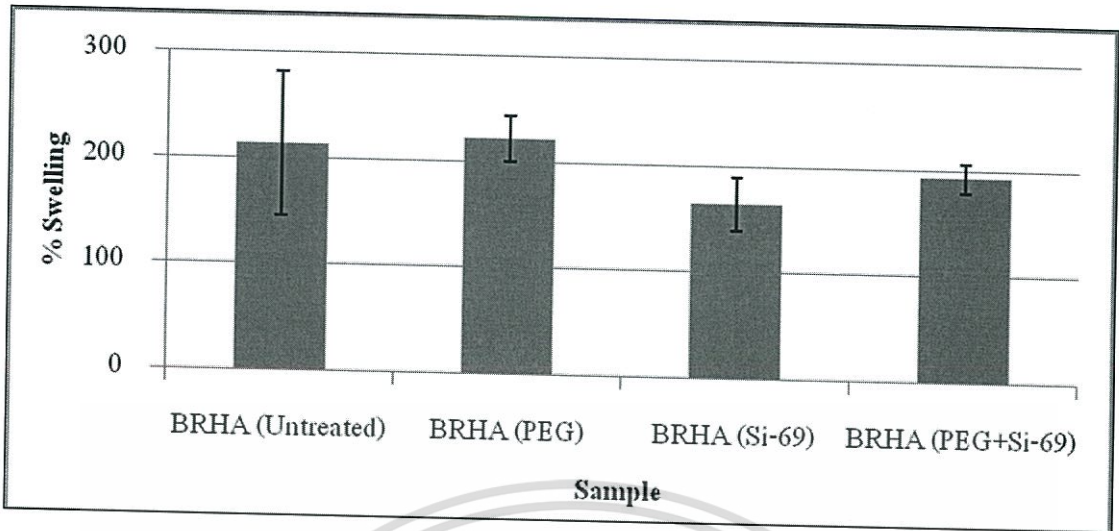
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



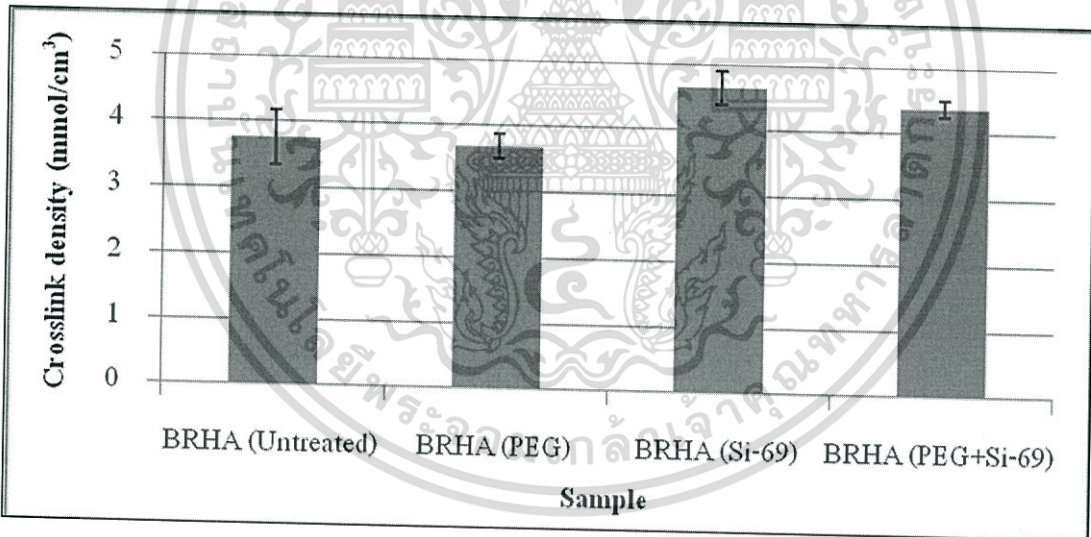
รูปที่ 4.6 ผลของการปรับปรุงผิวเข้าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเข้าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (CRI) ของยางเชื่อมโยง

4.2.2 การปรับปรุงผิวเข้าเคลือบดำด้วย PEG และ/หรือ Si-69 ที่มีต่อความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางเชื่อมโยง

ความหนาแน่นเชื่อมโยง (n) ของยางเป็นสมบัติที่ใช้บ่งบอกถึงสมบัติการเสีรูปถาวรของยาง โดยยางที่มีความหนาแน่นเชื่อมโยงที่สูงจะทำให้ยางคงสมบัติของยางอันได้แก่ ความยืดหยุ่น แข็งแรง มีเสถียรภาพทางรูปร่าง ดังนั้นเมื่อยางได้รับแรงกระทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างและเมื่อปล่อยแรงกระทำจะทำให้ยางสามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้ดีกว่ายางที่มีความหนาแน่นเชื่อมโยงที่ต่ำกว่า ทั้งนี้งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางที่ผ่านการเชื่อมโยงด้วยเทคนิคการบวมตัวด้วยตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 วัน โดยเลือกใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลาย พบว่าเข้าเคลือบดำที่ปรับปรุงผิวด้วย Si-69 ทั้ง BRHA (Si-69) และ BRHA (PEG + Si-69) มีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากกว่าเข้าเคลือบดำที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวด้วย Si-69 คือ (BRHA (Untreated) และ BRHA (PEG) เนื่องจากใน Si-69 มีกำมะถันอยู่ในโครงสร้างด้วยจึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่มากกว่า สอดคล้องกับค่าการบวมตัวที่น้อยกว่า แสดงว่า Si-69 ทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบร่างแหสามมิติได้ดีกว่า



รูปที่ 4.7 ผลของการปรับปรุงผิวแก้วเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับแก้วเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อการบวมตัว (Swelling) ของยางเชื่อมโยง



รูปที่ 4.8 ผลของการปรับปรุงผิวแก้วเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับแก้วเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางเชื่อมโยง

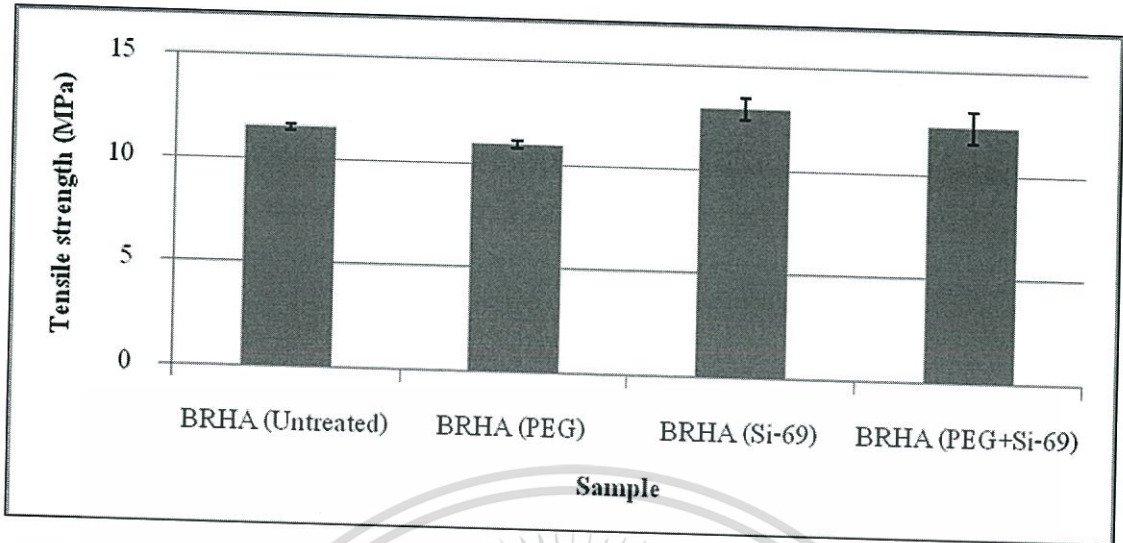
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วย PEG และ/หรือ Si-69 ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยง

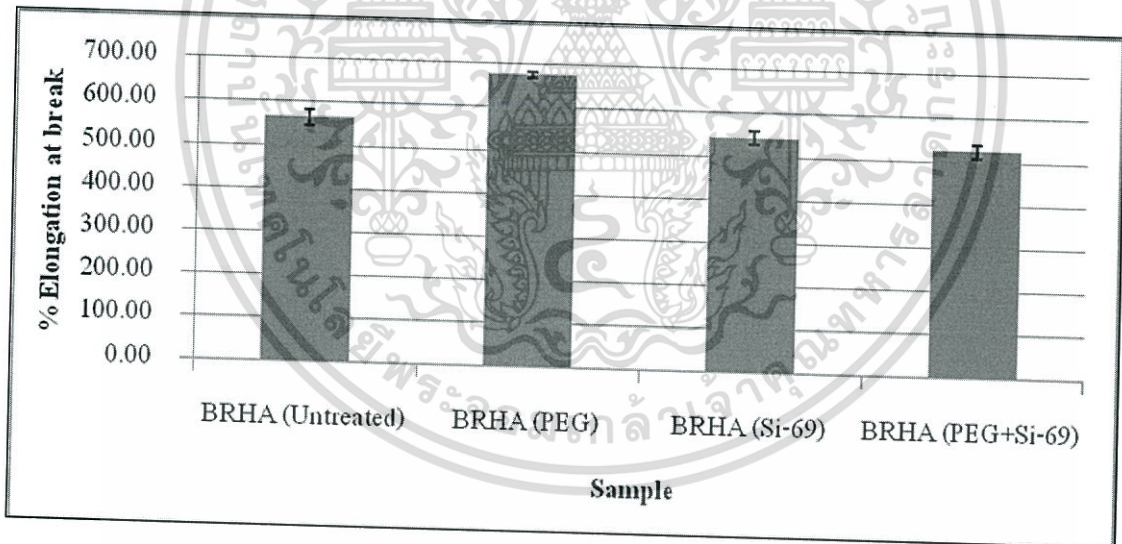
เมื่อพิจารณาผลของการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วย PEG และ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวต่อสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยงที่ใส่สารตัวเติม 60 phr ในรูปที่ 4.7 – 4.10 พบว่า BRHA (Si-69) และ BRHA (PEG+Si-69) ให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่า M100 และค่าความแข็งกดมากที่สุด ส่วน BRHA (PEG) จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางมากที่สุด เนื่องจากเก่าเคลือบดำมีอนุภาคขนาดใหญ่ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าซิลิกาที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่าเก่าเคลือบดำมาก พื้นที่ผิวของซิลิกาจึงมากกว่าเก่าเคลือบดำ ซึ่งขนาดของอนุภาคเป็นปัจจัยที่สำคัญมีผลต่อการเสริมแรงให้ยางเชื่อมโยง โดยเก่าเคลือบดำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอนุภาค 41 μm ใหญ่กว่าซิลิกาที่มีอนุภาคโดยเฉลี่ย 0.01-0.04 μm ค่าความแข็งแรงดึงจึงไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วย Si-69 และ PEG 400 สารคู่ควบไซเลนจะทำหน้าที่เหมือนสะพานเชื่อมระหว่างซิลิกาที่มีขั้วสูงกับยางธรรมชาติที่ไม่มีขั้ว ซึ่งเมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงไป หมู่อัลคอกซีที่อยู่ปลายด้านหนึ่งของโมเลกุลจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่อัลคอกซีบนพื้นผิวของซิลิกา เกิดเป็นพันธะไซลอคเซนที่มีความเสถียร ส่วนหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ที่อยู่ปลายอีกด้านหนึ่งจะช่วยให้ซิลิกาเข้ากับยางได้ง่ายในระหว่างกระบวนการผสมเพราะหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์นี้มีความเป็นขั้วต่ำจึงเข้ากับยางได้ดี นอกจากนี้หมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ของสารคู่ควบไซเลนยังมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งในระหว่างการเชื่อมโยงกำมะถันที่อยู่ในสารคู่ควบไซเลนจะเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization reaction) เกิดเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น [17] ส่วน PEG นั้นจะเคลือบพื้นผิวของซิลิกาทำให้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงถูกดูดซับโดยหมู่อัลคอกซีบนปลายของซิลิกา ปฏิกิริยาเชื่อมโยงจะเกิดได้เร็วขึ้น [17] เมื่อเติมทั้งสารประกอบไกลคอลและสารคู่ควบลงไป ในสารตัวเติมซิลิกานั้นจะเป็นการเสริมแรงให้กับยาง แต่เก่าเคลือบดำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหมู่อัลคอกซีอยู่ที่พื้นผิวน้อยกว่าซิลิกา เมื่อปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วย Si-69 และ PEG 400 จึงให้ผลต่างจากซิลิกา

ส่วน BRHA (PEG) นั้นจะเห็นว่าผลเชิงกลมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับ BRHA (Untreated) เนื่องจาก PEG นั้นใส่ลงไประหว่างการผสมยางผสมสูตรในเครื่องผสมระบบเปิด ไม่ได้ทำการเคลือบผิวเก่าเคลือบดำก่อนการผสมยางผสมสูตร ทำให้ PEG อาจจะไม่สามารถทำหน้าที่เคลือบผิวเก่าเคลือบดำได้ทั้งหมด และบนพื้นผิวของเก่าเคลือบดำมีหมู่อัลคอกซีน้อยจึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของสมบัติเชิงกลกันมากนักระหว่าง BRHA (PEG) และ BRHA (Untreated)

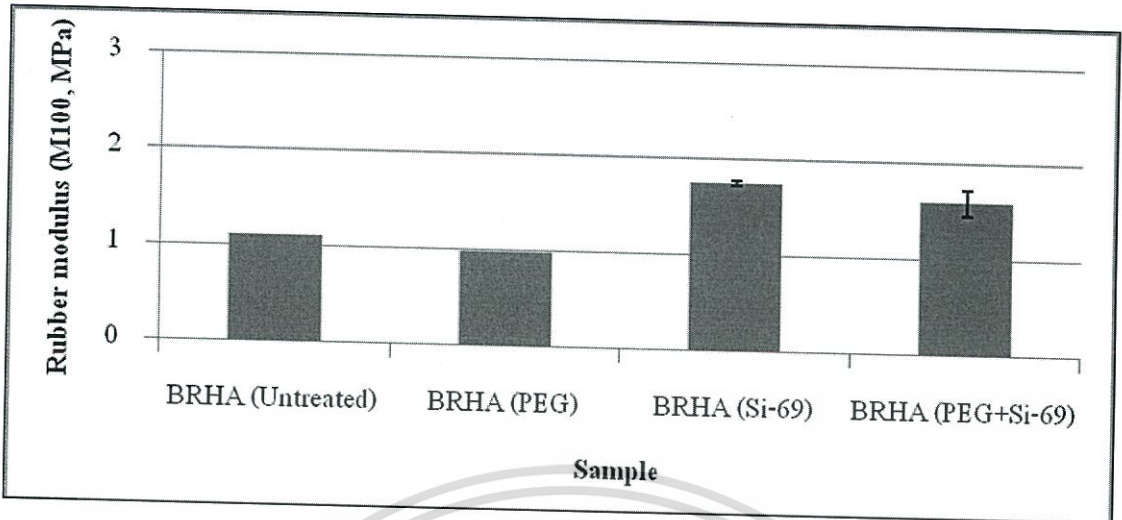


รูปที่ 4.9 ผลของการปรับปรุงผิวแก้วเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับแก้วเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของยางเชื่อมโยง

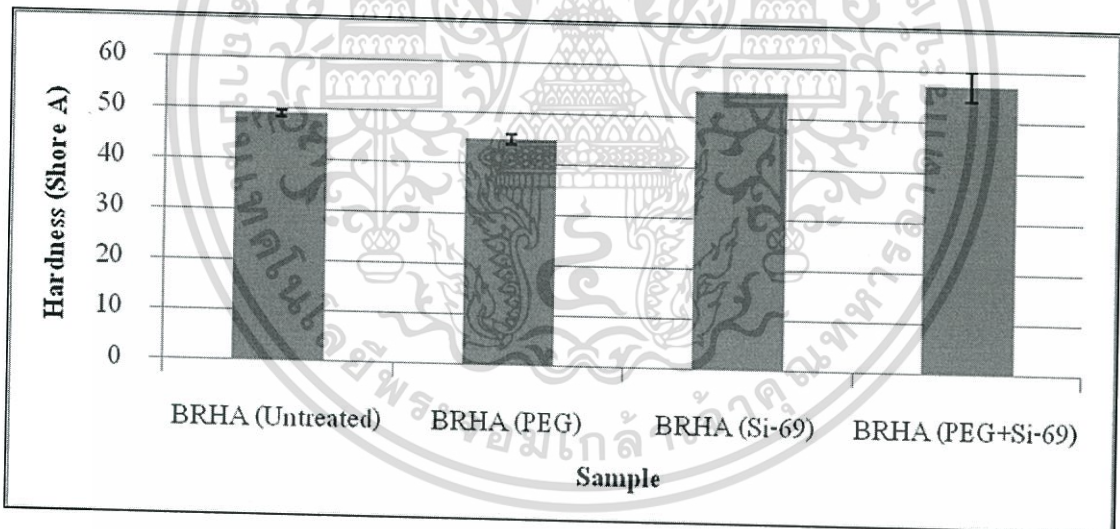


รูปที่ 4.10 ผลของการปรับปรุงผิวแก้วเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับแก้วเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของยางเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



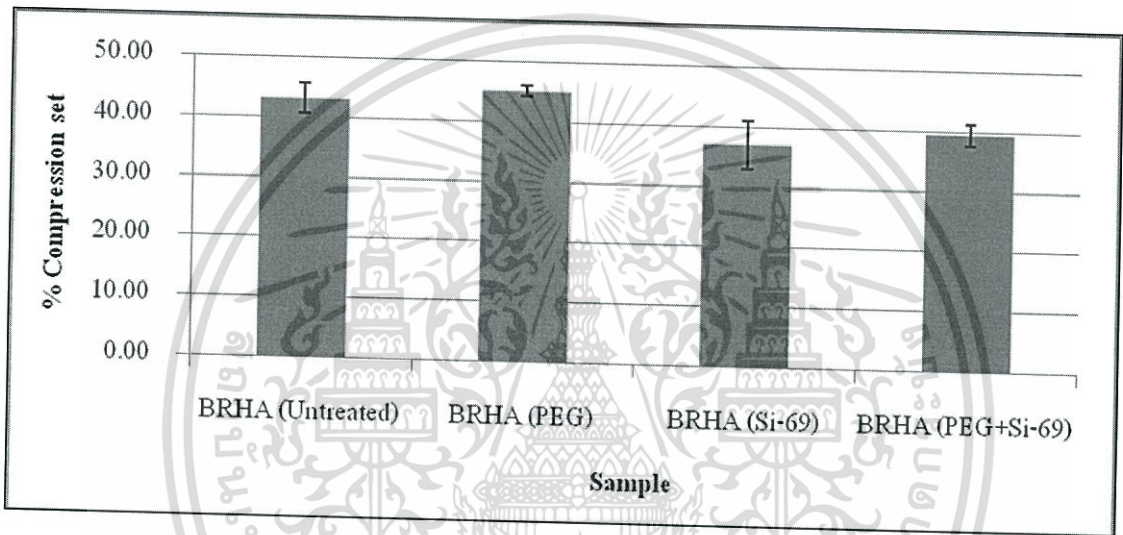
รูปที่ 4.11 ผลของการปรับปรุงผิวถั่วแกลบคำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับถั่วแกลบคำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่ามอดูลัสของยางที่ 100 % คิงซีด (M100) ของยางเชื่อมโยง



รูปที่ 4.12 ผลของการปรับปรุงผิวถั่วแกลบคำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับถั่วแกลบคำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าความแข็งกด (Hardness) ของยางเชื่อมโยง

การเสีรูปลถาวร (Permanent set) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ยังคงอยู่หลังปลดปล่อยแรงจากภายนอกที่มากระทำ โดยการเสีรูปลถาวรนั้นจะมีทั้งการเสีรูปลถาวรหลังการดึง (Tension set) และการเสีรูปลถาวรหลังการกด (Compression set) ซึ่งโดยทั่วไปการที่ยางสามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เนื่องมาจากโมเลกุลของยางที่เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ที่จะทำหน้าที่ดึงโครงสร้างกลับสู่รูปร่างเดิมเมื่อปล่อยแรง ทำให้ไม่เกิดการเลื่อนผ่านอย่างไม่คืนกลับของสายโซ่ ดังนั้นความสามารถในการยึด คืบกลับของยางสู่รูปร่างเดิมหรือการเสียรูปถาวรจึงขึ้นกับความหนาแน่นเชื่อมโยงของยาง (Crosslink density, n) ที่มากพอทำให้เกิดเป็นโครงสร้างเชื่อมโยงสามมิติ จากรูปที่ 4.13 พบว่าค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดเป็นเวลา 22 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C นั้น BRHA (Si-69) มีค่า Compression set น้อยที่สุด เนื่องจาก BRHA (Si-69) เกิดโครงสร้างร่างแหสามมิติมากที่สุด สอดคล้องกับผลการบวมตัวที่มีค่าน้อยที่สุด มีค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงมากที่สุด

