


ผลของแว็กซ์ที่มีต่อการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมชีวภาพ  
สำหรับยางธรรมชาติ

EFFECTS OF WAXES ON BLACK RICE HUSK ASH  
AS BIO-FILLER FOR NATURAL RUBBER



นางสาวกุลธิดา สกุนตนิยม  
นางสาวมัณฑุพร สุนทรรัช  
นางสาวสกุลแก้ว แสนแก้ว

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

ผลของแว็กซ์ที่มีต่อการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมชีวภาพ  
สำหรับยางธรรมชาติ

EFFECTS OF WAXES ON BLACK RICE HUSK ASH  
AS BIO-FILLER FOR NATURAL RUBBER



นางสาวกุลธิดา สกุนตนิยม  
นางสาวมัณฑุพร สุนทรรัช  
นางสาวสกุลแก้ว แสนแก้ว

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

EFFECTS OF WAXES ON BLACK RICE HUSK ASH  
AS BIO-FILLER FOR NATURAL RUBBER



MISS KULTHIDA SAKUNTANIYOM  
MISS MUNCHUPORN SOONTARAT  
MISS SAKUNKAEW SANKAEW

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY

DEPARTMENT OF CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

ผลของแว็กซ์ที่มีต่อการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมชีวภาพ  
สำหรับยางธรรมชาติ

Effects of Waxes on Black Rice Husk Ash as Bio-filler for  
Natural Rubber

ชื่อนักศึกษา

นางสาวกุลธิดา สกุนตนิยม รหัสนักศึกษา 54050133  
นางสาวมัณฑุพร สุนทรรัช รหัสนักศึกษา 54050248  
นางสาวสกุลแก้ว แสนแก้ว รหัสนักศึกษา 54050289

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2557

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(เคมี  
อุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์โนน ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ กรรมการ	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปคัดลอกขึ้นเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	ผลของแว็กซ์ที่มีต่อการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมชีวภาพสำหรับยางธรรมชาติ		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกุลธิดา	สกุณตนิยม	รหัสนักศึกษา 54050133
	นางสาวมัญชุพร	สุนทรรัช	รหัสนักศึกษา 54050248
	นางสาวสกุลแก้ว	แสนแก้ว	รหัสนักศึกษา 54050289
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. อิทธิพล แจ่มชัด		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำ (Black Rice Husk Ash: BRHA) เป็นสารตัวเติมชีวภาพในยางธรรมชาติ (STR-5L NR) โดยทำการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วยแว็กซ์ 2 ชนิด ได้แก่ แว็กซ์พอลิเอทิลีน (Polyethylene Wax: PE Wax) และแว็กซ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีน (Oxidized Polyethylene Wax: OPE Wax) ที่ 3 phr (5 %wt of BRHA) ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG 4000) ที่ 2.4 phr (4 %wt of BRHA) ผลของปริมาณ PE Wax กับ OPE Wax ที่ 1, 2 และ 3 phr (1.67, 3.33 และ 5 %wt of BRHA ตามลำดับ) ผลของขนาดเถ้าแกลบดำ (41.1, 4.96 และ 4.72 ไมครอน) และผลของการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำเปรียบเทียบระหว่าง Si-69 ร่วมกับ PEG 4000 และ OPE wax ร่วมกับ PEG 4000 เตรียมตัวอย่างโดยการผสมยางธรรมชาติ เถ้าแกลบดำ และสารเติมแต่งอื่นๆ ด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จากนั้นทำการหาลักษณะการเชื่อมโยง แล้วนำยางผสมสูตรมาทำการอัดขึ้นรูป เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล ศึกษาการดูดซึมน้ำ และศึกษาสัณฐานวิทยาของยางเชื่อมโยงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากการทดสอบยางผสมสูตรพบว่า การปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วยแว็กซ์ และ PEG 4000 ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยงดีขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้แว็กซ์ทั้ง 2 ชนิดพบว่าสมบัติเชิงกล และสมบัติการดูดซึมน้ำของยางเชื่อมโยงไม่แตกต่างกัน และเมื่อปริมาณของแว็กซ์เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางเชื่อมโยงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกด ค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด และค่ามอดูลัสของยางที่ 100 เปอร์เซนต์ดึงยืด (M100) ของยางเชื่อมโยง เมื่อเถ้าแกลบดำมีขนาดอนุภาคเล็กจะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยงดีขึ้น โดยการใช้สารคู่ควบไซเลน (Si-69) และ PEG 4000 นั้นพบว่า การปรับปรุงผิวด้วย Si-69 และ PEG 4000 ให้สมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยงที่ดีกว่า จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำ ด้วย Si-69 และ PEG 4000 จะทำให้ยางผสมสูตรที่ได้มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่แข็งแรงมากกว่าการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG 4000 และแว็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่า คำสำคัญ : เถ้าแกลบดำ ยางธรรมชาติ แว็กซ์พอลิเอทิลีน แว็กซ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีน ครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Effects of Waxes on Black Rice Husk Ash as Bio-filler for Natural Rubber		
<b>Students</b>	Miss Kultida	Sakuntaniyom	Student ID 54050133
	Miss Munchuporn	Soontarat	Student ID 54050248
	Miss Sakunkaew	Sankaew	Student ID 54050289
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Academic Year</b>	2014		
<b>Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Ittipol Jangchud		

### Abstract

This research was conducted to utilize black rice husk ash (BRHA) as a bio-filler in natural rubber (STR-5L NR). Effect of improving BRHA surfaces by using two types of waxes, i.e., polyethylene wax (PE Wax) and oxidized polyethylene wax (OPE Wax) at level of 3 phr (5 % wt of BRHA) with polyethylene glycol (PEG 4000) at 2.4 phr (4 % wt of BRHA) was investigated. In addition, effects of PE Wax/OPE Wax loading at 1, 2 and 3 phr (1.67, 3.33 and 5 % wt of BRHA, respectively), BRHA sizes (41.1, 4.96 and 4.72 microns) and BRHA surface treatment between using silane coupling agent (Si-69)/PEG 4000 and OPE wax/PEG 4000 were also studied. Samples were prepared by mixing NR, BRHA and other additives with a two-roll mill. Cure characteristics of rubber compounds were characterized. Rubber compounds were vulcanized by compression molding machine for testing mechanical properties, water absorption and morphology of filled rubbers by using scanning electron microscope (SEM). It was found that surface treated BRHA with waxes together with PEG 4000 possessed better mechanical properties of the filled rubbers. Tensile strength and tear strength of filled rubbers were increased. In this work, mechanical properties and water absorption of filled rubbers were no significant difference when using two types of waxes in comparison. When the wax loading was increased, tensile and tear strengths of filled rubbers showed trends to increase. However, hardness, compression set and rubber modulus (M100) of filled rubbers were unchanged. When the particle size of BRHA was decreased, improved mechanical properties of filled rubbers were achieved. Compounds with treated BRHA with Si-69/PEG 4000 showed improved mechanical properties of filled rubbers. In morphological study, it was found BRHA surface treatment with Si-69/PEG 4000 give stronger interphase in compound rubber, as compared with BRHA surface treatment with PEG 4000 and wax.

**Keywords :** Black Rice Husk Ash (BRHA), Natural Rubber (NR), Polyethylene Wax (PE Wax), Oxidized Polyethylene Wax (OPE Wax)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา รวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ ในโครงการพิเศษนี้ และคอยอบรมสั่งสอน ให้การเอาใจใส่เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ และ ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์โนน คณะกรรมการสอบ-โครงการพิเศษ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องบดความเร็วสูงชนิดบอลมิล (High speed ball mill) ในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณบริษัท เอส เค พอลิเมอร์ จำกัด บริษัท เอสซีจี เคมิคอล จำกัด และบริษัท ฮันนี่-เวลล์ อินเตอร์เนชั่นเนล จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์สารเคมีที่ใช้ในโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณโรงไฟฟ้าชีวมวล บริษัท ไบโอ-แมส เพาเวอร์ จำกัด จังหวัดชัยนาท ที่กรุณาอนุเคราะห์ถ่านแกลบดำที่ใช้ในโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณคุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ คุณสุตใจ สอนสะอาด คุณปราณี บุญวัฒน์และ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมี

ขอขอบคุณคุณขวัญใจ พูลสวัสดิ์ คุณเดชธร ฉันทรักษ์ และคุณสุตาพร ศักดิ์ศิธร ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษาและแนะนำในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณบิดา มารดา เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ สำหรับกำลังใจ ความช่วยเหลือ และข้อเสนอแนะต่างๆ และยังมีบุคคลอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่กล่าวมาซึ่งให้ความกรุณาช่วยเหลือทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาวกุลธิดา	สกุณตนิยม
นางสาวมัญชุพร	สุนทรรัช
นางสาวสกุลแก้ว	แสนแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 ยางธรรมชาติ.....	5
2.1.1 รูปแบบของยางธรรมชาติ.....	5
2.1.1.1 น้ำยาง.....	5
2.1.1.2 ยางแห้ง.....	6
2.1.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ.....	7
2.1.3 ผลิตภัณฑ์ยาง.....	9
2.2 การเชื่อมโยงยาง (Rubber vulcanization).....	10
2.3 สารตัวเติมและการเสริมแรงของยาง.....	11
2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสริมแรงของสารตัวเติม.....	12
2.4 ถ้ำกลบ.....	13
2.4.1 การเผาถ้ำกลบ.....	13
2.4.2 ลักษณะทางกายภาพของถ้ำกลบ.....	14
2.5 แร็กซ์ (Wax).....	18
2.5.1 ชนิดของแร็กซ์.....	19
2.5.1.1 แร็กซ์ธรรมชาติ (Natural waxes).....	19
2.5.1.2 แร็กซ์สังเคราะห์ (Synthetic waxes).....	20
2.5.2 ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแร็กซ์ (Oxidized polyethylene wax).....	20
2.6 สารควบไซเลน.....	21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>25</b>
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	25
3.2 สารเคมี.....	26
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	28

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	วิธีการทดลอง .....	29
3.4.1	การเตรียมเส้นใยแก้วด้าย .....	29
3.4.2	การบดละเอียดเส้นใยแก้วด้าย .....	29
3.4.3	การเตรียมเส้นใยแก้วด้ายที่ปรับปรุงด้วยแว็กซ์ .....	29
3.4.4	การเตรียมเส้นใยแก้วด้ายที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเคลือบไซเลน .....	30
3.4.5	การตรวจสอบและวิเคราะห์เส้นใยแก้วด้าย .....	30
3.4.6	การเตรียมยางผสมสูตร .....	30
3.5	การทดสอบยาง .....	31
3.5.1	การหาค่าความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscosity) .....	31
3.5.2	การหาเวลาเชื่อมโยงยางผสมสูตร (Cure time) .....	32
3.5.3	การขึ้นรูปยางเชื่อมโยง .....	33
3.5.4	การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยง .....	34
3.5.4.1	การทดสอบแรงดึง (Tensile test) .....	34
3.5.4.2	การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear test) .....	35
3.5.4.3	การทดสอบความแข็งกด (Hardness test) .....	35
3.5.4.4	การทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) .....	36
3.5.5	การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) .....	37
3.5.6	การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test) .....	37
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	38
4.1	ผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยแก้วด้ายด้วย PE Wax และ OPE Wax ที่ 3 phr และ PEG 4000 ที่ 2.4 phr .....	38
4.1.1	พฤติกรรมเชื่อมโยงยางผสมสูตร .....	39
4.1.2	สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตร .....	41
4.1.3	สมบัติเชิงกลยางผสมสูตร .....	42
4.1.4	สมบัติการดูดซึมน้ำของยางผสมสูตร .....	46
4.2	ผลของปริมาณ PE Wax และ OPE Wax ที่ 1, 2 และ 3 phr .....	47
4.2.1	พฤติกรรมเชื่อมโยงยางผสมสูตร .....	47
4.2.2	สมบัติเชิงกลยางผสมสูตร .....	49
4.3	ผลของขนาดเส้นใยแก้วด้ายที่มีขนาดเล็กกว่า 250 เมช และเส้นใยแก้วด้ายบดละเอียด .....	53
4.3.1	การวิเคราะห์ และสัณฐานวิทยาของเส้นใยแก้วด้าย .....	54
4.3.2	พฤติกรรมเชื่อมโยงยางผสมสูตร .....	57
4.3.3	สมบัติเชิงกลยางผสมสูตร .....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วย OPE Wax กับ PEG 4000 เทียบกับ Si-69 กับ PEG 4000.....	62
4.4.1 พฤติกรรมเชื่อมโยงอย่างผสมสูตร.....	62
4.4.2 สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตร.....	63
4.4.3 สมบัติเชิงกลยางผสมสูตร.....	64
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>67</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
เอกสารอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	73
ภาคผนวก ข ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแก้วเคลือบดำ.....	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ .....	17
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ .....	17
3.1 สมบัติบางประการของ PE Wax.....	26
3.2 สมบัติบางประการของ OPE Wax.....	27
3.3 สมบัติบางประการของ PEG 4000.....	27
3.4 สมบัติบางประการของ Si-69 .....	28
3.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ .....	31
4.1 อักษรย่อที่ใช้ในโครงการพิเศษ .....	39
4.2 ผลของพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรและความหนืดมูนนี้เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิว เถ้าแกลบดำด้วยแร็กซ์ 2 ชนิด และ/หรือ PEG 4000 เทียบกับไม่ปรับปรุงพื้นผิว.....	40
4.3 ก.ผลของปริมาณ PE Wax ที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร และ ค่าความหนืดมูนนี้ .....	49
4.3 ข.ผลของปริมาณ OPE Wax ที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรและ ค่าความหนืดมูนนี้ .....	49
4.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำ.....	55
4.5 ผลของขนาดเถ้าแกลบดำที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของยางผสมสูตรและค่าความหนืดมูนนี้.....	57
4.6 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วย OPE Wax เทียบกับ Si-69 ที่มีต่อพฤติกรรม การเชื่อมโยงของยางผสมสูตร และค่าความหนืดมูนนี้ .....	63
4.7 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร .....	66
ก-1 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และมอดุลัสของยางที่ 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (M100 และ M300).....	73
ก-2 ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ความแข็งกด (Hardness) และการเสียรูปถาวร หลังการกดอัด (Compression set).....	74
ข-1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด 1 ชั่วโมง .....	75
ข-2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด 3 ชั่วโมง .....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ.....	5
2.2 ก. โครงสร้างของยางก่อนเชื่อมโยง และ ข. โครงสร้างของยางหลังเชื่อมโยง.....	10
2.3 ความถ่วงจำเพาะของเก้า้แลกเปลี่ยนกับอุณหภูมิในการเผา.....	14
2.4 พื้นที่ผิวเก้า้แลกเปลี่ยนและเวลาการบด.....	15
2.5 ผลของขนาดอนุภาคเก้า้แลกเปลี่ยนที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรโดยเก้า้แลกเปลี่ยน ที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติม.....	16
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของแวกซ์พอลิเอทิลีนกับสมบัติทางกายภาพ.....	20
2.7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ Si-69.....	22
3.1 เครื่องแยกขนาด.....	29
3.2 เครื่องวัดความเร็วสูงชนิดบอลมิล.....	29
3.3 เครื่องวัดความหนืดหมุนนี้.....	32
3.4 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้งานหมุน.....	32
3.5 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางผสมสูตรแสดงเวลาเชื่อมโยง ( $t_{c90}$ ) และเวลาเริ่ม เชื่อมโยงยาง ( $t_{s2}$ ).....	33
3.6 ลักษณะขั้นตอนทดสอบการเสีรูปถาวรหลังการกดอัด.....	34
3.7 เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์.....	34
3.8 ตัวอย่างกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress – Strain curve) ของการดึงตัวอย่าง.....	35
3.9 เครื่องวัดความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์.....	36
3.10 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการเสีรูปถาวรหลังการกดอัด.....	36
4.1 พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเก้า้แลกเปลี่ยนด้วย แวกซ์ 2 ชนิด และ/หรือ PEG 4000 เทียบกับไม่ปรับปรุงพื้นผิว.....	40
4.2 สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตร ภาพซ้ายที่กำลังขยาย 1,000 เท่า และภาพขวาที่กำลังขยาย 5,000 เท่า; (ก) NR+BRHA (ข) NR+BRHA, PE3+P และ (ค) NR+BRHA, OPE3+P.....	41
4.3 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเก้า้แลกเปลี่ยนด้วยแวกซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของ ยางผสมสูตร.....	43
4.4 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเก้า้แลกเปลี่ยนด้วยแวกซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร.....	43
4.5 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเก้า้แลกเปลี่ยนด้วยแวกซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่าความแข็งแรงฉีกขาด ของยางผสมสูตร.....	44
4.6 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเก้า้แลกเปลี่ยนด้วยแวกซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่ามอดูลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยึดของยางผสมสูตร.....	44
4.7 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเก้า้แลกเปลี่ยนด้วยแวกซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่ามอดูลัสของยางที่ 300 เปอร์เซ็นต์ดึงยึดของยางผสมสูตร.....	45
4.8 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเก้า้แลกเปลี่ยนด้วยแวกซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่าความแข็งกดของ ยางผสมสูตร.....	45

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเก้าอี้เคลือบดำด้วยแว็กซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่าการเสีรูปถาวร- หลังการกวดอัดของยางผสมสูตร .....	46
4.10 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเก้าอี้เคลือบดำด้วยแว็กซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่าการดูดซึมน้ำของ ยางผสมสูตร .....	47
4.11 ก. ผลของปริมาณ PE Wax ที่มีต่อพฤติกรรมเกาะของยางผสมสูตร และ ข. ผลของปริมาณ OPE Wax ที่มีต่อพฤติกรรมเกาะของยางผสมสูตร .....	48
4.12 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเก้าอี้เคลือบดำด้วย PE Wax และ OPE Wax.....	50
4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์ดึงยึด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเก้าอี้เคลือบดำ ด้วย PE Wax และ OPE Wax.....	50
4.14 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเก้าอี้เคลือบดำด้วย PE Wax และ OPE Wax.....	51
4.15 ค่ามอดูลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยึดของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิว เก้าอี้เคลือบดำด้วย PE Wax และ OPE Wax.....	51
4.16 ค่ามอดูลัสของยางที่ 300 เปอร์เซ็นต์ดึงยึดของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิว เก้าอี้เคลือบดำด้วย PE Wax และ OPE Wax.....	52
4.17 ค่าความแข็งแรงกดของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเก้าอี้เคลือบดำด้วย PE Wax และ OPE Wax.....	52
4.18 ค่าการเสีรูปถาวรหลังการกวดอัดของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเก้าอี้เคลือบดำ ด้วย PE Wax และ OPE Wax.....	53
4.19 สัณฐานวิทยาของเก้าอี้เคลือบดำบดละเอียดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง .....	54
4.20 สัณฐานวิทยาของเก้าอี้เคลือบดำบดละเอียดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง .....	55
4.21 สัณฐานวิทยาของเก้าอี้เคลือบดำ ภาพซ้ายที่กำลังขยาย 500 เท่า และภาพขวาที่กำลังขยาย 5,000 เท่า; (ก) BRHA (ข) BRHA-G1 และ (ค) BRHA-G3 .....	56
4.22 ผลของขนาดเก้าอี้เคลือบดำที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของยางผสมสูตรเมื่อใช้ OPE Wax ปริมาณ 3 phr .....	57
4.23 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรเมื่อใช้เก้าอี้เคลือบดำที่มีขนาดแตกต่างกัน.....	59
4.24 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรเมื่อใช้เก้าอี้เคลือบดำที่มีขนาดแตกต่างกัน ...	59
4.25 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรเมื่อใช้เก้าอี้เคลือบดำที่มีขนาดแตกต่างกัน .....	60
4.26 ค่ามอดูลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยึดของยางผสมสูตรเมื่อใช้เก้าอี้เคลือบดำที่มีขนาด แตกต่างกัน .....	60
4.27 ค่ามอดูลัสของยางที่ 300 เปอร์เซ็นต์ดึงยึดของยางผสมสูตรเมื่อใช้เก้าอี้เคลือบดำที่มีขนาด แตกต่างกัน .....	61
4.28 ค่าความแข็งแรงกดของยางผสมสูตรเมื่อใช้เก้าอี้เคลือบดำที่มีขนาดแตกต่างกัน .....	61
4.29 ค่าการเสีรูปถาวรหลังการกวดอัดของยางผสมสูตรเมื่อใช้เก้าอี้เคลือบดำที่มีขนาด แตกต่างกัน .....	62

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วย OPE Wax เทียบกับ Si-69 ที่มีต่อพฤติกรรม การเชื่อมโยงของยางผสมสูตร.....	63
4.31 สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรที่กำลังขยาย 1,000 เท่า; (ก) NR+BRHA-G3, OPE3+P และ (ข) NR+BRHA-G3, Si-69+P .....	64
4.32 ภาพแสดงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวแก้วเคลือบดำ, OPE Wax และยางธรรมชาติ.....	65
4.33 ภาพแสดงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวแก้วเคลือบดำ, Si-69 และยางธรรมชาติ .....	65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ยางพารา (Natural Rubber: NR) จัดเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งมีปริมาณการผลิต และส่งออกมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก การนำยางพารามาใช้ประโยชน์นั้นจะต้องผ่านกระบวนการแปรรูปยางพาราก่อนโดยการทำเป็นยางแผ่น ยางก้อน หรือน้ำยางพาราที่มีการปรับปรุงสมบัติ เช่น การสกัดสารบางชนิดออก ได้แก่ โปรตีน เป็นต้น เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของยางให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และง่ายต่อกระบวนการผลิต

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีสมบัติเชิงกลดี มีความยืดหยุ่น (Elastic) สูง มีความเหนียว (Toughness) มีความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) สูง และสามารถยึดติดกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ และสิ่งทอได้ดี จึงสามารถนำไปใช้งานทางวิศวกรรมได้หลากหลายมากขึ้น เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามยางดิบจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ กล่าวคือ ยางจะอ่อนตัว และเหนียวติดเมื่ออุณหภูมิสูง แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจึงจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent) สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerator) สารกระตุ้น (Activator) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการเติมสารตัวเติม (Filler) เพื่อลดต้นทุนการผลิต ซึ่งสารตัวเติมที่ใช้ในปัจจุบันนี้มีอยู่หลายชนิด ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) และดินขาว (China clay) โดยสารตัวเติมที่นิยมใช้กันมากที่สุด ในอุตสาหกรรมยางคือ เขม่าดำ ซึ่งนอกจากจะช่วยในการลดต้นทุนการผลิตแล้ว เขม่าดำยังเป็น สารตัวเติมประเภทเสริมแรง (Reinforcing filler) ให้กับยาง มีราคาถูก และสามารถผสมให้เข้ากับยางได้ง่าย เนื่องจากเขม่าดำได้จากการเผาไหม้ น้ำมันปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติ ซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด จึงได้มีการศึกษาวัสดุทดแทนที่สามารถนำมาใช้เป็น สารตัวเติมในยาง จากการศึกษาพบว่าเถ้าแกลบ (Rice husk ash) มีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกา และซิลิกาเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงในยาง แต่เนื่องจากซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) อยู่ที่พื้นผิว ในปริมาณมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลเหล่านี้ค่อนข้างว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี และมีความเป็นขั้วค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีความเป็นขั้วสูง ด้วยเหตุนี้การผสมซิลิกาให้เข้ากับยางชนิดที่ไม่มีขั้วจึงทำได้ยาก ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบ (Coupling agent) สารคู่ควบที่นิยมใช้คือ Bis-(3-(trioxysilyl)-propyl)-tetrasulfide หรือ Si-69 โดยบริเวณหมู่อัลคอกซี (Alkoxy) ที่อยู่ปลายด้านหนึ่งของโมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของซิลิกา เกิดเป็นพันธะซิลอกเซน (Siloxane) ที่มีความเสถียร ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลลดลง อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาจึงลดลง ส่งผลให้การเข้ากันระหว่างยางชนิดไม่มีขั้ว และซิลิกาสูงขึ้น

ประเทศไทยมีพื้นฐานเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งมีปริมาณชีวมวล (Biomass) ที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรค่อนข้างมาก การใช้ชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรเหล่านี้มาใช้ในการผลิตไฟฟ้า จึงเป็นทางเลือกที่มีความเป็นไปได้สูง ชีวมวลที่เกิดขึ้นจากพืชเศรษฐกิจจะถูกแบ่งตามลักษณะแหล่งกำเนิดและการรวบรวม ดังนี้ [1]

1. **ชีวมวลประเภทกระจายตัว** คือชีวมวลที่ยังคงอยู่ที่พื้นที่เพาะปลูกเมื่อเกิดกระบวนการเก็บเกี่ยว และกระบวนการผลิต ได้แก่ ฟางข้าว ยอดและใบอ้อย ลำต้นข้าวโพด ลำต้นมันสำปะหลัง ก้าน และใบปาล์ม

2. **ชีวมวลประเภทกระจุกตัว** คือชีวมวลที่ถูกรวบรวมจากพื้นที่เพาะปลูกมายังโรงงาน ได้แก่ แกลบ ชานอ้อย ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง ทะลายปาล์มเปล้า ใบปาล์ม และกะลาปาล์ม โดยชีวมวลประเภทนี้สามารถนำไปใช้งานได้ง่ายกว่า เนื่องจากถูกรวบรวมโดยกระบวนการผลิตซึ่งชีวมวลประเภทกระจุกตัวที่มีศักยภาพสูงสุดคือ แกลบ และชานอ้อย ตามลำดับ

แกลบ (Rice husk) ถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่ดีที่สุดในบรรดาชีวมวลทั้งหมด เพราะมีความชื้นต่ำ ไม่ต้องผ่านเครื่องย่อยก่อนนำไปเผาไหม้ ประกอบกับมีสัดส่วนซีเถ้ามากกว่าชีวมวลชนิดอื่น ดังนั้นจึงนิยมใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า โดยจากกระบวนการเผาแกลบจะทำให้เกิดของเสียเป็นเถ้าแกลบ โดยจะได้เถ้าแกลบประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักของแกลบ กระบวนการผลิตจะมีเถ้าแกลบค่าประมาณ 10 ตันต่อวัน หรือประมาณ 3,600 ตันต่อปี ดังนั้นจะมีเถ้าแกลบเกิดขึ้นปริมาณมาก ซึ่งกลายเป็นปัญหาสำคัญในโรงไฟฟ้าที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ยากต่อการกำจัด และมีมูลค่าต่ำ

เถ้าแกลบเป็นส่วนของเปลือกข้าวที่ถูกเผาไหม้ มีลักษณะสำคัญคือ มีสารประกอบซิลิกาเป็นสารประกอบหลักอยู่ร้อยละ 95 มีความพรุน (Porosity) มาก น้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวมาก มีสมบัติดูดซับความชื้น และสารเคมีได้ดี และมีราคาถูก เถ้าแกลบเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ของแกลบ มีลักษณะหลายสีขึ้นอยู่กับกระบวนการ และสภาวะในการเผา ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ [2]

1. **เถ้าแกลบขาว (White Rice Husk Ash: WRHA)** เป็นเถ้าแกลบที่มีลักษณะสีขาว เป็นแกลบที่ได้จากการเผาอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูง ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่มีเกินพอทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ นอกจากการเผาที่อุณหภูมิสูงแล้วยังสามารถเผาได้จากแกลบดำที่อุณหภูมิต่ำอย่างต่อเนื่องได้อีกวิธี แกลบชนิดนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากในอุตสาหกรรมเนื่องจากองค์ประกอบส่วนมากเป็นซิลิกา

2. **เถ้าแกลบดำ (Black Rice Husk Ash: BRHA)** เป็นเถ้าแกลบที่มีลักษณะสีดำ เนื้อเถ้ามีการคงรูปของแกลบบางส่วน เนื้อแกลบแข็ง และเปราะง่ายกว่าแกลบสีขาว แต่จะแตกละเอียดหากได้รับแรงกดบีบ เป็นแกลบที่ได้จากการเผาอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิไม่เกิน 1,200 °C ในสภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำมาเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติเพื่อนำเถ้าแกลบที่เหลือใช้เหล่านี้มาใช้งานให้เกิดประโยชน์เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าแกลบดำ และช่วยลดปัญหาของเสียที่เกิดจากเถ้าแกลบดำได้อีกด้วย

การใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ความเข้ากันได้ระหว่างเถ้าแกลบดำกับยางธรรมชาตินั้นไม่ดีนักเนื่องจากเถ้าแกลบดำ และยางธรรมชาติมีสภาพขั้วต่างกัน จึงทำการปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าแกลบดำโดยการนำแว็กซ์มาใช้ในการเคลือบที่พื้นผิวเพื่อเพิ่มปรับปรุงสมบัติ ความเข้ากันได้ และช่วยให้เถ้าแกลบดำกระจายตัวได้ดีขึ้น โดยแว็กซ์ที่ใช้มี 2 ชนิด คือ

1. **แว็กซ์พอลิเอทิลีน (Polyethylene Wax: PE Wax)** เป็นแว็กซ์สังเคราะห์ มีมวลโมเลกุลต่ำ (500-4,000) ที่สังเคราะห์ได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผ่านกระบวนการแตกตัวทางความร้อน (Thermal cracking / Pyrolysis) โดยลักษณะเฉพาะคือ มีจุดหลอมเหลวสูง มีความแข็งที่ดี และมีช่วงความหนืดที่กว้าง ในอุตสาหกรรมยาง

แว็กซ์พอลิเอทิลีนถูกนำไปใช้เป็นสารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aid) และสารป้องกัน-ไอโซน (Antiozonant) ช่วยให้สารตัวเติม และสารเติมแต่งต่างๆ กระจายตัวได้ดีขึ้น

2. **แว็กซ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีน (Oxidized Polyethylene Wax: OPE Wax)** เป็นแว็กซ์สังเคราะห์ เกิดจากการนำ PE Wax มาปรับปรุงให้มีชั้นผิวมากขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) กับอากาศ หรือทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ที่อุณหภูมิสูง และทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) หรือเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ที่หมู่คาร์บอกซีในสายโซ่โมเลกุล ลักษณะของ OPE Wax คือมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง แข็ง และมีจุดหลอมเหลวสูง นอกจากนี้ยังมีหมู่คาร์บอกซิล และไฮดรอกซิลอยู่ในโครงสร้าง ทำให้มีสภาพผิวสูงกว่า PE Wax สามารถเป็นได้ทั้งสารหล่อลื่นภายใน และสารหล่อลื่นภายนอก นิยมใช้เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต และสารป้องกันไอโซนในยาง

นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมยางยังนิยมใช้สารคู่ควบไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้กับยางที่มีสภาพผิวแตกต่างจากสารตัวเติมนั้นๆ ทำให้สมบัติต่างๆ ของยางดียิ่งขึ้น

งานวิจัยที่ผ่านมาของรสิมา จันท์จำปา [3] ได้ศึกษาการนำเถ้าแกลบดำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของยาง ได้แก่ ผลของปริมาณสารตัวเติม การเคลือบผิวเถ้าแกลบดำด้วย Si-69 พอลิเอทิลีนไกลคอล 400 (PEG 400) และผลของขนาดอนุภาค พบว่าเมื่อใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมจะแสดงสมบัติเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง เนื่องจากเถ้าแกลบดำมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาทำให้พื้นผิวของเถ้าแกลบดำมีความเป็นขั้วค่อนข้างสูงจึงทำให้เถ้าแกลบดำเข้ากับยางธรรมชาติได้ไม่ตึง นอกจากนั้นเถ้าแกลบดำยังมีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่ ทำให้เสริมแรงได้ไม่ดี เดชาธร ฉันทริกซ์ [4] ศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ (NBR) โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่ส่งผลต่อสมบัติของยาง ได้แก่ ผลของการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย Si-69 และพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 (PEG 4000) ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำ ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำ โดยทำการเปรียบเทียบการใช้เถ้าแกลบดำกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้า เถ้าแกลบดำจัดเป็นสารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง โดยสามารถลดต้นทุน และปรับปรุงสมบัติบางประการของยางไนไตรล์ได้

ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่อง ซึ่งนำเถ้าแกลบดำจากโรงไฟฟ้าชีวมวล จังหวัดชัยนาท มาเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยทำการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าแกลบดำด้วยแว็กซ์ 2 ชนิด ได้แก่ PE Wax และ OPE Wax เปรียบเทียบกับเถ้าแกลบดำที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิว และเถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Si-69 นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลของปริมาณ PE Wax และ OPE Wax และผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อการเสริมแรง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อศึกษาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมสำหรับยางธรรมชาติโดยการปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าแกลบดำด้วยแว็กซ์ เน้นศึกษาผลของชนิดของแว็กซ์ ปริมาณแว็กซ์ และผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางผสมสูตรที่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการวิเคราะห์เถ้าแกลบดำ
2. ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG 4000, Si-69 และ PE Wax กับ OPE Wax เปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิว
3. ศึกษาผลของปริมาณ PE Wax และ OPE Wax
4. ศึกษาผลของขนาดเถ้าแกลบดำ ที่ขนาดเล็กกว่า 250 เมช และเถ้าแกลบดำบดละเอียด
5. ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของยางที่เตรียมได้ ดังนี้
  - ค่าความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscosity)
  - ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ได้แก่ เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time:  $t_{s2}$ ) เวลาเชื่อมโยง (Cure time:  $t_{c90}$ ) และอัตราเร็วในการเชื่อมโยง (Cure Rate Index: CRI)
  - สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) โมดูลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และ 300 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (Rubber modulus: M100 และ M300) ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ความแข็งกด (Hardness) และการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set)
  - สันฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
  - การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

1. เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาเกี่ยวกับ PE Wax และ OPE Wax ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่นำสารเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรมหรือชีวมวล เช่น เถ้าแกลบดำมาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อลดต้นทุนในอุตสาหกรรมยาง และพลาสติกอย่างมีประสิทธิภาพ
2. เป็นการเพิ่มมูลค่า และพัฒนาการใช้ประโยชน์จากเถ้าแกลบดำ ช่วยลดปริมาณของขยะเถ้าแกลบดำ และลดปัญหามลพิษที่เกิดจากขยะเถ้าแกลบดำ
3. เป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนาความรู้เกี่ยวกับผลของขนาดของสารตัวเติม และผลของแวกซ์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติ

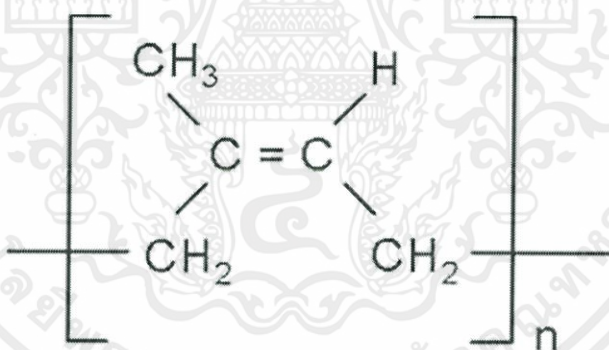
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ หรือยางพารา ส่วนมากได้จากต้นยางพาราสายพันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียนซิส (*Hevea Braziliensis*) น้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น และมีเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content: DRC) ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) แขนงลอยอยู่ในน้ำ ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (Cis-1,4-polyisoprene) เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยคาร์บอน และไฮโดรเจน ทำให้มีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมัน แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ใน 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแบบเส้นตรง ใน 1 หน่วย ไอโซพรีนจะมีพันธะคู่ และหมู่อัลฟาเมทิลีนที่เร่งให้เกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และทำให้ยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจน และโอโซน ดังนั้นการออกสูตรยาง จำเป็นจะต้องมีสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน และสารป้องกันโอโซนร่วมด้วย ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ  $0.93 \text{ g/cm}^3$  และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature: Tg) ประมาณ  $-72 \text{ }^\circ\text{C}$  ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูป โดยตรงจะต้องมีการบดยาง (Mastication) ก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิต



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ [5]

#### 2.1.1 รูปแบบของยางธรรมชาติ [6]

##### 2.1.1.1 น้ำยาง

เนื่องจากน้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นยางมีปริมาณน้ำมากเกินไป ไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ และยังสิ้นเปลืองค่าขนส่ง ดังนั้นจึงต้องนำน้ำยางไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) เพื่อลดปริมาณน้ำในน้ำยางสด จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นจาก 30 เปอร์เซ็นต์เป็น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เรียกว่าน้ำยางที่ได้เรียกว่า น้ำยางข้น (Concentrated latex) แต่เนื่องจากในน้ำยางมีสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น โปรตีน และฟอสโฟไลปิด (Phospholipid) ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถถูกย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ หรือเชื้อแบคทีเรียได้ก๊าซชนิดต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน หรือสารประกอบที่มีไนโตรเจน

เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นน้ำยางจึงสามารถบดเน่าได้ จึงต้องมีการเติมสารแอมโมเนียลงไป หรืออาจใช้แอมโมเนียร่วมกับสารอื่นเพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางชั้นให้เก็บได้นาน

### 2.1.1.2 ยางแห้ง

ยางแห้งได้จากการนำน้ำยางสดที่กรีตได้มาเติมกรด (นิยมใช้กรดฟอร์มิก) เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวออกจากน้ำ จากนั้นไล่ความชื้นออกจากเนื้อยางเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา ยางแห้งมีหลายรูปแบบ ได้แก่

- **ยางแผ่น (Rubber sheet)** ได้จากการนำน้ำยางสดมาใส่ตะกง จากนั้นเติมน้ำเพื่อเจือจางน้ำยางให้มีปริมาณเนื้อยางแห้งเหลือประมาณ 12-18 เปอร์เซ็นต์ ก่อนทำการเติมกรดเพื่อให้ยางจับตัวกัน และแยกตัวออกจากน้ำ โดยทั่วไปอนุภาคของน้ำยางจะเริ่มจับตัวกันหลังจากที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 5.1-4.8 หลังจากนั้นน้ำยางที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้งนำไปล้างน้ำแล้วจึงทำให้ยางแห้ง ซึ่งการทำให้ยางแห้งอาจทำได้ 2 วิธีคือ

1) นำไปตากแดด หรือผึ่งให้แห้งในอากาศร้อนเพื่อไล่ความชื้น ยางที่ได้เรียกว่า ยางแผ่นไม่รมควัน (Air Dried Sheet: ADS)

2) นำไปรมควันที่อุณหภูมิ 60-70 °C เป็นเวลาประมาณ 2-3 วัน ซึ่งยางที่ได้เรียกว่า ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet: RSS)

การจัดชั้นยางแผ่นรมควัน [7] ใช้วิธีการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual grading) โดยพิจารณาจากการขึ้นรา การรมควัน ฟองอากาศ สิ่งสกปรก และสิ่งแปลกปลอมต่างๆ สามารถแบ่งยางแผ่นรมควันได้ดังนี้

- **ยางแผ่นรมควันชั้น 1 พิเศษ (RSS1X):** ต้องเป็นยางแผ่นใสที่มีคุณภาพดี และมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น สะอาด และแห้งสนิท ไม่มีรอยตำหนิ จุดดำดำ หรือรอยเปื้อน ไม่มีเม็ดทราย หรือสิ่งสกปรก ไม่มีราสนิม หรือราแดงบนผิวของยางแผ่น ยางแผ่นต้องไม่รมควันมากเกินไปจนมีสีคล้ำ และไม่เหนียวตรงจุดใดจุดหนึ่ง สำหรับแผ่นยางที่ใช้ห่อตรงผิวนอกของก้อนยางอาจมีฟองอากาศเล็กๆ ขนาดเท่าหัวเข็มหมุดกระจายอยู่เล็กน้อยได้

- **ยางแผ่นรมควันชั้น 1 (RSS1):** แผ่นยางต้องแห้ง และสะอาด ไม่มีเม็ดทราย หรือสิ่งเจือปนบนแผ่นยาง ไม่มีราสนิมขึ้นบนยางแผ่น ยางอาจรมควันไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยได้ แต่ต้องไม่มีสีคล้ำจนเกินไป และไม่เหนียวตรงจุดใดจุดหนึ่ง บนผิวยางแผ่นที่ใช้ห่อก้อนยาง หรือตรงผิวก่อนของยางที่อยู่ติดกับยางที่ใช้ห่ออาจมีราแห้งปะปนอยู่ยางแผ่นรมควันปริมาณเล็กน้อย มีฟองอากาศเล็กๆ ขนาดเท่าหัวเข็มหมุดกระจายอยู่เล็กน้อยได้

- **ยางแผ่นรมควันชั้น 2 (RSS2):** แผ่นยางต้องแห้ง และสะอาด ไม่มีตำหนิจากรอยเปื้อน หรือฟอง ไม่มีเม็ดทราย หรือสิ่งเจือปนบนแผ่นยาง อาจมีฟองอากาศ สีของยางแผ่นรมควันอาจไม่สม่ำเสมอได้ บนผิวยางแผ่นที่ใช้ห่อก้อนยาง หรือตรงผิวก่อนของยางที่อยู่ติดกับยางที่ใช้ห่ออาจมีราสนิม หรือราแห้งปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อย แต่ไม่เกินร้อยละ 5 ของตัวอย่างที่ตรวจ สีของยางแผ่นรมควันอาจไม่สม่ำเสมอได้

- **ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (RSS3):** แผ่นยางต้องแห้ง สีอาจไม่ใส มีฟองอากาศเล็กๆ มีเศษผงสิ่งสกปรก หรือเศษเปลือกต้นยางปะปนได้เล็กน้อย แต่ต้องไม่มีรอยฟอง ไม่มีเม็ดทราย หรือสิ่งสกปรก ขณะห่อก้อนยางบนยางแผ่นที่ใช้ห่อ หรือภายในยางแผ่นอาจมีราสนิม ราแห้ง หรือราแดงขึ้นได้เล็กน้อย แต่ไม่เกินร้อยละ 10 ของตัวอย่างที่ตรวจ ไม่มีจุดรมควันที่ไม่แห้ง หรือจุดเหนียวบนยางแผ่น ยางอาจมีสีคล้ำบ้าง แต่สีต้องไม่ที่บจนดำ

- ยางแผ่นรมควันชั้น 4 (RSS4): ยางแผ่นต้องแห้ง มีฟองอากาศ เศษผงสิ่งสกปรก หรือเศษเปลือกต้น-ยางขนาดกลางปะปนอยู่บนยางแผ่นบ้าง มีรอยเปื้อนจางๆ เหนียวเล็กน้อย บนยางแผ่นที่ใช้ห่อ หรือภายในยางแผ่นอาจมีราสนิม ราแห้ง หรือราแดงขึ้นได้เล็กน้อย แต่ไม่เกินร้อยละ 20 ของตัวอย่างที่ตรวจ ไม่มีตำหนิจากรอยพอง ไม่มีเม็ดทราย หรือสิ่งสกปรกอื่นปน ยางแผ่นอาจมีสีคล้ำได้ แต่สีต้องไม่ทึบจนดำแบบถูกไฟไหม้

- ยางแผ่นรมควันชั้น 5 (RSS5): ยางแผ่นต้องแห้ง มีฟองอากาศ เศษผงสิ่งสกปรก หรือเศษเปลือกต้นยางค่อนข้างใหญ่ มีรอยพองเล็กๆ รอยเปื้อนสีคล้ำบนยางแผ่นที่ใช้ห่อ หรือภายในยางแผ่นอาจมีราสนิม ราแห้ง หรือราแดงขึ้นได้เล็กน้อย แต่ไม่เกินร้อยละ 30 ของตัวอย่างที่ตรวจ แผ่นยางต้องไม่พองมาก และไม่เหนียวจนเกินไป นอกจากสิ่งปะปนที่กล่าวมาแล้ว ยางแผ่นต้องไม่มีเม็ดทราย หรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ยางแผ่นอาจมีสีคล้ำได้ แต่ต้องไม่ทึบจนไหม้ดำ

- ยางเครพ (Crepe rubber) ได้จากการนำเศษยางไปรีดในเครื่องเครพ (Creping machine) พร้อมทั้งใช้น้ำทำความสะอาดสิ่งสกปรกต่างๆ ออกจากยางระหว่างการรีด จากนั้นนำไปผึ่งลมให้แห้ง ยางเครพมีสีค่อนข้างเข้ม และมีความบริสุทธิ์แตกต่างกันมาก ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิต

- ยางแห้ง (Technically classified rubber) เป็นยางที่มีคุณภาพสม่ำเสมอมากกว่ายางแผ่น และยางเครพ ผ่านการทดสอบ และจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ การจัดชั้นของยางแห้งจะพิจารณาจากปริมาณสิ่งสกปรกเป็นสำคัญ

- ยางแห้งรูปอื่นๆ ยางธรรมชาติสามารถผลิตให้อยู่ในรูปแบบอื่น เช่น ยางเกรดที่มีความหนืดคงที่ หรือยาง CV (Constant Viscosity) ยางผสมน้ำมัน (Oil Extended Natural Rubber: OENR)

### 2.1.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ [6]

- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูง จึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถแตกหักได้ง่ายเมื่อถูกยืด โดยผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง และการเติมสารตัวเติมชนิดเสริมแรงลงไปในยางจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรงในยางเช่นกัน

- ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติที่เชื่อมโยงแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง กล่าวคือเมื่อมีแรงกระทำภายนอก ยางจะกลับสู่รูปร่างเดิมหรือใกล้เคียงอย่างรวดเร็ว

- ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติในสถานะที่ยังไม่มีการเชื่อมโยงจะมีสมบัติความเหนียวติด ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บางประเภท เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

- ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (Tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติสามารถแตกหักได้เมื่อถูกดึงยืด ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีความแข็งแรงต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมลงไปจะช่วยทำให้ค่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

- ความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความทนทานต่อการขัดถูสูง แต่ด้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ พบว่ายางธรรมชาติมีค่าความต้านทานการขัดถูอยู่ในกลุ่มสูงมาก

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

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

- **ความทนทานต่อของเหลว และสารเคมี (Liquid and chemical resistance)** เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูป เนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของสาร ยางคงรูปจะเกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น อย่างไรก็ตามการบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ด้วยเหตุนี้ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม หรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังทนต่อกรด และด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริก และกรดกำมะถันเข้มข้น

- **การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging properties)** เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยืด และได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง ด้วยเหตุนี้ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Anti-degradants) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

- **การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility)** ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่น หรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งยางที่มีสมบัตินี้ดีกว่ายางธรรมชาติมีเพียง 2 ชนิดคือ ยางบิวทาไดอีน (BR) และยางซิลิโคน (Q)

- **Compression set** ยางธรรมชาติมีค่า Compression set ค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามค่า Compression set ที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่า Compression set ที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งส่งผลทำให้สมบัติ Compression set ด้อยลง

- **การกระด้างกระดอน (Rebound resilience)** ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูง (สูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ทั้งหมด ยกเว้นยาง BR) และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย (มี Hysteresis ต่ำ) ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงก็อาจทำให้ยางเกิดการระเบิดง่าย

- **อุณหภูมิของการทำงาน (Service temperature)** ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิตั้งแต่  $-55^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $70^{\circ}\text{C}$  อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้น และสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆ จะด้อยลงเนื่องจากความร้อนทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในบางกรณีที่มีการออกสูตรผสมเคมีอย่างได้อย่างเหมาะสม (ต้องมีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไป) ยางธรรมชาติอาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง  $90^{\circ}\text{C}$  หรืออาจสูงถึง  $100^{\circ}\text{C}$  (ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วงๆ เท่านั้น)

### 2.1.3 ผลิตภัณฑ์ยาง [8]

ผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ได้แก่

(1) ผลิตภัณฑ์ยางล้อยานยนต์ อุตสาหกรรมยางยานพาหนะของประเทศไทย ประกอบด้วย อุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมยางล้อเครื่องบิน ยางล้อรถยนต์ ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อรถใช้ในอุตสาหกรรม ยางล้อรถใช้ในเกษตร ยางล้อรถจักรยานยนต์ และรถจักรยาน เมื่อแบ่งตามโครงสร้างของยาง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทยางเรเดียล (Radial tire) และยางผ้าใบ (Bias tire)

(2) กลุ่มผลิตภัณฑ์ยางใช้ในงานวิศวกรรม หรือใช้ในงานอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในงานวิศวกรรม หรือใช้ในงานอุตสาหกรรมที่สำคัญคือ ท่อยาง หมายถึง สายท่อยาง ท่อดูด ท่อส่ง และข้อต่อ เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในงานก่อสร้าง และงานส่งลำเลียงของเหลวผ่านท่อ ใช้สำหรับติดตั้งเป็นท่อส่งน้ำ สูบน้ำ ระบายน้ำทิ้ง ที่ติดถาวรกับอาคารโรงงาน ทางยกระดับ สะพานลอย หรือใช้เป็นข้อต่อประเภทอื่นๆ ที่ต้องการให้ช่วงข้อต่อที่มีความยืดหยุ่น หรือเคลื่อนตัวได้ระดับหนึ่ง หรือใช้เป็นอุปกรณ์เคลื่อนย้ายไปใช้ในที่ต่างๆ ได้ เช่น สายยางสำหรับสูบน้ำ ท่อดับเพลิง ท่อส่งน้ำ ท่อส่งปุ๋ย โดยทั่วไปท่อยางใช้ประโยชน์ในการถ่ายเทของเหลว แก๊ส ของแข็งบางชนิด เป็นต้น ทั้งนี้ท่อยางมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีน้ำหนักเบา สามารถดัดแปลงเป็นรูปต่างๆ เพื่อใช้กับงานได้หลายประเภท ท่อยางมีหลายชนิด เช่น ท่อยางน้ำมัน ท่อยางดับเพลิง ท่อยาง หม้อน้ำรถยนต์ ท่อแก๊ส ท่อยางที่ใช้กับสวนและไร่ นา ท่อยางที่ใช้กับเครื่องจักรอุตสาหกรรม และอื่นๆ อีกหลายประเภทจึงทำให้มีการใช้ท่อยางในปริมาณสูง

(3) กลุ่มผลิตภัณฑ์ยางจากน้ำยางข้น ผลิตภัณฑ์ยางจากน้ำยางข้นที่สำคัญคือ ถุงมือยาง แบ่งตามประเภทการใช้งานออกเป็น 4 ประเภท คือ

- ถุงมือยางที่ใช้ในการแพทย์ (Medical gloves) ซึ่งแบ่งออกเป็น ถุงมือผ่าตัด (Surgical gloves) และถุงมือที่ใช้ในงานตรวจโรคทั่วไป (Examination gloves)

- ถุงมือยางสำหรับใช้ในครัวเรือน (Household gloves) ถุงมือชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่ แข็งแรง ทนทาน เนื้อหนากว่าถุงมือยางที่ใช้ ในการแพทย์ เนื่องจากต้องสัมผัสกับน้ำผงซักฟอก หรือน้ำยาทำความสะอาดต่างๆ มีอายุการใช้งานนาน และมีสีสันทสวยงาม สวมใส่สบาย นุ่มมือ

- ถุงมือยางที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial gloves) ถุงมือประเภทนี้จะมีขนาดใหญ่ แข็งแรง ทนทานต่อการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม

- ถุงมือยางที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ถุงมือประเภทนี้จะมีขนาดเล็กเพียงใช้สวมนิ้วมือเรียกว่า ถุงนิ้ว (Finger cots) ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตวงจรรีเลย์ทรอนิกส์

(4) กลุ่มผลิตภัณฑ์ยางอื่นๆ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางอื่นๆ ที่สำคัญคือ รองเท้า ในประเทศไทย สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทใหญ่คือ รองเท้ากีฬา รองเท้าหนัง รองเท้าที่ทำด้วยยางและพลาสติก รองเท้าแตะ ส่วนประกอบที่สำคัญของรองเท้าคือ พื้นรองเท้าและสันรองเท้า เมื่อพิจารณาโครงสร้างของต้นทุนรองเท้าจะเป็นค่าวัดดูถึงร้อยละ 65-75 ขึ้นอยู่กับประเภทของรองเท้า เช่น รองเท้าหนัง รองเท้ากีฬา รองเท้าแตะ รองเท้าแฟชั่น ฯลฯ ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยวัสดุคืบส่วนที่เป็นตัวรองเท้านิ้วบน (Upper) พื้นรองเท้า (Shoe sole) และสันรองเท้า (Heel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

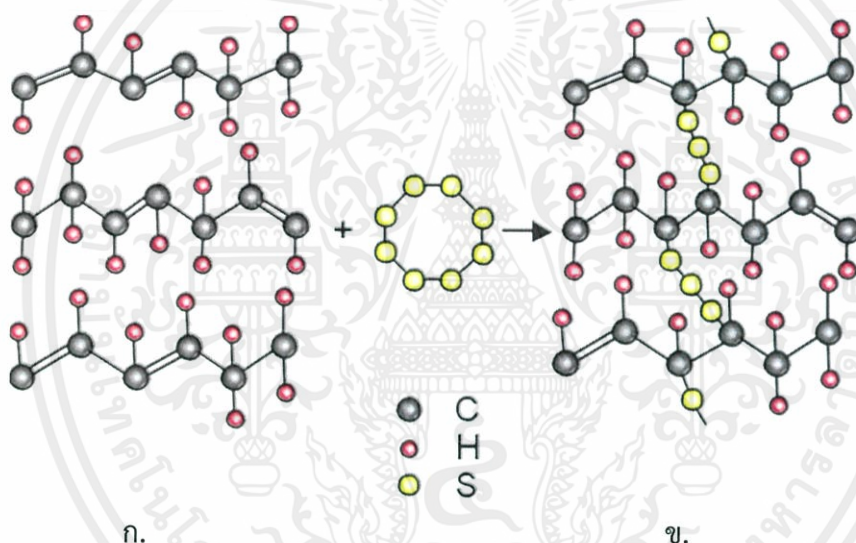
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การเชื่อมโยงยาง (Rubber vulcanization) [25]

สารทำให้ยางคงรูป หรือสารวัลคาไนซิง เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (Crosslink) ตรงตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเพื่อการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดเรียกว่า การคงรูป หรือการวัลคาไนซ์ (Vulcanization) โดยสมบัติของยางที่เปลี่ยนไปมีดังนี้

- มีค่าความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
- มีค่ามอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
- มีฮิสเตอรีซิส (Hysteresis) ลดลง
- มีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Permanent set) ลดลง หรือมีเสถียรภาพของรูปร่างเพิ่มขึ้น
- เหนียวติด (Sticky) น้อยลง
- ยางเปลี่ยนจากสภาพเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เป็นเทอร์โมเซต (Thermoset)

ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ทนต่ออุณหภูมิสูง แสง และการใช้งานยาวนานขึ้น



รูปที่ 2.2 ก. โครงสร้างของยางก่อนเชื่อมโยง และ ข. โครงสร้างของยางหลังเชื่อมโยง [9]

การวัลคาไนซ์ยางที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบกำมะถัน ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ [10]

1. กำมะถัน (Sulfur) กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้เร็ว และยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ระบบนี้นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ เช่น ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) ยางพอลิไอโซพรีน (IR) ยางพอลิบิวทาไดอีน (BR) และยางไนไตรล์ (NBR) เป็นต้น อย่างไรก็ตามระบบนี้ก็ยังมีข้อจำกัดหลักคือไม่สามารถใช้วัลคาไนซ์ยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลได้ เช่น ยางซิลิโคน หรือยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPM)

2. เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) สามารถใช้ได้ดีกับยางส่วนใหญ่ (ทั้งที่มีพันธะคู่ และไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล) แต่เนื่องจากระบบนี้มีต้นทุนสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน และยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตต่ำกว่ายางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ประกอบ-

กับเปอร์ออกไซด์จัดเป็นสารเคมีที่ค่อนข้างอันตราย การขนย้าย และการเก็บรักษาต้องทำด้วยความระมัดระวัง ดังนั้นการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์นั้นจึงนิยมใช้กับยางที่ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล (เช่น ยาง EPM ยางเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA) และยางคลอริเนตพอลิเอทิลีน (CPE) หรือ ยางซิลิโคน เป็นต้น) หรือยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำมากเท่านั้น (เช่น ยางไฮโดรจิเนต-ไนไตรล์ (HNBR) และ ยาง EPM) สำหรับยางอื่นๆ นิยมวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันมากกว่า ยกเว้นกรณีที่ต้องการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อความร้อนได้ดี หรือมีค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) ต่ำเท่านั้น

3. สารเคมีอื่นๆ นอกจากระบบหลักๆ 2 ระบบดังกล่าวมาแล้ว ยังมีการนำสารวัลคาไนซ์ชนิดอื่นๆ มาใช้ในการคงรูปด้วยเช่นกัน แต่มีการใช้น้อย หรือใช้ในกรณีที่จำเป็น เช่น การใช้โลหะออกไซด์ (แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide: MgO) ร่วมกับซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide: ZnO)) ในการคงรูปของยางคลอโรพรีน (CR) หรือการใช้สารประกอบในกลุ่มควิโนนไดออกไซม์นิยมใช้ในการวัลคาไนซ์ยางบิวทิล (IIR) เป็นต้น

### 2.3 สารตัวเติมและการเสริมแรงของยาง

สารตัวเติม (Filler) คือองค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มสมบัติเชิงกล ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน เพิ่มการนำทางไฟฟ้า เพิ่มอายุการใช้งานของยาง เป็นต้น

โดยทั่วไปสารตัวเติมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ สารตัวเติมกลุ่มที่เสริมแรง และสารตัวเติมกลุ่มที่ไม่เสริมแรง [11]

- สารตัวเติมกลุ่มเสริมแรง (Reinforcing filler) คือสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็กในระดับนาโนเมตร และเกิดอันตรกิริยากับยางได้ดี การเติมสารตัวเติมในกลุ่มนี้จึงส่งผลทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเติมเสริมแรง ได้แก่ เหมาดำ และซิลิกา

- สารตัวเติมกลุ่มที่ไม่เสริมแรง (Non-reinforcing filler) คือสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ในระดับไมโครเมตร และมีอันตรกิริยากับยางต่ำ ผู้ประกอบการนิยมใช้สารตัวเติมในกลุ่มนี้เพื่อปรับปรุงสมบัติในกระบวนการผลิต และลดต้นทุน ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเติมในกลุ่มนี้ได้แก่ ทัลคัม (Talcum) ดินขาว และแคลเซียมคาร์บอเนต

นอกจากการแบ่งกลุ่มตามประสิทธิภาพการเสริมแรงแล้วยังสามารถแบ่งกลุ่มของสารตัวเติมตามรูปร่างของสารตัวเติมได้อีกด้วย โดยทั่วไปสารตัวเติมที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางมีรูปร่าง 3 แบบคือ แบบทรงกลม แบบแท่ง และแบบแผ่น การเติมสารตัวเติมที่มีรูปร่างเป็นแบบทรงกลม (เช่น เหมาดำ และซิลิกา) ลงไปในยางจะส่งผลทำให้ยางมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง ในขณะที่การเติมสารตัวเติมที่มีรูปร่างแบบแท่ง และแบบแผ่นอาจส่งผลทำให้สมบัติของยางในแต่ละทิศทางมีค่าไม่เท่ากัน ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเติมที่มีรูปร่างแบบแท่ง และแบบแผ่น ได้แก่ เส้นใย และดินขาวตามลำดับ

การเสริมแรง (Reinforcement) [12] หมายถึงความสามารถของสารตัวเติมในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง และอาจปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของยางเชื่อมโยง เช่น ค่ามอดูลัสของยาง ความแข็งแรงฉีกขาด และความต้านทานต่อการขีดถู เป็นต้น ในทำนองเดียวกันค่ามอดูลัส และความแข็งแรงของยางจะเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และสมบัติการกระด้างกระดอนของยางจะลดลง ดังนั้นสารตัวเติมเสริมแรง คือสารตัวเติมที่เมื่อใส่ลงไปในยางแล้วจะ

ทำให้สมบัติของยางเกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวข้างต้น แต่สำหรับสารตัวเติมบางชนิดที่เมื่อใส่ลงไป ในยางแล้วทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ของยางคงรูป ด้อยลง หรือเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย จะเรียกรวมสารตัวเติมประเภทนี้ว่าสารตัวเติมไม่เสริมแรง

ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของสารตัวเติมจะขึ้นอยู่กับอันตรกิริยา หรือแรงกระทำระหว่าง ยางกับสารตัวเติม โดยที่อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในรูปของแรงแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีค่าค่อนข้างต่ำ หรืออาจอยู่ในรูปของพันธะเคมีซึ่งมี ความแข็งแรงค่อนข้างสูง เมื่อเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม ยางจะมีความต้านทานต่อ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงขึ้นเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลยางจะมีความสามารถในการเคลื่อนที่น้อยลง

### 2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสริมแรงของสารตัวเติม [13]

ในการเติมสารตัวเติมเพื่อเสริมแรงให้กับยาง มีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณาเนื่องจากจะมีผล อย่างมากต่อสมบัติของยาง ปัจจัยที่สำคัญได้แก่

#### 1. ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ (Particle size and specific surface area)

สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะให้การเสริมแรงแก่ยางได้ดี เพราะสารตัวเติมที่มี อนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยของน้ำหนัก (พื้นที่ผิวจำเพาะ) สูง จึงทำให้พื้นที่ที่จะเกิด แรงกระทำระหว่างยางกับสารตัวเติมเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด ความแข็งกด และความต้านทานต่อการขัดถูจึงสูงขึ้นตามพื้นที่ผิวจำเพาะของ สารตัวเติม โดยทั่วไปแล้วสารตัวเติมเสริมแรง เช่น เขม่าดำจะมีอนุภาคปฐมภูมิเล็กมาก และอนุภาค- ปฐมภูมิเหล่านี้จะไม่อยู่กันเดี่ยวๆ แต่จะหลอม (Fused) หรืออยู่รวมกันเป็นก้อนที่เรียกว่าแอกกรีเกต (Aggregate) แต่เนื่องจากแอกกรีเกตแต่ละกลุ่มจะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ดังนั้นแอกกรีเกตจึงจับตัว กันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่า แอกลอมเมอเรต (Agglomerate)

#### 2. โครงสร้างของสารตัวเติม (Filler structure)

นอกจากขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิวจำเพาะแล้ว โครงสร้างของสารตัวเติมมีอิทธิพลต่อการ- เสริมแรงเช่นกัน ดังที่ได้กล่าวไว้ว่าอนุภาคของสารตัวเติมบางชนิด เช่น เขม่าดำ จะไม่อยู่กันเป็น อนุภาคเดี่ยว แต่จะอยู่รวมกันเป็นก้อนแอกกรีเกต ซึ่งการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนดังกล่าวทำให้เกิดเป็น โครงสร้างสารตัวเติมที่เรียกว่า โครงสร้างสารตัวเติมปฐมภูมิ (Primary filler structure) โครงสร้าง- สารตัวเติมปฐมภูมิที่เกิดขึ้นนี้จะมีแข็งแรงสูงมาก และไม่สามารถถูกทำลายด้วยแรงเชิงกลใน ระหว่างการผสม การรวมกลุ่มกันของก้อนแอกกรีเกตทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของสารตัวเติมที่เรียกว่า โครงสร้างของสารตัวเติมทุติยภูมิ (Secondary filler structure) ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะไม่แข็งแรง และสามารถถูกทำลายได้ง่ายด้วยแรงเชิงกล

#### 3. ความว่องไวทางปฏิกิริยาของพื้นผิว (Specific surface activity)

ปกติสารตัวเติมจะมีหมู่ฟังก์ชันเคมีชนิดต่างๆ เกาะติดหรือถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิว เช่น บนพื้นผิวของเขม่าดำจะมีหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมาย เช่น ฟีนอลิก (Phenolic) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ควิโนน (Quinone) คาร์บอกซิล (Carboxyl) และแลกโตน (Lactone) รวมถึงอนุมูลอิสระที่สามารถ ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับโมเลกุลของยางได้ แต่สำหรับสารตัวเติมที่มีสีขาว เช่น ซิลิกา ส่วนใหญ่จะมี หมู่ฟังก์ชันเคมีจำพวกออกไซด์ของโลหะ หรือหมู่ไซลันอล เป็นองค์ประกอบอยู่บนพื้นผิวยางที่มี ความเป็นขั้วสูง เช่น ยาง NBR และยาง CR เป็นต้น จะทำปฏิกิริยาได้ดีกับพื้นผิวของสารตัวเติมที่มี หมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่น หมู่ไซลันอล หรืออะตอมของคลอรีน เป็นต้น ถ้าความว่องไวทางปฏิกิริยาของ สารตัวเติมลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงด้อยลง เช่น เมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวของ

เขม่าดำด้วยกระบวนการที่เรียกว่า Graphitization โดยการนำเขม่าดำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,600-1,300 °C เป็นเวลาหลายชั่วโมง ความร้อนที่สูงมากนี้จะทำให้หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำสลายไป เขม่าดำจะสูญเสียความว่องไวทางปฏิกิริยาซึ่งจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงของเขม่าดำลดลง โดยค่าความว่องไวทางปฏิกิริยาของพื้นผิวบอกด้วยปริมาณของยางบาวด์ (Bound rubber) ซึ่งยางบาวด์ คือส่วนของยางที่ไม่สามารถถูกสกัดออกมาจากสารตัวเติมได้โดยใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม (ตัวทำละลายที่สามารถละลายยางได้ดี) ยางส่วนนี้จะเกาะติดอยู่กับสารตัวเติมในลักษณะคล้ายเจล

#### 4. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH value)

แม้ว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของสารตัวเติมจะไม่ได้มีอิทธิพลโดยตรงต่อการเสริมแรงในยาง แต่เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างของสารตัวเติมส่งผลกระทบต่อลักษณะการเชื่อมโยงในยาง (สารตัวเติมที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะหน่วงปฏิกิริยาเชื่อมโยง) ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างของสารตัวเติมจึงส่งผลโดยตรงต่อสมบัติการเชื่อมโยง

## 2.4 ถ้ำกลบ

ถ้ำกลบเป็นของเสียที่เหลือจากการนำถ้ำกลบมาเผาทำเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยถ้ำกลบถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่ดีที่สุดในชีวมวลทั้งหมดเนื่องจากมีความชื้นต่ำ ไม่ต้องผ่านเครื่องย่อยก่อนนำไปเผาไหม้ และมีสัดส่วนซีถ้ำมากกว่าชีวมวลชนิดอื่นซึ่งสามารถนำไปทดแทนดินเพื่อปลูกพืชได้ และส่งขายต่างประเทศได้อีกด้วย โดยถ้ำกลบที่ได้จากการเผาเมืองค์ประกอบหลักที่สำคัญคือซิลิกาชนิดออสติฐาน นอกจากนี้ยังมีความพรุนมาก มีน้ำหนักเบา พื้นผิวผิวมาก และมีความสามารถในการดูดซับดีอีกด้วย

### 2.4.1 การเผาถ้ำกลบ [14]

ถ้ำกลบจัดเป็นเชื้อเพลิงแข็ง และมีน้ำหนักที่เบามาก ลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะเป็นการเผาไหม้แบบการแพร่ คือถ้ำกลบจะติดไฟที่ผิวด้านนอกก่อนแล้วจึงค่อยๆ ลามเข้าไปด้านใน ถ้ำกลบที่เผาไหม้ไปก่อนจะกลายเป็นซีถ้ำ ชัดขวางการลามเข้าไปในก้อนเชื้อเพลิงของเปลวไฟ จึงทำให้เชื้อเพลิงมักจะเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ โดยการเผาถ้ำกลบที่สภาวะต่างกันจะทำให้ได้ถ้ำกลบต่างชนิดกัน ดังนี้