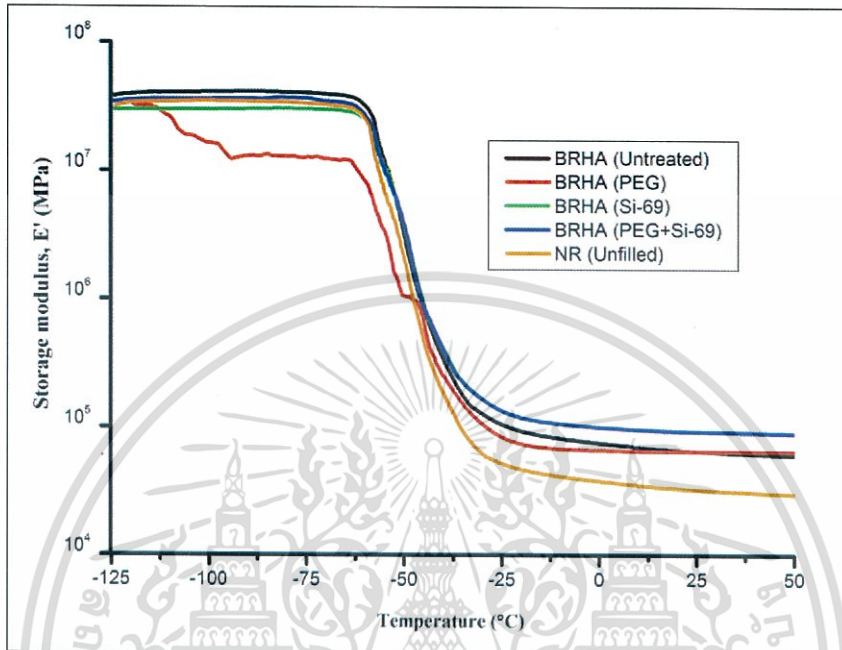


รูปที่ 4.13 ผลของการปรับปรุงผิวเก่าแก่ลบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าแก่ลบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเดิมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) ของยางเชื่อมโยงเป็นเวลา 22 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C

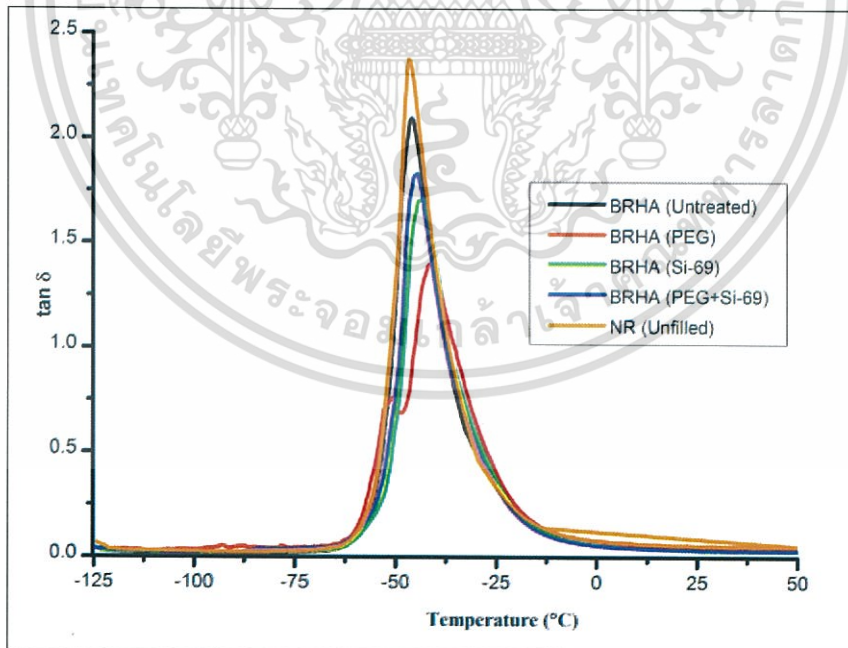
4.2.4 การปรับปรุงผิวเก่าแก่ลบดำด้วย PEG และ/หรือ Si-69 ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของยางเชื่อมโยง

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเชิงกลของวัสดุที่ได้รับแรงสั่นอย่างต่อเนื่อง โดยในการทดสอบจะให้ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus; E') และค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus; E'') เป็นฟังก์ชันของความถี่กับอุณหภูมิ และจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างค่ามอดุลัสสูญเสียและค่ามอดุลัสสะสม (Loss modulus/Storage modulus; E''/E') ได้เป็นค่า $\tan \delta$ สามารถหาอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของวัสดุได้ ซึ่งหาได้จากตำแหน่งของพีค $\tan \delta$ จากการศึกษาสมบัติ

ทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA ของยางผสมสูตรที่ปรับปรุงผิวเข้าเคลือบดำด้วย PEG และ Si-69 เทียบกับเข้าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิว ที่ 60 phr ค่าจากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.14



(ก) Storage modulus (E')



(ข) $\tan \delta$

รูปที่ 4.14 เทอร์โมแกรม DMTA ของยางเชื่อมโยงแสดงผลการปรับปรุงเข้าเคลือบดำด้วยการใช้

PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเข้าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับผลิตที่ไม่เต็มรูปแบบเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

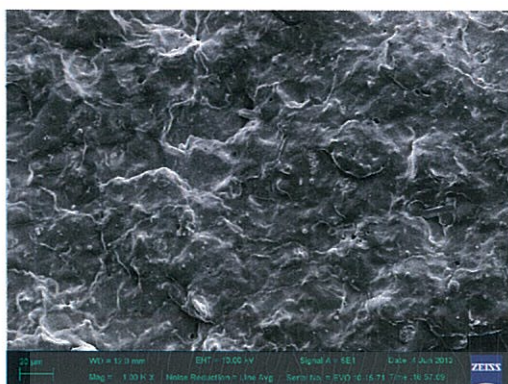
160 phr และยางธรรมชาติที่ไม่เต็มสารตัวเติม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

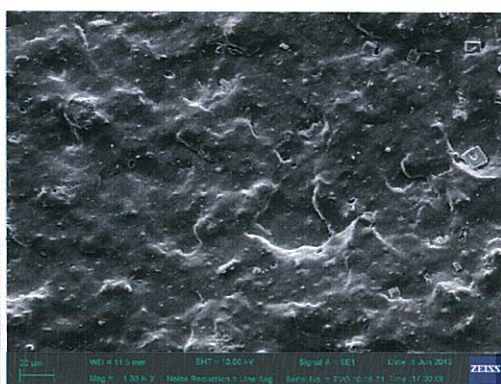
จากรูปที่ 4.14 พบว่าค่ามอดูลัสสะสมของยางธรรมชาติที่มีเถ้าแกลบค้ำเป็นสารตัวเติมให้ค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติมตลอดช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา -60°C ถึง 50°C เนื่องจากเถ้าแกลบค้ำเป็นสารตัวเติมที่มีอนุภาคเป็นของแข็ง จึงเพิ่มความแข็งให้แก่ยางธรรมชาติให้มีค่าสูงเพิ่มขึ้น พบว่ายางธรรมชาติที่ผสมเถ้าแกลบค้ำที่ทำการปรับปรุงผิวแตกต่างกันเป็นสารตัวเติมส่งผลทำให้ความแข็งแตกต่างกันด้วยซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ได้ (รูปที่ 4.14) แต่สำหรับ BRHA (PEG) นั้นค่าที่ได้จะเห็นว่ากราฟมีค่าที่ไม่ราบเรียบ เป็นผลมาจากแท่นจับยึดชิ้นงานไม่แน่นพอ เมื่อพิจารณาค่า $\tan \delta$ ของยางธรรมชาติที่ผสมเถ้าแกลบค้ำที่ทำการปรับปรุงผิวแตกต่างกันเป็นสารตัวเติม พบว่า BRHA (Si-69) ทำให้ความสูงของค่า $\tan \delta$ มีค่าลดลงมากที่สุด นั้นแสดงให้เห็นถึง BRHA (Si-69) สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติได้ดี ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลได้ยากขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดูลัสสะสมมีค่าสูงขึ้น โอกาสในการสูญเสียพลังงานในส่วนที่เป็นมอดูลัสสูญเสียมีค่าน้อยลง ค่า $\tan \delta$ จึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนในกรณี BRHA (PEG+Si-69) และ BRHA (Untreated) ความสูงของค่า $\tan \delta$ มีค่าลดลงตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าทั้ง BRHA (PEG+Si-69) และ BRHA (Untreated) สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติได้น้อยกว่า BRHA (Si-69) จากผลการทดลองเห็นค่า T_g ณ ตำแหน่งสูงสุดของกราฟ $\tan \delta$ ปรากฏในช่วงอุณหภูมิ -40 ถึง -50°C แสดงว่ายางธรรมชาติที่มีเถ้าแกลบค้ำเป็นสารตัวเติมไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า T_g อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งค่า T_g ของยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติมอยู่ที่ประมาณ -46°C

4.2.5 การปรับปรุงผิวเถ้าแกลบค้ำด้วย PEG และ/หรือ Si-69 ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของยางเชื่อมโยง

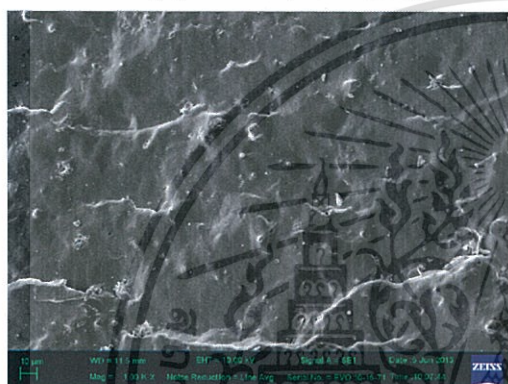
รูปที่ 4.15 - 4.16 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยา (Morphology) ของยางเชื่อมโยงที่มีการเติมสารตัวเติมเถ้าแกลบค้ำที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 และ/หรือ PEG ที่ 60 phr พบว่าอนุภาคเถ้าแกลบค้ำมีการกระจายตัวที่ดีในเมตริกซ์คือยางธรรมชาติในรูปที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (รูปที่ 4.15) และอนุภาคเถ้าแกลบค้ำมีการยึดเกาะที่ดีกับยางธรรมชาติในทุกสูตรในรูปที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (รูปที่ 4.16) ไม่พบการหลุดออกของอนุภาคเถ้าแกลบค้ำที่เสียดสภาพบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค



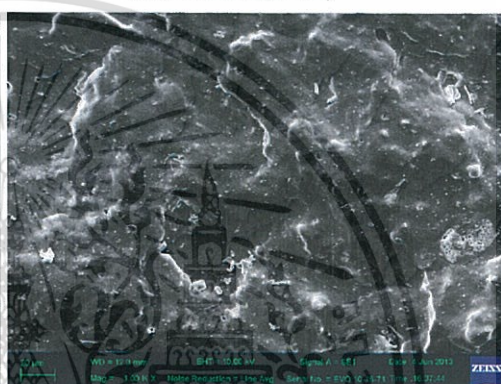
(ก) BRHA (Untreated)



(ข) BRHA (PEG)



(ค) BRHA (Si-69)

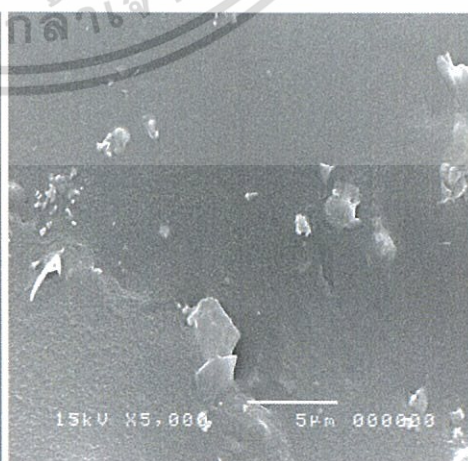


(ง) BRHA (PEG+Si-69)

รูปที่ 4.15 SEM micrographs แสดงลักษณะของยางเชื่อมโยงแสดงผลการปรับปรุงผิวเข้า
 แกลบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเถ้าแกลบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง
 ผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

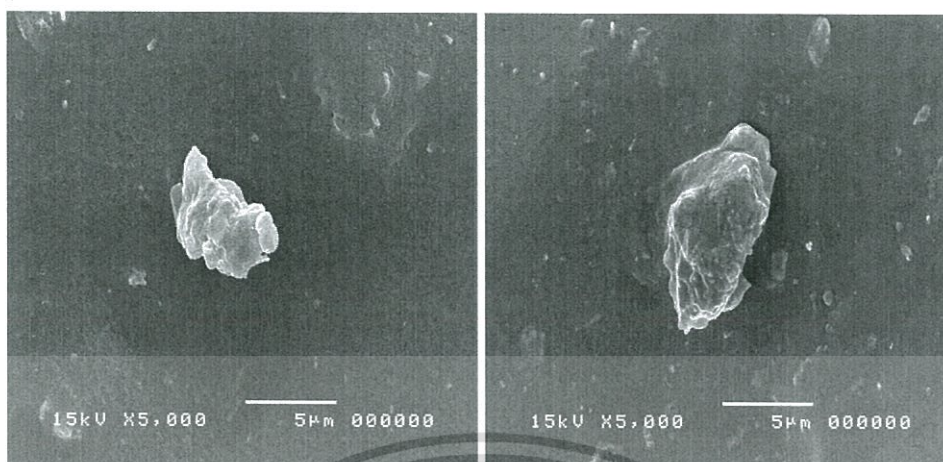


(ก) BRHA (Untreated)



(ข) BRHA (PEG)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) BRHA (Si-69)

(ง) BRHA (PEG+Si-69)

รูปที่ 4.16 SEM micrographs แสดงลักษณะของยางเชื่อมโยงแสดงผลการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วยการใช้ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับเก่าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

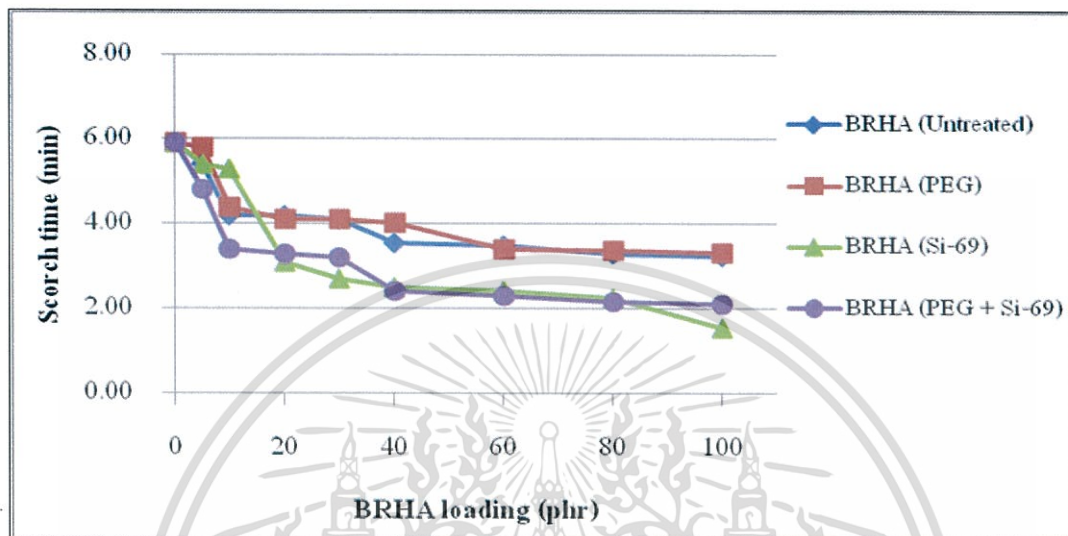
4.3 ผลของปริมาณเก่าเคลือบดำ

ศึกษาผลของปริมาณเก่าเคลือบดำซึ่งปริมาณที่ทำการศึกษา คือ 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80 และ 100 phr ในยางเชื่อมโยงโดยทำการปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำที่มีขนาดเล็กกว่า 250 mesh ด้วย Si-69 ที่ 3% โดยน้ำหนักของเก่าเคลือบดำและ PEG 400 ที่ 2.4 phr

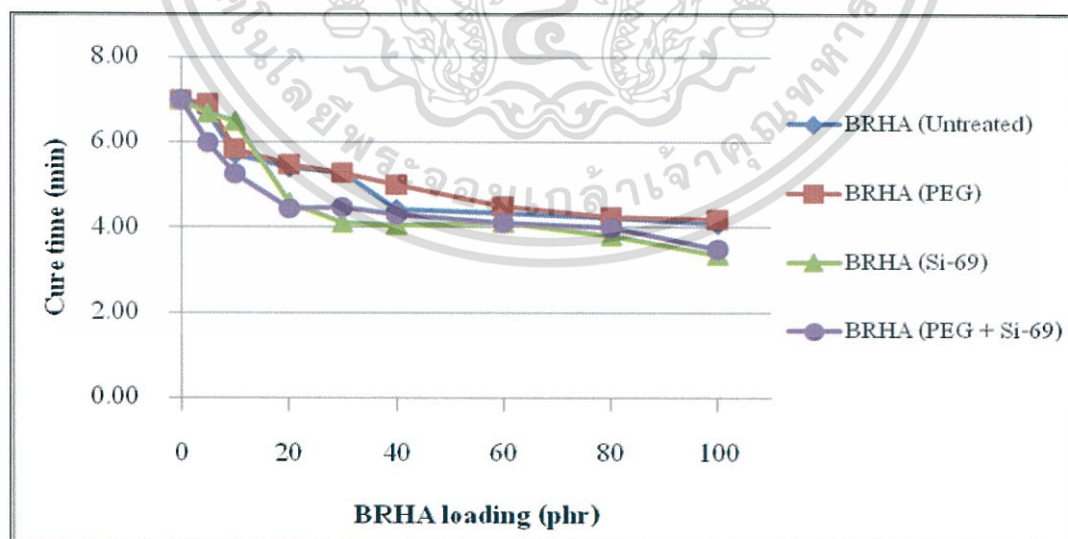
4.3.1 ผลของปริมาณเก่าเคลือบดำที่มีผลต่อสมบัติการเชื่อมโยงของยางเชื่อมโยง

จากรูปที่ 4.17 – 4.18 พบว่า เวลาเริ่มเชื่อมโยงยางและเวลาเชื่อมโยงยางมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเก่าเคลือบดำเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณเก่าเคลือบดำเพิ่มขึ้นจะเป็นการลดความเป็นฉนวนความร้อนของยางเหมือนกับการใช้สารตัวเติมเขม่าดำ จึงนำความร้อนได้ดีขึ้น ยางผสมสูตรจึงสามารถเชื่อมโยงได้เร็วขึ้น นอกจากนี้เก่าเคลือบดำมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนและซิลิกาแล้วยังมีส่วนของสารอนินทรีย์อื่นๆ เช่น โลหะออกไซด์ซึ่งมีส่วนเร่งให้อัตราการคงรูปเร็วขึ้น การปรับปรุงผิวเก่าเคลือบดำด้วย PEG นั้นมีผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติการเชื่อมโยง สังเกตได้จากรูปที่ 4.19 ค่า CRI มีค่าใกล้เคียงกับ BRHA (Untreated) แต่ BRHA (Si-69) และ BRHA (Si-69 + PEG) นั้นมีเวลาเริ่มเชื่อมโยงยางที่น้อยกว่า แต่มีเวลาเชื่อมโยงยางนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจาก Si-69 มีกำมะถันอยู่ในโครงสร้าง จึงทำให้ BRHA (Si-69) และ BRHA (Si-69 + PEG) มีเวลาเริ่มเชื่อมโยงยางที่สั้นกว่าในสูตรที่ไม่ปรับปรุงผิวด้วย Si-69 แต่เวลาเริ่มเชื่อมโยงยางของทุกสูตรมีเวลาที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติเหเนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้เคียงกันเพราะกำมะถันที่ใช้ในการเชื่อมโยงของระบบกำหนดให้มีปริมาณเท่ากัน ดังนั้นเมื่อคำนวณค่า CRI ด้วยสูตร $CRI = 100/(t_{c(90)} - t_{s2})$ จึงมีค่าแสดงดังรูปที่ 4.19

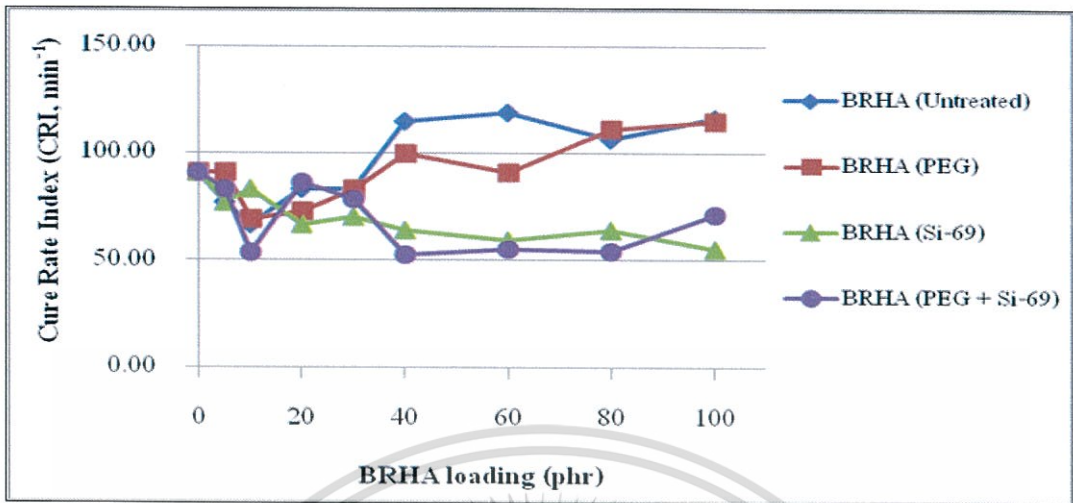


รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณเถ้าเคลือบดำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเถ้าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อเวลาเริ่มการเชื่อมโยงยาง (Scorch time, t_{s2}) ของยางเชื่อมโยง



รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณเถ้าเคลือบดำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเถ้าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อเวลาเชื่อมโยยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) ของยางเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

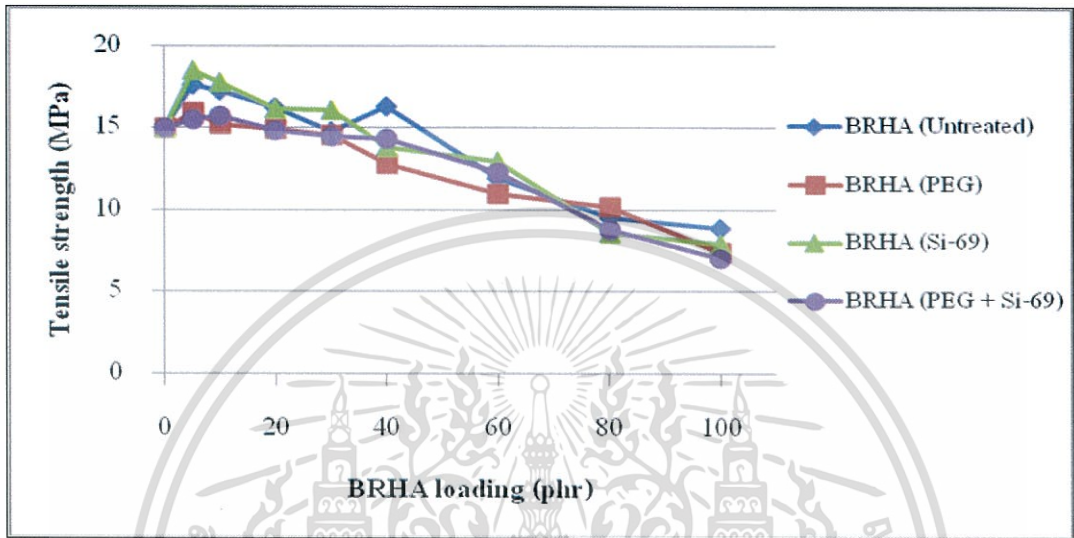


รูปที่ 4.19 ผลของปริมาณเถ้าเคลือบดำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเถ้าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (CRI) ของยางเชื่อมโยง

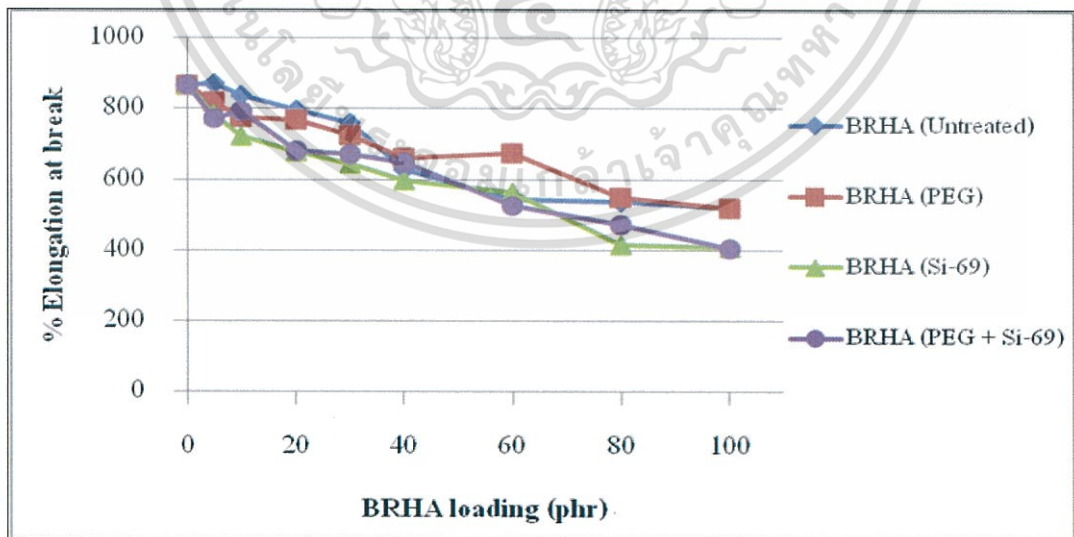
4.3.2 ผลของปริมาณเถ้าเคลือบดำที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยง

เมื่อนำยางผสมสูตรที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่า M100 และค่าความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าเคลือบดำที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.20 - 4.23) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคของเถ้าเคลือบดำที่มีลักษณะเป็นอนุภาคเดี่ยว มีขนาดอนุภาคใหญ่และมีพื้นที่ผิวน้อย เกิดการแทรกสอดเกิดเป็นยางบาวด์ได้ (Bound rubber) ใต้น้อยลงเมื่อใส่เถ้าเคลือบดำในปริมาณที่มากเกินไป (80 และ 100 phr) ดังเช่นในกรณีของการใช้สารตัวเติมเขม่าดำและเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าเคลือบดำมากขึ้น ปริมาณช่องว่างที่ยังไม่สามารถแทรกสอดได้จะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดตำหนิของชิ้นงานในการเกิดการเสียหายเมื่อได้รับแรงมากขึ้น เห็นได้จากค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเป็นค่าที่ได้จากผลการทดสอบจากชิ้นงานเมื่อเกิดข้อบกพร่องขึ้น เมื่อเติมเถ้าเคลือบดำซึ่งเป็นสารตัวเติมไม่เสริมแรงที่มีอนุภาคขนาดใหญ่และมีรูพรุนลงไปปริมาณมากขึ้น เป็นการเพิ่มปริมาณจุดบกพร่องให้กับยางผสมสูตรมากขึ้น และการเติมเถ้าเคลือบดำเพิ่มมากขึ้นลงในยางธรรมชาติเป็นการลดสัดส่วนของปริมาตร (Volume fraction) ที่เคลื่อนไหวได้ของสายโซ่โมเลกุลของยางด้วยโครงสร้างที่แข็งและเปลี่ยนรูปได้ยากของเถ้าเคลือบดำที่เป็นของแข็ง แต่ค่า M100 และค่าความแข็งกดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าเคลือบดำเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่พบทั่วไปเมื่อทำการผสมยางกับสารตัวเติมที่แข็งกว่ายางลงไป ทั้งนี้อาจเนื่องจากเถ้าเคลือบดำที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้อาจยังมีขนาดเล็กไม่พอ (เถ้าเคลือบดำที่ใช้ในการทดลองตอนนี้มีขนาด 41 μm) จึงยังไม่สามารถใช้เป็นสารเสริมแรง (Reinforcing filler) เหมือนเขม่าดำ (Carbon black, CB) (ขนาด 0.03 μm) ได้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่า M100 และค่าความแข็งแรงกดของ BRHA (Si-69) และ BRHA (Si-69+PEG) มีค่ามากกว่า BRHA (PEG) และ BRHA (Untreated) เป็นผลมาจาก Si-69 มีกำมะถันอยู่ในโครงสร้างด้วย ทำให้ยางเชื่อมโยงมีการเชื่อมโยงแบบร่างแหสามมิติที่มากกว่า

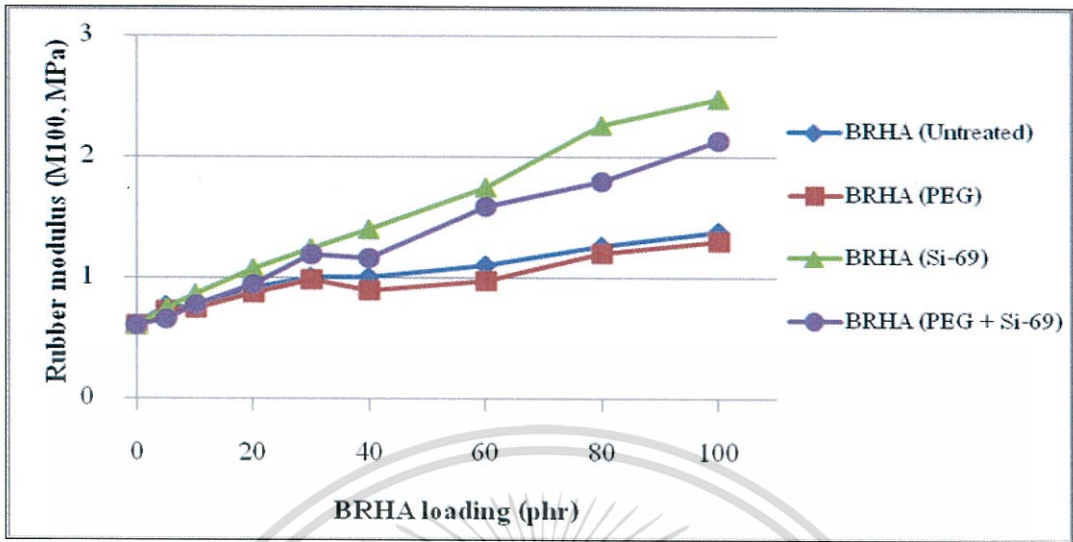


รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณเถ้าเคลบดำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเถ้าเคลบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของยางเชื่อมโยง

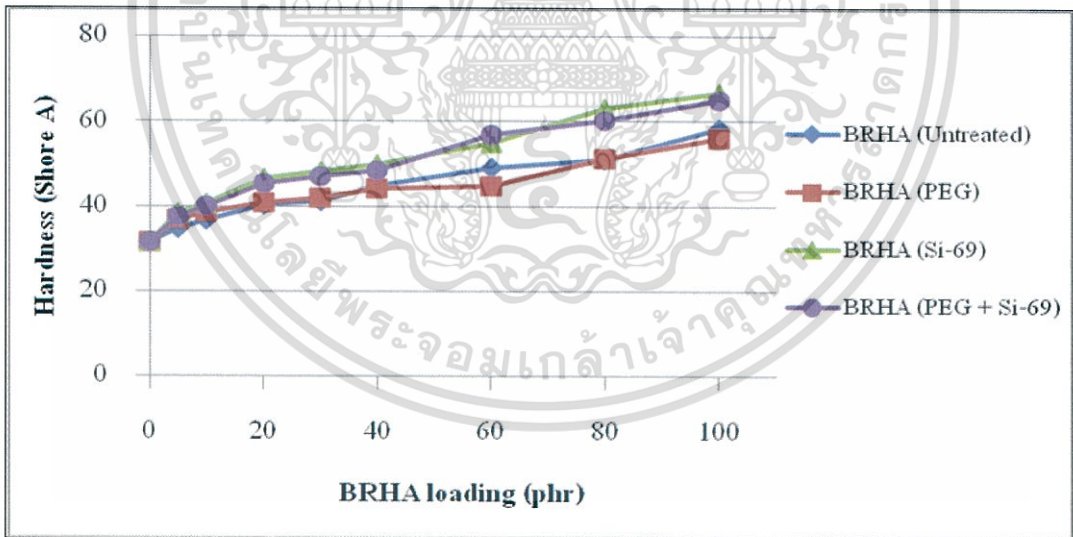


รูปที่ 4.21 ผลของปริมาณเถ้าเคลบดำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเถ้าเคลบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของยางเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารเชิงวิชาการที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



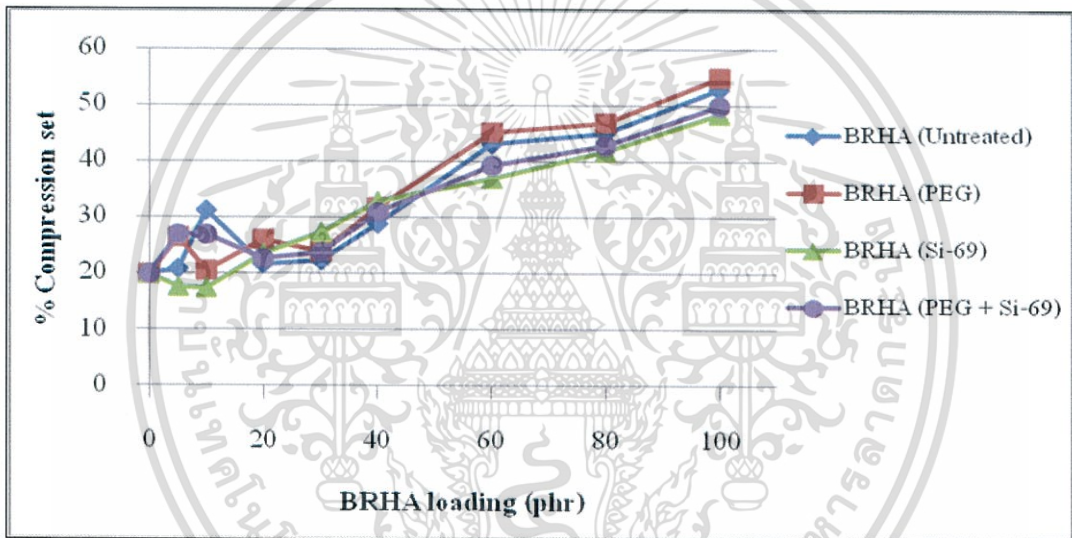
รูปที่ 4.22 ผลของปริมาณเถ้าเคลือบดำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเถ้าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยึด (M100) ของยางเชื่อมโยง



รูปที่ 4.23 ผลของปริมาณเถ้าเคลือบดำที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเถ้าเคลือบดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อค่าความแข็งกด (Hardness) ของยางเชื่อมโยง

จากรูปที่ 4.24 เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าเคลือบดำในยางเชื่อมโยงทุกสูตรค่า Compression set มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ปกติเนื่องอนุภาคของเถ้าเคลือบดำที่เป็นของแข็งมีรูปทรงอยู่รอบๆอนุภาคที่เติมเข้าไปในเนื้อยาง ทำให้เกิดแรงต้านทานต่อการบีบอัดของยางมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณเถ้าเคลือบดำมากเกินไปอาจทำให้เนื้อยางแข็งเกินไปและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

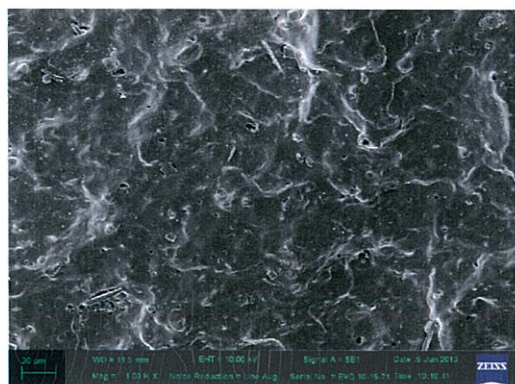
ในโครงสร้าง เมื่อได้รับแรงกดอัดจะเข้าไปแทรกในเข้าไปอยู่ในรูพรุนของเส้นใยเคลือบด้า ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเคลือบด้าปริมาณรูพรุนจะเพิ่มมากขึ้นด้วย ปริมาณยางที่แทรกเข้าไปแทรกอยู่ในรูพรุนของเส้นใยเคลือบด้าจึงมีปริมาณมากขึ้น ทำให้ยางที่อยู่ล้อมรอบอนุภาคเส้นใยเคลือบด้ามีน้อยลง ซึ่งยางส่วนนี้สามารถเคลื่อนที่สายโซ่หรือกลับสู่รูปร่างเดิมได้ง่ายกว่ายางที่แทรกตัวอยู่ในรูพรุนของเส้นใยเคลือบด้าหลังจากผ่านการกดอัดที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลานาน 22 ชั่วโมง ทำให้การคงรูปร่างเป็นชิ้นงานก่อนการทดสอบลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเคลือบด้าถึง 80 และ 100 phr จะเห็นว่าการปรับปรุงผิวเส้นใยเคลือบด้าด้วย Si-69 และ/หรือ PEG นั้นให้ค่า Compression set ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากปริมาณเส้นใยเคลือบด้าที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในโครงสร้างของยาง



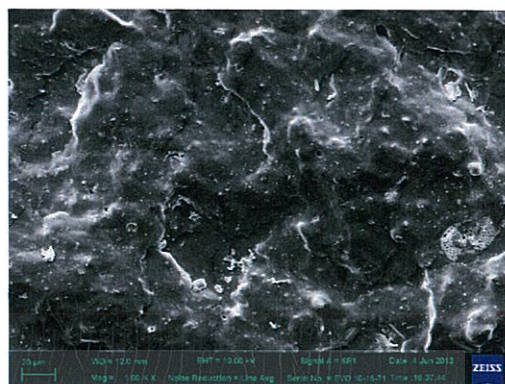
รูปที่ 4.24 ผลของปริมาณเส้นใยเคลือบด้าที่ปรับปรุงด้วย Si-69 และ/หรือ PEG เทียบกับเส้นใยเคลือบด้าที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C ของยางเชื่อมโยง

4.3.3 ผลของปริมาณเส้นใยเคลือบด้าที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของยางเชื่อมโยง

เมื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวตัวอย่างยางเชื่อมโยงจากรูปที่ 4.25 จะเห็นว่าเส้นใยเคลือบด้าทั้งที่ปริมาณ 20, 60 และ 100 phr มีการกระจายตัวที่ดี ไม่เกาะเป็นก้อน แต่การยึดเกาะกับยางที่ 100 phr ไม่ค่อยดีนัก อาจเนื่องมาจากปริมาณเส้นใยเคลือบด้าที่เติมมากเกินไป ทำให้เนื้อยางธรรมชาติที่เป็นเมตริกซ์ยึดเกาะกับเส้นใยเคลือบด้าได้อย่างไม่ทั่วถึง



(ก) 20 phr



(ข) 60 phr



(ค) 100 phr

รูปที่ 4.25 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางเชื่อม โยงเมื่อใช้เถ้าแกลบดำที่ทำการปรับปรุงผิวด้วย Si-69 และ PEG ที่ปริมาณ 20, 60 และ 100 phr เป็นสารตัวเติมที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

4.4 ผลของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบดำ

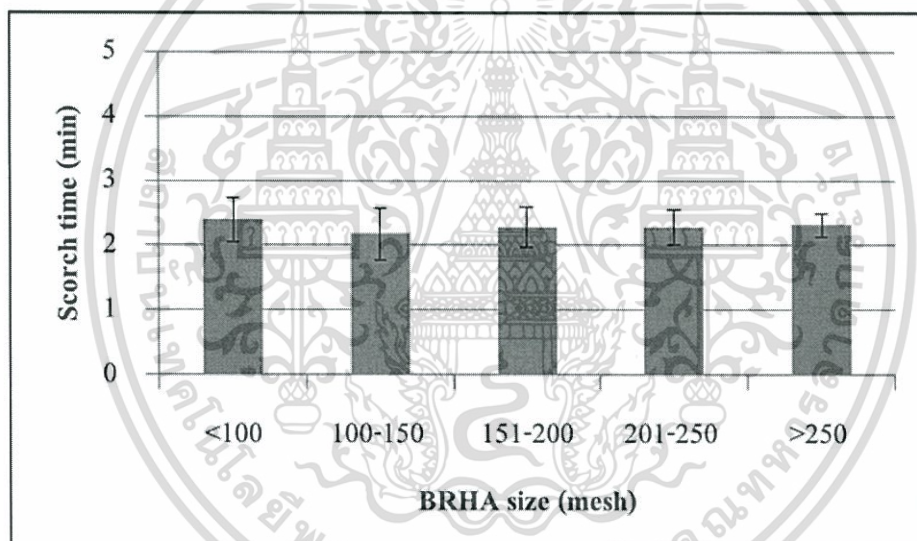
ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการเสริมแรงในยาง ได้แก่ ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ (Particle size and specific surface area) โครงสร้าง (Structure) ความว่องไวทางปฏิกิริยาของพื้นผิว (Specific surface activity) และค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH value) ซึ่งขนาดอนุภาคจะแปรผกผันกับพื้นที่ผิว (Surface area) คือ สารตัวเติมของแข็งที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมาก สารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวน้อย เป็นที่ทราบกันว่าสารตัวเติมที่ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) จะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กประมาณ 1 μm เมื่อสารตัวเติมมีขนาดเล็กกระจายตัวในยางได้ดีประสิทธิภาพการเสริมแรงจะยิ่งสูงขึ้น จะทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้น ความทนทานต่อการสึกหรอสูงขึ้น โดยในงานวิจัยตอนนี้ทำการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย Si-69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

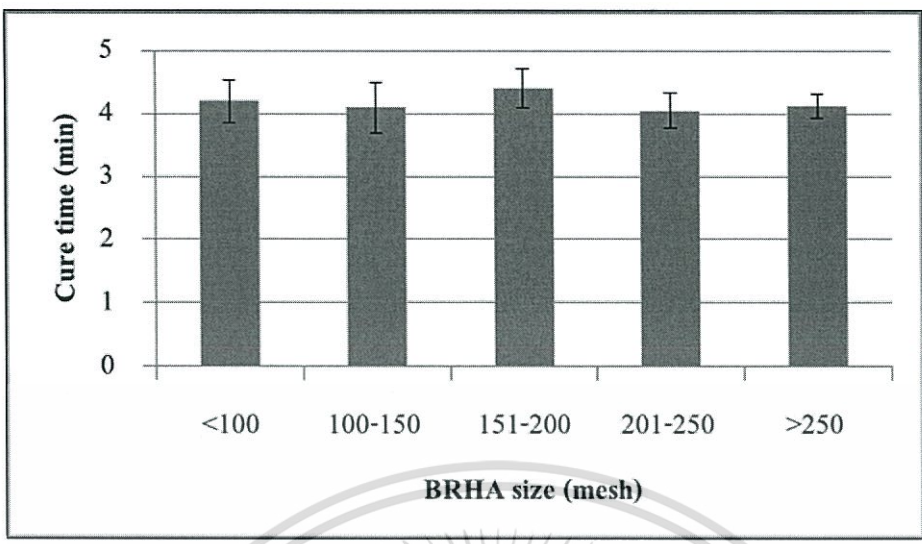
ปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของเถ้าแกลบดำและ PEG 400 ปริมาณ 2.4 phr ที่ปริมาณเถ้าแกลบดำ 60 phr ในทุกขนาด

4.4.1 ผลของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบดำที่มีผลต่อสมบัติการเชื่อมโยงของยางเชื่อมโยง

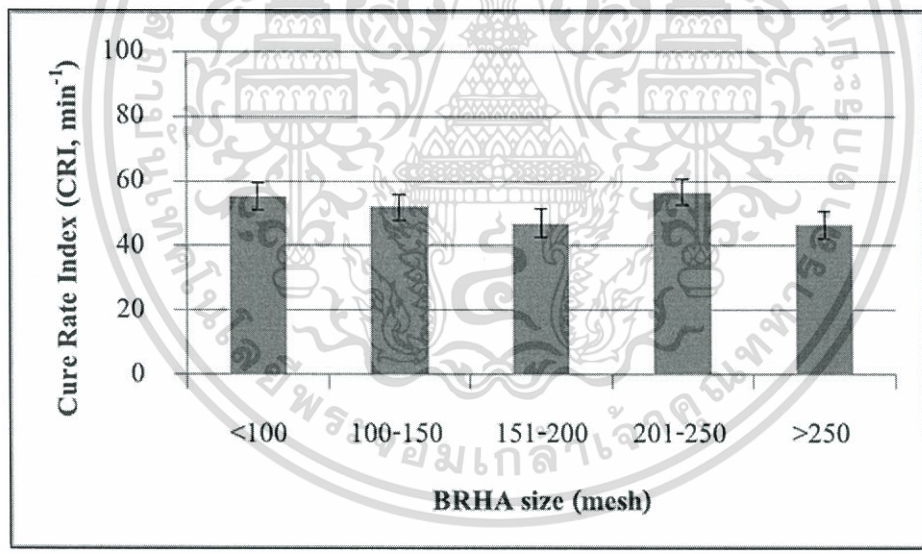
ในการวิเคราะห์ผลของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบดำ (ใหญ่กว่า 100, 100-150, 150-200, 200-250 และเล็กกว่า 250 mesh) ที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง โดยทำการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG และ Si-69 ในทุกขนาดที่ทำการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าเถ้าแกลบดำขนาดต่าง ๆ ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อลักษณะการเชื่อมโยง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากพื้นผิวของเถ้าแกลบดำมีความเฉื่อย เมื่อปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 จึงไม่ส่งผลต่อเวลาในการเชื่อมโยง



รูปที่ 4.26 ผลของขนาดเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) ของยางเชื่อมโยง



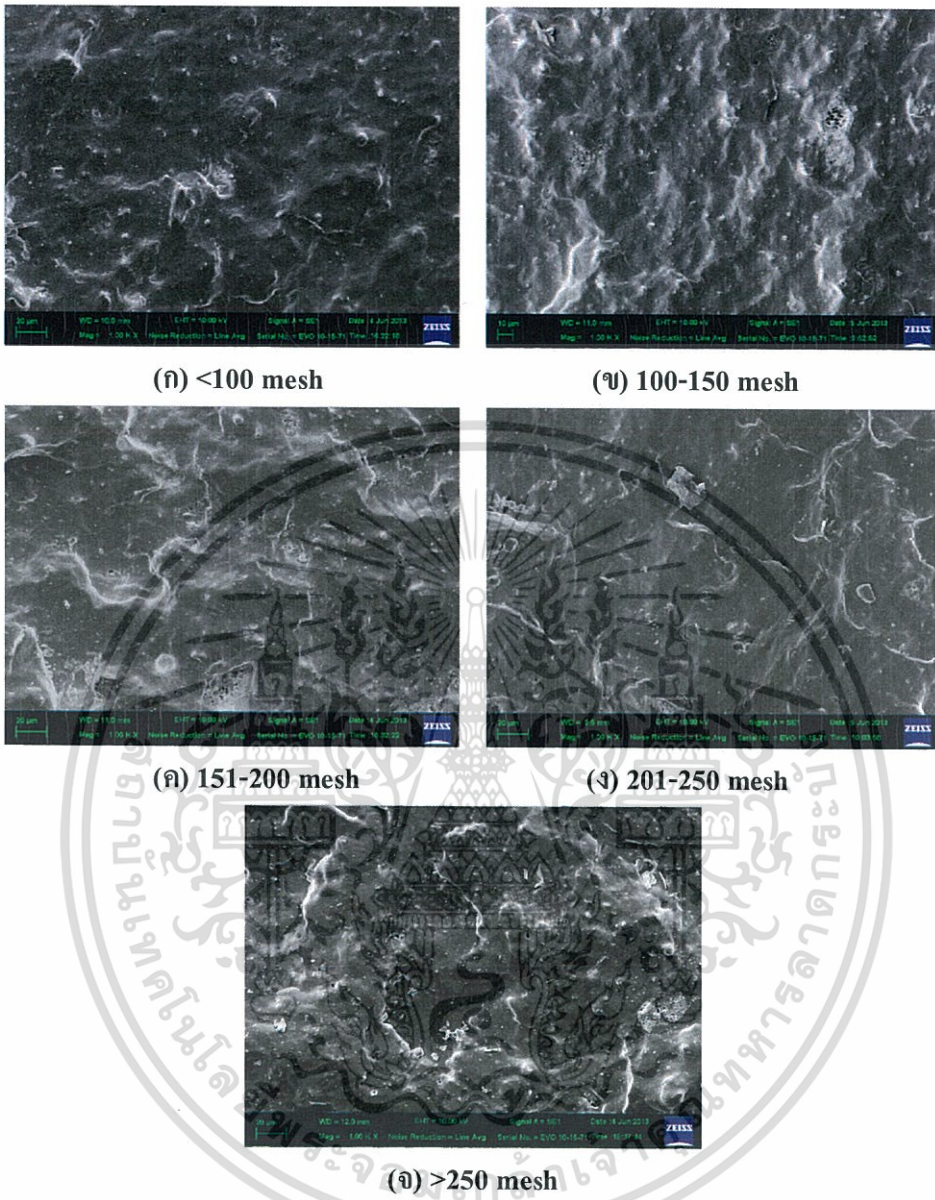
รูปที่ 4.27 ผลของขนาดเถ้าเคลือบดำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อเวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) ของยางเชื่อมโยง



รูปที่ 4.28 ผลของขนาดเถ้าเคลือบดำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (CRI) ของยางเชื่อมโยง

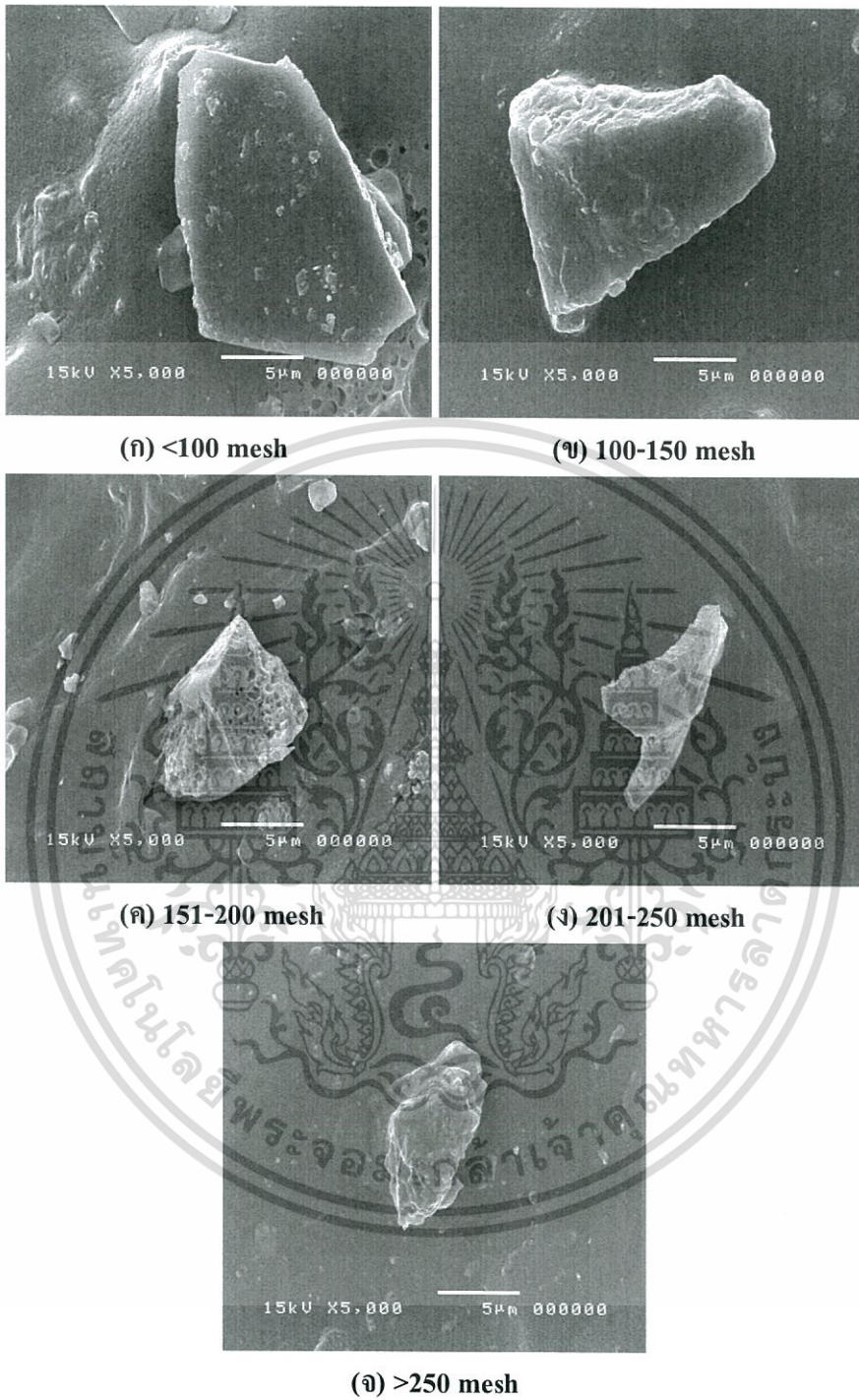
4.4.2 ผลของขนาดอนุภาคของเถ้าเคลือบดำที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของยางเชื่อมโยง

จากรูปที่ 4.29 – 4.30 พบว่าขนาดที่แตกต่างกันของเถ้าเคลือบดำมีผลของการกระจายตัวและการยึดเกาะกับยางธรรมชาติที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และไม่มีหลุมจากการหลุดออกของเถ้าเคลือบดำแสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติที่เป็นเมทริกซ์มีการยึดเกาะที่ดีกับเถ้าเคลือบดำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาการกระจายตัวของขนาดแก้วเคลือบดำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ในยางเชื่อมโยงที่กำลัขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

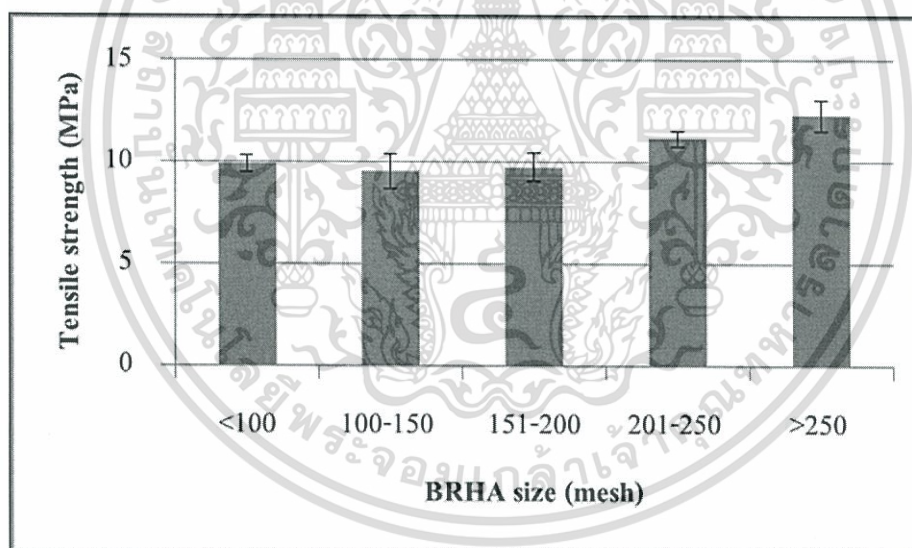


รูปที่ 4.30 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาการกระจายตัวของขนาดเล็กลบดำที่ปรับปรุง
ผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ในยางเชื่อม โยงที่กำลัขยาย 5,000 เท่า

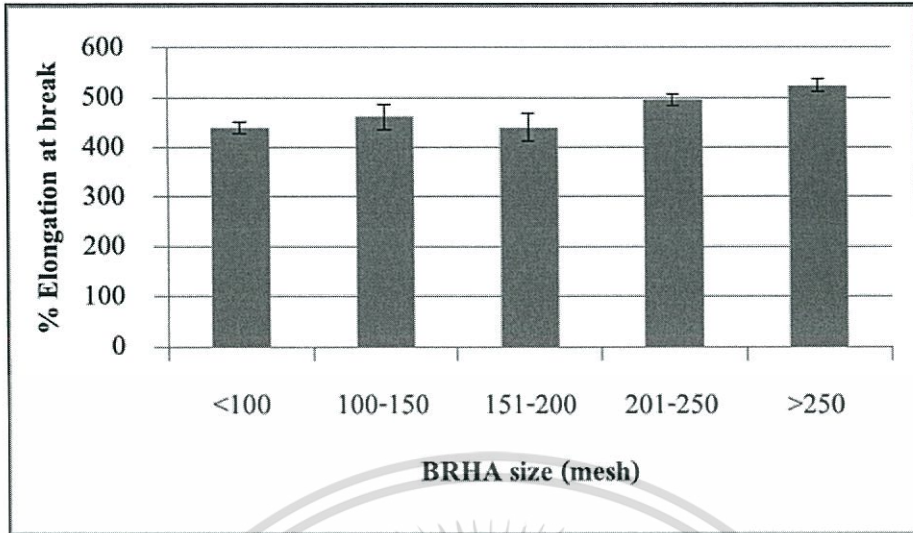
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบดำที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยง

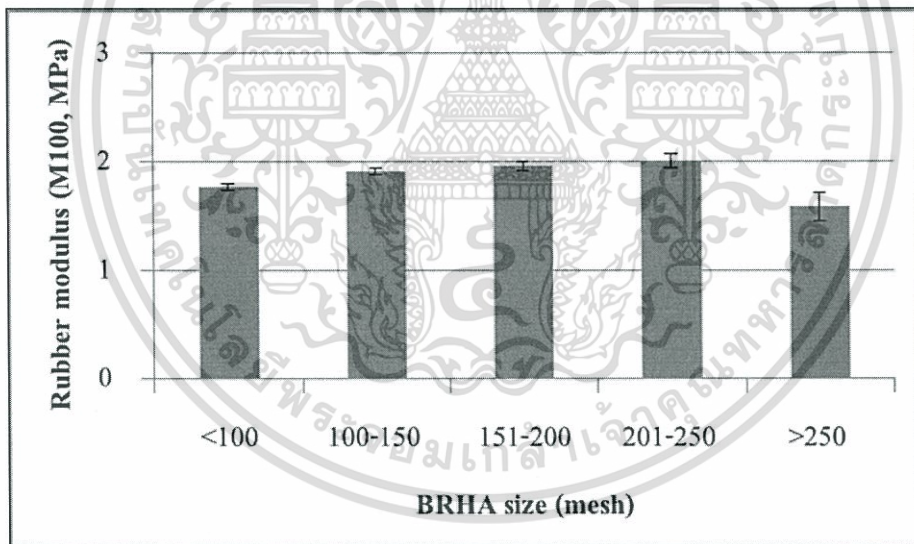
จากผลการทดลองพบว่าเถ้าแกลบดำขนาดต่าง ๆ ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติเชิงกลของยาง โดยเถ้าแกลบดำขนาดใหญ่ (เช่น ใหญ่กว่า 100 mesh) มีแนวโน้มที่จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำกว่า อาจเนื่องจากเถ้าแกลบดำขนาดใหญ่อาจมีรอยตำหนิ (Flaws) เป็นช่องว่างโดยเฉพาะในก้อนเถ้าแกลบดำขนาดใหญ่ส่งผลให้เกิดการขาดของตัวอย่างที่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำกว่า ส่วนค่าความแข็งแรงดึง ค่า M100 และค่าความแข็งแรงคมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่เถ้าแกลบดำที่มีขนาดมากกว่า 100 mesh ให้ค่า Compression set ที่น้อยที่สุด เนื่องจากเถ้าแกลบดำที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวน้อย ยางส่วนที่สามารถเกิดยางบาวด์ได้จึงมีปริมาณน้อยกว่า เมื่อปล่อยแรงกดอัดยางจึงกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้น้อย ค่า Compression set จึงมีค่าน้อยกว่า แตกต่างจากเถ้าแกลบดำที่มีอนุภาคขนาดเล็ก จึงทำให้มีพื้นที่ผิวมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ยางส่วนที่สามารถเกิดยางบาวด์ได้จึงมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อปล่อยแรงกดอัดยางจึงกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้น้อย ค่า Compression set จึงมีค่ามากกว่า



รูปที่ 4.31 ผลของขนาดเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของยางเชื่อมโยง

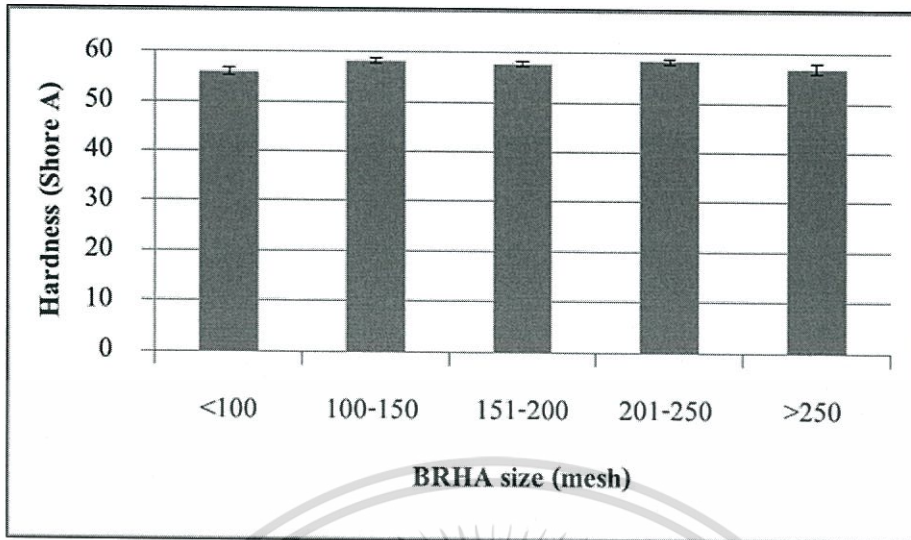


รูปที่ 4.32 ผลของขนาดถ้ำกลบดำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของยางเชื่อมโยง

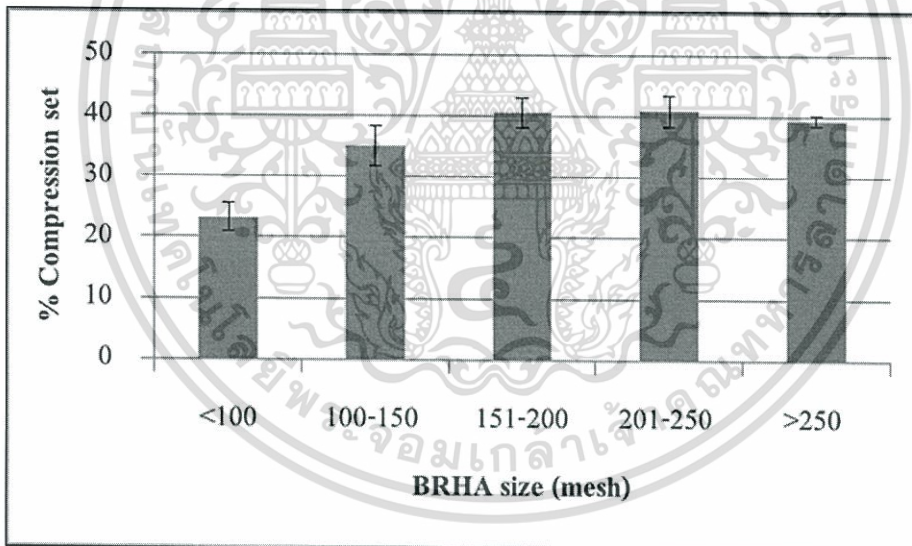


รูปที่ 4.33 ผลของขนาดถ้ำกลบดำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่ามอดูลัสของยางที่ 100 % ดึงยืด (M100) ของยางเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 ผลของขนาดเล้าเกลบค่าที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าความแข็งกด (Hardness) ของยางเชื่อมโยง