1. ถ้ำกลบขาว ได้จากการเผาอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,500 °C ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนเกินพอจึงเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทำให้ได้ถ้ำกลบที่มีโครงสร้างอะตอมอยู่ในรูป Cristobalite (Polyamorphous) ถ้ำกลบมีลักษณะเป็นสีขาว แตกหักเป็นผงขนาดเล็ก โดยส่วนมากมักจะเกิดเปลวไฟขณะเผาไหม้หากเผาในที่โล่งที่มีอากาศกระจายสู่พื้นผิวขณะเผาไหม้ที่เพียงพอ นอกจากนี้ยังสามารถเผาได้จากถ้ำกลบดำที่อุณหภูมิต่ำอย่างต่อเนื่องได้อีกด้วย ถ้ำกลบชนิดนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์มากในอุตสาหกรรม เนื่องจากองค์ประกอบส่วนมากเป็นซิลิกา

2. ถ้ำกลบดำ เป็นถ้ำกลบที่ได้จากการเผาอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิไม่เกิน 1,200 °C ในสภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ โดยไม่เกิดเปลวไฟขณะเผาไหม้ทำให้ได้ถ้ำกลบที่มีลักษณะอนุภาคเป็นสีดำ มีโครงสร้างอะตอมอยู่ในรูปอสติฐาน ถ้ำกลบมีลักษณะแข็ง-เปราะ แตกหักได้ง่าย จะแตกละเอียดหากได้รับแรงกดบีบ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.2 ลักษณะทางกายภาพของถ้ำกลบ [14]

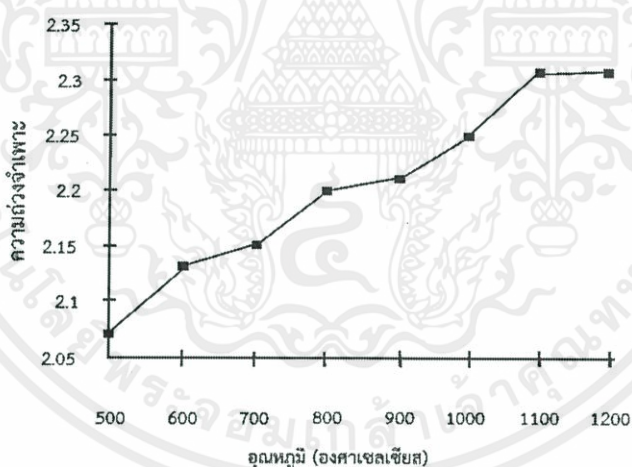
##### - โครงสร้างและความพรุนของถ้ำกลบบดละเอียด

กลบที่เผา และผ่านการบดละเอียดแล้วโดยมากจะยังคงมีลักษณะเป็นรูพรุน ทั้งนี้วิธีการบดละเอียดที่ทำให้เกิดแรงกระแทก และการบดละเอียดที่มากไปอาจทำให้โครงสร้างของเซลล์ถูกทำลาย และความเป็นรูพรุนลดลง ซึ่งจะมีผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะ และพื้นที่ผิวของกลบ

นอกจากนี้อุณหภูมิของการเผามีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของถ้ำกลบเช่นกัน โดยระยะแรกกลบจะเผาบริเวณจากเปลือกเข้าไปถึงส่วนในอนุภาค การบดกลบก่อนเผาจะช่วยในการเผาไหม้ ซึ่งอัตราการให้ความร้อน และเวลาที่มีผลต่อคุณภาพกลบที่ได้ กลบที่เผาที่อุณหภูมิ 600 °C จะให้ปริมาณถ้ำที่สูงกว่ากลบที่เผาที่ 400 °C การเผาที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 900 °C) จะทำให้เกิดการจับตัวกันของถ้ำกลบมากขึ้น เนื่องจากเกิดการหลอมขึ้น

##### - ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของถ้ำกลบขึ้นอยู่กับวิธีการเผา ถ้ำกลบที่ใหม่ไม่สมบูรณ์จะมีคาร์บอนเหลืออยู่มาก และจะมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ความถ่วงจำเพาะของถ้ำกลบที่เผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์มีค่าระหว่าง 1.9-2.3 และยิ่งขึ้นกับอุณหภูมิในการเผาดังแสดงในรูปที่ 2.3 ถ้ำกลบที่เผาที่อุณหภูมิ 500 °C มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.06 และความถ่วงจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเป็น 2.2 และ 2.3 ที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 1,000 °C ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของความถ่วงจำเพาะ เนื่องมาจากปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ลดน้อยลง การที่โครงสร้างของเซลล์ถูกทำลาย และความพรุนลดลงที่อุณหภูมิสูง

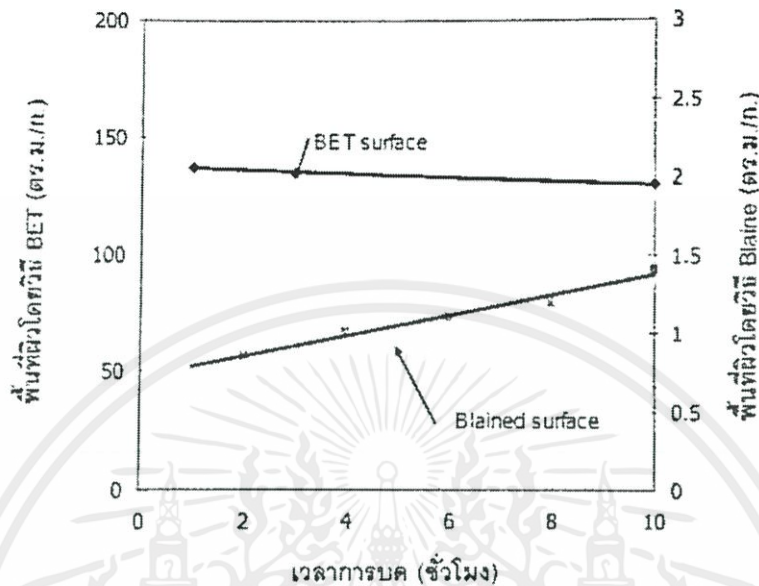


รูปที่ 2.3 ความถ่วงจำเพาะของถ้ำกลบกับอุณหภูมิในการเผา [14]

##### - ความละเอียด

นอกจากความละเอียดของถ้ำกลบจะขึ้นอยู่กับเวลา และวิธีในการบดแล้วยังขึ้นอยู่กับวิธีการเผา อุณหภูมิ และปริมาณอากาศ การเผาถ้ำกลบที่อุณหภูมิ 500 °C ให้ถ้ำกลบที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด 170 ตารางเมตรต่อกรัม (เมื่อวัดโดยวิธี BET) และที่อุณหภูมิ 500-600 °C พื้นที่ผิวยังคงมีค่าสูงประมาณ 100-150 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิสูงกว่่านี้พื้นที่ผิวจะลดลงอย่างมาก การลดลงของพื้นที่ผิวเกิดจากความเป็นผลึก และการทำลายโครงสร้างเซลล์ที่มีรูพรุน ในการเผาที่อุณหภูมิ 750 °C ในเตาปฏิกรณ์แบบทอร์เบด (Torbed) พบว่าความละเอียดของถ้ำกลบที่ไม่ได้บดมีค่าเท่ากับ 100 ตารางเมตรต่อกรัม และเพิ่มเป็น 229 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเผาโดยเพิ่มอากาศเข้าไป

ถ้าแกลบเทาขาวที่เผาที่อุณหภูมิพอเหมาะจะบดละเอียดได้ง่ายกว่าแกลบดำโรงสี ในการบด 1 ชั่วโมงเท่ากัน แกลบเทาขาวมีความละเอียด 14,300 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม (เมื่อวัดโดยวิธีของ Blaine) ส่วนแกลบดำโรงสีมีความละเอียด 9,500 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

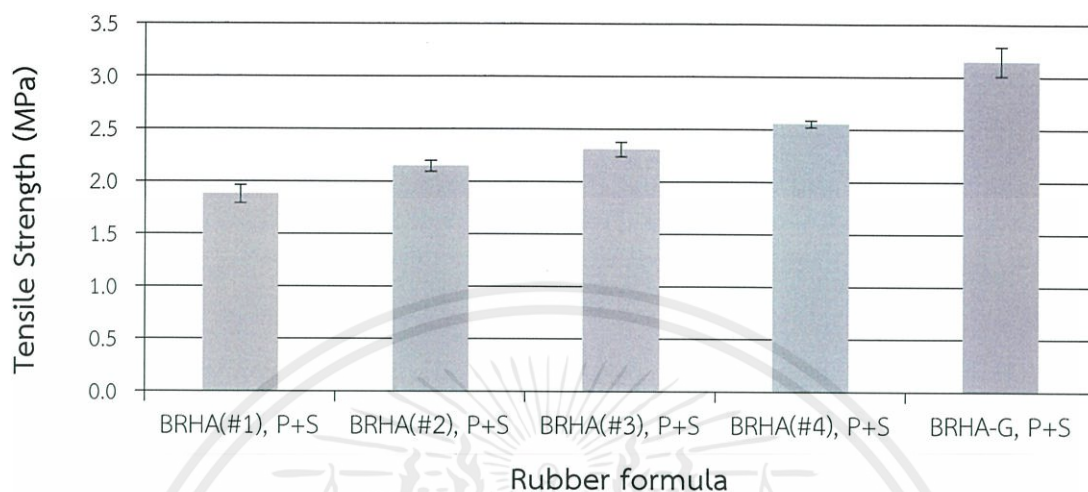


รูปที่ 2.4 พื้นที่ผิวแกลบ และเวลาการบด [14]

การวัดขนาดของอนุภาคแกลบนิยมใช้พื้นที่ผิว การวัดพื้นที่ผิวโดยวิธีของเบลนจะให้ค่าความละเอียดของแกลบที่เพิ่มขึ้นไม่เท่ากันกับการวัดพื้นที่ผิวโดยวิธีของ BET ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวแกลบเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการบดเพิ่ม เมื่อวัดโดยวิธีของเบลนซึ่งเป็นการวัดพื้นที่ผิวโดยอ้อม พื้นที่ผิวแกลบเพิ่มขึ้นจาก 8,500 ตารางเซนติเมตรต่อกรัมเป็น 13,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม วิธี BET เป็นการวัดพื้นที่ผิวโดยตรงด้วยการดูดซับที่ผิวแกลบด้วยก๊าซ จึงวัดพื้นที่ผิวทั้งหมดรวมพื้นที่ผิวของโพรงในเนื้อแกลบด้วย ในการบดแกลบจะละเอียดขึ้น แต่พื้นที่ผิวแกลบเมื่อวัดโดยวิธี BET จะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก และบางครั้งอาจลดลงได้ด้วยดังแสดงในรูป เนื่องจากในการบดจะเกิดการแตกตัว และการรวมตัวของแกลบที่ละเอียด จากการทดสอบพบว่าพื้นที่ผิวแกลบเพิ่มขึ้นจาก 123 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม เป็น 137 และ 151 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ในการบดแกลบ 0, 14 และ 18 ชั่วโมง การที่พื้นที่ผิวจะเพิ่มมากขึ้นได้จะต้องบดแกลบให้ละเอียดจนมีขนาดเล็กมากใกล้เคียงกับขนาดของรูพรุน รูพรุนภายในแกลบมีขนาดประมาณ 0.5-0.6 ไมครอน ดังนั้นพื้นที่ผิวแกลบจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่ออนุภาคของแกลบมีขนาดเล็กลงประมาณ 10 จนถึง 0.5 ไมครอน นอกจากนี้การระบุความละเอียดของแกลบยังสามารถทำได้โดยการระบุขนาดเฉลี่ยของอนุภาค โดยแกลบที่ใช้กันส่วนมากมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 5-20 ไมครอน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของเตชาธร ฉันทรักษ์ [4] พบว่าแกลบดำที่ใช้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 127 ไมครอน (แกลบดำที่ผ่านการแยกขนาด 100-150 เมช: BRHA(#1)) ถึง 6.12 ไมครอน (แกลบดำที่บดละเอียด: BRHA-G) โดยมีพื้นที่ผิวเป็น  $0.047 \text{ m}^2/\text{g}$  และ  $0.9809 \text{ m}^2/\text{g}$  ตามลำดับ ซึ่งขนาดอนุภาคของแกลบดำนี้มีผลอย่างมากต่อสมบัติของยางผสมสูตร โดยจากงานวิจัยพบว่า

เมื่อนำเถ้าแกลบดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 6.12 ไมครอนมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ จะทำให้ยางผสมสูตรมีสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติด้านความแข็งแรงดึง สมบัติด้านความแข็งแรงฉีกขาดดีกว่าสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเป็นสารตัวเติม



รูปที่ 2.5 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร โดยเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติม [4]

#### - องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกข้าวจะแตกต่างกันไปบ้างขึ้นอยู่กับชนิดของข้าว ทั้งนี้ความแตกต่างเท่าที่ปรากฏอยู่ในขั้นต่ำ นอกจากนี้สภาพดิน อากาศ และปุ๋ยมีผลต่อองค์ประกอบของเถ้าแกลบ โดยที่สภาพของดินปุ๋ยจะมีส่วนประกอบของโปแทสเซียม และโซเดียมแตกต่างกันพอสมควร แต่ยังคงแตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากเถ้าแกลบที่เผาได้สมบูรณ์จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 องค์ประกอบที่เหลือจะเป็นออกไซด์ของโซเดียม โปแทสเซียม แคลเซียม ฟอสฟอรัส และกำมะถัน ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition: LOI) จะค่อนข้างต่ำ ปริมาณ LOI ส่วนใหญ่จะเป็นคาร์บอน และสารที่เผาไหม้ไม่หมด ซึ่งถ้ามีปริมาณสูง แสดงว่าเถ้าแกลบผ่านการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้ได้เถ้าแกลบที่มีปริมาณซิลิกาลดลง

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้เผาเถ้าแกลบ และพื้นที่เพาะปลูกข้าวดังตารางที่ 2.2 ที่แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่ถูกเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

#### - สถานะของซิลิกาในเถ้าแกลบ

องค์ประกอบที่สำคัญ และมีอยู่มากที่สุดในเถ้าแกลบดำคือ ซิลิกา โดยความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของเถ้าแกลบจะขึ้นอยู่กับสถานะของซิลิกา ซิลิกามีอยู่ 2 สถานะคือ ซิลิกาแบบอสัณฐาน (Amorphous) และซิลิกาแบบผลึก (Crystalline) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และระยะเวลาในการเผาซิลิกาที่เป็นผลึกค่อนข้างอยู่ตัวและเฉื่อยต่อปฏิกิริยา แต่ซิลิกาแบบอสัณฐานซึ่งได้จากการเผาที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไปจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิสูงซิลิกาจะเปลี่ยนรูปไปเป็นผลึกควอตซ์ (Quartz) คริสโตบาไลต์ (Christobalite) และทริดีไมต์ (Tridymite)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ [4]

สารประกอบ	ปริมาณ (% โดยน้ำหนัก)
SiO <sub>2</sub>	74.00
K <sub>2</sub> O	11.80
Na <sub>2</sub> O	3.10
MgO	2.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.35
CaO	2.35
MnO	0.75
TiO <sub>2</sub>	1.21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.26
Loss on ignition (LOI)	0.54

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ [14]

องค์ประกอบ		อุณหภูมิ (°C)				
		<300	400	600	700	1,000
ธาตุ (%)	Si	81.90	80.43	81.25	86.71	92.73
	K	9.58	11.86	11.80	7.56	2.57
	Ca	4.08	3.19	2.75	2.62	2.57
	Na	0.96	0.92	1.33	1.21	0.91
	Mg	1.25	1.20	0.88	0.57	0.66
	S	1.81	1.32	1.30	1.34	0.64
	Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45
	Fe	0.43	1.81	0.68	0.00	0.68
ออกไซด์	SiO <sub>2</sub>	88.01	88.05	88.67	92.15	95.48
	MgO	1.17	1.13	0.84	0.51	0.59
	SO <sub>3</sub>	1.12	0.83	0.81	0.79	0.09
	CaO	2.56	2.02	1.73	1.60	1.16
	K <sub>2</sub> O	5.26	6.48	6.41	3.94	1.28
	Na <sub>2</sub> O	0.79	0.76	1.09	0.99	0.73
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.29	0.74	0.46	0.00	0.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในห้องเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปจัดพิมพ์หรือจำหน่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงสถานะของซิลิกาจากจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแล้วยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการเผา จากการศึกษพบว่า การเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า หรือเท่ากับ  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะได้แก้วเคลือบที่มีซิลิกาอยู่ในรูปอสัณฐาน แต่หากใช้เวลาในการเผานานซิลิกาในเคลือบจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปผลึก แม้ว่า จะเผาที่อุณหภูมิต่ำก็ตาม แต่การเป็นผลึกจะเกิดขึ้นมาก และเห็นได้ชัดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยเฟสซิลิกาที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาเป็นดังนี้ [15]

ซิลิกาอสัณฐาน  $\longrightarrow$  ควอตซ์  $\longrightarrow$  คริสโตบาไลต์  $\longrightarrow$  ทริติไมต์

อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนเฟสจากควอตซ์เป็นคริสโตบาไลต์จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ส่วนการเผาที่อุณหภูมิ  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานานทำให้ซิลิกาอยู่ในรูปคริสโตบาไลต์ได้เช่นกัน

นอกจากนี้ปริมาณอากาศในเตาเผาเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากปริมาณอากาศเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยการเผาที่สภาวะก๊าซ  $\text{CO}_2$  จะเป็นสภาวะที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระดับปานกลาง ส่วนการเผาที่สภาวะก๊าซ  $\text{O}_2$  เป็นสภาวะที่มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระดับสูง ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กภายในแก้วเคลือบ

แก้วเคลือบดำเป็นผลพลอยได้จากโรงงานไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งมาจากการเผาไหม้ของเคลือบเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า แก้วเคลือบดำนั้นมียูอยู่ในปริมาณมาก โดยส่วนใหญ่ก็นำแก้วเคลือบดำมาใช้ในการถมที่ดิน แต่เนื่องจากแก้วเคลือบดำมีขนาดอนุภาคที่เล็ก และฟุ้งกระจายทำให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศขึ้น จึงได้มีการวิจัยมากมายที่นำแก้วเคลือบดำมาประยุกต์ใช้ เพื่อนำแก้วเคลือบดำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเป็นการลดปริมาณของแก้วเคลือบดำ โครงการพิเศษนี้ได้ให้ความสนใจแก่แก้วเคลือบดำ โดยนำแก้วเคลือบดำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ เนื่องจากแก้วเคลือบดำมีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกา และซิลิกายังเป็นสารตัวเติมชนิดหนึ่งที่อุตสาหกรรมยางนั้นนิยมใช้ และเนื่องจากพื้นผิวของแก้วเคลือบดำนั้นมีรูพรุนมาก จึงมีโอกาสดียางธรรมชาติจะเข้าไปยึดเกาะกับแก้วเคลือบดำได้มากขึ้น

## 2.5 แวกซ์ (Wax)

แวกซ์โดยทั่วไปมาจากธรรมชาติ และการสังเคราะห์ มักมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น ในอุตสาหกรรมสี สารเคลือบ บรรจุภัณฑ์ ยาง พลาสติก สารหล่อลื่น เครื่องสำอาง เทียน เป็นต้น สมบัติของแวกซ์

- เป็นของแข็งที่อุณหภูมิ  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- มีตั้งแต่เกรตหยาบถึงละเอียด และใสถึงขุ่น
- เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว ความหนืดจะลดลงเล็กน้อย
- หลอมที่อุณหภูมิสูงกว่า  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยปราศจากการสลายตัว
- ละลายได้ดีที่อุณหภูมิสูง
- ชัดให้เป็นเงาภายใต้ความดันเล็กน้อย
- เผาไหม้โดยเปลวไฟสีเหลือง
- สามารถเป็นเจลได้เมื่อกระจายตัวในตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ

การเคลือบโดยใช้เร็กซ์ มักใช้เคลือบสารจำพวกเทอร์โมเซต (Thermoset) และเทอร์โม-พลาสติก (Thermoplastic) โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- เพื่อเพิ่มคุณสมบัติ เช่น สมบัติการลื่น สมบัติต้านทานความเสียหายบนพื้นผิว
- เพื่อช่วยกระบวนการผลิต เช่น การไหลของผงสารขณะทำการอัดรีด
- เพื่อเพิ่มคุณสมบัติเฉพาะบนพื้นผิว เช่น ความใส
- เพื่อปรับปรุงสมบัติการไหล เช่น หลีกเลี้ยงสติดตะกอน

## 2.5.1 ชนิดของเร็กซ์ [16]

### 2.5.1.1 เร็กซ์ธรรมชาติ (Natural wax)

เร็กซ์ธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเอสเทอร์ โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาของ แอลกอฮอล์สายโซ่ยาวกับกรด (โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีจำนวนคาร์บอน 25-40 ตัว) ซึ่งจะแสดงถึง ค่าความเป็นกรด (Acid Number: AN) และสะaponนิฟิเคชัน นัมเบอร์ (Saponification number) เลขทั้งสองชนิดนี้มีความสำคัญต่อผู้ออกสูตรของสารเคลือบ (Coating formulator) และยังมีผลกระทบต่ออัตราส่วนการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบ (Coating's stoichiometry) โดยที่เร็กซ์ที่มี ค่า AN สูงจะเกิดปฏิกิริยา และสามารถแขวนลอยในน้ำ ส่วนเร็กซ์ที่มีค่าสะaponนิฟิเคชัน นัมเบอร์สูง จะเกิดการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

#### 1. เร็กซ์คาร์นูบา (Carnauba wax)

เร็กซ์คาร์นูบามีความแข็ง โดยธรรมชาติแล้วเร็กซ์ชนิดนี้จะไหลออกมาจากใบไม้ ที่แยกออกเป็นส่วนเล็กๆ ของต้นบราซิลเลียน คาร์นูบา ปาล์ม (Brazilian carnauba palm) ชาวบราซิลจะเรียกว่า “ต้นไม้แห่งชีวิต” ใบของต้นปาล์ม คาร์นูบา (Palm carnauba) จะสามารถ เก็บเกี่ยวได้ในช่วงเดือนกันยายนถึงมีนาคม การที่จะได้เร็กซ์คาร์นูบานั้นจะต้องทำให้ใบไม้นั้นแห้ง ก่อนซึ่งจะใช้ระยะเวลาหลายวัน หลังจากนั้นนำใบไม้ใส่เข้าไปในเครื่องตีผสมซึ่งเป็นส่วนที่จะดึงเอา เร็กซ์ออกมาจากใบไม้ และผงเร็กซ์จะถูกแยกออกมาจากส่วนที่เหลือของใบไม้ สีของเร็กซ์ชนิดนี้จะ อยู่ในช่วงสีเหลืองอ่อนจนถึงสีน้ำตาลแกมเขียว ซึ่งสีจะขึ้นอยู่กับอายุของใบไม้

เร็กซ์คาร์นูบาจะถูกนำไปใช้ในการเคลือบ และหมักพิมพ์สำหรับทำให้เกิดการลื่น ความต้านทานการสึกหรอ ความมันเงา และสมบัติในการปลดปล่อย นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้ในการผลิตหมักพิมพ์กระดาษคาร์บอน ซึ่งจะช่วยให้การผลิตภาพที่มีความคมชัด และภาพไม่เกิดการเบลอ

#### 2. เร็กซ์มอนแตน (Montan wax)

เร็กซ์มอนแตนโดยธรรมชาติแล้วจะเกิดขึ้นในเร็กซ์บิทูมินีเยส (Bituminous wax) ซึ่งจะพบในถ่านหินลิกไนต์ หรือถ่านหินสีน้ำตาลที่เกิดจากการทับถมกัน มีความแข็ง ไม่เป็นพิษ และ ป้องกันการสลายตัว โดยทั่วไปแล้วเร็กซ์มอนแตนจะนำไปใช้ในการแขวนลอยในน้ำ สำหรับใช้ในการเคลือบ ใช้สำหรับการต้านทานการครูด การป้องกันน้ำ ความเงา และสมบัติความต้านทานต่อ-สารเคมี นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้ในกระดาษคาร์บอนที่มีคุณภาพสูง ลักษณะการทำงานจะใช้เป็นส่วนผสมที่ใส่ลงไปในการผลิตถ่านไฟฉาย และใช้เป็นสารหล่อลื่นในการผลิตพลาสติก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1.2. แวกซ์สังเคราะห์ (Synthetic Waxes)

1. แวกซ์ฟิชเชอร์-ทรอป (Fischer - Tropsh wax) คือแวกซ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน มีโครงสร้างเป็นอัลเคน (Alkane) ที่อิ่มตัวและสายโซ่ตรงเหมือนกับพาราฟิน แต่มีน้ำหนักโมเลกุล ความแข็ง และจุดหลอมเหลวสูงกว่าพาราฟิน

2. แวกซ์พอลิเอทิลีน (Polyethylene wax) เป็นแวกซ์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากที่สุด สามารถใช้เคลือบตัวเดียวหรือผสมกับแวกซ์ชนิดอื่นได้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

#### 2.1 แวกซ์พอลิเอทิลีนโฮโมพอลิเมอร์ (Polyethylene homopolymer wax)

ผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของโมเลกุลเอทิลีนภายใต้ความดันสูงจะได้พอลิเมอร์อิ่มตัวที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 500-4,000 สมบัติของแวกซ์เหมือนกับแวกซ์ไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีสมบัติความลื่น การต้านทานแรงขีดถู และไม่สามารถละลายในตัวทำละลาย โดยปกติแวกซ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุล และความเป็นผลึกสูงจะมีจุดหลอมเหลวสูง ดังนั้นความสามารถในการละลายจะลดลง ความสามารถในการต้านทานการขีดถูสูงขึ้น และทนสารเคมีในทางตรงกันข้ามแวกซ์ที่มีจุดหลอมเหลว และความเป็นผลึกต่ำจะมีความลื่นดีกว่า แสดงดังรูปที่ 2.6

Molecular Weight	Abrasion Resistance	Melt Point (300°F)	Insolubility
4000 3000 2000 1000 <500	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓
	Reduction of COF (Slip)	(0°F)	Solubility

รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของแวกซ์พอลิเอทิลีนกับสมบัติทางกายภาพ [16]

2.2 แวกซ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนโฮโมพอลิเมอร์ และโคพอลิเมอร์ (Oxidized polyethylene homopolymer and copolymers wax) แวกซ์ชนิดนี้มีความมีขี้แตกต่างจากพอลิเอทิลีนโฮโมพอลิเมอร์ โดยความมีขี้ของออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนโฮโมพอลิเมอร์ และโคพอลิเมอร์ เกิดจากการเติมหมู่ออกซิเจนในสายโซ่ของพอลิเอทิลีน ค่าความเป็นกรดของออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนโฮโมพอลิเมอร์ และโคพอลิเมอร์ อยู่ระหว่าง 15-50 จึงทำให้สามารถแขวนลอย และกระจายตัวในน้ำได้ดีขึ้น

### 2.5.2 แวกซ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีน (Oxidized polyethylene wax)

แวกซ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีน [17] เป็นแวกซ์ชนิดหนึ่งซึ่งมาจากแวกซ์พอลิเอทิลีนโฮโมพอลิเมอร์ โดยแวกซ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนจะมีหมู่คาร์บอกซิล และหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มเข้ามาในสายโซ่โมเลกุล

## ลักษณะเฉพาะทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ

1. **ลักษณะเฉพาะทางเคมี:** การยึดติดต่ำ จุดอ่อนตัวสูง ความแข็งดี ด้วยลักษณะทางเคมีที่มีความเสถียรทางความร้อน การกระจายตัวดี และไม่มีพิษจึงใช้แทนสารพาราฟินเหลว (Liquid paraffin) หรือพาราฟินธรรมชาติได้ เป็นสารหล่อลื่นที่ดี ทนสารเคมี ละลายในสารละลายพวกออะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

2. **สมบัติทางกายภาพ:**
- ผงของแข็งสีขาว
  - จุดอ่อนตัว (Softening point) 90-110 °C
  - ความถ่วงจำเพาะ 0.94-0.96

### การเตรียมแฉีกข้อออกซีไดซ์พอลิเอทิลีน

เตรียมแฉีกข้อออกซีไดซ์พอลิเอทิลีนถูกเตรียมในถังปฏิกรณ์ที่มีโคนิคอล ดิสทริบิวชัน เพลท (Conical distribution plate) โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO<sub>4</sub>) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาจะเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 141-148 °C ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 3-7 ชั่วโมง

### การใช้งาน

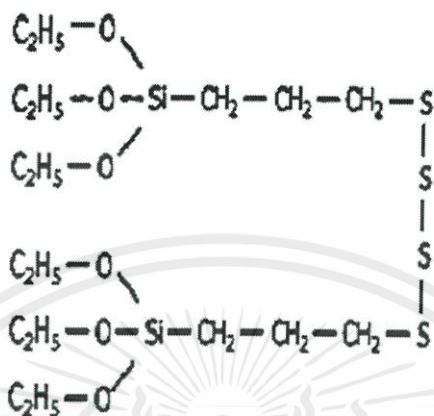
1. ใช้เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) ในกระบวนการผลิตพลาสติก โดยทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นภายนอก (External lubricant) เพื่อลดการยึดเกาะระหว่างพลาสติกกับผิวหน้าที่ร้อนของเครื่องจักร ทำให้สามารถนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น ช่วยลดเวลาในการทำ ความสะอาดแม่พิมพ์ และช่วยเพิ่มอัตราการผลิต
2. ใช้เป็นสารช่วยกระจายตัว (Dispersant) ช่วยให้สารเติมแต่งกระจายตัวได้ดีขึ้น
3. ใช้ในอุตสาหกรรมรองเท้า เฟอร์นิเจอร์ ฟัน และรถยนต์ เพื่อปกป้องพื้นผิวของวัสดุเพิ่มความเงา และต้านทานการหดยืดของหมึก
4. ใช้เคลือบผิวผลไม้จำพวกส้ม เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำออกจากผิว และป้องกันการขั้

## 2.6 สารคู่ควบไซเลน

สารคู่ควบไซเลน [18] เป็นสารเคมีที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ คือหมู่แอลคอกซี และหมู่ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ เช่น หมู่เมอร์แคปโท เมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงในระบบหมู่แอลคอกซี จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่อยู่บนผิวของซิลิกาเกิดเป็นพันธะซิลอกเซน (Siloxane linkage) ที่เสถียร และมีการปลดปล่อยแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยาออกมา ปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้บนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไซลานอลลดลง ด้วยเหตุนี้การเติมสารคู่ควบไซเลนจึงทำให้อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาตกลง ซิลิกาจึงแตกตัว และกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น ส่งผลให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดลดลง และทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างยิ่งยั้ง ส่วนหมู่ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่จะมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบก็จะเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาโครงสร้าง (เฉพาะในระบบที่มีการคงรูปด้วยกำมะถันเท่านั้น) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกับยางด้วยพันธะเคมี ด้วยเหตุนี้สารคู่ควบไซเลนจึงทำหน้าที่เป็นเหมือนสะพานเชื่อมระหว่างยางกับซิลิกา ทำให้อันตรกิริยาของยางกับซิลิกามีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงดึง โมดูลัสของยาง ความแข็งแรงฉีกขาด และความต้านทานต่อการขูดถู เป็นต้น สารคู่ควบไซเลนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเหลวที่สามารถเติมลงไปในยางพร้อมกับซิลิกาในระหว่างการผสม

สารคู่ควบไซเลนที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่

- ไตรเอทอกซีไซลิลโพรพิลเททราซัลไฟด์ (Bis -3- (triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide: Si-69)
- ไทโอไซยาเนโตโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Thiocyanato-propyl-triethoxysilane: Si-264)
- เมอร์แคปโทโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (Mercaptopropyl-trimethoxysilane: A-189)



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ Si-69 [18]

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sae-Oui, P. และคณะ [19] ศึกษาเก้าแกลบดำ 2 ชนิด (ปริมาณคาร์บอนต่ำ และสูง) มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ได้ทำการเปรียบเทียบผลของการเสริมแรงระหว่างเก้าแกลบดำ และสารตัวเติมชนิดอื่นๆ เช่น ทัลคัม ดินขาว แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ เก้าแกลบดำประกอบไปด้วยซิลิกา และเขม่าดำเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของเก้าแกลบดำด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เมื่อทำการใส่ Si-69 ลงในยางที่ใช้เก้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมพบว่า สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง โมดูลัสของยาง ความแข็งกต การต้านทานแรงขีดถู และความแข็งแรงฉีกขาดดีกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น ได้แก่ ซิลิกา และเขม่าดำ การเติม Si-69 จะส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติของยาง

รสิมา จันทร์จำปา [3] ศึกษาการใช้เก้าแกลบดำจากโรงไฟฟ้าชีวมวลเป็นสารตัวเติมในยาง โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติ RSS-3 ได้แก่ ผลของปริมาณสารตัวเติม ผลของการใช้ Si-69 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเก้าแกลบดำ การเคลือบผิวเก้าแกลบดำด้วย PEG 400 และผลของขนาดอนุภาค จากการวิเคราะห์เก้าแกลบดำที่ใช้ในงานวิจัยพบว่ามีขนาดอนุภาค 41-279 ไมครอน และมีพื้นที่ผิว 0.024-0.212 m<sup>2</sup>/g โดยมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก 74 เปอร์เซ็นต์ และจากการศึกษาผลของปริมาณเก้าแกลบดำพบว่า เวลาเริ่ม-เชื่อมโยงยาง และเวลาเชื่อมโยงยางมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเก้าแกลบดำเพิ่มขึ้น เนื่องจากเก้าแกลบดำจะไปลดความเป็นฉนวนทางความร้อนของยาง ดังนั้นยางผสมสูตรจึงนำความร้อนได้ดีขึ้น ทำให้เชื่อมโยงได้เร็วขึ้น เพราะนอกจากเก้าแกลบดำจะมีองค์ประกอบเป็นซิลิกา และสารพวกไฮโดรคาร์บอนแล้วยังมีโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบซึ่งมีส่วนเร่งให้อัตราการคงรูปเร็วขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณ-