รูปที่ 4.35 ผลของขนาดเล้าเกลบค่าที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C ของยางเชื่อมโยง

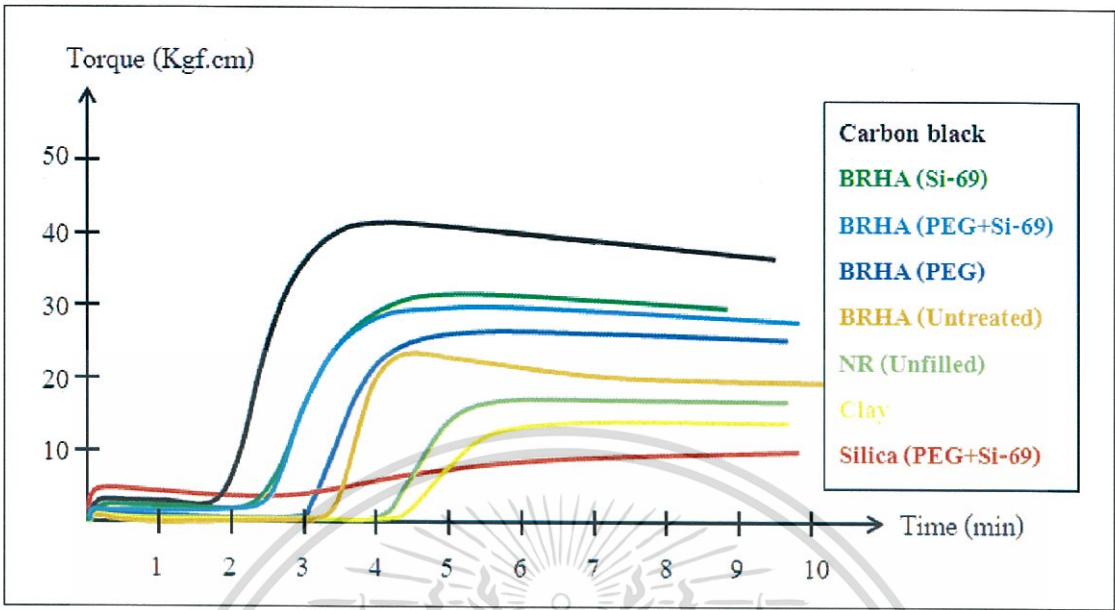
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลของการใช้เถ้าแกลบดำในยางธรรมชาติเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น

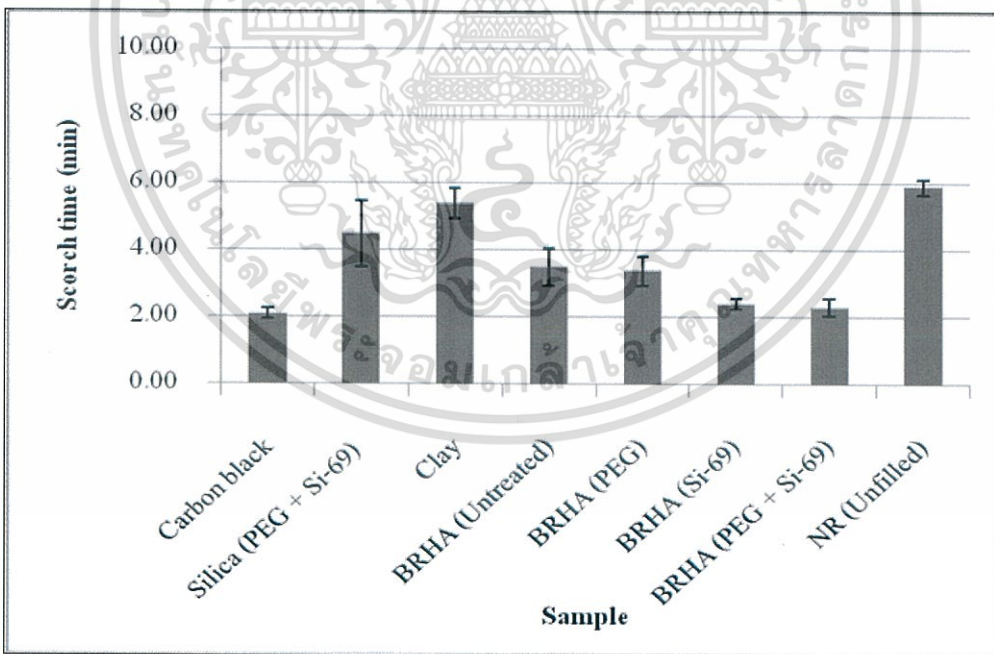
สารตัวเติมทางการค้ามีมากมายหลายชนิด การเข้ากันของสารตัวเติมกับยางธรรมชาติขึ้นกับความมีขี้ว เป็นผลให้สารตัวเติมนั้นๆ สามารถเสริมแรงและไม่เสริมแรงให้กับยางธรรมชาติ งานวิจัยนี้ได้้นำสารตัวเติมทางการค้าที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางทั้งหมด 3 ชนิด คือ เหม่าดำ (N 330), แคลไซน์เคลย์ (Calcined clay, Iceberg®) และ ซิลิกา (Tokusil® 255) เพื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมเถ้าแกลบดำที่ปริมาณ 60 phr และยางเชิงโอยที่ไม่เติมสารตัวเติม

4.5.1 ผลของการใช้เถ้าแกลบดำในยางธรรมชาติเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นที่มีต่อสมบัติการเชื่อมโอยของยางเชื่อมโอย

เมื่อเปรียบเทียบกับยางเชื่อมโอยที่เติมเถ้าแกลบดำทุกสูตร (ทั้งเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 และที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว) กับเหม่าดำ เคลย์และซิลิกาเป็นสารตัวเติม จะเห็นว่าเหม่าดำมีเวลาเริ่มเชื่อมโอยยางและเวลาเชื่อมโอยยางน้อยที่สุด เนื่องจากว่าเหม่าดำนั้นไม่มีขี้วเหมือนกับยางธรรมชาติจึงเข้ากับยางธรรมชาติที่ไม่มีขี้วเช่นกันได้ดี ส่วนซิลิกานั้นมีขี้วสูงเข้ากันได้ไม่ดีกับยางธรรมชาติจึงมิได้การปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เข้าไปเพื่อทำให้เข้ากับยางธรรมชาติที่มีขี้วต่ำได้ดีขึ้น แต่จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าซิลิกามีเวลาเชื่อมโอยนานที่สุด (รูปที่ 4.36) เมื่อเทียบกันในปริมาณการเติมสารตัวเติม 60 phr ทุกชนิด อาจเนื่องมาจากแรงเสียดทานในการผสมของเครื่องผสมสองลูกกลิ้งไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการผสมที่ดีกับซิลิกาที่มีอนุภาคขนาดเล็กมาก ทำให้ PEG และ Si-69 ไม่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโอยยางของซิลิกาในงานวิจัยนี้ เมื่อเทียบกับเถ้าแกลบดำทุกสูตรนั้นจะเห็นได้ว่าเวลาเริ่มเชื่อมโอยของยางและเวลาเชื่อมโอยจะอยู่ระหว่างเหม่าดำและซิลิกา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเถ้าแกลบดำเป็นสารที่เหลือจากการเผาเถ้าที่ไม่สมบูรณ์ (Incompleted combustion) ทำให้เหลือปริมาณคาร์บอน (Carbon, C) จำนวนมาก แม้ว่าจะมีองค์ประกอบหลักที่เป็นซิลิกา แต่ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้วเช่นไฮดรอกซิลที่ผิวมีไม่มากเหมือนเช่นซิลิกา ทำให้เวลาในการเชื่อมโอยยางมากกว่าเหม่าดำ แต่เมื่อเทียบแคลไซน์เคลย์กับเถ้าแกลบดำในทุกสูตร พบว่าเวลาเริ่มเชื่อมโอยของยางและเวลาเชื่อมโอยของเถ้าแกลบดำในทุกสูตรมีค่าน้อยกว่าแคลไซน์เคลย์ เนื่องจากแคลไซน์เคลย์ (1.4 μm) มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับเถ้าแกลบดำ (41 μm)

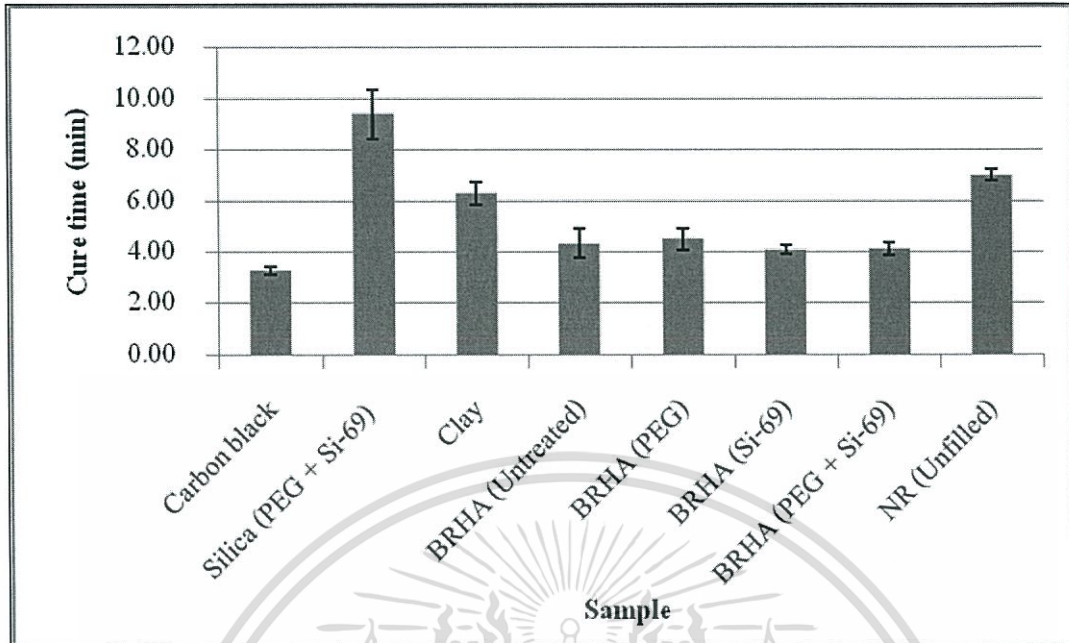


รูปที่ 4.36 กราฟแสดงการเชื่อมโยงของยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม

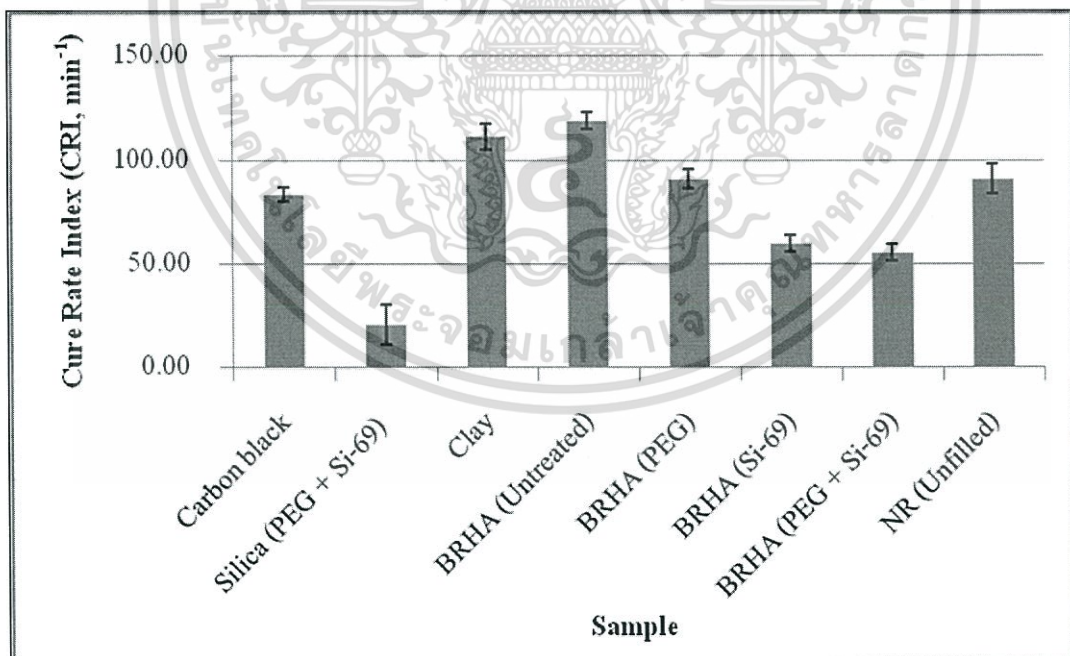


รูปที่ 4.37 ผลของยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{50}) เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 ผลของยางเชื่อม โยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อเวลาเชื่อม โยง (Cure time, $t_{c(90)}$) เทียบกับยางเชื่อม โยงที่ไม่เติมสารตัวเติม

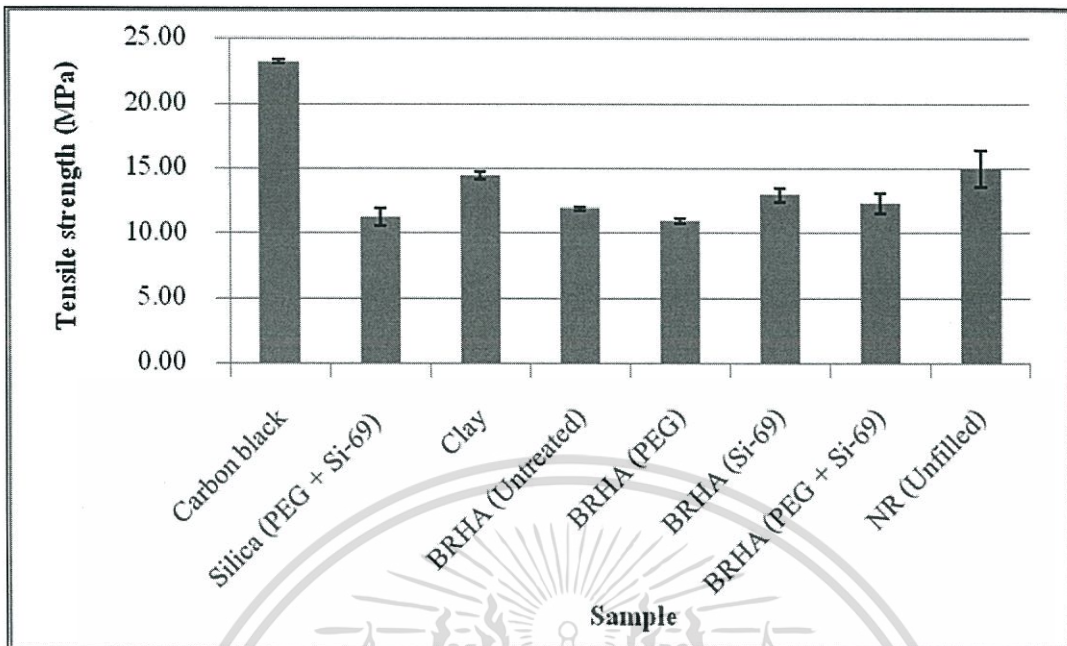


รูปที่ 4.39 ผลของยางเชื่อม โยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อดัชนีอัตราการเชื่อม โยง (CRI) เทียบกับยางเชื่อม โยงที่ไม่เติมสารตัวเติม

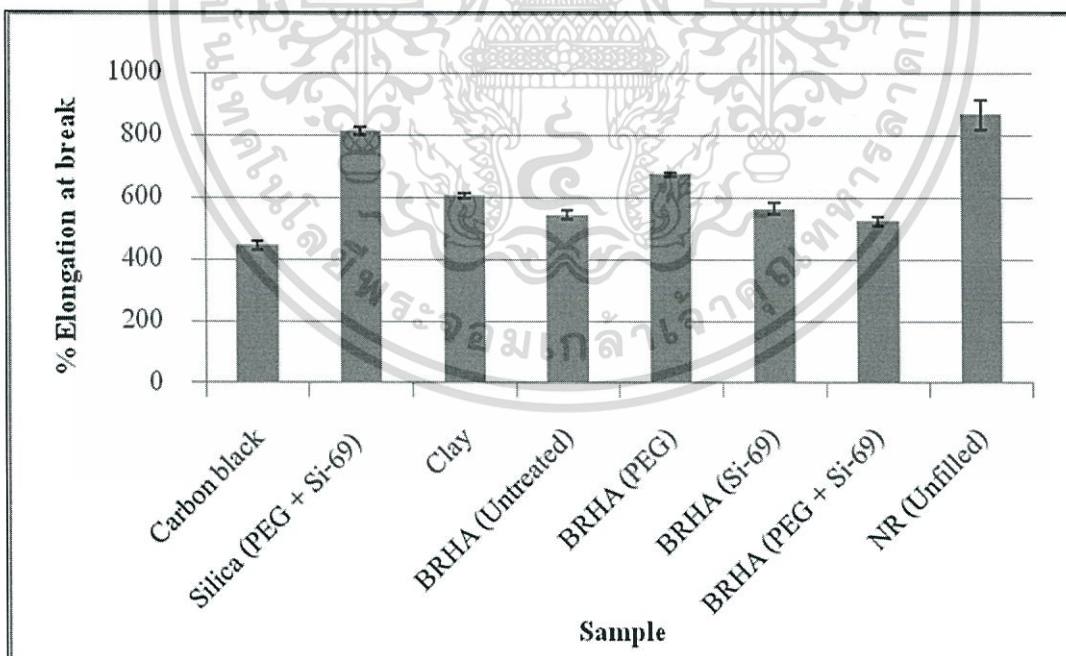
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ผลของการใช้เถ้าแกลบดำในยางธรรมชาติเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยง

จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบเถ้าแกลบดำทุกสูตรกับเขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมที่เสริมแรงได้ดี พบว่ายางเชื่อมโยงที่ใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมทุกสูตรมีค่าความแข็งแรงดึง ค่า M100 และค่าความแข็งแรงกดต่ำกว่าเขม่าดำ แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดและค่า Compression set มีค่าสูงกว่าเขม่าดำ เนื่องจากว่าเขม่าดำมีความเป็นขั้วดำเหมือนกับยางธรรมชาติ มีอนุภาคนาขนาดเล็กกว่าและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าเถ้าแกลบดำมาก และอนุภาคของเขม่าดำจะไม่อยู่กันอย่างเดี่ยวๆ แต่จะอยู่รวมกันเป็นก้อนแอกกรีเกต โดยการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนดังกล่าวทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของสารตัวเติมที่เรียกว่าโครงสร้างสารตัวเติมปฐมภูมิ ซึ่งโครงสร้างสารตัวเติมปฐมภูมิที่เกิดขึ้นนี้ จะมีความแข็งแรงสูงมากและไม่สามารถถูกทำลายได้ด้วยแรงเชิงกลในระหว่างกระบวนการผสม จึงทำให้เขม่าดำเสริมแรงได้ดีกว่า ให้สมบัติเชิงกลดีกว่าเถ้าแกลบดำ สำหรับซิลิกาที่มีความเป็นขั้วสูงจึงมีการปรับปรุงผิวด้วย Si-69 เพื่อให้เกิดการเสริมแรงในยางธรรมชาติที่มีขั้วดำได้ดี พบว่าค่าความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.40) มีค่าใกล้เคียงกับเถ้าแกลบดำแต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดที่ต่ำกว่าเถ้าแกลบดำทุกสูตร ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ได้แตกต่างจากการเติมสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงเลย อาจเนื่องมาจากการผสมในระบบเปิดทำให้ซิลิกาที่มีอนุภาคนาขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก เกิดการผสมได้ไม่ดี แม้ว่าจะทำการปรับปรุงผิวซิลิกาด้วย PEG และ Si-69 เพื่อให้สามารถเสริมแรงในยางธรรมชาติได้ ทำให้ค่า M100 และค่าความแข็งแรงกดของยางเชื่อมโยงที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมมีค่าน้อยกว่าทั้งแคลไซนเซลล์และเถ้าแกลบดำทุกสูตร ทั้งค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดยังมีค่ามากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบเถ้าแกลบดำทุกสูตรกับแคลไซนเซลล์จะเห็นได้ว่าสมบัติเชิงกลมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากว่าแคลไซนเซลล์มีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ SiO_2 เหมือนกับเถ้าแกลบดำ และโครงสร้างของแคลไซนเซลล์นั้นได้กำจัดน้ำในโครงสร้างด้วยการเผาไล่น้ำออก ทำให้ความเป็นขั้วลดลงสามารถเข้ากับยางธรรมชาติได้ดีขึ้น แต่ไม่ดีเท่าเขม่าดำเพราะแคลไซนเซลล์มีอนุภาค ($1.4 \mu\text{m}$) ขนาดใหญ่กว่าเขม่าดำ ($0.02-0.10 \mu\text{m}$) มาก