ถ้ากลบดำยังทำให้ยางผสมสูตรมีความแข็งกตเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดน้อยลงเนื่องจากถ้ากลบมีอนุภาคขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวน้อย ด้วยเหตุนี้ถ้ากลบดำจึงเสริมแรงได้น้อยกว่าซิลิกา และเขม่าดำ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าถ้ากลบดำเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรงในยางธรรมชาติ

กุลภัสสร แพงพันธุ์ และคณะ [20] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ้าปาล์มดำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการใช้งาน ได้แก่ แหล่งถ้าปาล์มดำ การใช้ PEG 400 และ Si-69 ผลของปริมาณการเติมถ้าปาล์มดำ และผลของขนาดถ้าปาล์มดำ โดยเน้นศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงยาง และสมบัติเชิงกลของยาง จากการทดลองพบว่า ถ้าปาล์มดำทั้งสองแหล่ง (โรงไฟฟ้าชีวมวล และโรงงานปาล์มน้ำมัน) ไม่แตกต่างกันในองค์ประกอบเคมี และผลที่มีต่อสมบัติของยาง สามารถใช้ทดแทนกันได้ และจากการศึกษาผลของปริมาณถ้าปาล์มดำ (10, 30, 50 และ 70 phr) พบว่าปริมาณถ้าปาล์มดำไม่มีผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง แต่มีผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางลดลง ในการศึกษาขนาดอนุภาคถ้าปาล์มดำ (100-150, 150-200, 200-250 และเล็กกว่า 250 เมช) พบว่าถ้าปาล์มดำขนาดเล็กให้ลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าถ้าปาล์มดำขนาดใหญ่ จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า ถ้าปาล์มดำกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติ และมีการยึดติดกันได้ดี จากข้อมูลข้างต้นจึงสรุปได้ว่าถ้าปาล์มดำสามารถใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อเพื่อลดต้นทุนหรือเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง

เดชาธร ฉันทรักษ์ [4] ศึกษาการใช้ถ้ากลบดำเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของยาง ได้แก่ ผลของการปรับปรุงผิวถ้ากลบดำด้วย Si-69 และ PEG 4000 ผลของขนาดอนุภาคถ้ากลบดำ (100-150, 150-200, 200-250 เล็กกว่า 250 เมช และถ้ากลบดำบดละเอียด) ผลของปริมาณถ้ากลบดำ (20-120 phr) และเปรียบเทียบการใช้ถ้ากลบดำกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ จากการวิเคราะห์ถ้ากลบดำ พบว่าถ้ากลบดำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอยู่ในช่วง 6.1-128.9 ไมครอน มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 6.18-17.30 m<sup>2</sup>/g มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณ 74 เปอร์เซ็นต์ และมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลกับไฮดรอกเซนเหมือนกับซิลิกา การปรับปรุงผิวถ้ากลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบ Si-69 ส่งผลต่อเวลาเริ่มเชื่อมโยง และเวลาเชื่อมโยงลดลง ในด้านสมบัติเชิงกลมีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด ค่าความแข็งแรงฉีกขาด และค่าความแข็งแรงกดสูงขึ้น ค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดลดลง และจากสมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตพบว่า เมื่อปรับปรุงผิวถ้ากลบดำด้วย PEG 4000 และ Si-69 ทำให้ยางผสมสูตรมีค่ามอดุลัสเหมาะสมมาก และค่าแทนเดลต่ำต่ำที่สุด ขนาดอนุภาคถ้ากลบดำที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นถ้ากลบดำบดละเอียดที่มีเวลาเชื่อมโยงน้อยกว่าเล็กน้อย และเมื่อถ้ากลบดำมีขนาดอนุภาคเล็กลงจะส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรง เมื่อเพิ่มปริมาณถ้ากลบดำพบว่าไม่ส่งผลต่อเวลาเชื่อมโยง แต่ส่งผลให้มีค่าความหนืดมูนนี้ ค่าทอร์กสูงสุด และเกิดการเสียสภาพแบบเกิดการเชื่อมโยง (Marching) มีแนวโน้มสูงขึ้น ในด้านสมบัติเชิงกลพบว่า การใช้ถ้ากลบดำปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น จนมีปริมาณถ้ากลบดำ 100 phr จะให้ค่าดีที่สุดในเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้าพบว่าถ้ากลบดำจัดเป็นสารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง โดยสามารถลดต้นทุน และปรับปรุงสมบัติบางประการของยางไนไตรล์ได้

Arayaprane, W. และคณะ [21] ศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ เถ้าแกลบดำประกอบด้วยซิลิกา และเขม่าดำเป็นส่วนใหญ่ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการใช้ เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในยางเทียบกับสารตัวเติมอื่นๆ ที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิลิกา และเขม่าดำ โดยศึกษาผลของปริมาณร่วมด้วย ซึ่งศึกษาที่ 0-40 phr จากการทดสอบพบว่า การใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมทำให้ค่าความหนืดมูนีลลดต่ำลง และเวลาในการเชื่อมโยงสั้นลงรวมถึงทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดลดลง และในทางสมบัติอื่นๆ เช่น ค่ามอดูลัสของยัง และการต้านทานการขัดถู (Abrasion loss) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามเถ้าแกลบดำมีสมบัติความยืดหยุ่นที่ดีกว่าซิลิกา และเขม่าดำ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า การกระจายตัวของเถ้าแกลบดำที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติเป็นไปอย่างต่อเนื่อง จากผลโดยรวมแสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบดำสามารถใช้เป็นสารตัวเติมที่ถูกลงกว่าสำหรับยางเชื่อมโยงที่ไม่ต้องการการเสริมแรง

ในหลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเถ้าแกลบดำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยาง และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่า เถ้าแกลบดำมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกา การใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมนั้นจะแสดงสมบัติเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง หรือเป็นสารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง ซึ่งสามารถเสริมแรงได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากเถ้าแกลบมีขนาดอนุภาคใหญ่ และมีพื้นผิวจำเพาะน้อย นอกจากนี้ความเป็นขั้วของหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของเถ้าแกลบดำทำให้ความเข้ากันได้ของเถ้าแกลบดำ และยางธรรมชาติไม่ดีนัก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของขนาดอนุภาคโดยใช้เถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียดเป็นสารตัวเติม และศึกษาผลของการปรับปรุงผิวด้วยแก้วซ์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของยางผสมสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เน้นการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำ ด้วยแว็กซ์สังเคราะห์ที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ซึ่งงานวิจัยมีขั้นตอน และวิธีการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

**ตอนที่ 1** ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วย PEG 4000 ที่ 2.4 phr (4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแก้วเคลือบดำ) และ PE Wax กับ OPE Wax ที่ 3 phr (5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแก้วเคลือบดำ) เปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิว

**ตอนที่ 2** ศึกษาผลของปริมาณ PE Wax กับ OPE Wax ที่ 1, 2 และ 3 phr (1.67, 3.33 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแก้วเคลือบดำ)

**ตอนที่ 3** ศึกษาผลของขนาดแก้วเคลือบดำที่มีขนาดเล็กกว่า 250 เมช และแก้วเคลือบดำบดละเอียดที่ปริมาณ 60 phr

**ตอนที่ 4** ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วย OPE Wax เปรียบเทียบกับสูตรที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Si-69 ที่ปริมาณ 3 phr (5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแก้วเคลือบดำ)

ทดสอบสมบัติของยางที่เตรียมได้ ดังนี้

- การทดสอบสมบัติเชิงกล
  - ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)
  - เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)
  - โมดูลัสของยางที่ 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (Rubber modulus: M100, M300)
  - การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)
  - การทดสอบความแข็งกด (Hardness test)
  - การทดสอบการเสีรูปลาวหลังจากกดอัด (Compression set)
- การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
- การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 สารเคมี

1. ยางธรรมชาติ (Natural Rubber: NR): ยางแท่งเอสทีอาร์-5L (STR-5L) บริษัท ไทยอิฐรับเบอร์ จำกัด
2. เถ้าแกลบดำ (Black Rice Husk Ash: BRHA) จากโรงไฟฟ้าชีวมวล บริษัท ไปโอ-แมสเพาเวอร์ จำกัด จังหวัดชัยนาท
3. สารเชื่อมโยงกำมะถัน (Sulfur) เกรดการค้า บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด
4. กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า บริษัท พีที ซีสาเดน รายา เคมีคัล จำกัด
5. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เกรดการค้า บริษัท จักรवालเคมี จำกัด
6. น้ำมันขาว (White oil) เกรดการค้า บริษัท คุณคง ออย แอนด์ เคมีคัล จำกัด
7. สารป้องกันการเกิดออกซิไดซ์ (Antioxidant): Wingstay<sup>®</sup> L เกรดการค้า บริษัท ออมโนว่าโซลูชันส์ จำกัด
8. พอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 (Polyethylene glycol 4000: PEG 4000) เกรดการค้า บริษัท คอลติค จำกัด
9. MBTS (Mercaptobenzothiazole disulfide) เกรดการค้า บริษัท มอนเฟล็กซ์ จำกัด
10. TMTM (Tetramethylthiuram monosulfide) เกรดการค้า บริษัท อาร์คิมา จำกัด
11. MBS (2-Morpholiniothiobenzo thiazole) เกรดการค้า บริษัท มอนเฟล็กซ์ จำกัด
12. แร็วซ์พอลิเอทิลีน (Polyethylene Wax: PE Wax) เกรดการค้า บริษัท เอสซีจี เคมิคอล จำกัด
13. แร็วซ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีน (Oxidized Polyethylene Wax: OPE Wax) เกรดการค้า บริษัท อันนิเวลล์ อินเตอร์เนชันเนล จำกัด
14. ไซลีน (Xylene) เกรดการค้า บริษัท แลปซีสเต็ม จำกัด
15. ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) บริษัท แล็บ โซลูชัน แอนด์ เอ็นจิเนียริง จำกัด
16. สารควบไซเลน (Bis(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide: Si-69) เกรดการค้า บริษัท เบนเมเยอร์ จำกัด
17. เอทานอล (Ethanol: C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) 95 เปอร์เซ็นต์ เกรดการค้า องค์การสุรา กรมสรรพสามิต

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ PE Wax

สมบัติ	ค่าที่ได้
ความหนืด (Viscosity) ที่ 140 °C	400 ± 50 cPs
ความหนาแน่น (Density)	0.92 ± 0.01 g/cm <sup>3</sup>
Penetration Hardness	Max. 5 d.mm
ค่าอุณหภูมิอ่อนตัว (Softening Point)	107 ± 3 °C

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ OPE Wax

สมบัติ	ค่าที่ได้
ความแข็ง (Hardness) ที่ 25 °C (77 °F)	3-6 d.mm
สี (Color)	150 Klett Max
ค่าความเป็นกรด (Acid Number)	14-17 mg KOH/g
ขนาด (Size)	98% minus 12 mesh (1410 microns)
จุดหยด (Drop point), Mettler	101 °C (214 °F)
ความหนาแน่น (Density)	0.93 g/cc
ความหนืด (Viscosity) ที่ 140 °C Brookfield	200 cps
ลักษณะของผลิตภัณฑ์ (Product form)	ผง (powder)
ความหนาแน่นรวม (Bulk density)	485 kg/m <sup>3</sup> (30 lb/ft <sup>3</sup> )

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ PEG 4000

สมบัติ	ค่าที่ได้
ช่วงการแข็งตัว, °C (Congealing range)	54-58
ค่าไฮดรอกซิล, mgKOH/g (Hydroxyl value)	30-36
ความชื้น, %w/w (Moisture)	Max 0.5
น้ำหนักมวลโมเลกุล (Molecular weight)	3,800-4,000
pH (5% aq. Sol ที่ 27 °C)	4.5-7.5
ความสามารถการละลาย	ละลายในน้ำ
ความหนืด ที่ 98.9 °C (Viscosity)	76-110
ค่าความเป็นกรด, % ของ CH <sub>3</sub> COOH (Acidity)	Max 0.5
สารหนู, ppm (Arsenic)	Max 3
โลหะหนัก, ppm (Heavy metal)	Max 5
EO content, %	Max 0.01
การระเหยสารอินทรีย์ที่ไม่บริสุทธิ์	ใช้เทคนิค GLC

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของ Si-69

สมบัติ	ค่าที่ได้
จุดหลอมเหลว (Melting point)	80 °C
จุดวาบไฟ (Flash point)	>100 °C
อุณหภูมิที่ติดไฟ (Ignition temperature)	240 °C
ความดันไอ (Vapour pressure) ที่ 20 °C	1 hPa
ความหนาแน่น (Density) ที่ 20 °C	1.1 g/cm <sup>3</sup>
ความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility)	ไม่ละลาย

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. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้อานหมุน (Moving Die Rheometer: MDR) รุ่น II F 150 บริษัท นิซีโกโซวจิ จำกัด
4. เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่น SMV-201 บริษัท ชิมุดซุ จำกัด
5. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM) รุ่น LR 5K บริษัท ลอยด์อินสทรูเมนต์ จำกัด
6. เครื่องวัดความแข็งแรงกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester) รุ่น SE-104DC บริษัท เอทีเอส พาร์เอส พี เอ จำกัด
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น S-3400N บริษัท ฮีทาคิ ไฮเทคโนโลยี ยุโรป จีเอ็มบีเอช จำกัด
8. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) รุ่น Mastersizer 3000 บริษัท มาลเวิร์น จำกัด
9. เครื่องแยกขนาด (Sieve shaker) บริษัท นัมเฮง จำกัด
10. เครื่องบดความเร็วสูงชนิดบอลมิล (High speed ball mill) บริษัท เซล่าวัลซัพพลาย จำกัด
11. แม่แบบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 152.4x152.4x2 มิลลิเมตร<sup>3</sup>
12. ตู้อบ (Hot air oven) บริษัท ไฮแอนติฟิค โพรโมชัน จำกัด
13. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analysis balance) รุ่น 404 MSCS บริษัท พรیشิสา จำกัด
14. ตู้ดูดควัน บริษัท ไฮน์ เทคโนโลยี จำกัด
15. เครื่องปั่นกวน บริษัท ไอเคเอ-เวิร์ค จำกัด
16. แผ่นให้ความร้อน (Hot plate) บริษัท ฟิชเซอร์ไฮแอนติฟิค จำกัด

เอกสารนี้ 17. อุปกรณ์เครื่องแก้ว ได้รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การเตรียมเถ้าแกลบดำ

นำเถ้าแกลบดำที่ได้มาจากโรงงานไฟฟ้าชีวมวลมาผ่านตะแกรงกรองจำนวน 1 ชั้น เพื่อให้ได้เถ้าแกลบดำขนาดเล็กกว่า 250 เมช โดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาด และอบเถ้าแกลบดำ ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 เครื่องแยกขนาด

#### 3.4.2 การบดละเอียดเถ้าแกลบดำ

นำเถ้าแกลบดำขนาดอนุภาคเล็กกว่า 250 เมช มาบดละเอียดด้วยเครื่องบดความเร็วสูงชนิดบอลมิล โดยใช้เถ้าแกลบดำ 200 กรัม น้ำปราศจากไอออน 400 กรัม และลูกบด 450 กรัม ในหม้อบดขนาดบรรจุ 1000 ซีซี ทำการบดที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นนำเถ้าแกลบดำที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 เครื่องบดความเร็วสูงชนิดบอลมิล

#### 3.4.3 การเตรียมเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วยแวกซ์

1. ละลายแวกซ์ในตัวทำละลายไซลีนความเข้มข้นประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิประมาณ 80-140 °C
2. เทเถ้าแกลบดำลงในสารละลายผสมในข้อที่ 3.4.3 ซ้อย่อย 1 แล้วทำการปั่นกวนให้เข้ากัน ด้วยเครื่องปั่นกวนที่ความเร็วประมาณ 600 รอบต่อนาที เวลาประมาณ 5 นาที

3. นำเข้าเคลือบดำที่เคลือบด้วยแว็กซ์แล้วตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดควันเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อระเหยกลิ่นของตัวทำละลายไซลีนออก
4. นำเข้าเคลือบดำไปอบในตู้อบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 °C
5. นำเข้าเคลือบดำมาบดด้วยครกบดสารเพื่อให้เข้าเคลือบดำไม่จับตัวกันเป็นก้อน

#### 3.4.4 การเตรียมเข้าเคลือบดำที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

1. นำสารคู่ควบไซเลน Si-69 ปริมาณ 3 กรัม ละลายในเอทานอล 50 มิลลิลิตร
2. ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
3. นำเข้าเคลือบดำเทลงในภาชนะที่มีสารละลายผสมของ Si-69 และเอทานอล
4. ทำการปั่นกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
5. นำเข้าเคลือบดำมาอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อทำการระเหยตัวทำละลายออกจากเข้าเคลือบดำ

#### 3.4.5 การตรวจสอบและวิเคราะห์เข้าเคลือบดำ

1. วิเคราะห์หาขนาดอนุภาคเข้าเคลือบดำด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค
2. วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเข้าเคลือบดำด้วย SEM

#### 3.4.6 การเตรียมยางผสมสูตร

1. ชั่งยางธรรมชาติ และสารเคมีต่างๆ ตามตารางที่ 3.5
2. ทำการผสมยางด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง โดยใส่สารตัวเติม และสารเติมแต่งต่างๆ ยกเว้นสารเชื่อมโยงกำมะถัน และสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง โดยจะค่อยๆ ใส่สารระหว่างลูกกลิ้ง ทำการผสมโดยการกรีด และพับยาง (Cut and fold) เพื่อให้เกิดการผสมที่ดี และใช้เวลาในการผสมประมาณ 15 นาที
3. ทำการเติมสารเชื่อมโยงกำมะถัน และสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (MBS, TMTM และ MBTS) ลงในยางผสมสูตร โดยจะค่อยๆ ใส่ระหว่างลูกกลิ้ง ทำการผสมโดยการกรีด และพับยาง ใช้เวลาประมาณ 5 นาที แล้วรีดยางออกเป็นแผ่นหนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ

สูตรที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9
สารเคมี	ปริมาณ (phr)								
NR (STR 5 L)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
BRHA	60	60	60	60	60	60	60	60	60
PEG 4000*	-	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
Si-69**	-	-	-	-	-	-	-	3	-
OPE Wax***	-	1	2	3	-	-	-	-	-
PE Wax****	-	-	-	-	1	2	3	-	-
Wingstay® L	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
White oil	8	8	8	8	8	8	8	8	8
ZnO	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Sulfur	1.6	1.6	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	0.8	0.8
TMTM	0.25	0.25	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	0.5	0.5

- หมายเหตุ - PEG 4000\* ที่ 2.4 phr (4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเส้นใย)
- Si-69\*\* ที่ 3 phr (5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเส้นใย)
- OPE Wax\*\*\* ที่ 1, 2 และ 3 phr (1.67, 3.33 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเส้นใย)
- PE Wax\*\*\*\* ที่ 1, 2 และ 3 phr (1.67, 3.33 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเส้นใย)

### 3.5 การทดสอบยาง

สมบัติของยางโดยทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ดังนี้

#### 3.5.1 การหาค่าความหนืดแบบมูนี (Mooney viscosity)

นำแผ่นยางที่ได้จากการเตรียมยางผสมสูตร 3.4.6 ข้อย่อย 2 ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 5x5 เซนติเมตร<sup>2</sup> จำนวน 2 แผ่น เพื่อใช้วัดหาค่าความหนืดแบบมูนี โดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบมูนี กำหนดอุณหภูมิวัดที่ 100 °C โดยหาค่าความหนืดมูนี ML 1+4 (100 °C) ของยางผสมสูตร

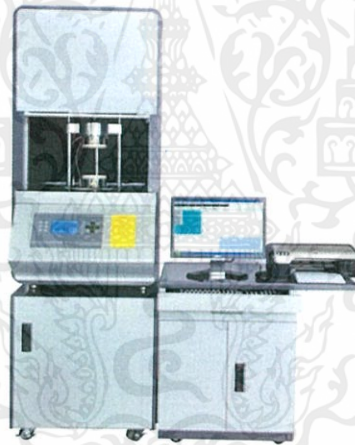
หมายเหตุ ML 1+4 (100 °C) หมายถึงความหนืดมูนีโดยใช้แกนหมุนขนาดใหญ่ (L คือ Large moter) ทำการให้ความร้อนก่อน 1 นาที (1 คือ Preheat time 1 นาที) และทำการวัดค่าความหนืดมูนีเมื่อเวลาผ่านไป 4 นาที โดยวัดค่าความหนืดมูนีที่อุณหภูมิ 100 °C ค่าความหนืดมูนีไม่มีหน่วยที่สวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความหนืดมินนี่

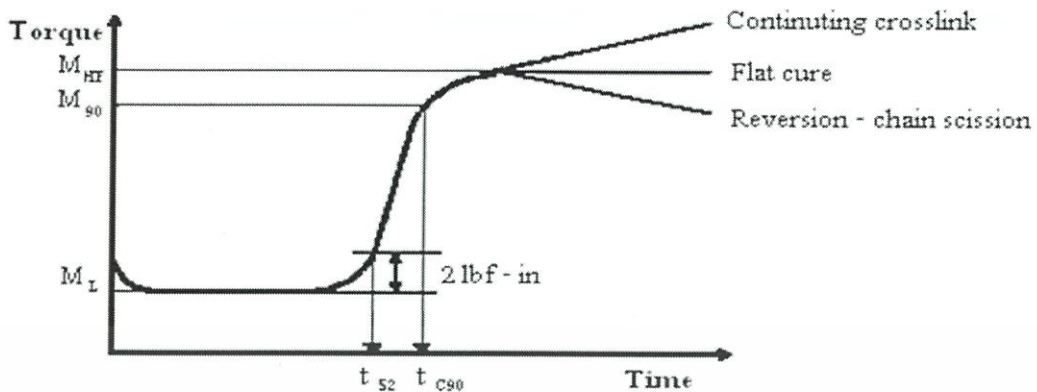
### 3.5.2 การหาเวลาเชื่อมโยงอย่างผสมสูตร (Cure time)

ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้จากการเตรียมยางผสมสูตรในหัวข้อ 3.4.6 ซ้อย่อย 3 เป็นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ  $2.5 \times 2.5$  เซนติเมตร<sup>2</sup> แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จางหนุ่น ที่อุณหภูมิ  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  เพื่อหาเวลาเชื่อมโยงยาง และอัตราเร็วในการเชื่อมโยงของยางแต่ละสูตร ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.2



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จางหนุ่น [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางผสมสูตรแสดงเวลาเชื่อมโยง ( $t_{c(90)}$ ) และเวลาเริ่มเชื่อมโยงยาง ( $t_{s2}$ ) [23]

- เมื่อ  $M_L$  คือ ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)  
 $M_{HF}$  คือ ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)  
 $M_{90}$  คือ ค่าแรงบิดที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของการเชื่อมโยง 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 เปอร์เซ็นต์ (Optimum time)

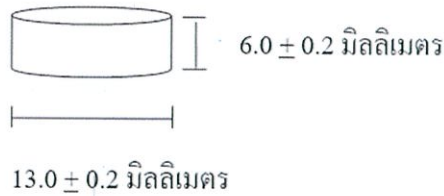
CRI (Cure Rate Index) คือ ดัชนีอัตราการเชื่อมโยง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Cure Rate Index (CRI)} = \frac{100}{t_{c90} - t_{s2}} \quad (3.2)$$

### 3.5.3 การขึ้นรูปยางเชื่อมโยง

1. ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้จากการเตรียมยางผสมสูตรในหัวข้อ 3.4.6 ใส่แม่แบบสำหรับอัดเป็นแผ่นขนาด  $152.4 \times 152.4 \times 2$  มิลลิเมตร<sup>3</sup> แล้วนำแม่แบบใส่เครื่องกดอัดขึ้นรูป เพื่อทำการขึ้นรูปโดยทำการกดอัดที่อุณหภูมิ  $150^\circ\text{C}$  เป็นเวลาเท่ากับ  $t_{c(90)} \times 1.2$

2. นำยางผสมสูตรที่เตรียมได้จากการเตรียมยางผสมสูตร 3.4.6 มาใส่ในแม่แบบสำหรับขึ้นงานที่ใช้ทดสอบการเสีรูปลถาวรหลังการกดอัด หลังจากนั้นนำแม่แบบใส่เครื่องกดอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $150^\circ\text{C}$  เป็นเวลา  $t_{c(90)} + 2$  นาที (เนื่องจากแม่แบบที่ใช้มีความหนาของเหล็กที่หนามากจึงจำเป็นต้องเพิ่มเวลาให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์) ซึ่งขึ้นงานทดสอบที่ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกความหนา  $6.0 \pm 0.2$  มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง  $13.0 \pm 0.2$  มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะชิ้นทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด [24]

### 3.5.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยง

#### 3.5.4.1. การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ตามมาตรฐาน ASTM D 412 [25] โดยนำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.3 ซ้อย่อย 1 มาตัดเป็นรูปร่างดัมเบลล์ (Dumbbell shape) กำหนดสถานะเครื่องทดสอบ ดังนี้

ความเร็วในการดึงยืด	500	มิลลิเมตรต่อนาที
ความยาวเกจ หรือความยาวเริ่มต้น (Gauge length)	35	มิลลิเมตร
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	1	กิโลนิวตัน
จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ	6	ชิ้นงาน



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ [26]

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ความแข็งแรงดึง เท่ากับ ความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุที่รับได้เมื่อให้แรงดึง (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาได้จากสมการที่ 3.3

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

เมื่อ  $F$  คือ แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดสูงสุด (N)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ( $\text{mm}^2$ )

- เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด หาได้จากสมการที่ 3.4

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด} = [(l - l_0) / l_0] \times 100 \quad (3.4)$$

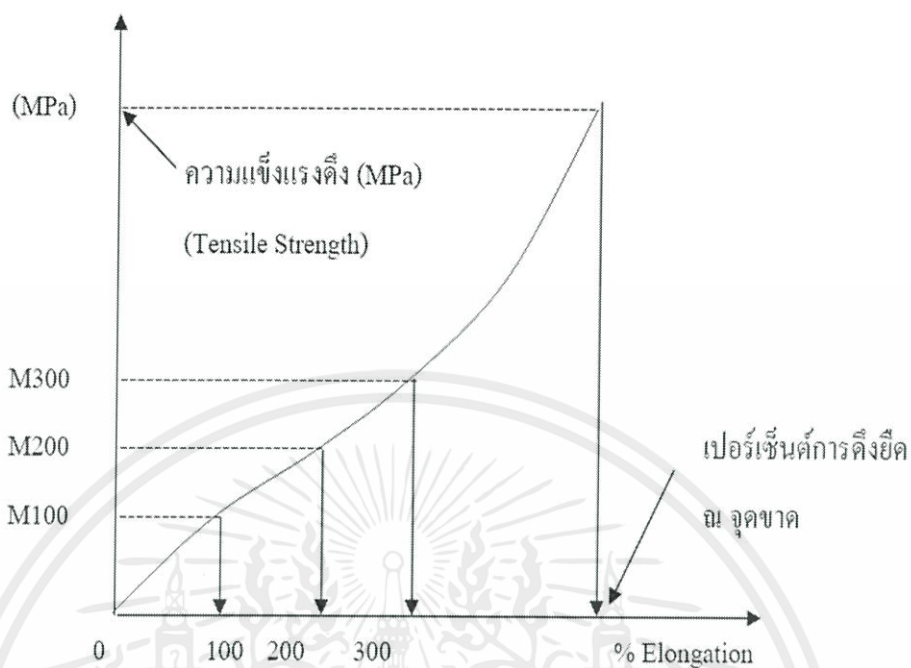
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีที่คัดลอกเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสาร

เมื่อ  $l$  คือ ความยาวสุดท้าย ณ จุดขาดของชิ้นงาน (mm)

$l_0$  คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm) หรือความยาวเกจ

- ค่ามอดุลัสของยาง เป็นค่าความเค้น (stress) ที่เปอร์เซ็นต์ความเครียดหนึ่งๆ เช่น M100 คือ ความเค้นที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดัดยืด ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างกราฟความเค้น - ความเครียด (Stress - Strain curve) ของการดึงตัวอย่าง [12]

#### 3.5.4.2 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear test)

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ตามมาตรฐาน ASTM D624 [27] โดยนำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.3 ซ้อย่อย 1 มาตัดเป็นรูปปีกนก โดยกำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

ความเร็วในการดัดยืด	500 มิลลิเมตรต่อนาที
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	1 กิโลนิวตัน
จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ	6 ชิ้น

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าความแข็งแรงฉีกขาด โดยหาได้จากสมการ

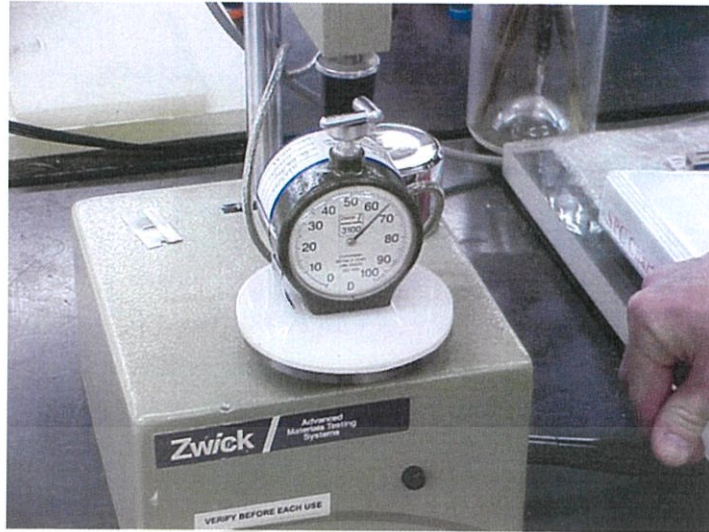
$$\text{ความแข็งแรงฉีกขาด} = F/t \quad (3.5)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้สูงสุดในการทำให้ชิ้นงานเสียหาย (N)

t คือ ความหนาของชิ้นงานโดยเฉลี่ย (mm)

#### 3.5.4.3 การทดสอบความแข็งกด (Hardness test)

นำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.3 ซ้อย่อย 1 มาทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ชนิด Shore A ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D 2240 [28] ซึ่งอ่านค่าความแข็งกดได้โดยตรงจากเครื่อง จากการกดที่ตัวอย่างหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร สามารถซ้อนชั้นทดสอบเพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการ ค่าความแข็งกดอ่านได้หลังจากกดเป็นระยะเวลา 5 วินาที ใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 3 ชิ้นในแต่ละสูตร โดยทำการทดสอบ 10 ครั้ง คือ 10 จุดในการกดต่อชิ้นงานทดสอบ

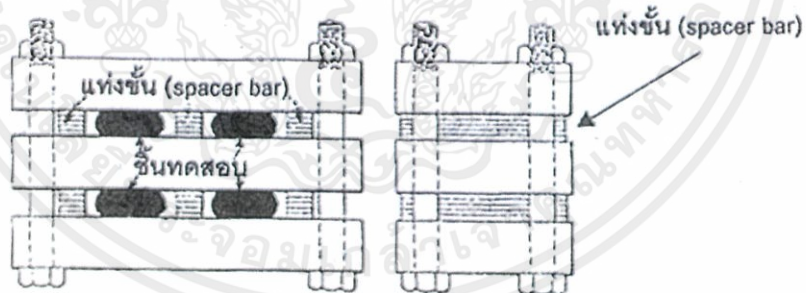


รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความแข็งแรงแบบดิวโรมิเตอร์ [29]

#### 3.5.4.4. การทดสอบการเสีรูปลาวรรหลังการกดอัด (Compression set)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 395 (Test Method B) [24]

นำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.3 ซ้อย่อย 2 มาวัดความหนาของชิ้นงานทดสอบ นำไปวางระหว่างแผ่นเหล็กทั้งสองของอุปกรณ์สำหรับทดสอบการอัดที่มีแท่งเหล็กกั้น (Spacer bars) เพื่อกำหนดระยะในการอัดยาง อัดชิ้นทดสอบให้มีความหนาเท่ากับแท่งเหล็กกั้น ซึ่งความหนาจะลดลงจากเดิมประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ต่อมานำอุปกรณ์สำหรับทดสอบการอัดที่มีชิ้นทดสอบอยู่ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.10 เข้าไปในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 70 °C นาน 22 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดนำชิ้นงานทดสอบออกจากอุปกรณ์ทดสอบมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที วัดความหนาของชิ้นทดสอบ โดยทดสอบ 3 ชิ้นต่อ 1 สูตร คำนวณผลดังสมการที่ 3.6



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการเสีรูปลาวรรหลังการกดอัด [30]

การคำนวณ

$$\%C_B = [(t_0 - t_1) / (t_0 - t_n)] \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $C_B$  คือ การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (%)

$t_0$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบเริ่มต้น (mm)

$t_1$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังอบ (mm)

$t_n$  คือ ความหนาของแท่งเหล็กกั้น (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น มิใช่เพื่อให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการเผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.5 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

นำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.3 ซ้อย่อย 1 ไปแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 30 นาที แล้วหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) โดยระวังไม่ไปสัมผัสผิวหน้าที่เกิดการแตกหักชิ้นงาน เพื่อให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของยางได้ชัดเจน จากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมได้นำไปเคลือบทองคำ แล้วทำการศึกษาชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาพื้นผิว รูปร่าง และขนาด รวมทั้งการกระจายตัวของเถ้ากลบดำ และแว็กซ์ในยางเชื่อมโยง

### 3.5.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D570 [31]

นำตัวอย่างแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.3 ซ้อย่อย 1 เตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบ โดยนำมาตัดให้มีขนาด  $5.5 \times 5.5$  เซนติเมตร<sup>2</sup> สطرละ 4 ตัวอย่าง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนัก ( $W_1$ ) ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง แล้วนำไปแช่น้ำในภาชนะที่เตรียมไว้ ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุกๆ 24 ชั่วโมง โดยการนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ และใช้ผ้าซับน้ำที่เคลือบอยู่บนผิวของตัวอย่างออกจนหมด ทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างทันที ซึ่งน้ำหนักที่วัดได้นี้จะเป็นน้ำหนักของตัวอย่างในสภาพอิ่มตัวแห้ง ( $W_2$ ) จากนั้นหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำได้จากสมการ

$$\text{ร้อยละของการดูดซึมน้ำ} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ  $W_1$  คือ น้ำหนักวัสดุอบแห้งในอากาศ (g)  
 $W_2$  คือ น้ำหนักวัสดุในสภาพอิ่มตัวแห้ง (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการนำเอาแก้วเคลือบมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยการนำเอาแก้วเคลือบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลมาผ่านตะแกรงร่อนขนาด 250 เมช และทำการบดละเอียดนาน 1 และ 3 ชั่วโมง จากนั้นนำเอาแก้วเคลือบไปผสมในยางธรรมชาติด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง การศึกษาโครงการพิเศษนี้แบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่

- ผลของการปรับปรุงผิวแก้วเคลือบด้วย PE Wax กับ OPE Wax ที่ 3 phr และ PEG 4000 ที่ 2.4 phr เทียบกับไม่ปรับปรุงพื้นผิว
- ผลของปริมาณ PE Wax กับ OPE Wax ที่ 1, 2 และ 3 phr
- ผลของขนาดแก้วเคลือบที่มีขนาดเล็กกว่า 250 เมช และแก้วเคลือบตาบดละเอียด
- ผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบด้วย OPE Wax กับ PEG 4000 เทียบกับ Si-69 กับ PEG 4000 ที่ 3 และ 2.4 phr ตามลำดับ

ซึ่งทำการศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง สมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา และการดูดซึมน้ำด้วยของสูตรที่ใช้ในโครงการพิเศษแสดงดังตารางที่ 4.1

#### 4.1 ผลของการปรับปรุงผิวแก้วเคลือบด้วย PE Wax กับ OPE Wax ที่ 3 phr และ PEG 4000 ที่ 2.4 phr

แก้วเคลือบมีปริมาณซิลิกาประมาณ 74 เปอร์เซ็นต์ [4] และมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่บนพื้นผิว ทำให้แก้วเคลือบมีความมีขี้สูง การกระจายตัว และความเข้ากันได้ของแก้วเคลือบกับยางธรรมชาตินั้นจึงต่ำ การเลือกใช้แว็กซ์มาปรับปรุงพื้นผิวของแก้วเคลือบนั้นจะช่วยทำให้แก้วเคลือบกระจายตัว และเข้ากับยางธรรมชาติได้ดีมากขึ้นโดยอาศัยแรงระหว่างขั้ว (Dipole-dipole interaction) สำหรับแก้วเคลือบที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย PE Wax นั้นจะมีสายโซ่โมเลกุลของ PE Wax บางส่วนแทรกตัวเข้าไปอยู่ในรูพรุนของแก้วเคลือบ และอีกส่วนหนึ่งจะเกิดการเกี่ยวพันกับสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ ส่วน OPE Wax มีโครงสร้าง 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีขี้ (บริเวณที่เกิดออกซิไดซ์) และส่วนที่ไม่มีขี้ (สายโซ่โมเลกุลของ PE) ส่วนที่มีขี้จะเกิดแรงระหว่างขั้วขึ้นกับหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของแก้วเคลือบ และส่วนที่ไม่มีขี้จะเกิดแรงระหว่างขั้วกับยางธรรมชาติ การปรับปรุงพื้นผิวด้วย PEG 4000 นั้นเพื่อป้องกันสารตัวเติมที่มีขี้ (แก้วเคลือบ) ดูดซับสารเคมีเชื่อมโยงที่มีขี้ เช่น สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง และ ZnO

โครงการพิเศษนี้ทำการเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบด้วยแว็กซ์ต่างชนิดกัน ที่มีผลต่อพฤติกรรมเชื่อมโยงของยางผสมสูตร สมบัติเชิงกล และสมบัติการดูดซึมน้ำของยางผสมสูตรโดยควบคุมปริมาณ BRHA ที่ 60 phr

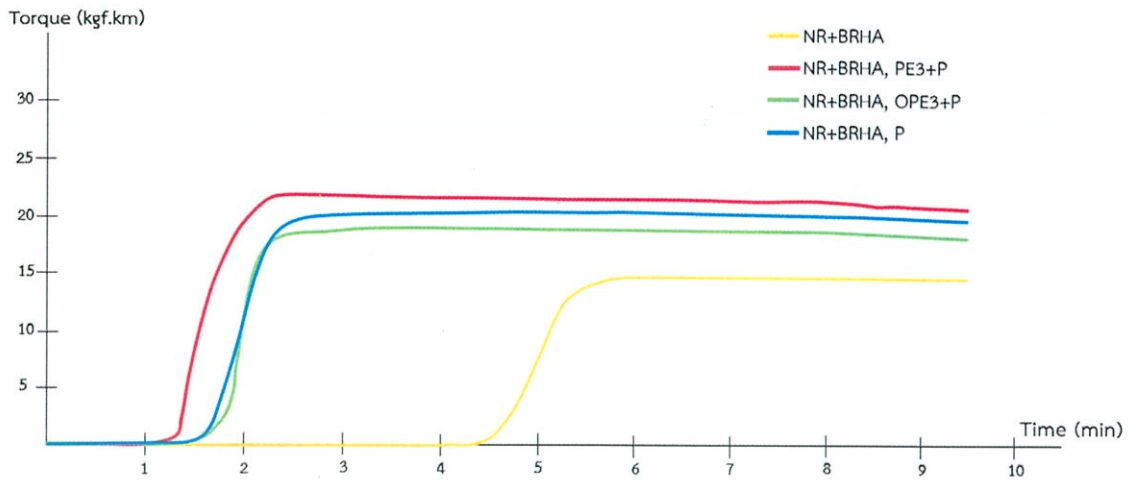
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อที่ใช้ในโครงการพิเศษ

อักษรย่อ	คำอธิบายอักษรย่อ
NR	ยางธรรมชาติ
BRHA	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการแยกขนาดเล็กลงกว่า 250 เมช (41.1 $\mu\text{m}$ )
BRHA-G1	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (4.97 $\mu\text{m}$ )
BRHA-G3	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (4.72 $\mu\text{m}$ )
P	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย PEG 4000 ในปริมาณ 2.4 phr
PE1+P	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย PE Wax และ PEG 4000 ในปริมาณ 1 และ 2.4 phr
PE2+P	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย PE Wax และ PEG 4000 ในปริมาณ 2 และ 2.4 phr
PE3+P	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย PE Wax และ PEG 4000 ในปริมาณ 3 และ 2.4 phr
OPE1+P	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย OPE Wax และ PEG 4000 ในปริมาณ 1 และ 2.4 phr
OPE2+P	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย OPE Wax และ PEG 4000 ในปริมาณ 2 และ 2.4 phr
OPE3+P	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย OPE Wax และ PEG 4000 ในปริมาณ 3 และ 2.4 phr
Si-69+P	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Si-69 และ PEG 4000 ในปริมาณ 3 และ 2.4 phr

#### 4.1.1 พฤติกรรมเชื่อมโยงอย่างผสมสูตร

การศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรทดสอบด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน ที่อุณหภูมิ 150 °C โดยหาค่า  $t_{52}$ ,  $t_{90}$ , CRI (Cure Rate Index) และหาค่าความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 (100 °C)) โดยเครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ จากรูปที่ 4.1 พบว่าชนิดเร็กซ์ส่งผลต่อเวลาการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรโดยยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย PE Wax เป็นสารตัวเติมมีเวลาการเชื่อมโยงน้อยกว่ายางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย OPE Wax เล็กน้อย เนื่องจาก OPE Wax มีความเป็นขี้ผึ้งมากกว่า PE Wax จึงส่งผลให้ OPE Wax สามารถดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้มากกว่า ทำให้ปริมาณสารเชื่อมโยงที่มีในระบบลดลง การเชื่อมโยงจึงเกิดได้ช้ากว่า แต่การปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG 4000 จะทำให้เวลาเชื่อมโยงลดลงเนื่องจาก PEG 4000 จะช่วยลดความมีขี้ผึ้งของเถ้าแกลบดำ การดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงหรือสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยงจะลดลง ทำให้เกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น ส่วนสูตรที่ไม่ทำการปรับปรุงพื้นผิวนั้น เถ้าแกลบดำจะมีรูพรุนอยู่มาก และพื้นผิวมีความเป็นขี้ผึ้งสูง จึงดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้มาก ทำให้เวลาเชื่อมโยงมากขึ้น จากตารางที่ 4.2 เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเร็กซ์ และ PEG 4000 ไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดมูนนี่อย่างมีนัยสำคัญถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเก่าเคลบดำด้วยแว็กซ์ 2 ชนิด และ/หรือ PEG 4000 เทียบกับไม่ปรับปรุงพื้นผิว

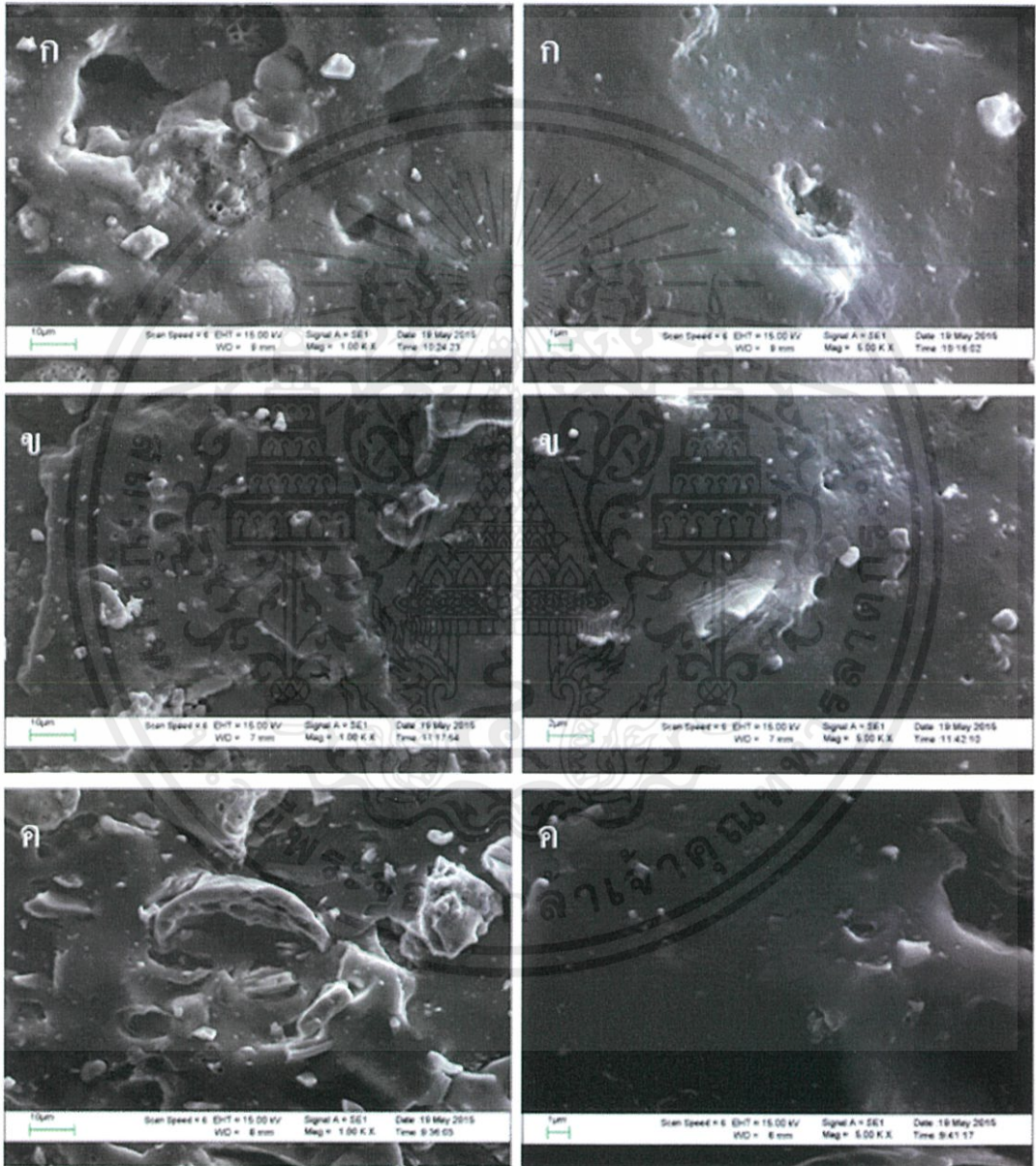
ตารางที่ 4.2 ผลของพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร และความหนืดมุนนี้เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเก่าเคลบดำด้วยแว็กซ์ 2 ชนิด และ/หรือ PEG 4000 เทียบกับไม่ปรับปรุงพื้นผิว

No.	Rubber formula	Mooney ML 1+4 (100 °C)	Torque (kgf.cm)		Scorch time	Cure time	Cure Rate Index
			M <sub>L</sub>	M <sub>H</sub>	t <sub>s2</sub> (min.sec)	t <sub>c90</sub> (min.sec)	CRI (min <sup>-1</sup> )
1	NR+BRHA	20.2	0	15	4.11	5.18	93.5
2	NR+BRHA, PE3+P	14.3	0	22	1.18	2.00	122.0
3	NR+BRHA, OPE3+P	17.7	0	19	1.36	2.12	131.6
4	NR+BRHA, P	14.2	0	20	1.36	2.15	126.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตร

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่า พบว่ายางผสมสูตรที่สารตัวเติมผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแวกซ์ และ PEG 4000 นั้นมีการกระจายตัวของสารตัวเติมดีกว่า เนื่องจากแวกซ์ทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิตทำให้อนุภาคของสารตัวเติมกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า และพบว่าเมื่อช่องว่างเกิดขึ้นเนื่องจากการหลุดออกของอนุภาคแก้วเคลือบดำ ดังรูปที่ 4.2 (ก) (ข) และ (ค) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตร ภาพซ้ายที่กำลังขยาย 1,000 เท่า และภาพขวาที่กำลังขยาย 5,000 เท่า; (ก) NR+BRHA (ข) NR+BRHA, PE3+P และ (ค) NR+BRHA, OPE3+P

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยสงวนสิทธิ์ในทรัพย์สินทางปัญญา  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 (ก) คืออย่างผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติม ช่องว่างที่เกิดขึ้นเกิดจากความแตกต่างระหว่างสภาพผิวของเถ้าแกลบดำกับยางธรรมชาติ โดยเถ้าแกลบดำมีความหยาบกว่ายางธรรมชาติทำให้เข้ากันได้ไม่สนิท

จากรูปที่ 4.2 (ข) และ (ค) คืออย่างผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแว็กซ์ และ PEG 4000 โดยเมื่อใช้ OPE Wax คาดว่าวัฏภาคระหว่างเถ้าแกลบดำกับแว็กซ์ยึดติดด้วยแรงระหว่างขั้ว และวัฏภาคระหว่างยางธรรมชาติกับแว็กซ์ยึดติดกันด้วยแรงเชิงกล (การเกี่ยวพันของสายโซ่) ส่วนการใช้ PE Wax วัฏภาคของแว็กซ์กับยางธรรมชาติ และแว็กซ์กับเถ้าแกลบดำจะยึดติดกันด้วยแรงเชิงกล ดังนั้นระหว่างวัฏภาคจึงไม่แข็งแรงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคเถ้าแกลบดำกับยางธรรมชาติมากขึ้น

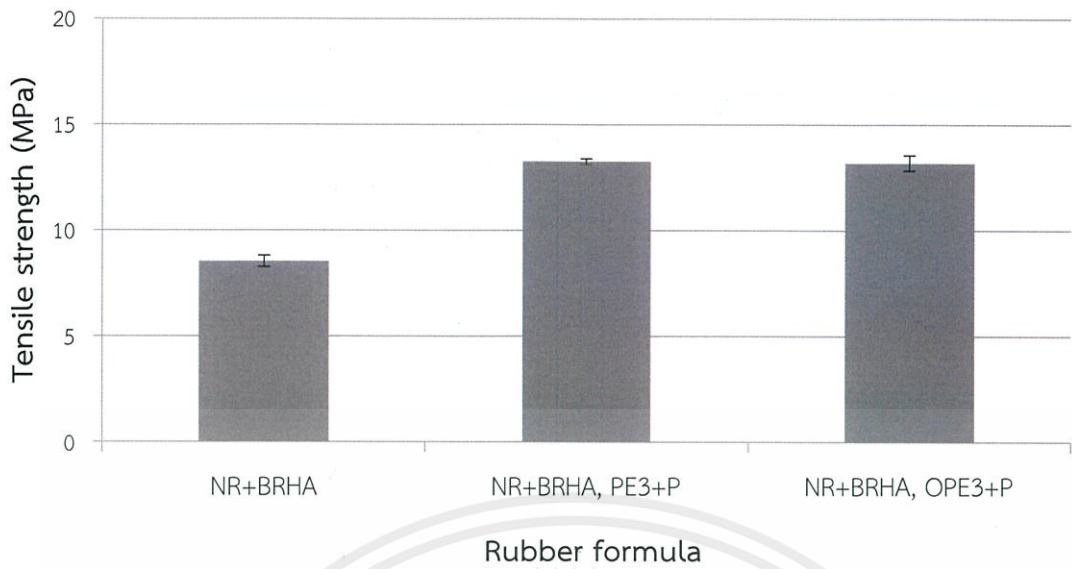
#### 4.1.3 สมบัติเชิงกลของผสมสูตร

รูปที่ 4.3-4.8 จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของอย่างผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำขนาดเล็กกว่า 250 เมช เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 60 phr พบว่าเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วยแว็กซ์ จะทำให้มีสมบัติเชิงกลสูงขึ้นโดยค่าความแข็งแรงดึงของอย่างผสมสูตรที่ทำการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PE Wax มีค่าเพิ่มขึ้นจากสูตรที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าใกล้เคียงกับสูตรที่ผ่านการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย OPE Wax ส่วนค่าความแข็งแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นจากสูตรที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และมากกว่าสูตรที่ผ่านการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย OPE Wax เล็กน้อย

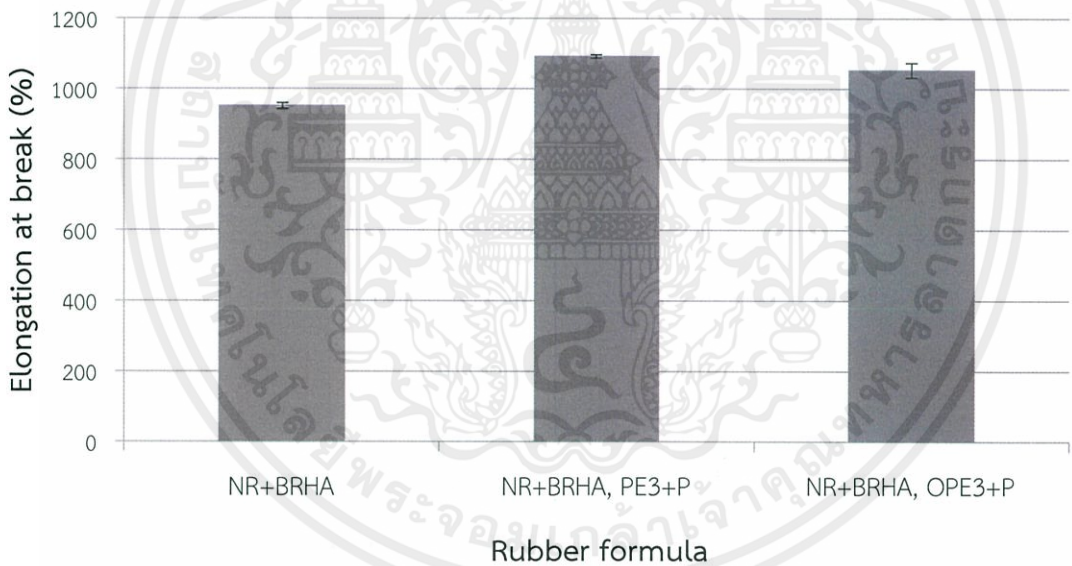
นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ค่ามอดุลัสของยางที่ 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด และค่าความแข็งแรงดของอย่างผสมสูตรที่ทำการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PE Wax มีค่ามากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจาก PE Wax ช่วยทำให้เถ้าแกลบดำเข้ากับยางธรรมชาติได้ดีขึ้น และช่วยให้อนุภาคของเถ้าแกลบดำกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น นอกจากนี้ PE Wax ยังช่วยปกคลุมพื้นผิวของเถ้าแกลบดำ ทำให้ความเป็นขั้วของอนุภาคเถ้าแกลบดำลดลง การดูดซับสารเร่งปฏิกิริยา-เชื่อมโยงของเถ้าแกลบดำจึงน้อยลง ทำให้การเชื่อมโยงสมบูรณ์ขึ้น สมบัติเชิงกลของอย่างผสมสูตรจึงดีขึ้น ส่วนอย่างผสมสูตรที่ผ่านการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย OPE Wax ให้สมบัติเชิงกลต่ำกว่าสูตรที่ทำการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PE Wax เนื่องจาก OPE Wax มีความหยาบมากกว่า PE Wax จึงสามารถดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้มากกว่า ทำให้เกิดการเชื่อมโยงน้อยกว่า ดังนั้นสมบัติเชิงกลจึงต่ำกว่า

จากรูปที่ 4.9 ค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดของอย่างผสมสูตร สูตรที่ทำการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PE Wax มีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงได้สมบูรณ์ที่สุด เกิดโครงสร้างร่างแหสามมิติมากที่สุด โดยโครงสร้างร่างแหดังกล่าวมีหน้าที่ดึงโครงสร้างกลับสู่รูปร่างเดิมเมื่อปล่อยแรง ทำให้ไม่เกิดการเลื่อนผ่านแบบไม่กลับคืนของสายโซ่ ชิ้นงานทดสอบจึงสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

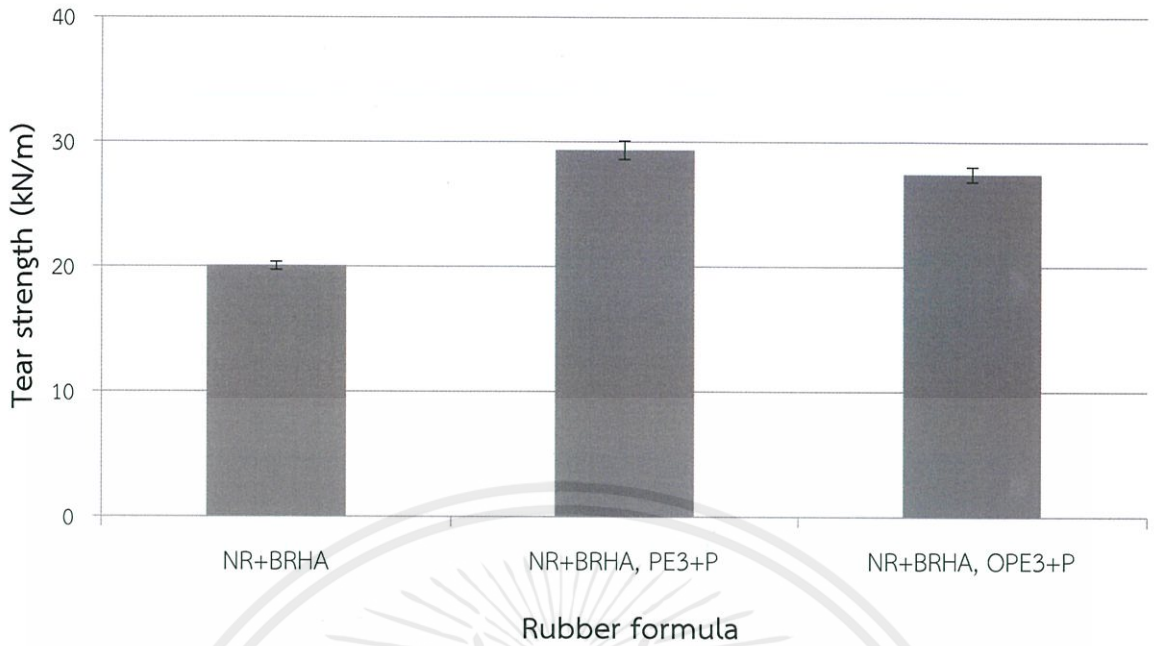


รูปที่ 4.3 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วยเร็กซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร

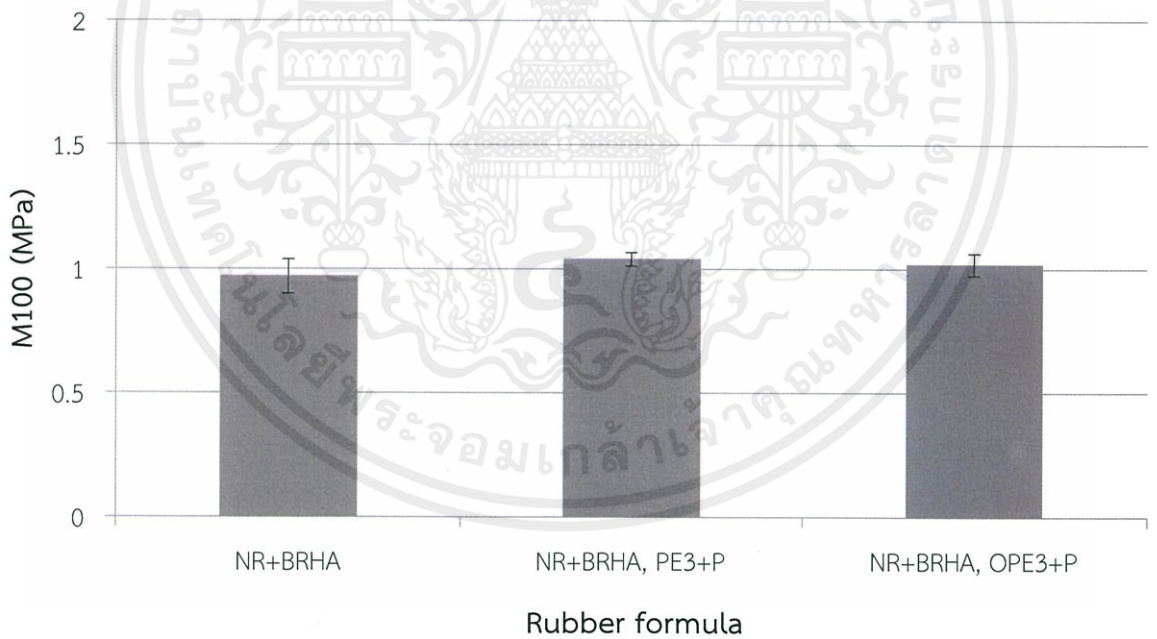


รูปที่ 4.4 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วยเร็กซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

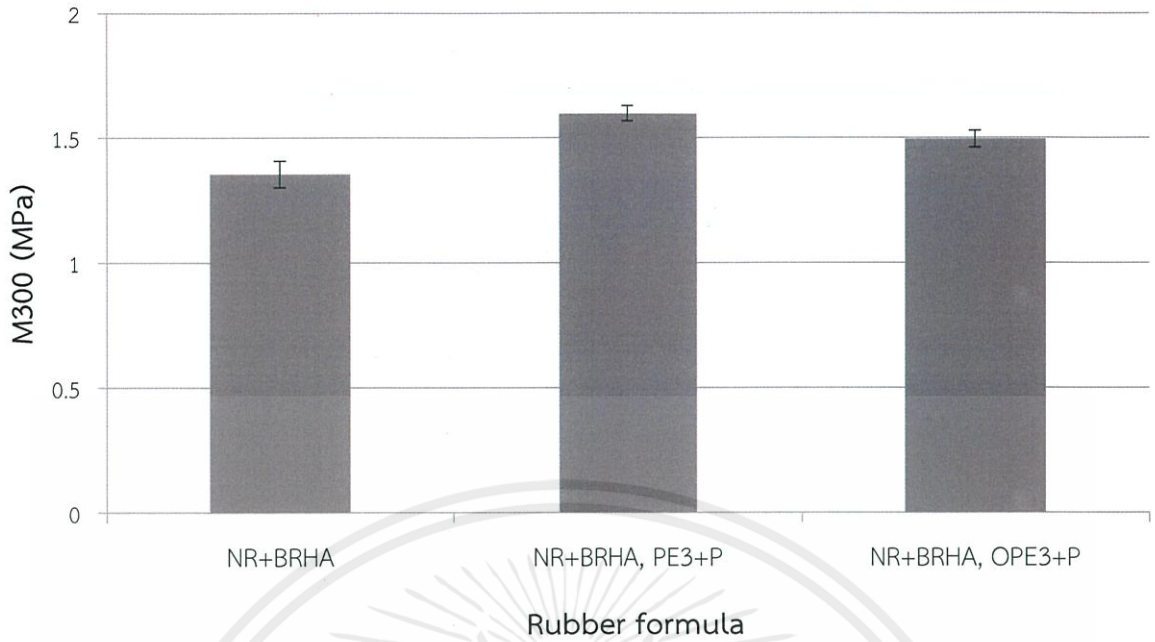


รูปที่ 4.5 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วยเร็กซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร

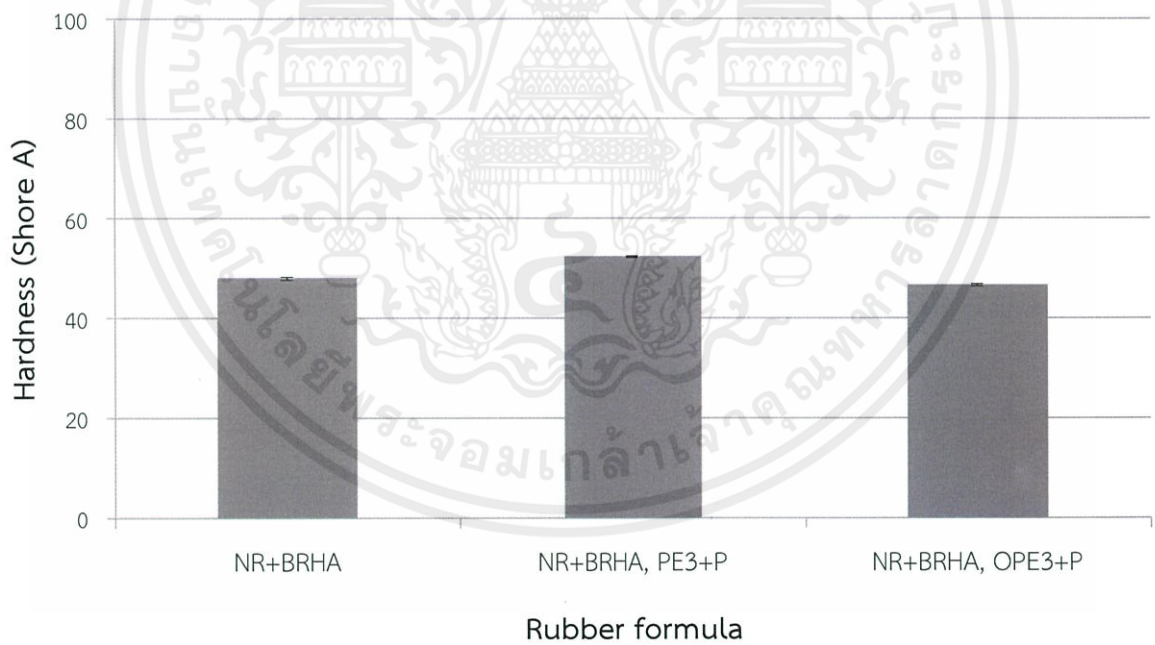


รูปที่ 4.6 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วยเร็กซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืดของยางผสมสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

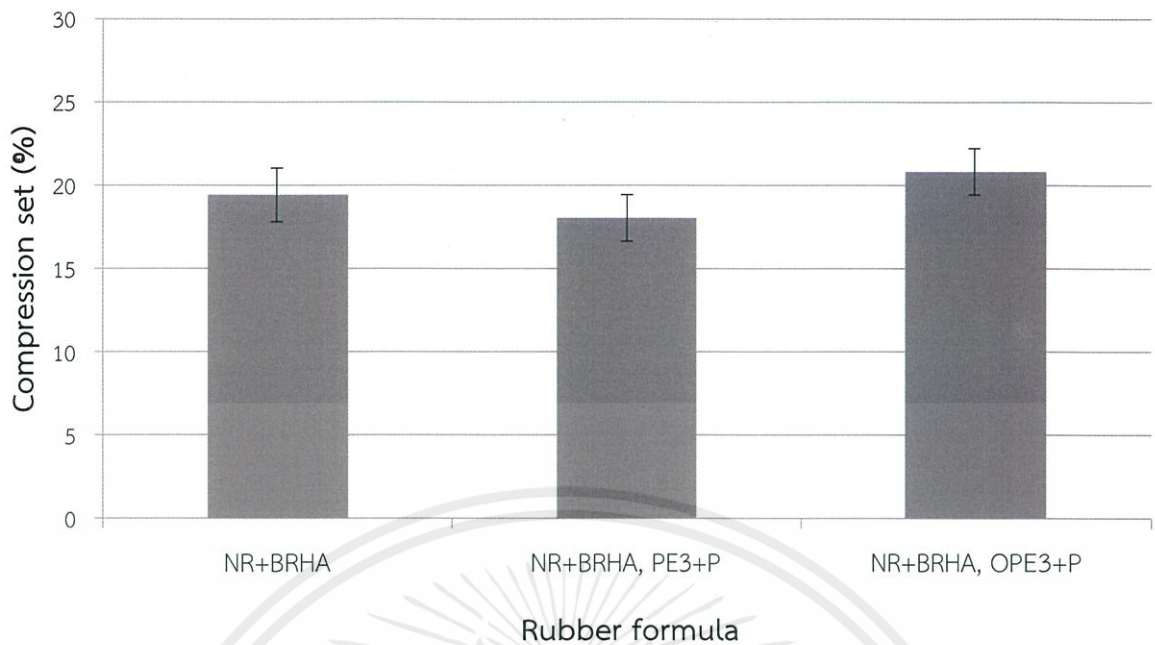


รูปที่.4.7 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วยแว็กซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 300 เปอร์เซ็นต์ดัดงัดของยางผสมสูตร