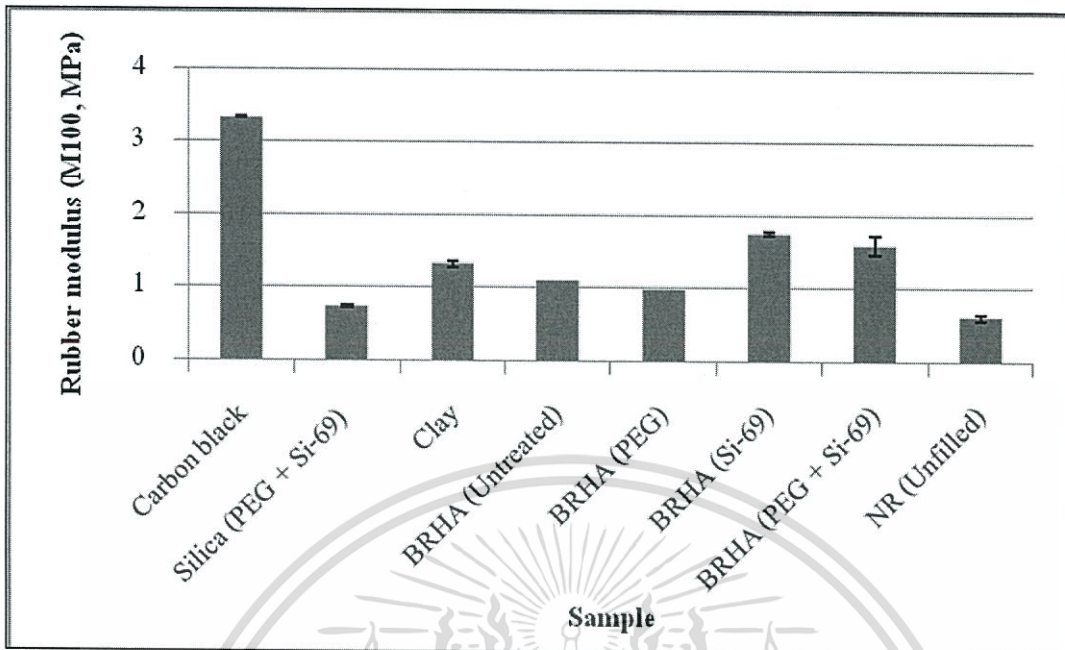


รูปที่ 4.40 ผลยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม

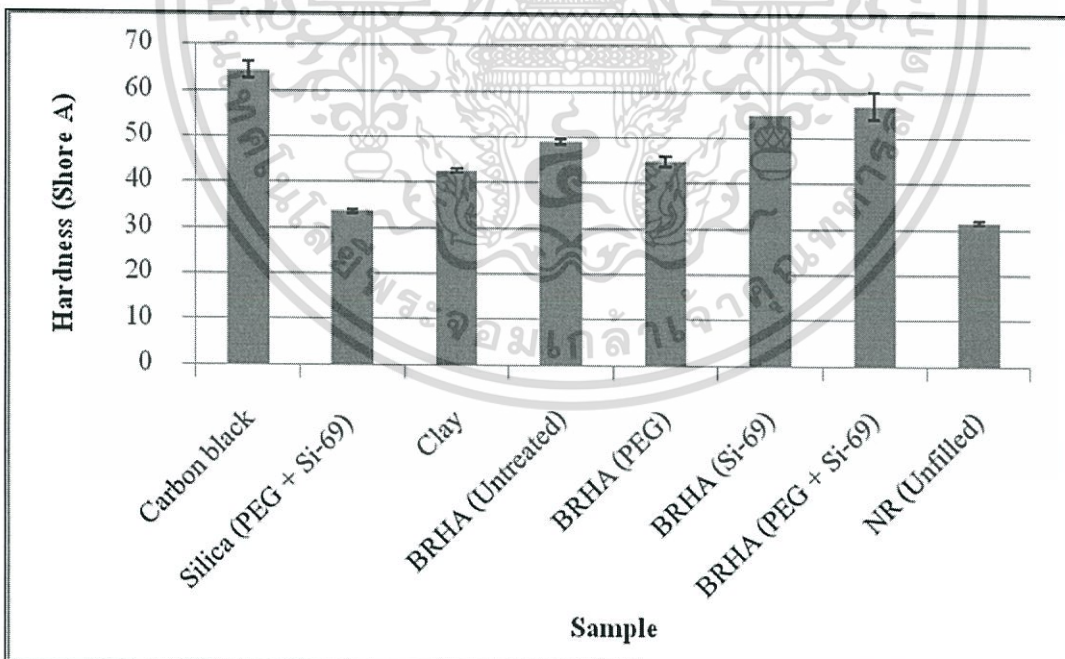


รูปที่ 4.41 ผลยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



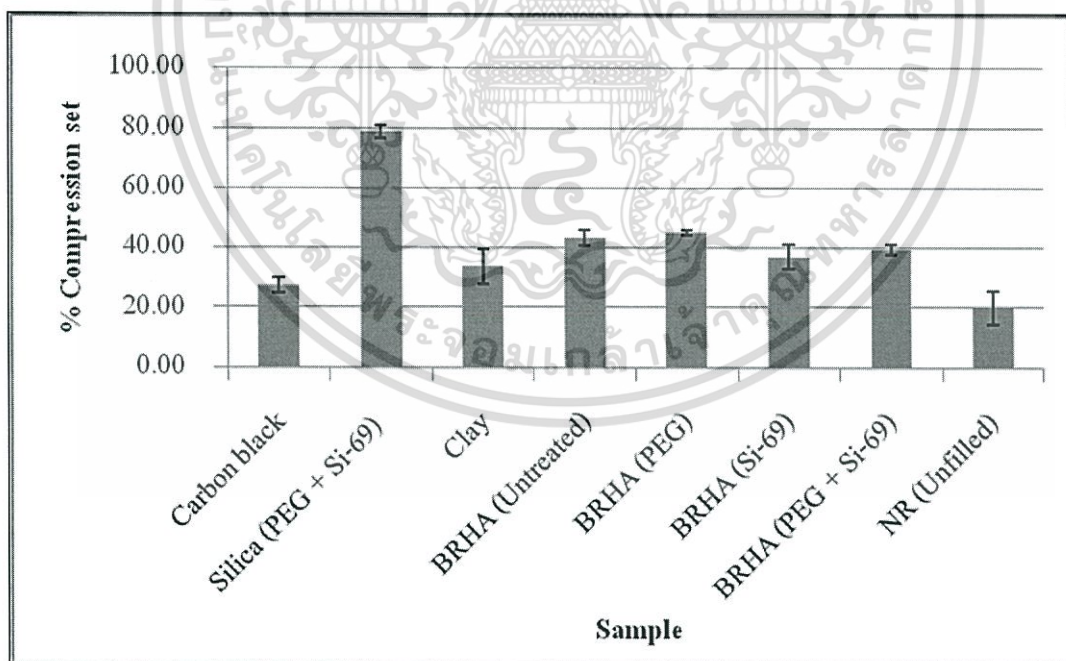
รูปที่ 4.42 ผลยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 100 % ดึงยืด (M100) เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม



รูปที่ 4.43 ผลยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 60 phr ที่มีต่อค่าความแข็งกด (Hardness) ของยางเชื่อมโยงเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.44 จะเห็นได้ว่าค่า Compression set ของยางธรรมชาติที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติม มีค่ามากที่สุด เนื่องจากระหว่างการผสมยางผสมสูตรด้วยเครื่องผสมระบบเปิด ซิลิกาที่มีอนุภาคขนาดเล็กเกิดการฟุ้งกระจาย ทำให้ Si-69 และ PEG ที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงผิวซิลิกาให้เกิดการเสริมแรงที่ดีในยางธรรมชาติที่มีขั้วต่ำได้ผลไม่ดีนัก ค่า Compression set จึงมีค่ามากที่สุดเปรียบเสมือนเติมสารตัวเติมที่มีความเป็นขั้วสูงลงไปยางธรรมชาติที่มีขั้วต่ำโดยไม่ทำการปรับปรุงให้สามารถเข้ากันได้ ซิลิกาจึงไม่สามารถเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติเหมือนกับเขม่าดำซึ่งยางธรรมชาติที่มีเขม่าดำเป็นสารตัวเติมมีค่า Compression set ที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติม จะเห็นว่าค่า Compression set ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ (NR (Unfilled)) ที่ไม่เติมสารตัวเติมใดๆ เลยที่มีค่า Compression set น้อยที่สุด เนื่องจากไม่มีอนุภาคของแข็งเข้าไปแทรกในเนื้อยางเลย มีแต่เนื้อยางและสารเติมแต่งเท่านั้น จึงมีการกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้มากที่สุด เสียรูปน้อยที่สุด จึงเกิดการเสริมแรงที่ดี ส่วนค่า Compression set ของแคลไซน์เคลย์นั้นมีค่าน้อยกว่าถ้าแคลบดำทุกสูตร เนื่องจากโครงสร้างของแคลไซน์เคลย์เป็นแผ่น ไม่มีรูพรุน ยางธรรมชาติจึงไม่มีการแทรกตัวเข้าไปอยู่ในรูพรุนเหมือนกับถ้าแคลบดำระหว่างการทดสอบกดอัดที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.44 ผลยางเชื่อมโยงที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr ที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

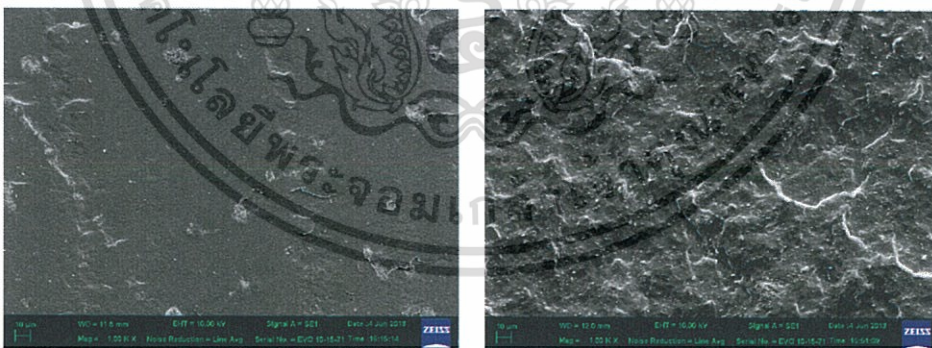
4.5.3 ผลของการใช้เถ้าแกลบดำในยางธรรมชาติเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นที่มีต่อลักษณะวิทยาของยางเชื่อมโยง

จากรูปที่ 4.45 – 4.46 พบว่าเถ้าดำมีการกระจายตัวและยึดเกาะกับยางธรรมชาติได้ดีที่สุด เนื่องจากมีขั้วเหมือนกัน มีอนุภาคนาขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก เมื่อเทียบสารตัวเติมชนิดอื่น ส่วนซิลิกามีการกระจายตัวที่ทั่วถึง แต่จะเห็นว่ามีส่วนที่เกาะกลุ่มกันเป็นแอก โกลเมอเรต สำหรับแคลไซน์เคลย์นั้นมีการกระจายและการยึดเกาะกับยางธรรมชาติได้ดีใกล้เคียงกับเถ้าแกลบดำ เนื่องจากว่าแคลไซน์เคลย์มีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ SiO_2 เหมือนกับเถ้าแกลบดำและโครงสร้างของแคลไซน์เคลย์นั้นได้กำจัดน้ำในโครงสร้างด้วยการเผาไล่ไอน้ำออก ทำให้ความเป็นขั้วลดลงสามารถเข้ากับยางธรรมชาติได้ดีขึ้น



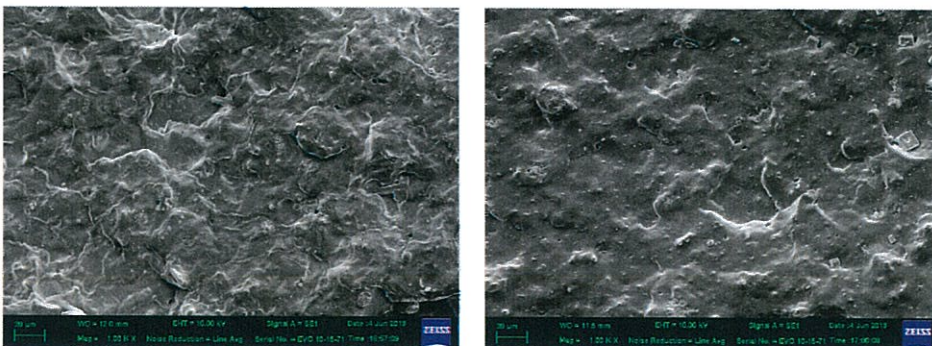
(ก) NR (Unfilled)

(ข) Carbon black



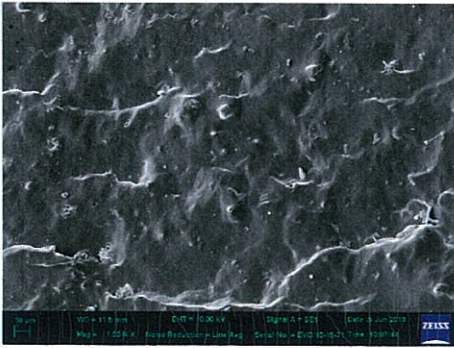
(ค) Silica (PEG+Si-69)

(ง) Clay

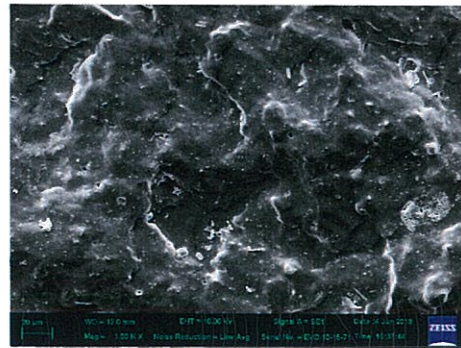


(จ) BRHA (Untreated)

(ฉ) BRHA (PEG)

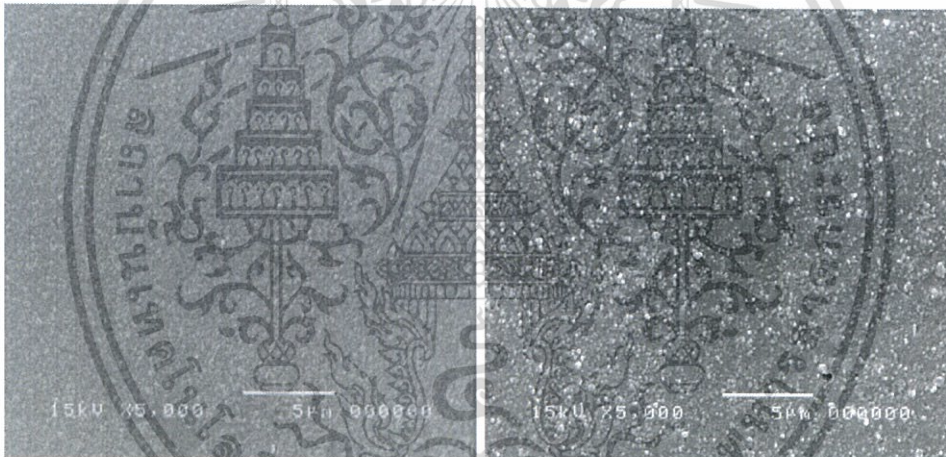


(ข) BRHA (Si-69)



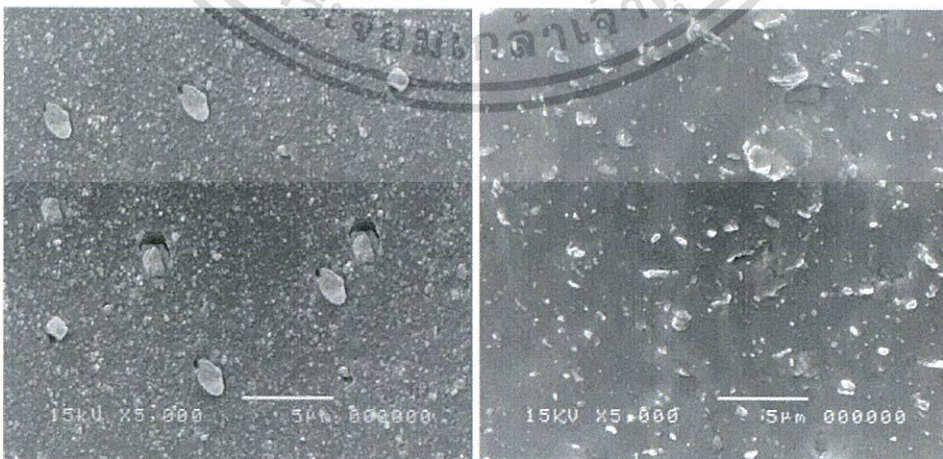
(ช) BRHA (PEG+Si-69)

รูปที่ 4.45 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางเชื่อมโยงสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติมที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



(ก) NR (Unfilled)

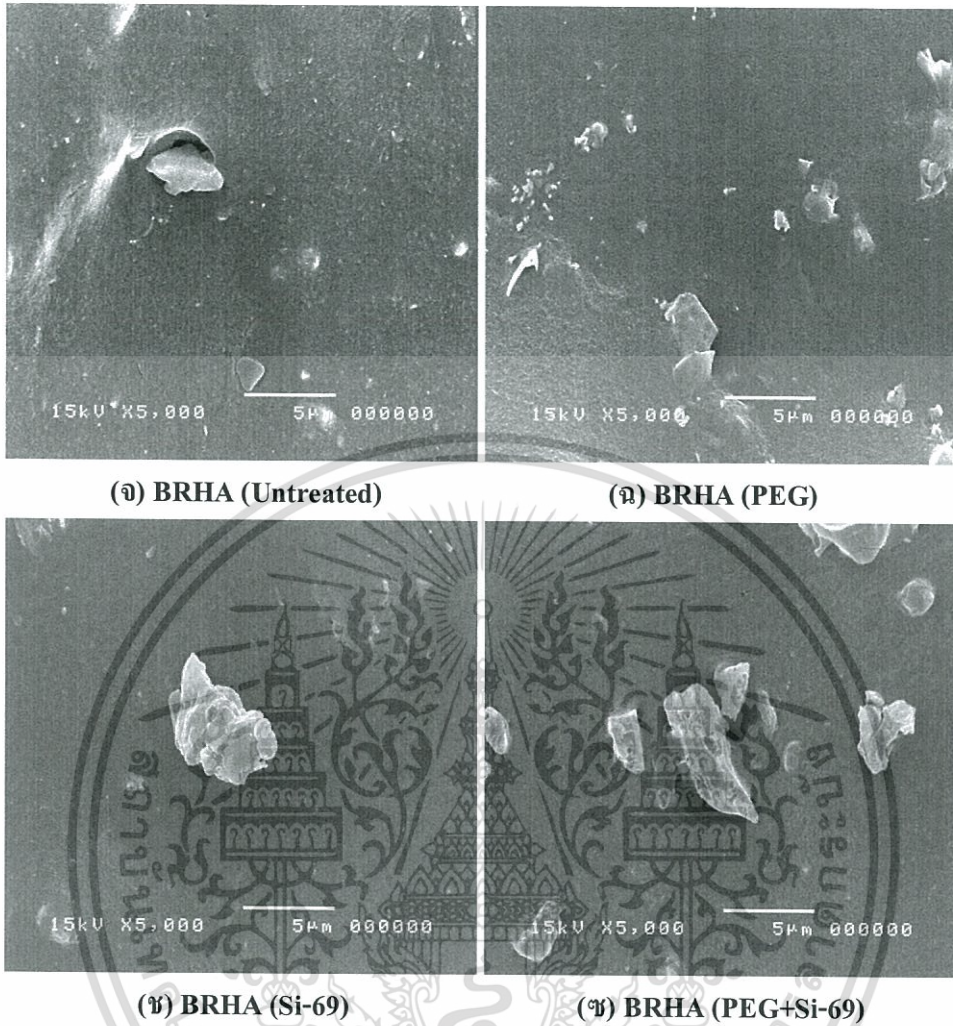
(ข) Carbon black



(ค) Silica (PEG+Si-69)

(ง) Clay

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางเชื่อมโยงสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ 60 phr เทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่เติมสารตัวเติมที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำ (Black rice husk ash, BRHA) จากโรงไฟฟ้าพลังชีวมวลเป็นสารตัวเติม (Filler) ในยางธรรมชาติ โดยมีการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกา ด้วย PEG และ Si-69 เพื่อให้สามารถเสริมแรงในยางธรรมชาติได้ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่ใช้เป็นสารตัวเติม ผลของขนาดเถ้าแกลบดำ และผลของเถ้าแกลบดำเมื่อเทียบกับสารตัวเติมทางการค้า ได้แก่ เชม่าดำ ซิลิกา และเคลย์ จากการทดสอบสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำมีรูปร่างที่หลากหลายมีทั้งที่เป็นแท่ง แผ่นเหลี่ยมและมีอนุภาคขนาดใหญ่ มีการกระจายตัวดี ไม่จับรวมตัวกันเป็นก้อน และจากการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบของเถ้าแกลบดำด้วยเทคนิค XRF จะเห็นได้ว่าเถ้าแกลบดำที่ได้มาจากโรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวล (จังหวัดชัยนาท) นี้มีปริมาณซิลิกาถึง 74% มีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในเถ้าแกลบดำ 4.45% มีขนาดอนุภาค 41-279 μm และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.024-0.212 m^2/g

การปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย Si-69 (ทั้งในเชิงเชื่อมโยงสูตร BRHA (Si-69) และ BRHA (PEG+Si-69)) นั้นให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) ที่สั้นกว่า ด้านสมบัติเชิงกลจะให้ค่า M100 และค่าความแข็งกดที่สูงกว่าเถ้าแกลบดำที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวด้วย Si-69 แต่การปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG และ Si-69 นั้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยต่อเวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time) และค่า Compression set เนื่องจาก Si-69 มีกำมะถันที่อยู่ในโครงสร้างทำให้เริ่มเชื่อมโยงได้เร็วขึ้น และเถ้าแกลบดำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอนุภาคขนาดใหญ่ไม่ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การเสริมแรง จึงไม่ทำให้การปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG และ Si-69 มีผลต่อการเสริมแรงในยางธรรมชาติ จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้เถ้าแกลบดำไม่มีความจำเป็นต้องมีการปรับปรุงผิวด้วย PEG และ Si-69 เพื่อให้เกิดการเสริมแรงในยางธรรมชาติ สามารถใช้เป็นสารตัวเติมเพิ่มเนื้อเพื่อลดต้นทุนโดยไม่จำเป็นต้องปรับปรุงผิว

การศึกษาผลของปริมาณเถ้าแกลบดำพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบดำพบว่าเวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงของยางมีค่าลดลง ส่วนสมบัติเชิงกลนั้นค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่า M100 ค่าความแข็งกดและค่า Compression set ของยางเชื่อมโยงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเถ้าแกลบดำที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลของขนาดเถ้าแกลบดำพบว่าขนาดของเถ้าแกลบดำส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อลักษณะการเชื่อมโยง ด้านสมบัติเชิงกลพบว่าเถ้าแกลบดำขนาดใหญ่ (เช่นใหญ่กว่า 100 mesh) มีแนวโน้มที่จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยึดฉ ด จุดขาดต่ำกว่า ส่วนค่าความแข็งแรงดึง ค่า M100 และค่าความแข็งกมมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ค่า Compression set มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดของเถ้าแกลบดำเล็กลง อาจเนื่องมาจากขนาดของเถ้าแกลบดำที่เล็กกระจายตัวได้ไม่ดี เกาะกันเป็นก้อน ทำให้ชิ้นงานเกิดจุดบกพร่องในบางส่วน ค่า Compression set จึงเพิ่มมากขึ้น

จากการศึกษาผลการใช้เถ้าแกลบดำในยางที่เทียบกับสารตัวเติมทางการค้าชนิดอื่น (เขม่าดำ (N 330), แคลไซน์เคลย์ (Iceberg® calcined clay) และซิลิกา (Tokusil® 255)) พบว่าเถ้าแกลบดำให้การเสริมแรงที่ด้อยกว่าเขม่าดำซึ่งให้การเสริมแรงดีที่สุดและมีเวลาในการเชื่อมโยงยางน้อยที่สุดสำหรับ ซิลิกาที่ทางอุตสาหกรรมใช้เป็นสารเสริมแรงได้ดีรองจากเขม่าดำนั้นพบว่าให้ผลเชิงกลที่ไม่ดีนักและเวลาในการเชื่อมโยงยางยังมีเวลาที่สูงสุดด้วย อันเป็นผลมาจากมีการผสมได้ไม่ดีนัก ส่วนแคลไซน์เคลย์ให้ผลเชิงกลและการเชื่อมโยงยางใกล้เคียงกับเถ้าแกลบดำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากเถ้าแกลบดำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอนุภาคไม่เล็กพอจึงไม่สามารถเสริมแรงได้ ดังนั้นจึงควรศึกษาความเป็นไปได้ของประสิทธิภาพการเสริมแรงในยางธรรมชาติ เมื่อเถ้าแกลบดำมีขนาดเล็กลง (เล็กกว่า 1 μm) โดยการนำเถ้าแกลบดำไปบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง
2. เนื่องจากเถ้าแกลบดำมีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกาที่มีความเป็นขั้วสูง ดังนั้นจึงควรนำเถ้าแกลบดำไปเป็นสารตัวเติมในยางที่มีขั้วเช่นเดียวกัน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเสริมแรงในยางที่มีขั้วเหมือนกัน
3. เนื่องจากเถ้าแกลบที่ได้จากแหล่งที่ต่างกัน (ต่างสถานที่) และผ่านวิธีการเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันจะทำให้ได้เถ้าแกลบที่มีปริมาณซิลิกาที่ต่างกัน ดังนั้นจึงควรนำเถ้าแกลบที่ต่างกันมาศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทั้งด้านการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน เพื่อให้ได้ผลที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. “การส่งเสริมการใช้พลังงานจากชีวมวลของประเทศไทย.” [Online]. Available : <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS55-06-biomass.html>. 2010.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2552. “ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย.” [Online]. Available : http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=130%3A2010-05-07-08-10-57&catid=58&Itemid=68&lang=th. 2010.
- [3] Electrical Power System Knowledge. “โรงไฟฟ้าชีวมวล.” [Online]. Available : http://protectionrelay.blogspot.com/2010/10/blog-post_12.html. 2010.
- [4] H. Ismail, M.N. Nasaruddin and U.S. Ishiaku. “**White rice husk ash filled natural rubber compounds: the effect of multifunctional additive and silane coupling agents.**” Polymer Testing 18 (1999) 287-298.
- [5] สถาบันวิจัยยาง. “สถิติยางไทย.” [Online]. Available : http://www.rubberthai.com/statistic/stat_index.htm. 2012.
- [6] A. Ansarifara, A. Azharb, N. Ibrahima, S.F. Shiahah and J.M.D. Lawton. “**The use of a silanised silica filler to reinforce and crosslink natural rubber.**” International Journal of Adhesion & Adhesives 25 (2005) 77-86.
- [7] H.M. da Costa, T.A.S. Abrantes, R.C.R. Nunes, L.L.Y. Visconte and C.R.G. Furtado. “**Design and analysis of experiments in silica filled natural rubber compounds - effect of castor oil.**” Polymer Testing 22 (2003) 769-777.
- [8] T. Pongprayoon, N. Yooprasert, P. Suwanmala and K. Hemvichian. “**Rubber products prepared from silica modified by radiation-induced Admicellar polymerization.**” Radiation Physics and Chemistry 81 (2012) 541-546.
- [9] หน่วยเทคโนโลยียาง (Rubber technology unit). “**ยางธรรมชาติ (Natural rubber)**” [Online]. Available : <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbtech/NR.htm>. 2012.
- [10] พงษ์ธร แซ่อูย. ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2550.
- [11] สถาบันวิจัยยาง. “**ข้อมูลวิชาการยาง 2555.**” : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2555.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] อธิพิล แจ้งซัด. “เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [13] Trye. “**Vulcanization.**” [Online]. Available : <http://www.emt-india.net/process/tyre/tyre.htm>. 2012.
- [14] พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. ปัตตานี : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. 2528.
- [15] Nanopotal. “**Carbon black.**” [Online]. Available : <http://nanoportal.gc.ca/default.asp?lang=En&n=64893C1E-1>. 2012.
- [16] Professional Development for Geoscience Faculty. “**Mineralogy, Petrology, and Geochemistry Across the Curriculum: Teaching Clay Mineralogy.**” [Online]. Available : http://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/mineralogy/clay_mineralogy.html. 2012.
- [17] หน่วยเทคโนโลยียาง (Rubber technology unit). “การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมในยาง.” [Online]. Available : <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/Silica.pdf>. 2010.
- [18] Sigma – aldrich. “**Bis(3-(triethoxysilyl)propyl) tetrasulfide.**” [Online]. Available : <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/15200?lang=en®ion=TH>. 2012.
- [19] Energy Research Division, Thailand Institute of Scientific and Technological Research, “**Fessibility Study on Rice Husk Pyrolysis Technology for Rice Mill Application in Thailand.**” Submitted to National Energy Administration Ministry of Science, Technology and Energy, Bangkok, 1984, 127.
- [20] B.S.Luh. “**Rice : Production and Utilization.**” AVI Publishing Co., Inc., Westport, Connecticut, USA., 1980 : pp.736-743
- [21] สำนักพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าว. “**เผยสูตรน้ำข้าวกล้องงอกขึ้นโต๊ะเสวย.**” [Online]. Available : <http://erawan.loei.doe.go.th/story/ricekor.pdf>. 2012.
- [22] สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ. “**แกลบ...วัสดุเหลือใช้ที่ไม่ไร้ประโยชน์.**” [Online]. Available : <http://wqm.pcd.go.th/km/images/stories/agriculture/chaff.pdf>. 2012.
- [23] Scientific Psychic. “**Carbohydrates - Chemical Structure.**” [Online]. Available : <http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates2.html>. 2012.
- [24] Wikipedia the free encyclopedia. “**Vanillin.**” [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Vanillin>. 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] H. M. da Costa, L. L. Y. Visconte, R. C. R. Nunes and C. R. G. Furtado. “**Rice Husk Ash Filled Natural Rubber. I. Overall Rate Constant Determination for the Vulcanization Process from Rheometric Data.**” *Journal of Applied Polymer Science* 87 (2003) 1194–1203.
- [26] H. Ismail, M.N. Nasaruddin and H.D. Rozman. “**The effect of multifunctional additive in white rice huskash filled natural rubber compounds.**” *European Polymer Journal* 35 (1999) 1429-1437.
- [27] H. Ismail, J.M. Nizam and H.P.S. Abdul Khalil. “**The effect of a compatibilizer on the mechanical properties and mass swell of white rice husk ash filled natural rubber/linear low density polyethylene blends.**” *Polymer Testing* 20 (2001) 125–133.
- [28] S. Chuayjuljit, S. Eiumnoh and P. Potiyaraj. “**Using silica from rice husk as a reinforcing filler in natural rubber.**” *Journal Science Research Chula University* 26 (2001) 127-138.
- [29] วีรยา วรคันธี, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกชัย วิมลมาลา และ ศิรินทร ทองแสง. “**การเสริมแรงของสารประกอบยางธรรมชาติด้วยซิลิกาผสมระหว่างเถ้าลอยและพรีซิพิเตดซิลิกา.**” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี* 12 (2553) 9-20.
- [30] W. Arayapranee, N. Na-Ranong and G.L. Rempel. “**Application of Rice Husk Ash as Fillers in the Natural Rubber Industry.**” *Journal of Applied Polymer Science* 98 (2005) 34–41.
- [31] P. Sae-Oui, C. Rakdee and P. Thanmathorn. “**Use of Rice Husk Ash as Filler in Natural Rubber Vulcanizates: In Comparison with Other Commercial Fillers.**” *Journal of Applied Polymer Science* 83 (2002) 2485–2493.
- [32] H. Ismail, L Mega and H.P.S. Abdul Khalil. “**Effect of a silane coupling agent on the properties of white rice husk ash–polypropylene/natural rubber composites.**” *Polymer International* 50 (2001) 606–611.
- [33] H. M. Da Costa, L. L. Y. Visconte, R. C. R. Nunes and C. R. G. Furtado. “**Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Rice Husk Ash–Filled Natural Rubber Compounds.**” *Journal of Applied Polymer Science* 83 (2002) 2331–2346.
- [34] Mesh (scale) “**Commercial Sieve Mesh Dimensions**” [Online]. Available : [http://en.wikipedia.org/wiki/Mesh_\(scale\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Mesh_(scale)) . 2012.
- [35] นิพนธ์ วงศ์วิเศษสิริกุล. **ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2537.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [36] ASTM D 395-89. **“Standard Test Methods for Rubber Property – Compression Set.”** Philadelphia : American Society for Testing and Materials. 1993
- [37] ASTM D412. **“Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension”** Philadelphia : American Society for Testing and Materials. 1993
- [38] ASTM D2240. **“Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness”** Philadelphia : American Society for Testing and Materials. 1993
- [39] พรหมพร พิมพ์เสน. **“การศึกษาเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางโบรโมบิวทิลผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสำหรับงานทางการแพทย์.”** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544
- [40] J. Brandru, E.H. Immergut and E.A. Grulke. **“Polymer Handbook.”** 4th New York : John Wiley & Sons. 1999.
- [41] ชวยากรณ์ เพ็ชฌุพิศิษฏ์, สรัญญา พลอยประดับ และ ปิยะพงศ์ เทพกฤษณ์. **“ผลของยางธรรมชาติเหลวตัดแปรในยางคอมพาวด์ที่เติมเถ้าแกลบข้าวดำ.”** NU Science Journal 5 (2008) 92 – 107.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ก-1 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และมอดูลัสของยางที่ 100% (M100)

สูตร	ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) (%)	มอดูลัสของยางที่ 100% (M100) (MPa)
NR (Unfilled)	15.0 ± 1.4	887 ± 70	0.61 ± 0.04
BRHA (PEG+Si-69) (mesh)			
<100	9.9 ± 0.4	439 ± 11	1.77 ± 0.03
100-150	9.5 ± 0.8	462 ± 25	1.91 ± 0.03
150-200	8.7 ± 0.7	440 ± 28	1.96 ± 0.04
200-250	11.2 ± 0.4	495 ± 12	2.01 ± 0.07
>250	9.4 ± 0.8	525 ± 12	1.59 ± 0.13
BRHA (Untreated) >250 mesh			
5 phr	17.6 ± 0.7	871 ± 23	0.77 ± 0.03
10 phr	17.2 ± 0.5	837 ± 12	0.75 ± 0.01
20 phr	16.2 ± 0.9	796 ± 15	0.92 ± 0.02
30 phr	14.7 ± 0.3	760 ± 10	1.00 ± 0.03
40 phr	16.3 ± 0.4	628 ± 7	1.00 ± 0
60 phr	11.9 ± 0.2	543 ± 15	1.10 ± 0
80 phr	9.5 ± 0.3	536 ± 7	1.26 ± 0.05
100 phr	8.8 ± 0.2	521 ± 7	1.38 ± 0.04
BRHA (PEG) >250 mesh			
5 phr	16.0 ± 1.1	820 ± 38	0.73 ± 0.01
10 phr	15.2 ± 1.1	776 ± 24	0.75 ± 0.03
20 phr	14.9 ± 0.7	769 ± 17	0.88 ± 0.02
30 phr	14.6 ± 0.6	725 ± 12	0.99 ± 0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และมอดุลัสของยางที่ 100% (M100)

สูตร	ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) (%)	มอดุลัสของยางที่ 100% (M100) (MPa)
40 phr	12.8 ± 0.8	661 ± 12	0.90 ± 0
60 phr	11.0 ± 0.2	675 ± 6	0.98 ± 0.04
80 phr	10.2 ± 0.1	548 ± 5	1.20 ± 0
100 phr	7.4 ± 0.2	519 ± 3	1.30 ± 0
BRHA (Si-69) >250 mesh			
5 phr	18.5 ± 2.1	782 ± 39	0.75 ± 0.01
10 phr	17.7 ± 0.5	722 ± 11	0.87 ± 0.03
20 phr	16.1 ± 1.1	676 ± 2	1.07 ± 0.01
30 phr	16.1 ± 0.2	644 ± 17	1.24 ± 0.02
40 phr	13.9 ± 0.6	598 ± 19	1.40 ± 0
60 phr	13.0 ± 0.5	565 ± 19	1.75 ± 0.03
80 phr	8.5 ± 0.4	414 ± 14	2.26 ± 0.05
100 phr	8.0 ± 0.6	408 ± 25	2.48 ± 0.05
BRHA (PEG+Si-69) >250 mesh			
5 phr	15.5 ± 0.4	774 ± 21	0.66 ± 0.03
10 phr	15.7 ± 0.5	793 ± 37	0.78 ± 0.02
20 phr	14.8 ± 0.7	682 ± 17	0.95 ± 0.02
30 phr	14.5 ± 0.4	670 ± 16	1.19 ± 0.02
40 phr	14.4 ± 1.1	647 ± 25	1.16 ± 0.06
60 phr	9.4 ± 0.8	525 ± 15	1.59 ± 0.13
80 phr	8.8 ± 0.4	472 ± 20	1.80 ± 0.04
100 phr	7.0 ± 0.3	406 ± 17	2.14 ± 0.04
Carbon black 60 phr	23.3 ± 0.2	445 ± 15	3.33 ± 0.08
Silica (PEG+Si-69) 60 phr	11.3 ± 0.7	814 ± 13	0.74 ± 0.02
Clay 60 phr	14.5 ± 0.3	605 ± 8	1.32 ± 0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 ความแข็งกด (Hardness) และการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set)

สูตร	ความแข็งกด (Hardness) (Shore A)	การเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) (%)
NR (Unfilled)	32.0 ± 0.5	19.90 ± 5.48
BRHA (PEG+Si-69) (mesh)		
<100	56.0 ± 0.7	23.30 ± 2.31
100-150	58.0 ± 0.5	35.00 ± 3.32
150-200	58.0 ± 0.4	40.50 ± 2.42
200-250	58.0 ± 0.5	40.90 ± 2.49
>250	57.0 ± 0.9	44.30 ± 0.91
BRHA (Untreated) >250 mesh		
5 phr	35.0 ± 1.3	20.80 ± 2.50
10 phr	37.0 ± 0.8	31.20 ± 2.04
20 phr	40.0 ± 1.4	21.80 ± 3.16
30 phr	41.0 ± 1.6	22.20 ± 2.15
40 phr	45.0 ± 0.8	29.10 ± 1.95
60 phr	49.0 ± 0.7	42.50 ± 12.53
80 phr	51.0 ± 0.7	45.40 ± 2.45
100 phr	58.0 ± 0.8	53.90 ± 1.83
BRHA (PEG) >250 mesh		
5 phr	37.0 ± 1.2	26.60 ± 3.97
10 phr	39.0 ± 1.1	20.50 ± 5.25
20 phr	41.0 ± 0.4	26.30 ± 3.50
30 phr	42.0 ± 1.3	24.10 ± 3.93
40 phr	44.0 ± 1.1	32.40 ± 6.92
60 phr	45.0 ± 1.0	39.00 ± 4.01
80 phr	51.0 ± 1.1	42.10 ± 2.35
100 phr	56.0 ± 0.8	52.90 ± 4.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

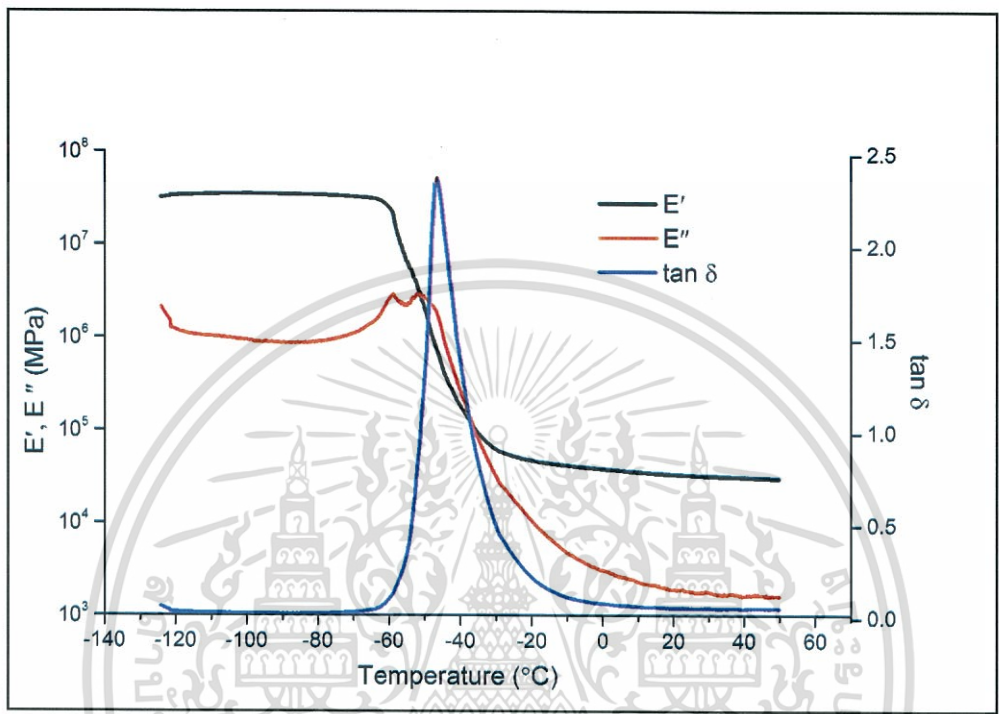
ตารางที่ ก-2 (ต่อ) ความแข็งกด (Hardness) และการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set)