รูปที่.4.8 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วยแว็กซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

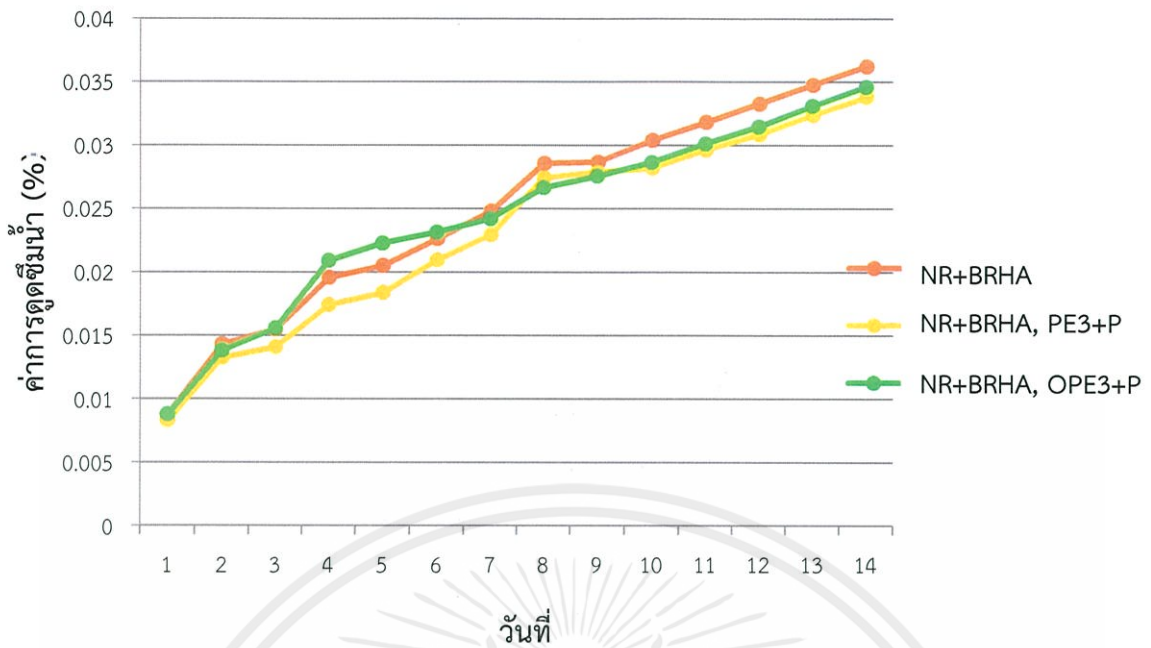


รูปที่.4.9 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วยเวกซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดของยางผสมสูตร

#### 4.1.4 สมบัติการดูดซึมน้ำของยางผสมสูตร

ค่าการดูดซึมน้ำของยางผสมสูตรเป็นผลเนื่องมาจากความมีขี้วของสารตัวเติม โดยสารตัวเติมที่มีความมีขี้วนี้ จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำจากความชื้นในอากาศ ทำให้ยางผสมสูตรมีความชื้นสูงจึงก่อให้เกิดฟองอากาศขึ้นหลังจากทำการขึ้นรูปส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร เช่น ค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงฉีกขาดจะมีค่าลดน้อยลง แต่ยางธรรมชาติไม่มีความมีขี้ว จึงไม่ส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของยางผสมสูตร การปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วยเวกซ์ส่งผลทำให้ความมีขี้วของแก้วเคลือบดำลดลง จึงทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของยางผสมสูตรที่ปรับปรุงพื้นผิวนั้นมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับยางผสมสูตรที่ไม่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำ แต่ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน เนื่องจากยางธรรมชาติไม่มีขี้ว และยางธรรมชาติสามารถห่อหุ้มแก้วเคลือบดำได้หมดรวมทั้งวัฏภาคระหว่างแก้วเคลือบดำ และยางธรรมชาติค่อนข้างแข็งแรง (แรงระหว่างขี้ว หรือแรงเชิงกล) จึงทำให้ยางผสมสูตรมีความสามารถในการดูดซึมน้ำค่อนข้างน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเก้าแกลบดำด้วยแว็กซ์ต่างชนิดที่มีต่อค่าการดูดซึมน้ำของยางผสมสูตร

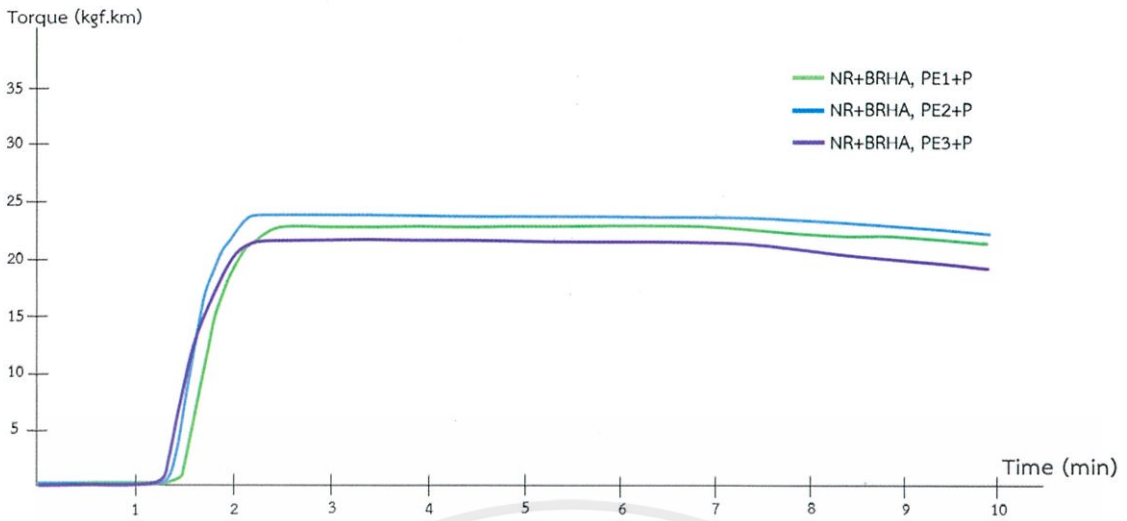
#### 4.2 ผลของปริมาณ PE Wax และ OPE Wax ที่ 1, 2 และ 3 phr

เก้าแกลบดำเป็นของเหลือจากโรงไฟฟ้าชีวมวล การนำเก้าแกลบดำมาใช้ประโยชน์เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาตินั้นจำเป็นต้องทำการปรับปรุงพื้นผิวของเก้าแกลบดำ การนำแว็กซ์มาใช้เคลือบผิวเก้าแกลบดำจะช่วยให้การกระจายตัวในยางธรรมชาติดีขึ้น และปริมาณของแว็กซ์นั้นส่งผลต่อการกระจายตัวของเก้าแกลบดำเช่นกัน ถ้าปริมาณแว็กซ์ที่ใช้เคลือบผิวมากขึ้นจะส่งผลทำให้ความชื้นของเก้าแกลบดำยิ่งน้อยลง การกระจายตัว และความเข้ากันได้ระหว่างเก้าแกลบดำกับยางธรรมชาติจะยิ่งดีขึ้น

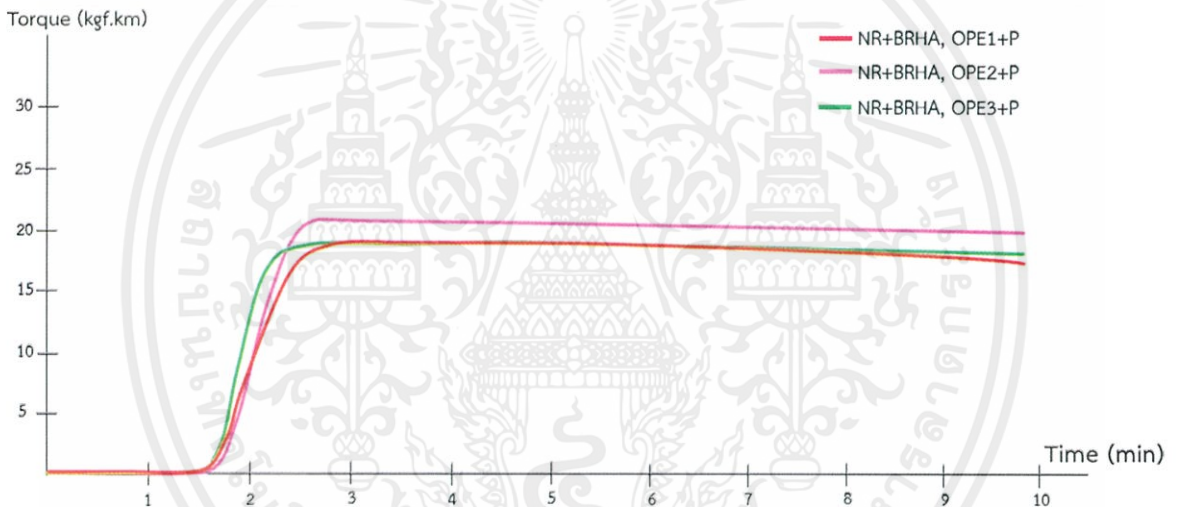
โครงการพิเศษนี้จึงทำการศึกษาหาปริมาณแว็กซ์ที่เหมาะสม และผลต่อสมบัติต่างๆ ทำการปรับปรุงพื้นผิวเก้าแกลบดำด้วย PE Wax และ OPE Wax กับ PEG 4000 โดยศึกษาปริมาณแว็กซ์ที่ 1, 2 และ 3 phr ควบคุมขนาดอนุภาคของสารตัวเติมโดยใช้เก้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดละเอียด ในปริมาณ 60 phr

##### 4.2.1 พฤติกรรมเชื่อมโยงอย่างผสมสูตร

จากรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.3 เป็นการศึกษาปริมาณแว็กซ์ที่มีผลต่อพฤติกรรมของยางผสมสูตร และค่าความหนืดมูนนี้ โดยทำการศึกษาปริมาณแว็กซ์ที่ 1, 2 และ 3 phr พบว่าปริมาณของแว็กซ์ไม่ส่งผลต่อเวลาในการเชื่อมโยง แต่ส่งผลต่อค่าความหนืดมูนนี้ เมื่อปริมาณแว็กซ์เพิ่มมากขึ้น ค่าความหนืดมูนนี้มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากแว็กซ์ช่วยทำให้เก้าแกลบดำกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น และทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) ทำให้ยางมีความหนืดลดลง จากตารางที่ 4.3 ข. ไม่ว่าจะค่าความหนืดมูนนี้ลดลงจาก 17.9 เป็น 15.0 เมื่อใช้ปริมาณแว็กซ์เท่ากับ 1 และ 3 phr ตามลำดับไปใช้



ก.



ข.

รูปที่ 4.11 ก. ผลของปริมาณ PE Wax ที่มีต่อพฤติกรรมการณ์เชื่อมโยงของยางผสมสูตร และ  
 ข. ผลของปริมาณ OPE Wax ที่มีต่อพฤติกรรมการณ์เชื่อมโยงของยางผสมสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ก. ผลของปริมาณ PE Wax ที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร และค่าความหนืดมูนนี่

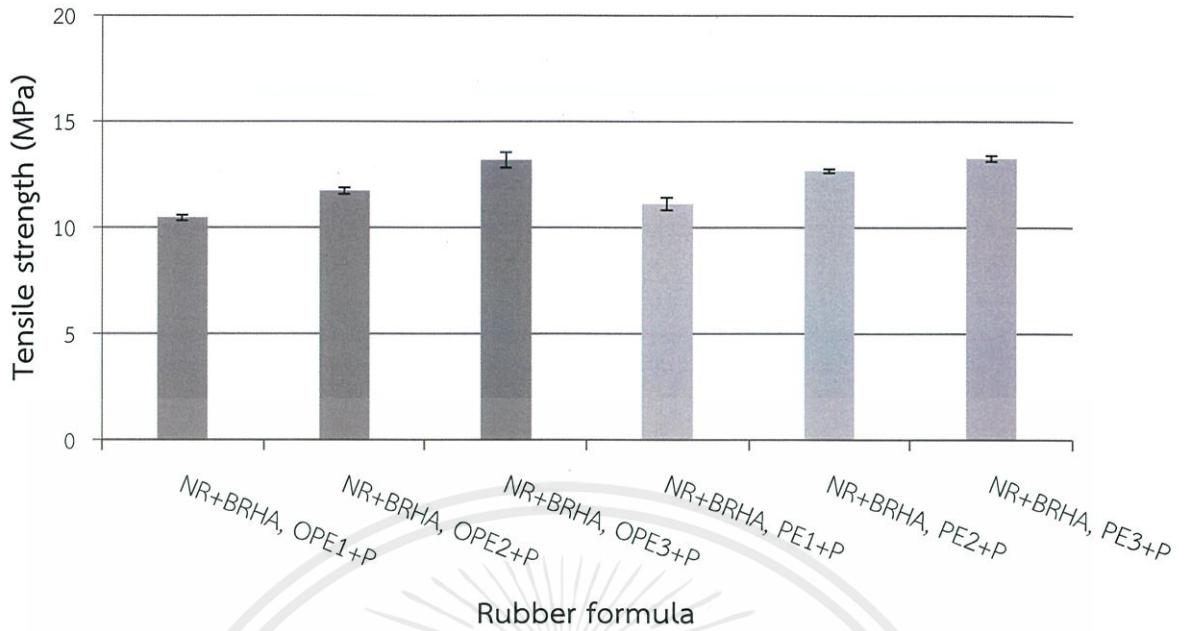
No.	Rubber formula	Mooney ML 1+4 (100 °C)	Torque (kgf.cm)		Scorch time	Cure time	Cure Rate Index
			M <sub>L</sub>	M <sub>H</sub>	t <sub>s2</sub> (min.sec)	t <sub>c90</sub> (min.sec)	CRI (min <sup>-1</sup> )
1	NR+BRHA, PE1+P	16.4	0	23	1.3	2.06	131.6
2	NR+BRHA, PE2+P	16.1	0	24	1.18	2.00	122.0
3	NR+BRHA, PE3+P	14.3	0	22	1.18	2.00	122.0

ตารางที่ 4.3 ข. ผลของปริมาณ OPE Wax ที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร และค่าความหนืดมูนนี่

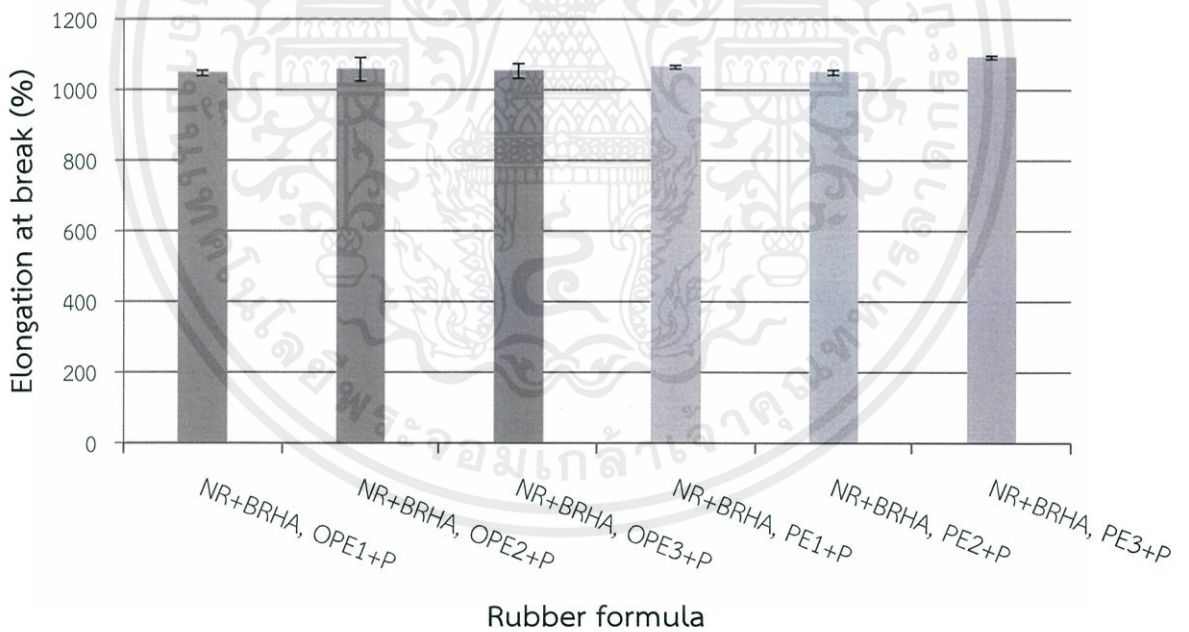
No.	Rubber formula	Mooney ML 1+4 (100 °C)	Torque (kgf.cm)		Scorch time	Cure time	Cure Rate Index
			M <sub>L</sub>	M <sub>H</sub>	t <sub>s2</sub> (min.sec)	t <sub>c90</sub> (min.sec)	CRI (min <sup>-1</sup> )
1	NR+BRHA, OPE1+P	17.9	0	19	1.36	2.24	113.6
2	NR+BRHA, OPE2+P	17.7	0	21	1.39	2.21	122.0
3	NR+BRHA, OPE3+P	15.0	0	19	1.36	2.12	131.6

#### 4.2.2 สมบัติเชิงกลยางผสมสูตร

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณแร็กซ์ที่แตกต่างกันคือ 1, 2 และ 3 phr พบว่าค่าความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดของแร็กซ์ทั้งสองชนิดมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณแร็กซ์มากขึ้น โดยค่าความแข็งแรงดึงของ OPE Wax เพิ่มขึ้นจาก 10.5 เป็น 13.2 MPa เมื่อใช้ปริมาณแร็กซ์เป็น 1 และ 3 phr ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และค่าความแข็งแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นจาก 24.2 เป็น 27.4 kN/m ดังแสดงในรูปที่ 4.14 เพราะเมื่อปริมาณแร็กซ์เพิ่มมากขึ้นการกระจายตัวของเส้นใยจะดีขึ้น ทำให้ยางผสมสูตรมีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดเพิ่มมากขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดมอดูลัสของยางที่ 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ดึงยึด ความแข็งกด และการเสีรูปถาวรหลังการกดอัดมีแนวโน้มไม่ต่างกัน

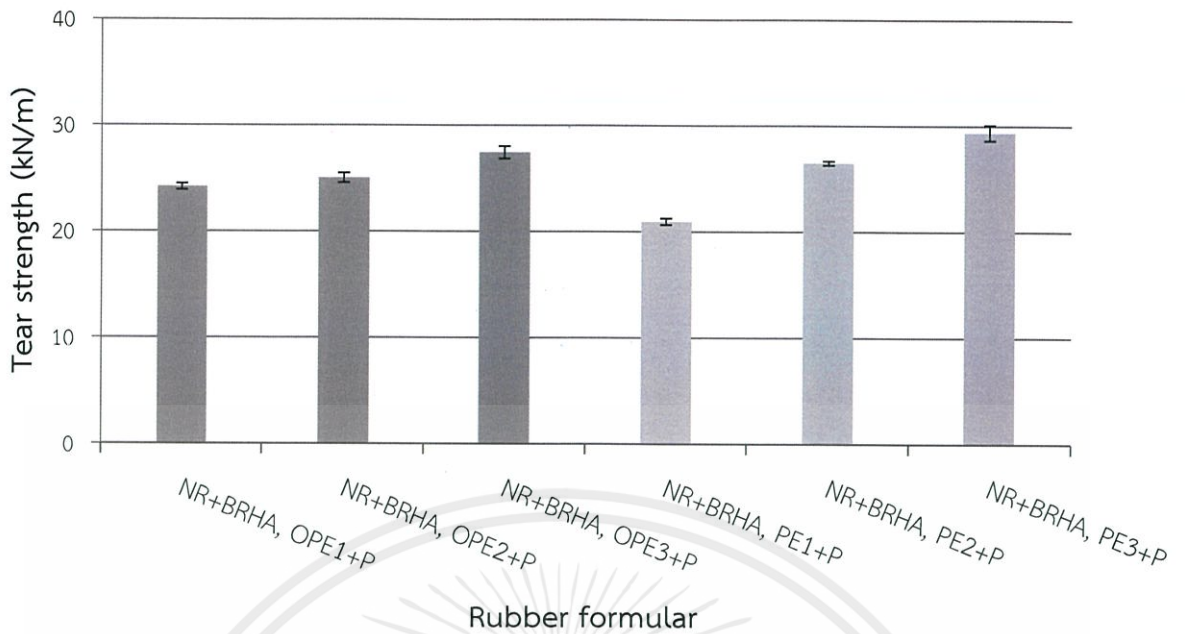


รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วย PE Wax และ OPE Wax

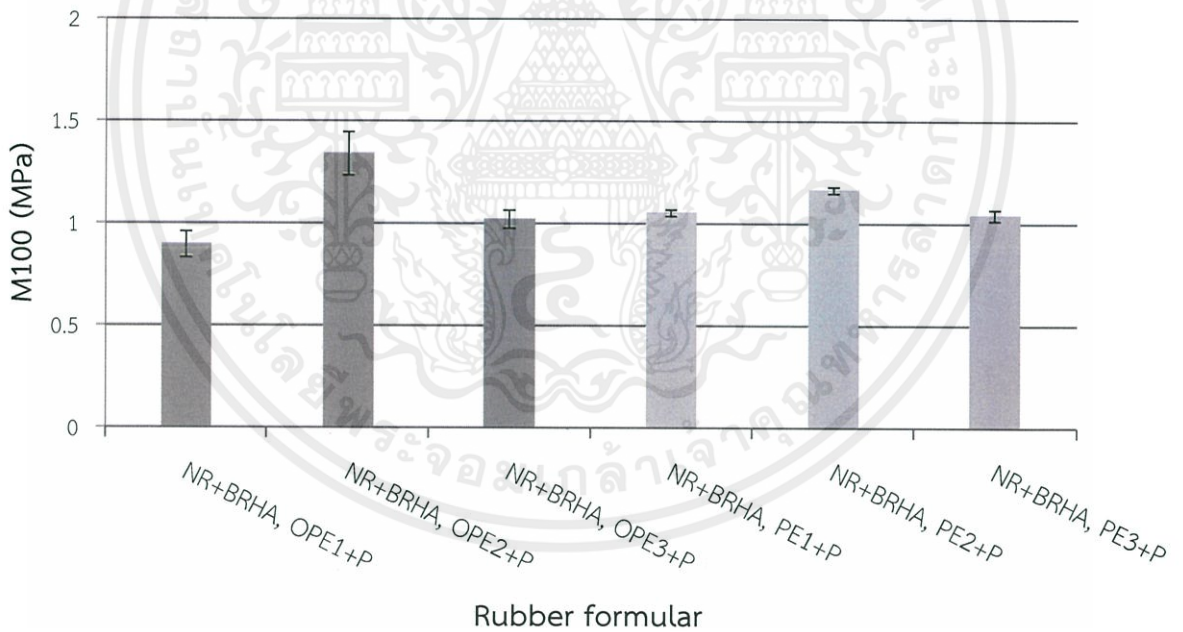


รูปที่ 4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วย PE Wax และ OPE Wax

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

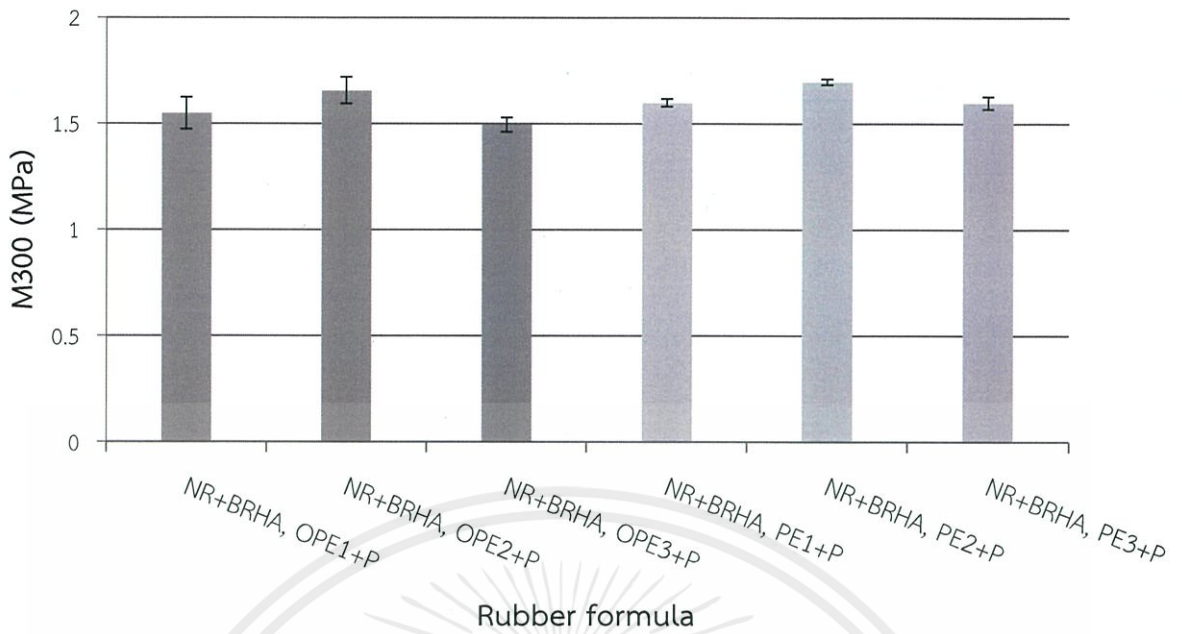


รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเก่าเคลือบดำด้วย PE Wax และ OPE Wax

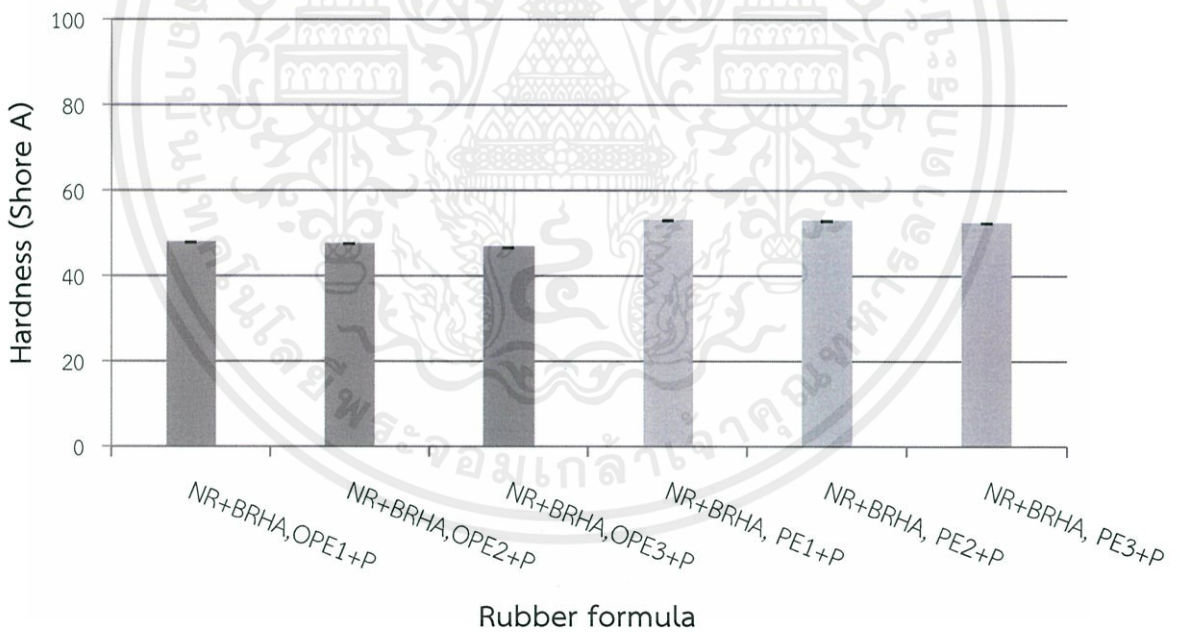


รูปที่ 4.15 ค่ามอดูลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยึดของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเก่าเคลือบดำด้วย PE Wax และ OPE Wax

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

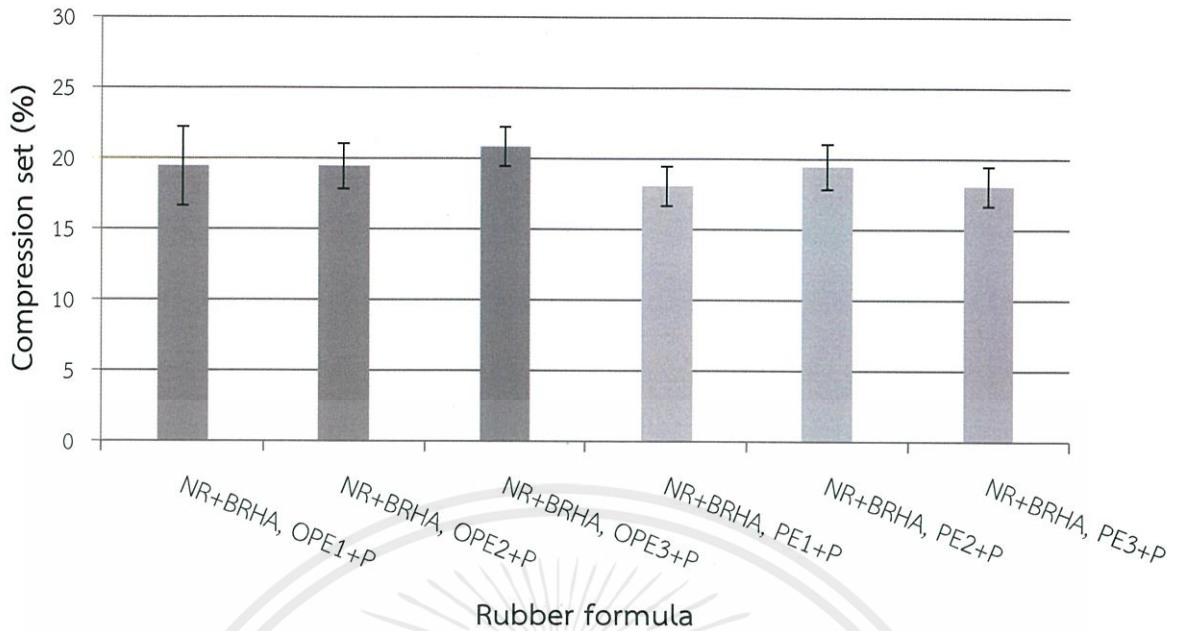


รูปที่ 4.16 ค่ามอดุลัสของยางที่ 300 เปอร์เซนต์ดึงยึดของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วย PE Wax และ OPE Wax



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วย PE Wax และ OPE Wax

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้วเคลือบดำด้วย PE Wax และ OPE Wax

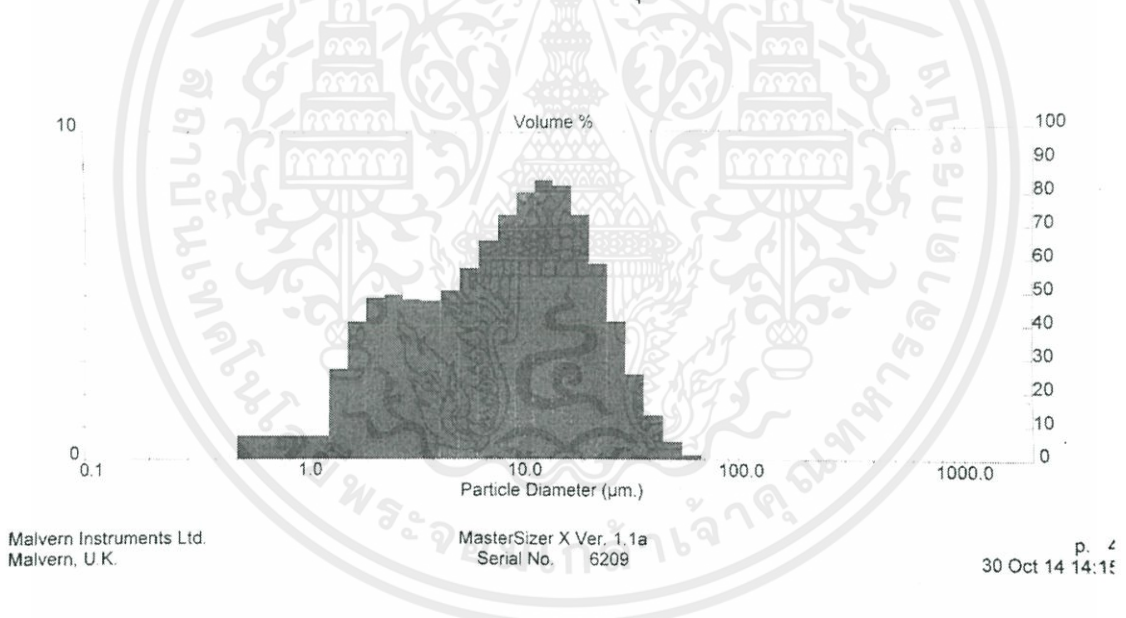
#### 4.3 ผลของขนาดเม็ดแก้วดำที่มีขนาดเล็กกว่า 250 เมช และเม็ดดำบดละเอียด

ในโรงงานอุตสาหกรรมยางขนาดของสารตัวเติมนั้นจะมีผลต่อการเสริมแรงเป็นอย่างมาก และยังส่งผลต่อสมบัติต่างๆของยางอีกด้วย จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ รสิมา จันทรจำปา [3] พบว่าเมื่อใช้เม็ดดำเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติจะแสดงสมบัติเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรงเนื่องจากเม็ดดำมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยขนาดใหญ่ (ขนาดเล็กกว่า 250 เมช) และนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ เดชาธร ฉันทรักษ์ [4] พบว่าการใช้เม็ดดำที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 6.1 ไมครอนเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์จัดเป็นสารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง เนื่องจากเม็ดดำมีขนาดอนุภาคเล็กกลง โดยสามารถนำมาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อเพื่อลดต้นทุนได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการบดละเอียดเม็ดดำให้มีขนาดอนุภาคเล็กกลงด้วยเครื่องบดความเร็วสูงชนิดบอลมิลเป็นเวลา 1 และ 3 ชั่วโมง ทำให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงจาก 41.1 ไมครอนเป็น 4.97 และ 4.72 ไมครอนตามลำดับ โดยการทดลองข้างต้นเป็นการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวแล้วเคลือบดำด้วย PEG 4000 และ PE Wax กับ OPE Wax ในปริมาณ 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