สูตร	ความแข็งกด (Hardness) (Shore A)	การเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) (%)
BRHA (Si-69) >250 mesh		
5 phr	38.0 ± 0.5	17.70 ± 6.79
10 phr	39.0 ± 0.8	17.30 ± 1.32
20 phr	41.0 ± 0.7	23.58 ± 3.00
30 phr	46.0 ± 0.5	27.50 ± 1.75
40 phr	50.0 ± 0	33.60 ± 6.12
60 phr	55.0 ± 0	41.60 ± 1.81
80 phr	63.0 ± 0.4	44.90 ± 3.19
100 phr	67.0 ± 0.8	50.40 ± 2.69
BRHA (PEG+Si-69) >250 mesh		
5 phr	37.0 ± 1.1	27.00 ± 3.59
10 phr	40.0 ± 0.4	27.00 ± 0.01
20 phr	45.0 ± 0.5	22.70 ± 1.90
30 phr	47.0 ± 0.4	23.70 ± 2.27
40 phr	48.0 ± 0.5	31.50 ± 1.95
60 phr	57.0 ± 0.9	44.30 ± 0.91
80 phr	60.0 ± 0.4	46.80 ± 2.65
100 phr	65.0 ± 0	52.10 ± 2.01
Carbon black 60 phr	64.0 ± 1.7	27.40 ± 2.64
Silica (PEG+Si-69) 60 phr	34.0 ± 0.5	78.70 ± 2.03
Clay 60 phr	43.0 ± 0.5	33.70 ± 5.74

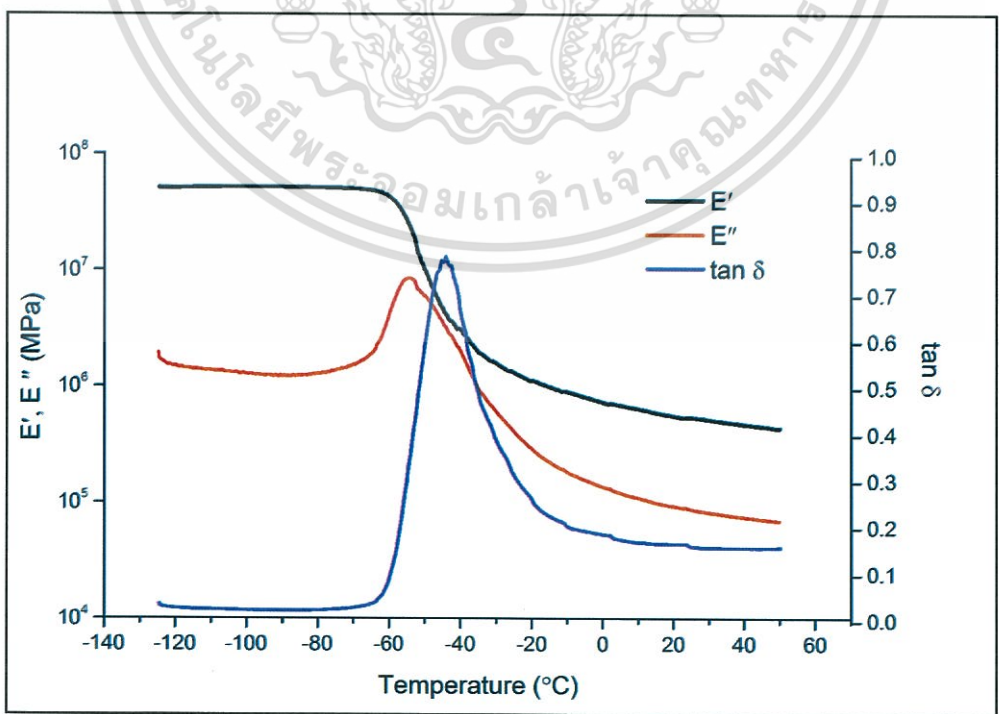
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA

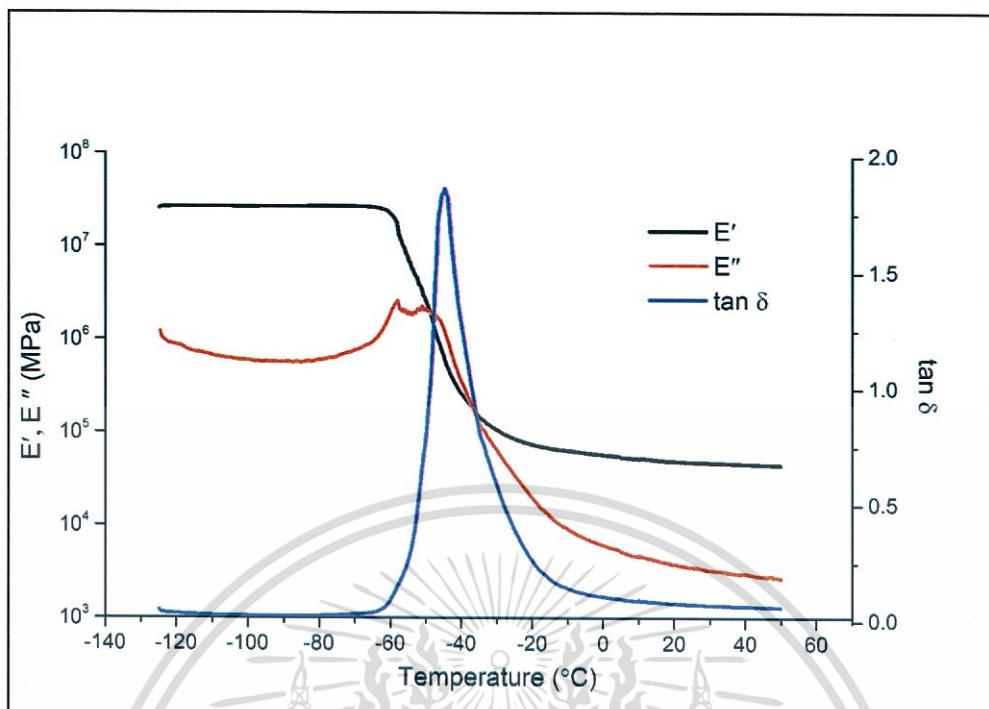


รูปที่ ข-1 NR (Unfilled)

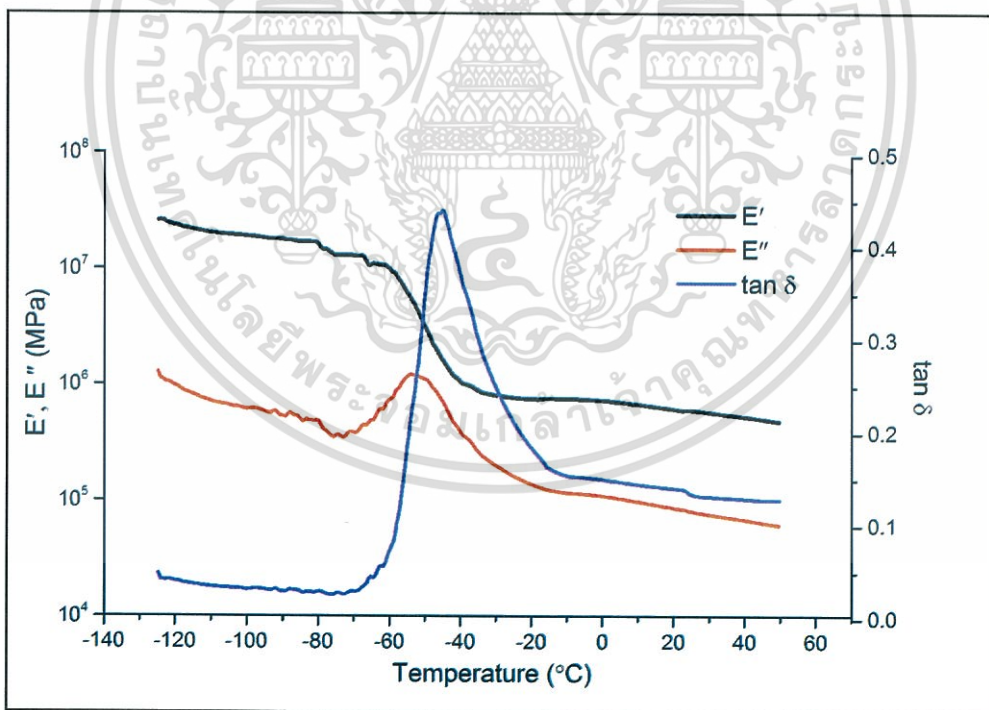


รูปที่ ข-2 Carbon black 60 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

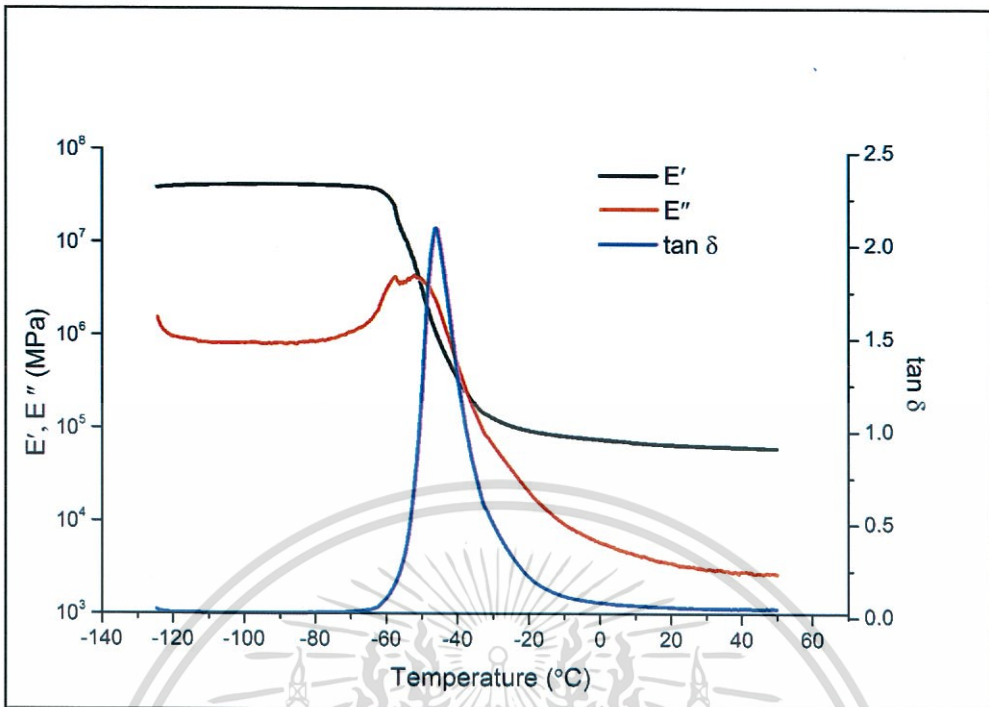


รูปที่ ข-3 Clay 60 phr

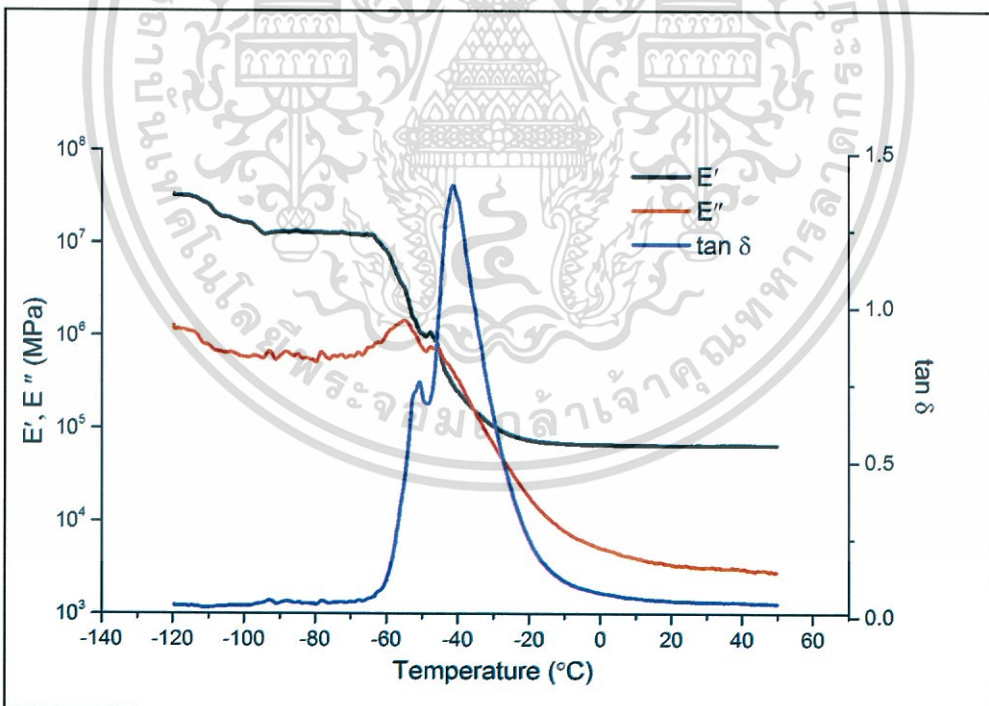


รูปที่ ข-4 Silica (PEG + Si-69) 60 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

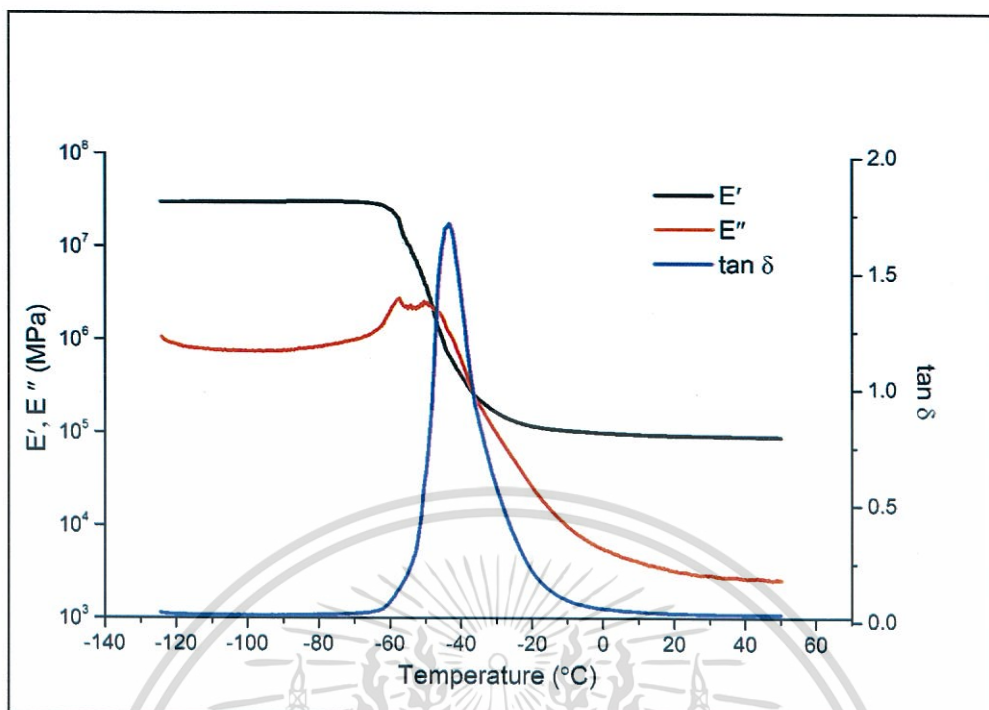


รูปที่ ข-5 BRHA (Untreated) 60 phr

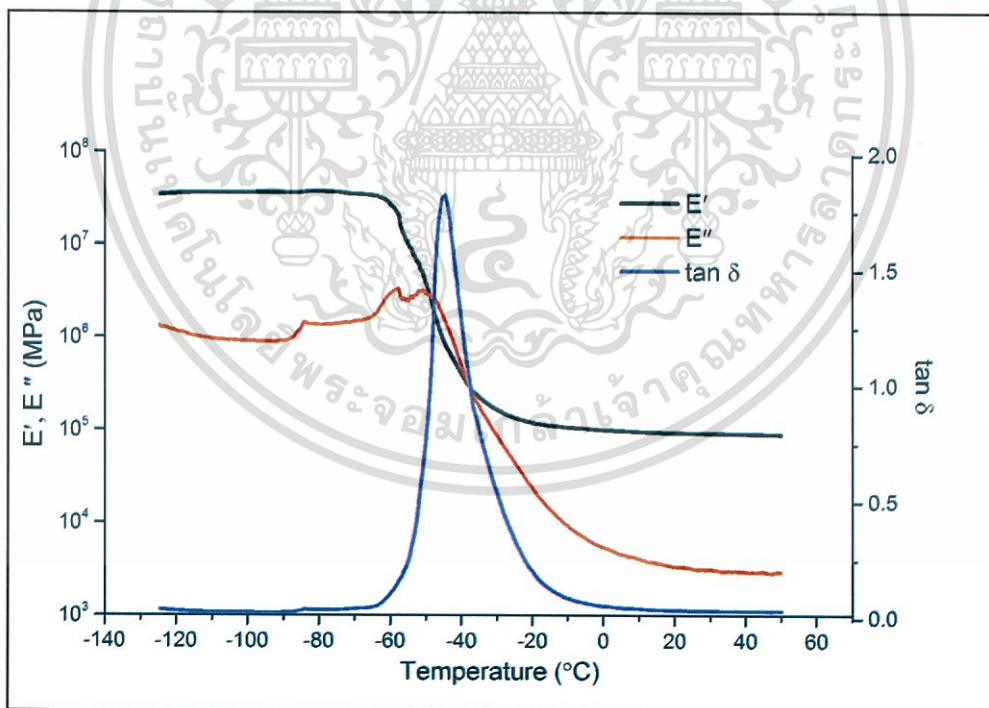


รูปที่ ข-6 BRHA (PEG) 60 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

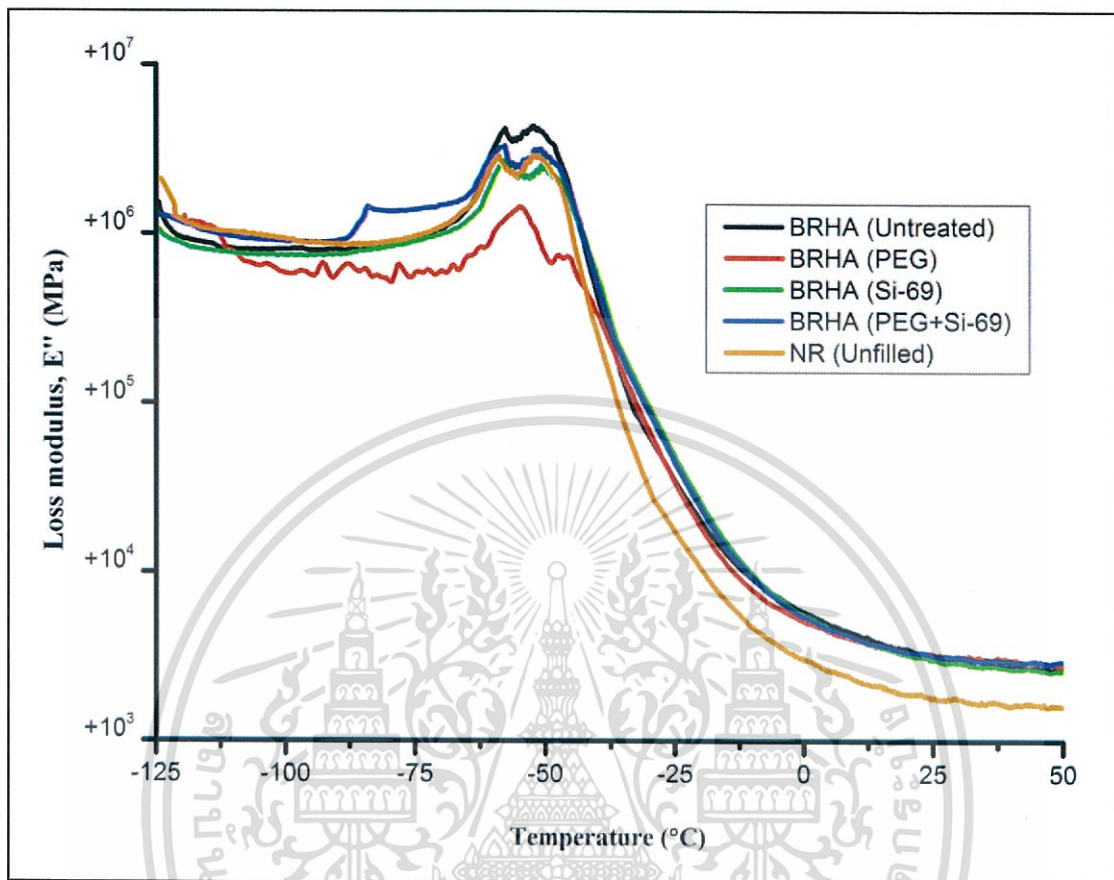


รูปที่ ข-7 BRHA (Si-69) 60 phr



รูปที่ ข-8 BRHA (PEG + Si-69) 60 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-9 เทอร์โมแกรม DMTA (Loss modulus) ของผลการปรับปรุงผิว BRHA ด้วยการใส่ PEG และ/หรือ Si-69 เทียบกับ BRHA ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเป็นสารตัวเติมที่ 60 phr ของยางเชื่อมโยง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล นางสาวรสิมา จันทร์จำปา
วัน เดือน ปีเกิด 30 มิถุนายน 2529
ที่อยู่ 55/294 หมู่ 1 ถนนรามคำแหง แขวงสะพานสูง เขตสะพานสูง
กรุงเทพมหานคร 10240

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2551 วิทยาศาสตร์บัณฑิต
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัย

พ.ศ. 2554 การศึกษาเถ้าแกลบดำ (Black rice husk ash) เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยาง
Study of Black Rice Husk Ash (BRHA) as rubber filler
นำเสนอผลงานในงานการประชุมทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตบางเขน ครั้งที่ 49 ระหว่างวันที่ 1-4 กุมภาพันธ์ 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้