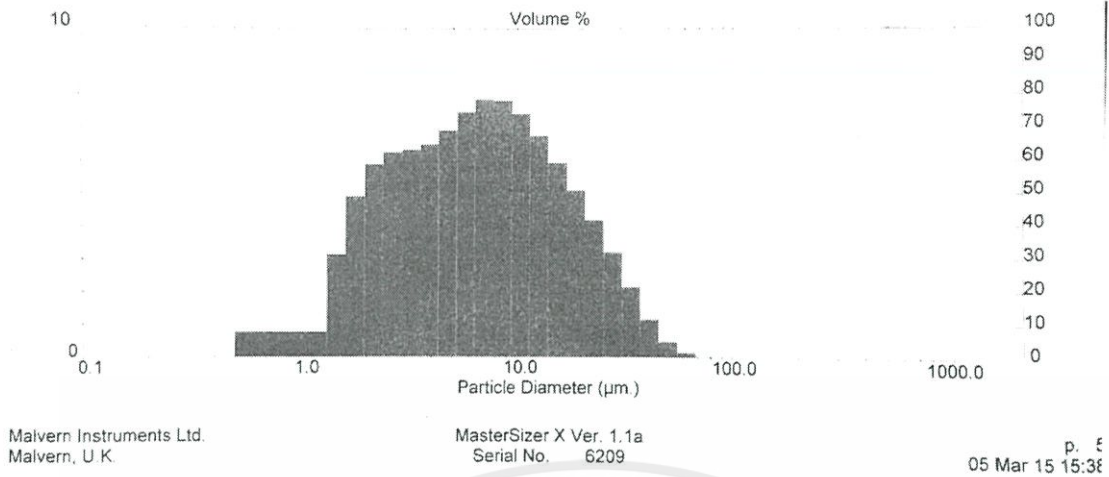
#### 4.3.1 การวิเคราะห์ และสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำ

เถ้าแกลบดำจากโรงไฟฟ้าชีวมวล (จังหวัดชัยนาท) เมื่อผ่านตะแกรงร่อน และการบดละเอียด ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำเมื่อทำการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM แสดงในรูปภาพที่ 4.21 พบว่าเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดละเอียดจะมีการกระจายตัวที่ดี ไม่จับตัวเป็นก้อน และมีรูพรุน เมื่อทำการบดละเอียดเถ้าแกลบดำจะทำให้อนุภาคของเถ้าแกลบดำนั้นมีการแตกออกทำให้อนุภาคมีขนาดเล็ก และเมื่อเวลาในการบดมากขึ้นจะส่งผลทำให้สัดส่วนของเถ้าแกลบดำที่มีขนาดเล็กเพิ่มขึ้น (กราฟมีแนวโน้มไปทางซ้ายมากขึ้น) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียดเป็นเวลา 1 และ 3 ชั่วโมง (รูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ) ซึ่งทำให้มีความเป็นรูพรุนน้อยลง และพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น โดยการบดเถ้าแกลบดำนาน 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมงจะทำให้เถ้าแกลบดำมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กลงจาก 41.1 ไมครอน เป็น 4.97 และ 4.72 ไมครอน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบดำบดละเอียดที่แสดงในตารางนั้นเป็นขนาดอนุภาคเฉลี่ยจะเห็นได้ว่าการบดที่ 1 และ 3 ชั่วโมง ทำให้ขนาดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่จะเห็นการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าแกลบดำอยู่ในช่วงกว้าง (จาก 0.5 ไมครอน ถึงประมาณ 100 ไมครอน) ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 และมีค่าฐานนิยม (Mode) อยู่ที่ 11.27 และ 6.33 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งค่าฐานนิยมแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียดเป็นเวลา 1 และ 3 ชั่วโมงได้ดีกว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ย



รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำบดละเอียดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

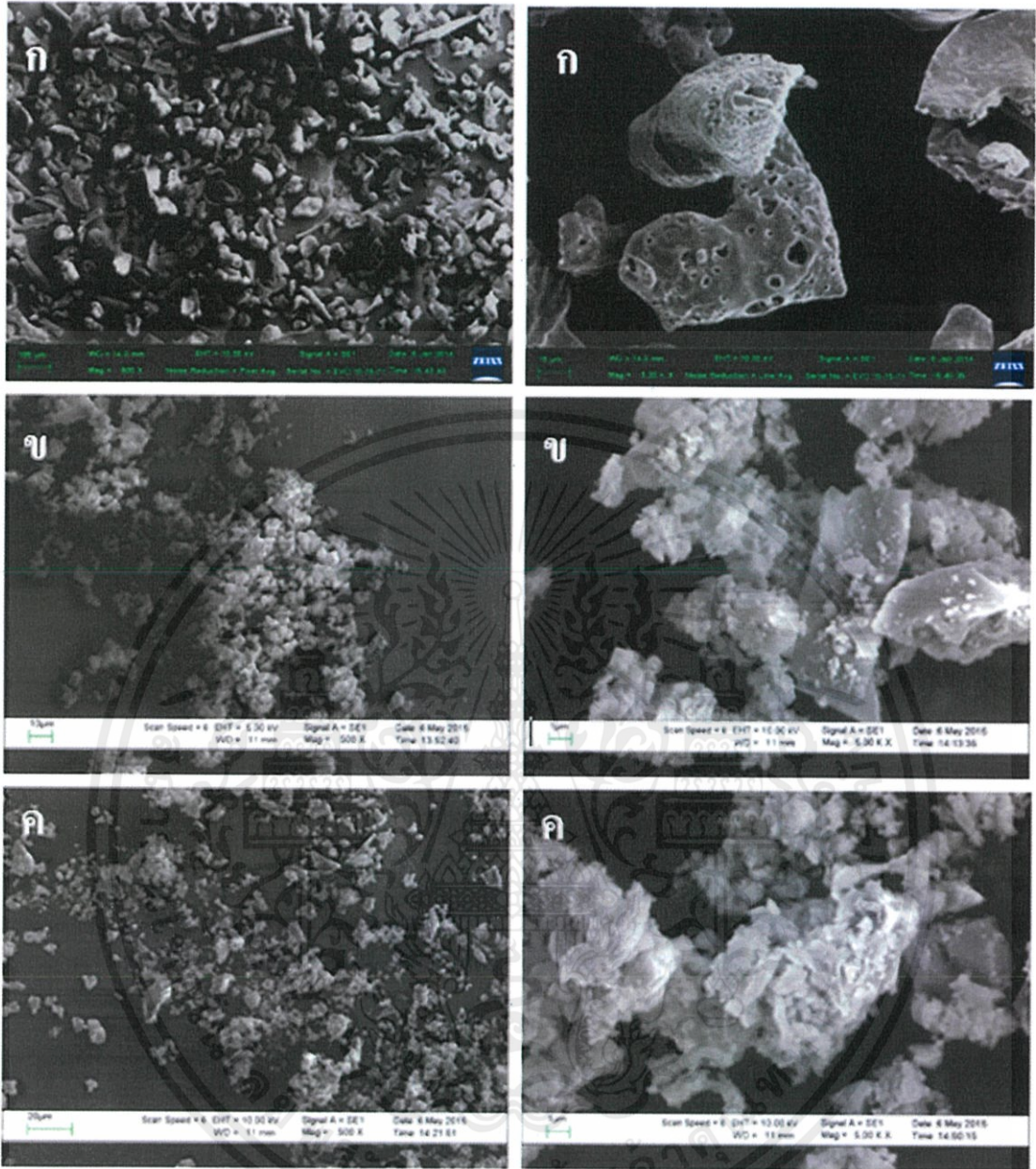


รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำบดละเอียดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำ

เถ้าแกลบดำ	BRHA	BRHA-G1	BRHA-G3
ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	$41.10 \pm 1.00$	$4.97 \pm 0.31$	$4.72 \pm 0.15$
ฐานนิยม ( $\mu\text{m}$ )	$60.65 \pm 0.00$	$11.27 \pm 1.40$	$6.33 \pm 2.12$
พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	$0.15 \pm 0.00$	$1.21 \pm 0.07$	$1.27 \pm 0.03$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

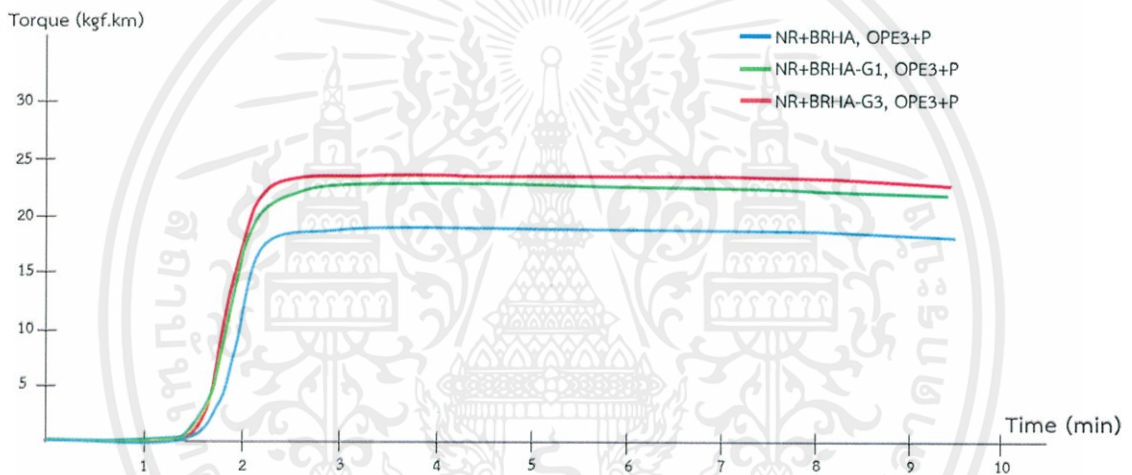


รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของถ้ำแกลบดำ ภาพซ้ายที่กำลังขยาย 500 เท่า และภาพขวาที่กำลังขยาย 5,000 เท่า; (ก) BRHA (ข) BRHA-G1 และ (ค) BRHA-G3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 พฤติกรรมเชื่อมโยงอย่างผสมสูตร

จากรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.5 เป็นการแสดงพฤติกรรมการเชื่อมโยง และค่าความหนืด-มูนนี่ของยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำขนาดอนุภาคแตกต่างกันโดยทำการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วย OPE Wax ในปริมาณ 3 phr พบว่าเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียดเป็นเวลา 3 ชั่วโมงสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้เร็วกว่าเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดละเอียด และเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด 1 ชั่วโมงเล็กน้อย เนื่องจากการบดทำให้อนุภาคของเถ้าแกลบดำแตกออก ส่งผลให้ความเป็นรูพรุนลดน้อยลง เถ้าแกลบดำมีขนาดอนุภาคเล็กลง และมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น PEG 4000 และแร็กซ์จึงสามารถเคลือบผิวเถ้าแกลบดำได้อย่างทั่วถึงทำให้การดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงบนผิวของเถ้าแกลบดำลดลง จึงใช้เวลาในการเชื่อมโยงน้อยลง นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวยังส่งผลให้มีค่าแรงบิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าแกลบดำมีพื้นที่ผิวในการเกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.22 ผลของขนาดเถ้าแกลบดำที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของยางผสมสูตรเมื่อใช้ OPE Wax ปริมาณ 3 phr

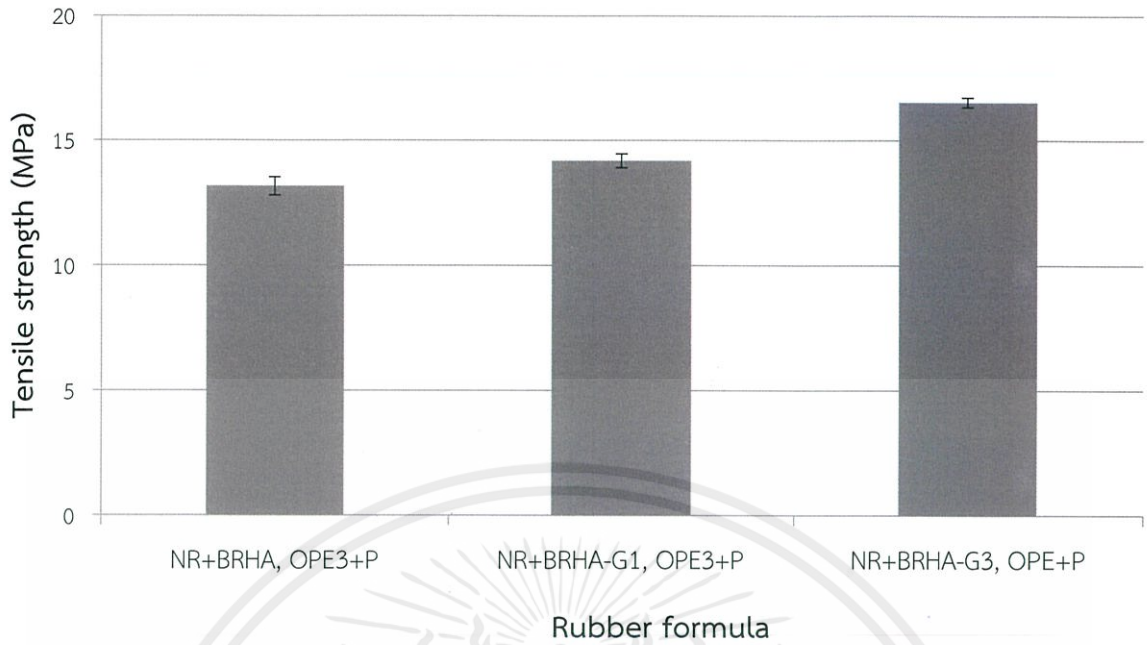
ตารางที่ 4.5 ผลของขนาดเถ้าแกลบดำที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของยางผสมสูตร และค่าความหนืดมูนนี่

No.	Rubber formula	Mooney ML 1+4 (100 °C)	Torque (kgf.cm)		Scorch time	Cure time	Cure Rate Index
			M <sub>L</sub>	M <sub>H</sub>	t <sub>s2</sub> (min.sec)	t <sub>c90</sub> (min.sec)	CRI (min <sup>-1</sup> )
1	NR+BRHA, OPE3+P	17.7	0	19	1.36	2.12	131.6
2	NR+BRHA-G1, OPE3+P	17.0	0	23	1.27	2.12	117.7
3	NR+BRHA-G3, OPE3+P	18.8	0	24	1.27	2.06	126.6

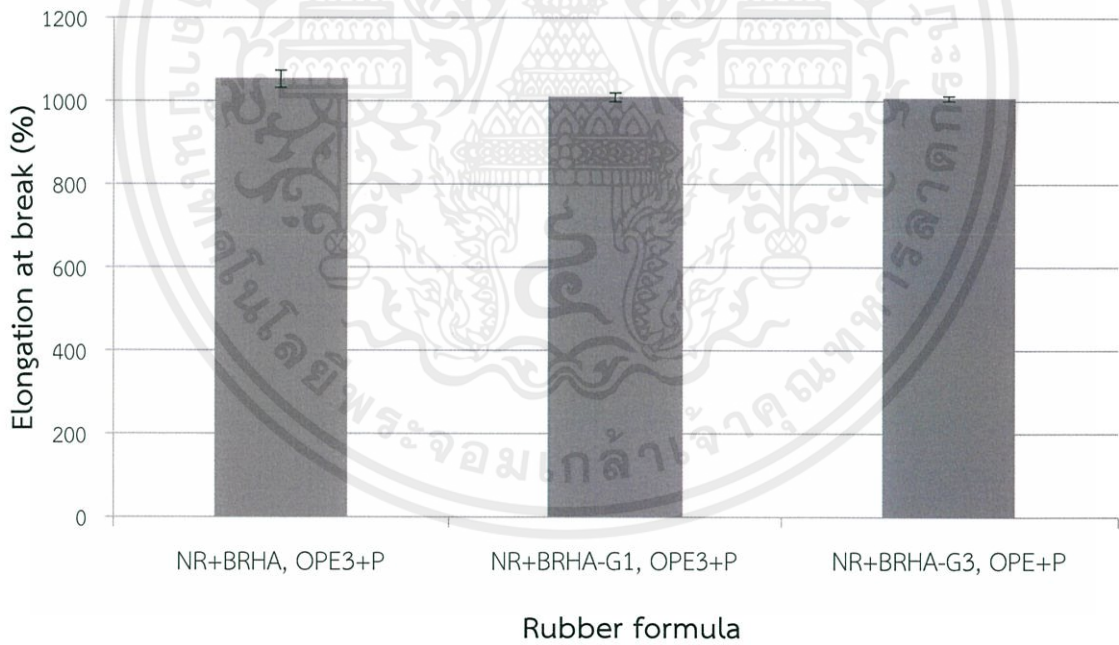
### 4.3.3 สมบัติเชิงกลของผสมสูตร

จากรูปที่ 4.23-4.29 เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึง เเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงฉีกขาด มอดุลัสของยางที่ 100 และ 300 เเปอร์เซ็นต์การดึงยืด และการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดของยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำขนาดต่างๆ เป็นสารตัวเติม พบว่าการใช้เถ้าแกลบดำที่มีขนาดใหญ่ที่สุด (เล็กกว่า 250 เมช) จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลมีค่าน้อยที่สุด และเมื่อใช้เถ้าแกลบดำที่มีขนาดเล็กลง จะส่งผลให้ยางผสมสูตรมีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดดีที่สุด เนื่องจากเมื่อทำการบดเถ้าแกลบดำจะทำให้ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบดำเล็กลง ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นทำให้มีพื้นที่ในการเกิดแรงกระทำระหว่างยางกับเถ้าแกลบดำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้แว็กซ์ และ PEG 4000 เคลือบผิวเถ้าแกลบดำได้ทั่วถึงมากขึ้น ทำให้เถ้าแกลบดำดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้น้อยลงจึงเกิดการเชื่อมโยงได้สมบูรณ์ จากรูปที่ 4.24 และ 4.28 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงของยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำขนาดต่างๆ เป็นสารตัวเติม ตามลำดับ พบว่าขนาดที่แตกต่างของเถ้าแกลบดำไม่ส่งผลต่อสมบัติเหล่านี้ เนื่องจากขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบดำไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของเถ้าแกลบดำและยางธรรมชาติ และสารตัวเติมที่ใช้เป็นวัสดุชนิดเดิมจึงทำให้ความแข็งแรงของสารตัวเติมไม่ต่างกัน ดังนั้นค่าความแข็งแรงจึงไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ขนาดอนุภาคยังไม่ส่งผลต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดอีกด้วย แม้ว่า การลดลงของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำนั้นจะทำให้เกิดการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดมากขึ้น [32] เมื่อสารตัวเติมมีขนาดเล็กจะทำให้มีปริมาณยางบาวด์ (Bound rubber) และยางออกคลู๊ด (Occluded rubber) เพิ่มมากขึ้น และเมื่อได้รับแรงกระทำจากการกดอัดขึ้นงานจะทำให้สายโซ่ของยางธรรมชาติบริเวณยางบาวด์ และออกคลู๊ดเกิดการเคลื่อนที่ หรือเกิดการหลุดออก เป็นผลทำให้เมื่อปล่อยแรงกระทำแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดถาวรมากขึ้น แต่ขนาดของเถ้าแกลบดำที่ใช้ในการทดลองมีช่วงของขนาดอนุภาคค่อนข้างกว้าง จึงเป็นผลทำให้ขนาดอนุภาคนั้นไม่ส่งผลต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

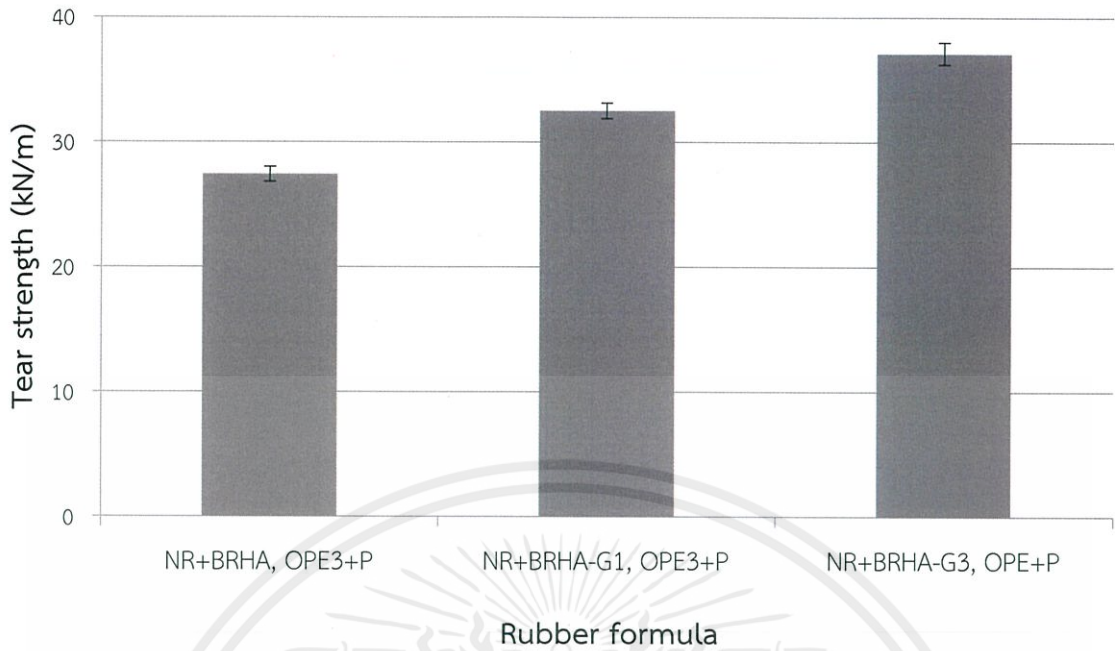


รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรเมื่อใช้เส้นใยแก้วขนาดต่างกัน

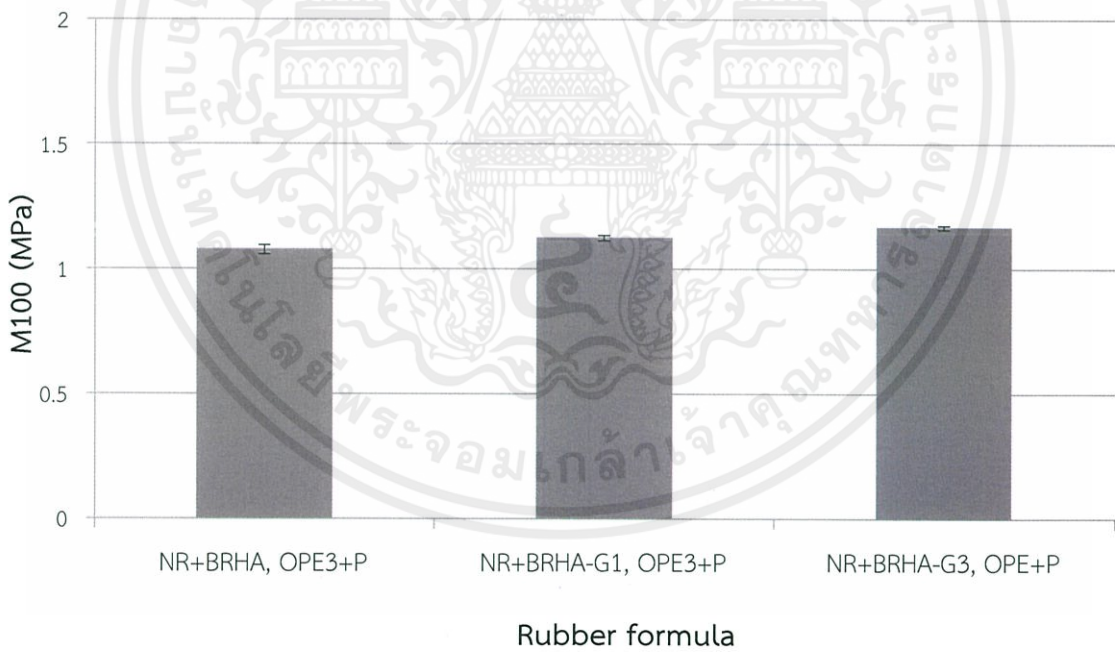


รูปที่ 4.24 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรเมื่อใช้เส้นใยแก้วขนาดต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

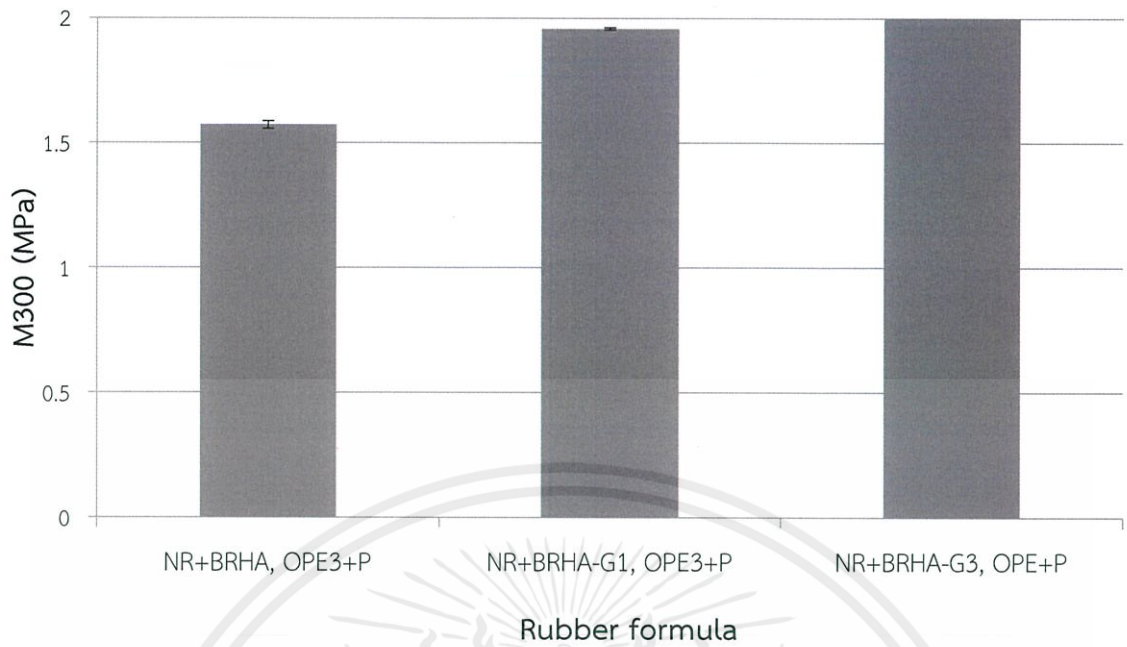


รูปที่ 4.25 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรเมื่อใช้เส้นผ่าศูนย์กลางที่มีขนาดแตกต่างกัน

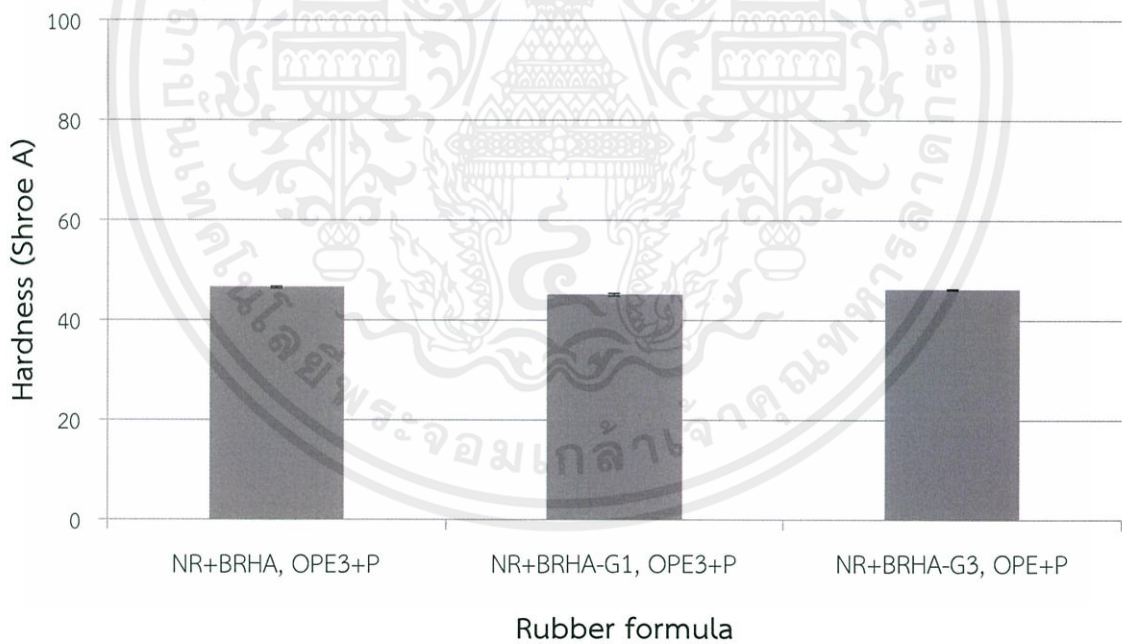


รูปที่ 4.26 ค่ามอดูลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยึดของยางผสมสูตรเมื่อใช้เส้นผ่าศูนย์กลางที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

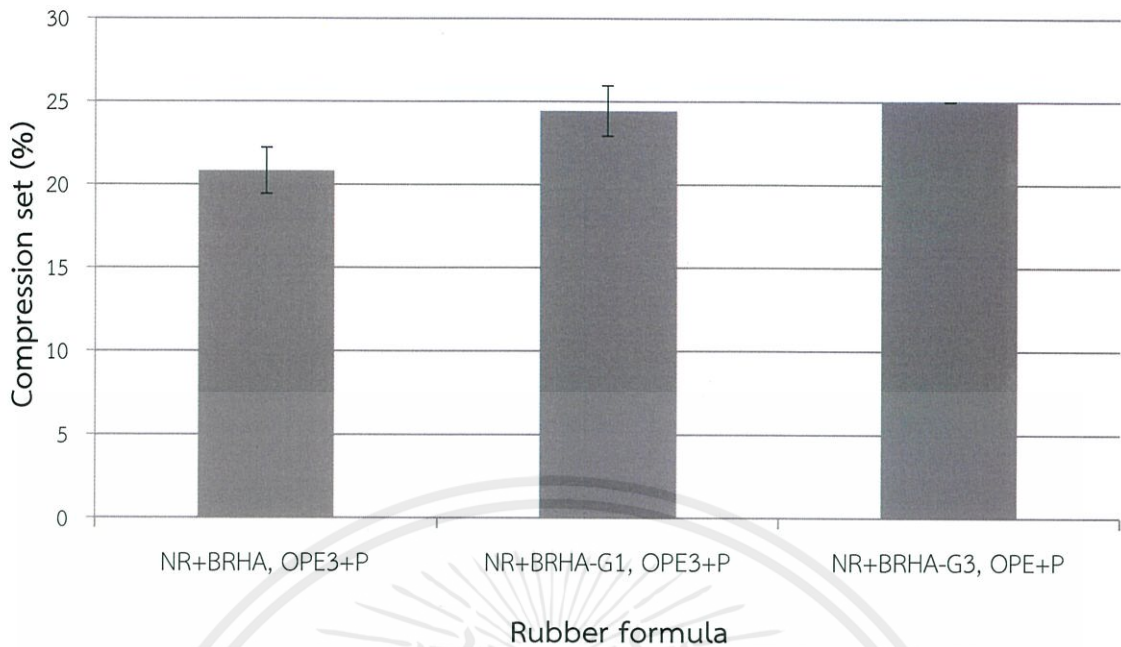


รูปที่ 4.27 ค่ามอดุลัสของยางที่ 300 เปอร์เซ็นต์ดึงยึดของยางผสมสูตรเมื่อใช้เส้นผ่าศูนย์กลางที่มีขนาดแตกต่างกัน



รูปที่ 4.28 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรเมื่อใช้เส้นผ่าศูนย์กลางที่มีขนาดแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดของยางผสมสูตรเมื่อใช้เถ้าแกลบดำที่มีขนาดแตกต่างกัน

#### 4.4 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วย OPE Wax กับ PEG 4000 เทียบกับ Si-69 กับ PEG 4000

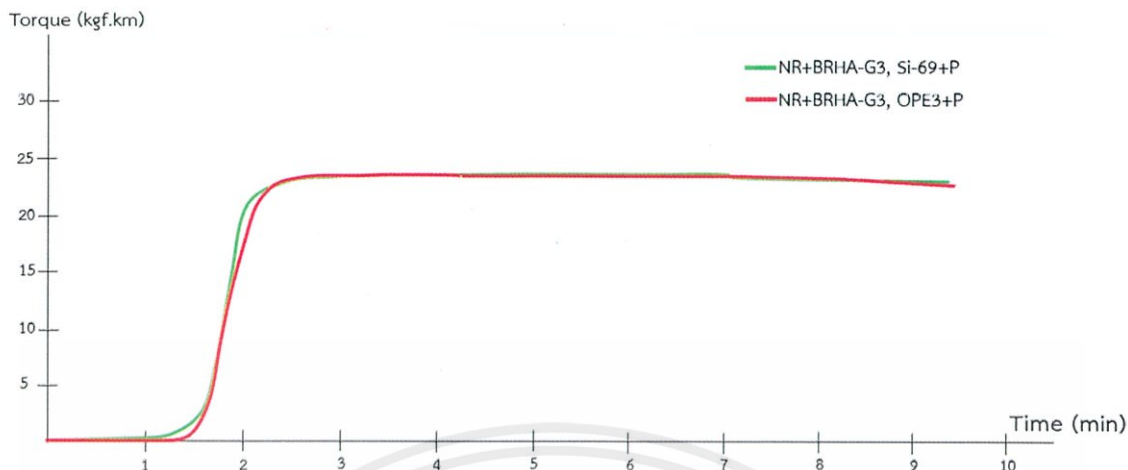
การใช้งานสารตัวเติมที่มีผิวกับยางที่ไม่มีผิวนั้นจำเป็นที่จะต้องทำการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมก่อนทำการผสม อาจทำให้ความมีผิวของสารตัวเติมลดน้อยลง หรือใช้สารคู่ควบเพื่อทำให้สารตัวเติมกับยางนั้นเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น ในอุตสาหกรรมสารตัวเติมชนิดซิลิกานิยมทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Si-69 ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงได้นำวิธีการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วย Si-69 มาใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำแล้วนำมาเปรียบเทียบกับเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยแว็กซ์

การทดลองทำการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วย OPE Wax กับ PEG 4000 ในปริมาณ 3 และ 2.4 phr ตามลำดับ และ Si-69 กับ PEG 4000 ในปริมาณ 3 และ 2.4 phr ตามลำดับ โดยควบคุมขนาดของเถ้าแกลบดำโดยการใช้ BRHA-G3 เป็นสารตัวเติม ในปริมาณ 60 phr

##### 4.4.1 พฤติกรรมเชื่อมโยงยางผสมสูตร

การศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยง และค่าความเหนียวของยางผสมสูตรเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วยวิธีที่ต่างกันคือ ปรับปรุงผิวด้วย OPE Wax กับ PEG 4000 และ Si-69 กับ PEG 4000 พบว่าค่าความเหนียวนี้มีแนวโน้มไม่ต่างกัน แต่เวลาในการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 กับ PEG 4000 เป็นสารตัวเติมนั้นเร็วกว่า เนื่องจาก Si-69 มีอนุโมลอิสระของกำมะถันอยู่จึงทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงได้เร็วมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และตารางที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วย OPE Wax เทียบกับ Si-69 ที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร

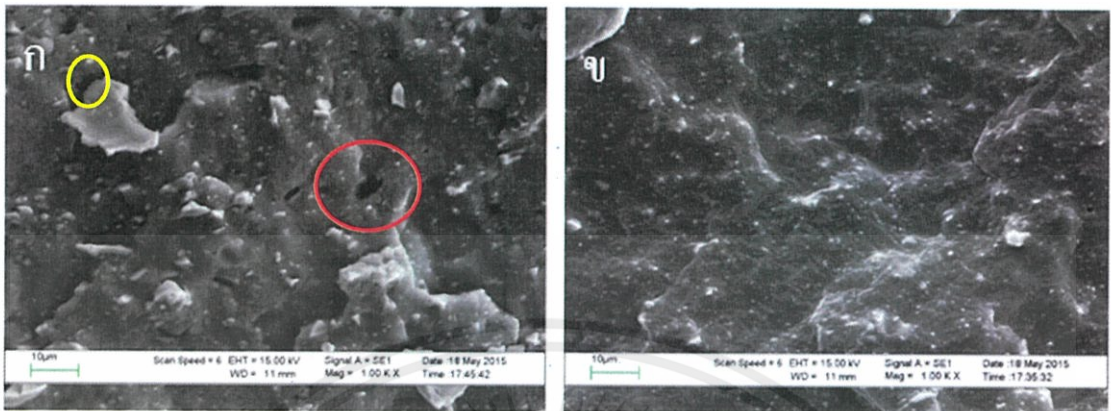
ตารางที่ 4.6 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำด้วย OPE Wax เทียบกับ Si-69 ที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร และค่าความหนืดมูนนี้

No.	Rubber formula	Mooney ML1+4 (100 °C)	Torque (kgf.cm)		Scorch time	Cure time	Cure Rate Index
			M <sub>L</sub>	M <sub>H</sub>	t <sub>s2</sub> (min.sec)	t <sub>c90</sub> (min.sec)	CRI (min <sup>-1</sup> )
1	NR+BRHA-G3, OPE3+P	18.8	0	24	1.27	2.06	126.6
2	NR+BRHA-G3, Si-69+P	14.4	0	24	1.30	2.00	142.9

#### 4.4.2 สันฐานวิทยาของยางผสมสูตร

จากการศึกษาพื้นผิวภาคตัดขวางของยางผสมสูตรด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าอนุภาคแก้วเคลือบดำสามารถกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติ ดังในรูปที่ 4.31 (ก) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า เนื่องจาก OPE Wax และ PEG 4000 ช่วยให้แก้วเคลือบดำกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดี ส่วนในรูปที่ 4.31 (ข) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า การกระจายตัวเป็นผลมาจาก PEG 4000 เพียงอย่างเดียว และพบว่ามีช่องว่างเกิดขึ้นเนื่องจากการหลุดออกของอนุภาคแก้วเคลือบดำในตัวอยางยางผสมสูตรที่ใช้ OPE Wax และ PEG 4000 ในการปรับปรุงพื้นผิว (รูปที่ 4.31 (ก) วงกลมสีแดง) เพราะแรงยึดติดระหว่างวัสดุภาคไม่แข็งแรง ส่วนยางผสมสูตรที่ปรับปรุงผิวแก้วเคลือบดำด้วยสารคู่ควบ Si-69 และ PEG 4000 (รูปที่ 4.31 (ข)) ไม่พบช่องว่างที่เกิดจากการหลุดออกของอนุภาคแก้วเคลือบดำ เนื่องจาก Si-69 เกิดพันธะเคมีกับแก้วเคลือบดำ และยางธรรมชาติ จึงทำให้

ระหว่างภูมิภาคทั้งสองยึดติดกันได้ดี และมีความแข็งแรงมากกว่าการยึดติดด้วยแรงเชิงกลหรือแรงระหว่างขั้ว

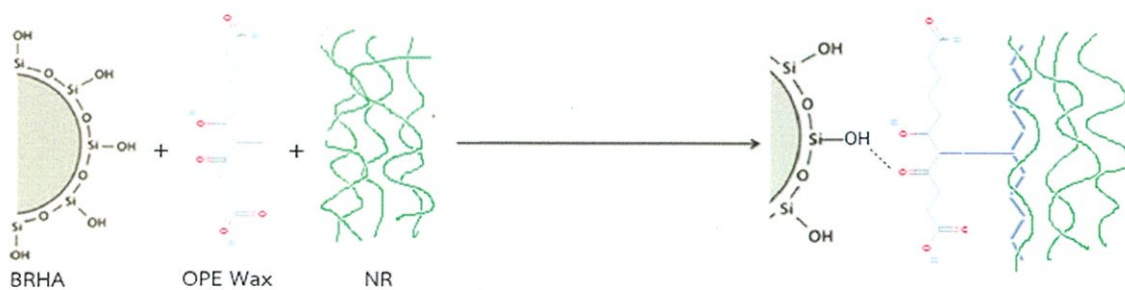


รูปที่ 4.31 สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตร ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า; (ก) NR+BRHA-G3, OPE3+P และ (ข) NR+BRHA-G3, Si-69+P

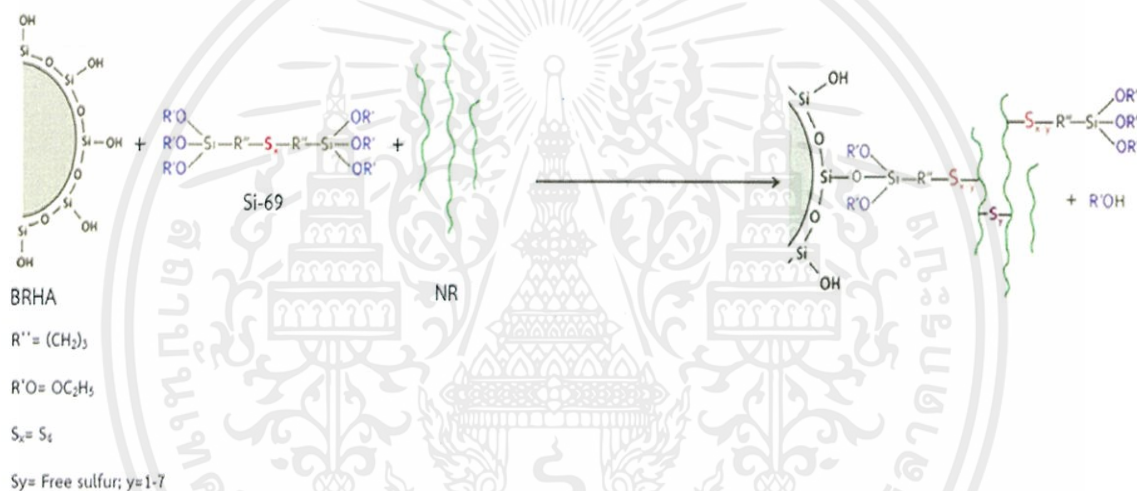
#### 4.4.3 สมบัติเชิงกลยางผสมสูตร

การศึกษาสมบัติเชิงกลต่างๆ ของยางผสมสูตร ทำการควบคุมขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบดำโดยใช้ BRHA-G3 ในปริมาณ 60 phr จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าแกลบดำด้วย Si-69 และ PEG 4000 จะให้สมบัติเชิงกลที่สูงกว่าเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแวกซ์ และ PEG 4000 ทั้งนี้เนื่องจาก Si-69 มีหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสองด้านได้แก่ หมู่อัลคอกซี และกำมะถัน โดยหมู่อัลคอกซีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของเถ้าแกลบดำ และกำมะถันทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับพันธะคู่ในโมเลกุลของยาง ทำให้รอยต่อระหว่างภูมิภาคมีความแข็งแรงเพราะมีการเกิดพันธะเคมีขึ้น ส่วนรอยต่อระหว่างภูมิภาคของยางกับเถ้าแกลบดำเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแวกซ์เป็นเพียงแรงระหว่างขั้ว (รูปที่ 4.31 (ก) วงกลมสีเหลือง) จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่า และ Si-69 เป็นสารคู่ควบประเภท เมอร์แคปโท ปลายด้านหนึ่งของโครงสร้างคือ กำมะถัน ดังนั้นยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย Si-69 จึงเกิดการเชื่อมโยงได้มากกว่าปกติ ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด กับการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดต่ำ และ ความแข็งกดสูงกว่าเมื่อเทียบกับการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วยแวกซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ภาพแสดงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวแก้วเคลือบดำ, OPE Wax และยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.33 ภาพแสดงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวแก้วเคลือบดำ, Si-69 และยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวแก้วเคลือบดำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร

สมบัติเชิงกล	ยางผสมสูตร	NR+BRHA-G3, OPE+P	NR+BRHA-G3, Si-69+P
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) (MPa)		16.54 ± 0.47	17.33 ± 0.43
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)		1,007 ± 14	887 ± 12
ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) (N/mm)		37.1 ± 2.2	41.6 ± 8.2
มอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (M100) (MPa)		1.17 ± 0.02	1.27 ± 0.02
มอดุลัสของยางที่ 300 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (M300) (MPa)		2.29 ± 0.04	3.59 ± 0.04
ความแข็งกด (Hardness) (Shore A)		46 ± 1	47 ± 0
การเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) (%)		25 ± 0	14 ± 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำเถ้าแกลบดำซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยทำการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วยแวกซ์ และ PEG 4000 ซึ่งในการทดลองใช้ PE Wax และ OPE Wax ในการปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าแกลบดำ จุดประสงค์คือเพื่อให้เถ้าแกลบดำสามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดียิ่งขึ้น เปรียบเทียบสูตรที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วยแวกซ์ และ PEG 4000 กับสูตรที่ไม่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำ และสูตรปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลน (Si-69) กับ PEG 4000

จากผลของการเปรียบเทียบระหว่างการไม่ปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำกับการปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าแกลบดำด้วยแวกซ์ทั้ง 2 ชนิด คือ PE Wax และ OPE Wax กับ PEG 4000 นั้น พบว่าเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วยแวกซ์ และ PEG 4000 ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ของยางผสมสูตรสูงขึ้น แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบแวกซ์ทั้ง 2 ชนิด พบว่ายางผสมสูตรมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกัน และจากการทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ พบว่าเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วยแวกซ์ และ PEG 4000 สมบัติการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน

การศึกษาผลของปริมาณ PE Wax และ OPE Wax ที่ 1, 2 และ 3 phr พบว่าสมบัติต่างๆ มีแนวโน้มที่สูงขึ้น เช่น ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาด เมื่อใช้ปริมาณแวกซ์ในการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำที่มากขึ้นตามลำดับ ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มอดุลัสของยางที่ 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ความแข็งกด และการเสีรูปถาวรหลังการกดอัด มีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน ส่วนปริมาณของแวกซ์ไม่ส่งผลต่อเวลาในการเชื่อมโยง แต่จะส่งผลต่อความหนืดมูนนี้ นั่นคือ เมื่อใช้ปริมาณแวกซ์เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความหนืดมูนนี้ลดลง

การศึกษาผลของขนาดเถ้าแกลบดำ จะเห็นได้ว่าการใช้เถ้าแกลบดำที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (เล็กกว่า 250 เมช) ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าน้อยที่สุด และเมื่อใช้เถ้าแกลบดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความแข็งกด และการเสีรูปถาวรหลังการกดอัดนั้น พบว่ามีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน

การศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วย OPE Wax กับ PEG 4000 เทียบกับสารคู่ควบไซเลน (Si-69) กับ PEG 4000 พบว่าเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าแกลบดำด้วย Si-69 และ PEG 4000 ให้สมบัติเชิงกลที่สูงกว่า เช่น ค่าความแข็งกด แต่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และการเสีรูปถาวรหลังการกดอัดมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าแกลบดำด้วย OPE Wax กับ PEG 4000

เอกสารฉบับนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการบดละเอียดให้เข้าเกลบดามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่า 4.7 ไมครอน เนื่องจากเมื่อเข้าเกลบดามีขนาดอนุภาคเล็กลงจะสามารถช่วยเสริมแรงได้มากขึ้น อาจทำได้โดยการเปลี่ยนชนิดของเครื่องบด หรือการลดขนาดของลูกบดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2 เซนติเมตร เพื่อลดช่องว่างระหว่างลูกบดให้น้อยลง และป้องกันการบดกันเองของลูกบด ทำให้เข้าเกลบดามีขนาดเล็กลงและไม่เกิดการปนเปื้อนของสารอื่น

2. ควรใช้ OPE Wax ที่มีค่าความเป็นกรดมากขึ้น เนื่องจากมีส่วนที่เป็นขี้ผึ้งมากทำให้มีสภาพขี้ผึ้งใกล้เคียงกับอนุภาคเข้าเกลบดามีขนาดมากขึ้น ส่งผลให้อนุภาคเข้าเกลบดามีขนาดเล็กลง และยางธรรมชาติมีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พุฒิชชาติ คิดหาทอง, วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร และอัจฉริยา สุริยะวงค์. 2557. การศึกษาศักยภาพเชิงพื้นที่ของชีวมวลสำหรับผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย. [Online]. Available : <http://www.eri.chula.ac.th/eri-main/wp-content/uploads/2014/07/63-76.pdf>.
- [2] พีชเกษตร.คอม. 2557. แกลบ แกลบดำ ซี้เข้าแกลบ. [Online]. Available : <http://puechkaset.com/%E0%B9%81%E0%B8%81%E0%B8%A5%E0%B8%9A/>.
- [3] รลิวา จันทร์จำปา. 2556. การศึกษาเถ้าแกลบดำเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] เดชาธร ฉันทร์ภักษ์. 2558. การศึกษาเถ้าแกลบดำเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางไนโตรล. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] หน่วยเทคโนโลยียาง (Rubber technology unit). 2557. ยางธรรมชาติ (Natural rubber). [Online]. Available : <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbtech/rubbtech.htm>.
- [6] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2547. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [7] กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2557. แนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกัน และลดมลพิษอุตสาหกรรมยางแผ่นรมควัน. [Online]. Available : <http://infofile.pcd.go.th/water/rubber.pdf?CFID=1090158&CFTOKEN=59199315>.
- [8] Bryan Cave (Thailand) Co., Ltd. 2557. ยางและผลิตภัณฑ์ยาง. [Online]. Available : [http://tpso.moc.go.th/userfiles/04\\_TPSO\\_Rev-Final\\_Chap2Rubber\\_v3.pdf](http://tpso.moc.go.th/userfiles/04_TPSO_Rev-Final_Chap2Rubber_v3.pdf)
- [9] School of Materials Science and Engineering UNSW. 2013. Vulcanisation & Reinforcement. [Online]. Available : <http://www.materials.unsw.edu.au/tutorials/online-tutorials/4-vulcanisation-reinforcement>.
- [10] สถาบันพลาสติก (Plastics Institute of Thailand). 2557. เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์. [Online]. Available : <http://rubber.oie.go.th/box/Article/25239/%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%A2%E0%B8%B5%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%9C%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%84%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B8%9E%E0%B8%B2%E0%B8%A7%E0%B8%94%E0%B9%8C.pdf>
- [11] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2557. นาโนเคลย์: สารตัวเติมทางเลือกใหม่. [Online]. Available : <http://www.rubbercenter.org/informationcenter/file/magazine8.pdf>.
- [12] อธิพิณ แจ่มชัด. 2553. เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. นำไปใช้ กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [13] พงษ์ธร แซ่ฮวย. 2548. สารเคมียาง. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [14] อุบลลักษณ์ รัตน์ศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ. 2552. เล้าแก่ลบบในงานคอนกรีต. อุบลราชธานี : สำนักพิมพ์ไซน์ แอนด์ เอ็นจีเนียริ่ง.
- [15] Onojah, A.D., Agbendeh, N.A. and Mbakaan, C. 2557. Rice Husk Ash Refractory: The Temperature Dependent Crystalline Phase Aspects. [Online]. Available : [http://www.arpapress.com/volumes/vol15issue2/ijrras\\_15\\_2\\_12.pdf](http://www.arpapress.com/volumes/vol15issue2/ijrras_15_2_12.pdf).
- [16] Florio, J. and Miller, D. 2004. Handbook of Coatings Additives Second Edition. New York : Marcel Dekker, Inc.
- [17] บริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด. 2557. แวกซ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีน. [Online]. Available : <http://thaipolychemical.page.tl/%26%233629%3B%26%233629%3B%26%233585%3B%26%233595%3B%26%233636%3B%26%233652%3B%26%233604%3B%26%233595%3B%26%233660%3B%26%233650%3B%26%233614%3B%26%233621%3B%26%233637%3B%26%233648%3B%26%233629%3B%26%233607%3B%26%233636%3B%26%233621%3B%26%233637%3B%26%233609%3B%26%233649%3B%26%233623%3B%26%233585%3B%26%233595%3B%26%233660%3B.htm>.
- [18] ชญาภา นิมสุวรรณ. 2557. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างสารควบไซเลน Si-69 กับ Si-264. [Online]. Available : <http://www.rubbercenter.org/informationcenter/file/magazine-18.pdf>.
- [19] Sae-Oui, P., Rakdee, C. and Thanmathorn, P. 2002. "Use of Rice Husk Ash as Filler in Natural Rubber Vulcanizates: In Comparison with Other Commercial Fillers." Applied Polymer Science Journal. 83 : 2485-2493.
- [20] กุลภัสสร แผงพันธ์, คุณัญญา จันทร์ฉาย และนฤมล ศรีประจันทร์. 2555. การใช้เล้าปาล์มดำเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ. โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [21] Arayapranee, W., Na-Ranong, N. and Rempel G.L. 2005. "Application of Rice Husk Ash as Fillers in the Natural Rubber Industry." Applied Polymer Science Journal. 98 : 34-41.
- [22] GOTECH TESTING MACHINES INC. 2557. Moving Die Rheometer. [Online]. Available : [http://www.taiwantrade.com.tw/MAIN/en\\_front/searchserv.do?method=listProductProductDetail&locale=2&MEMBER\\_TYPE=4&WEB\\_OPEN=1&DOMAIN\\_NAME=gotech&DOMAIN\\_NAME\\_FLAG=0&company\\_id=3326&catalog\\_id=704449&come\\_soon=0](http://www.taiwantrade.com.tw/MAIN/en_front/searchserv.do?method=listProductProductDetail&locale=2&MEMBER_TYPE=4&WEB_OPEN=1&DOMAIN_NAME=gotech&DOMAIN_NAME_FLAG=0&company_id=3326&catalog_id=704449&come_soon=0).
- [23] Nawawi Abd Rahman. 2557. Cure Measurement As Quality Tool. [Online]. Available : <http://rubbertrainer.blog.com/2013/08/02/cure-measurement-as-quality-tool/>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ออกไป และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] American Standard for Testing and Materials. 2014. “**Standard Test Methods for Rubber Property-Compression Set.**” ASTM D395. Annual Book of ASTM Standards. 9 : 1-6.
- [25] American Standard for Testing and Materials. 2013. “**Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers-Tension.**” ASTM D412. Annual Book of ASTM Standards. 9 : 1-14.
- [26] Guiyang Sunpoc INTNL Co., LTD. 2557. **WDW-D Series Electronic type universal testing machine.** [Online]. Available : <http://sunpoc.nanasupplier.com/wdw-d-series-electronic-type-universal-testing-machine-111290-4.html>.
- [27] American Standard for Testing and Materials. 2012. “**Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers.**” ASTM D624. Annual Book of ASTM Standards. 9 : 1-9.
- [28] American Standard for Testing and Materials. 2010. “**Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness.**” ASTM D2240. Annual Book of ASTM Standards. 9 : 1-13.
- [29] Intertek Plastics Technology Laboratories. 2557. **Durometer Hardness Shore Hardness.** [Online]. Available : <http://www.ptli.com/testlopedia/tests/DurometerShore-d2240.asp>.
- [30] SL Rubber Industry (2000) Co., Ltd. 2557. **การทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมเพาต์(Cure Characteristic).** [Online]. Available : <http://www.slrubber.net/NP-21415-%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%88%E0%B8%B1%E0%B8%A2%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B8%9E%E0%B8%B1%E0%B8%92%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B8%9C%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%A0%E0%B8%B1%E0%B8%93%E0%B8%91%E0%B9%8C.html>.
- [31] American Standard for Testing and Materials. 2000. “**Standard Test Method for Water Absorption of Plastic.**” ASTM D570. Annual Book of ASTM Standards. 8 : 32-35.
- [32] Blow, C. 1977. **Rubber technology and manufacture.** London : Butterworth & Co. (Publishers) Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ก-1 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และมอดุลัสของยางที่ 100 และ 300 เปอร์เซนต์ดึงยึด (M100 และ M300)

สูตร	ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)	มอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซนต์- ดึงยึด (M100) (MPa)	มอดุลัสของยางที่ 300 เปอร์เซนต์- ดึงยึด (M300) (MPa)
BRHA	8.55 ± 0.66	954 ± 20	0.97 ± 0.24	1.35 ± 0.18
BRHA, PE1+P	11.11 ± 0.72	1,065 ± 12	1.05 ± 0.05	1.60 ± 0.06
BRHA, PE2+P	12.66 ± 0.22	1,050 ± 16	1.16 ± 0.06	1.70 ± 0.05
BRHA, PE3+P	13.25 ± 0.32	1,094 ± 11	1.04 ± 0.09	1.60 ± 0.10
BRHA, OPE1+P	10.46 ± 0.31	1,049 ± 19	0.90 ± 0.22	1.54 ± 0.03
BRHA, OPE2+P	11.73 ± 0.36	1,059 ± 81	1.34 ± 0.37	1.56 ± 0.05
BRHA, OPE3+P	13.18 ± 0.89	1,055 ± 50	1.02 ± 0.15	1.57 ± 0.04
BRHA-G1, OPE3+P	14.19 ± 0.68	1,010 ± 25	1.13 ± 0.03	1.96 ± 0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ความแข็งกด (Hardness) และการเสีयरูปลวกรหลังการกดอัด (Compression set)

สูตร	ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) (kN/m)	ความแข็งกด (Hardness) (Shore A)	การเสีयरูปลวกรหลังการกดอัด (Compression set) (%)
BRHA	20.1 ± 1	48 ± 1	19 ± 3
BRHA, PE1+P	20.9 ± 0.8	53 ± 1	18 ± 3
BRHA, PE2+P	26.5 ± 0.5	53 ± 1	19 ± 3
BRHA, PE3+P	29.4 ± 1.8	52 ± 1	18 ± 3
BRHA, OPE1+P	24.2 ± 0.7	48 ± 1	19 ± 6
BRHA, OPE2+P	25.0 ± 1.1	48 ± 0	19 ± 3
BRHA, OPE3+P	27.4 ± 1.4	47 ± 1	21 ± 3
BRHA-G1, OPE3+P	32.5 ± 1.5	45 ± 1	24 ± 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำ

ตารางที่ ข-1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด 1 ชั่วโมง

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i0.10000

Polydisperse model

Volume result

Focus = 300 mm

Residual = 1.573%

Concentration = 0.012%

Obscuration = 17.95%

d (0.5) = 7.93  $\mu\text{m}$

d (0.1) = 2.03  $\mu\text{m}$

d (0.9) = 37.56  $\mu\text{m}$

D [4,3] = 14.41 $\mu\text{m}$

Span = 4.48

Sauter mean ( D[3,2] ) = 4.97  $\mu\text{m}$

Mode = 7.64  $\mu\text{m}$

Specific surface area = 1.2062 sq.m./gm.

Density = 1.00 gm./c.c.

Size (Lo) $\mu\text{m}$	Result in %	Size (Hi) $\mu\text{m}$	Result below %	Size (Lo) $\mu\text{m}$	Result in %	Size (Hi) $\mu\text{m}$	Result below %
0.50	0.84	1.32	0.84	25.46	4.22	31.01	85.90
1.32	3.18	1.60	4.02	31.01	4.23	37.79	90.13
1.60	4.87	1.95	8.88	37.79	3.93	46.03	94.06
1.95	5.70	2.38	14.58	46.03	3.00	56.09	97.06
2.38	5.82	2.90	20.40	56.09	1.66	68.33	98.72
2.90	5.60	3.53	26.00	68.33	0.70	83.26	99.41
3.53	5.46	4.30	31.46	83.26	0.33	101.44	99.74
4.30	5.60	5.24	37.06	101.44	0.19	123.59	99.93
5.24	5.98	6.39	43.04	123.59	0.06	150.57	99.99
6.39	6.32	7.78	49.37	150.57	0.01	183.44	100.00
7.78	6.37	9.48	55.74	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	6.16	11.55	61.90	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	5.73	14.08	67.62	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	5.16	17.15	72.79	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	4.62	20.90	77.40	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	4.28	25.46	81.68	492.47	0.00	600.00	100.00

10

Volume %

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตามหากมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Malvern Instruments Ltd  
Malvern, U.K.

MasterSizer X Ver. 1 1a  
Serial No. 6209

P. E.  
05 Mar 15 13.51

ตารางที่ ข-1 (ต่อ) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด 1 ชั่วโมง

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i0.10000

Polydisperse model

Volume result

Focus = 300 mm

Residual = 1.573%

Concentration = 0.012%

Obscuration = 17.95%

d (0.5) = 7.93  $\mu\text{m}$

d (0.1) = 2.03  $\mu\text{m}$

d (0.9) = 37.56  $\mu\text{m}$

D [4,3] = 14.41  $\mu\text{m}$

Span = 4.48

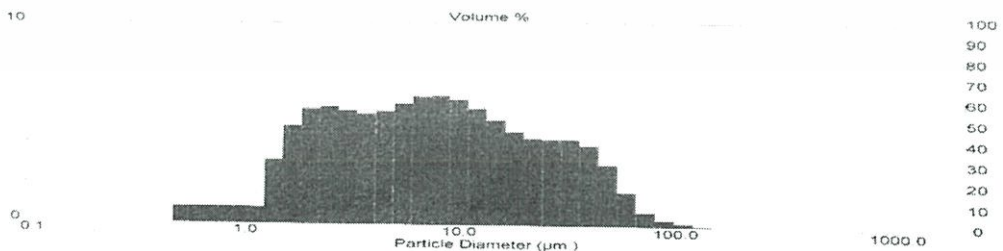
Sauter mean ( D[3,2] ) = 4.97  $\mu\text{m}$

Mode = 7.64  $\mu\text{m}$

Specific surface area = 1.2062 sq.m./gm.

Density = 1.00 gm./c.c.

Size (Lo) $\mu\text{m}$	Result in %	Size (Hi) $\mu\text{m}$	Result below %	Size (Lo) $\mu\text{m}$	Result in %	Size (Hi) $\mu\text{m}$	Result below %
0.50	0.84	1.32	0.84	25.46	4.22	31.01	85.90
1.32	3.18	1.60	4.02	31.01	4.23	37.79	90.13
1.60	4.87	1.95	8.88	37.79	3.93	46.03	94.06
1.95	5.70	2.38	14.58	46.03	3.00	56.09	97.06
2.38	5.82	2.90	20.40	56.09	1.66	68.33	98.72
2.90	5.60	3.53	26.00	68.33	0.70	83.26	99.41
3.53	5.46	4.30	31.46	83.26	0.33	101.44	99.74
4.30	5.60	5.24	37.06	101.44	0.19	123.59	99.93
5.24	5.98	6.39	43.04	123.59	0.06	150.57	99.99
6.39	6.32	7.78	49.37	150.57	0.01	183.44	100.00
7.78	6.37	9.48	55.74	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	6.16	11.55	61.90	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	5.73	14.08	67.62	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	5.16	17.15	72.79	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	4.62	20.90	77.40	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	4.28	25.46	81.68	492.47	0.00	600.00	100.00



Malvern Instruments Ltd  
Malvern, U.K.

MasterSizer X Ver 1.1a  
Serial No. 6209

05 Mar 15 13.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 (ต่อ) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด 1 ชั่วโมง

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i0.10000

Polydisperse model

Volume result

Focus = 300 mm

Residual = 1.480 %

Concentration = 0.012 %

Obscuration = 17.51 %

d (0.5) = 7.97 μm

d (0.1) = 2.04 μm

d (0.9) = 25.84 μm

D [4,3] = 11.57 μm

Span = 2.99

Sauter mean ( D[3,2] ) = 4.94 μm

Mode = 10.17 μm

Specific surface area = 1.2152 sq.m./gm.

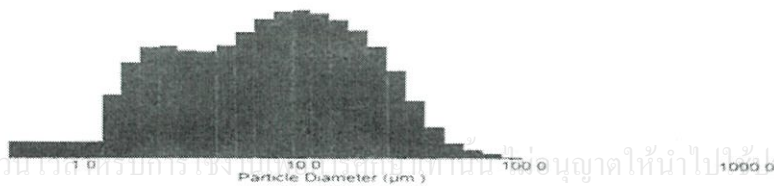
Density = 1.00 gm./c.c

Size (Lo) μm	Result in %	Size (Hi) μm	Result below %	Size (Lo) μm	Result in %	Size (Hi) μm	Result below %
0.50	0.87	1.32	0.87	25.46	4.34	31.01	93.97
1.32	3.13	1.60	4.00	31.01	2.86	37.79	96.83
1.60	4.75	1.95	8.75	37.79	1.55	46.03	98.38
1.95	5.50	2.38	14.24	46.03	0.78	56.09	99.16
2.38	5.56	2.90	19.80	56.09	0.45	68.33	99.61
2.90	5.34	3.53	25.14	68.33	0.29	83.26	99.90
3.53	5.27	4.30	30.42	83.26	0.10	101.44	100.00
4.30	5.58	5.24	36.00	101.44	0.00	123.59	100.00
5.24	6.23	6.39	42.23	123.59	0.00	150.57	100.00
6.39	6.89	7.78	49.12	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	7.26	9.48	56.38	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	7.34	11.55	63.72	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	7.18	14.08	70.91	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	6.85	17.15	77.76	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	6.34	20.90	84.10	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	5.53	25.46	89.63	492.47	0.00	600.00	100.00

10

Volume %

100



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่ไปยังบุคคลภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาต

Malvern Instruments Ltd  
Malvern U.K. MasterSizer X Ver. 1.1a  
Serial No. 6209 30 Oct 14 14:15

ตารางที่ ข-1 (ต่อ) ลักษณะทางสถิติฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด 1 ชั่วโมง

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i0.10000

Polydisperse model

Volume result

Focus = 300 mm

Residual = 1.436 %

Concentration = 0.013 %

Obscuration = 17.65 %

d (0.5) = 8.87  $\mu\text{m}$

d (0.1) = 2.14  $\mu\text{m}$

d (0.9) = 24.39  $\mu\text{m}$

D [4,3] = 11.45  $\mu\text{m}$

Span = 2.51

Sauter mean ( D[3,2] ) = 5.27  $\mu\text{m}$

Mode = 13.68  $\mu\text{m}$

Specific surface area = 1.1394 sq.m./gm.

Density = 1.00 gm./c.c.

Size (Lo) $\mu\text{m}$	Result in %	Size (Hi) $\mu\text{m}$	Result below %	Size (Lo) $\mu\text{m}$	Result in %	Size (Hi) $\mu\text{m}$	Result below %
0.50	0.73	1.32	0.73	25.46	4.21	31.01	95.36
1.32	2.75	1.60	3.48	31.01	2.59	37.79	97.95
1.60	4.21	1.95	7.69	37.79	1.35	46.03	99.30
1.95	4.93	2.38	12.62	46.03	0.55	56.09	99.86
2.38	5.04	2.90	17.66	56.09	0.14	68.33	100.00
2.90	4.89	3.53	22.55	68.33	0.00	83.26	100.00
3.53	4.85	4.30	27.41	83.26	0.00	101.44	100.00
4.30	5.17	5.24	32.57	101.44	0.00	123.59	100.00
5.24	5.85	6.39	38.42	123.59	0.00	150.57	100.00
6.39	6.71	7.78	5.13	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	7.49	9.48	52.62	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	8.17	11.55	60.78	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	8.55	14.08	69.33	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	8.37	17.15	77.70	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	7.49	20.90	85.19	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	5.96	25.46	91.15	492.47	0.00	600.00	100.00

10

Volume %

100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาหรือส่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด 3 ชั่วโมง

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i0.10000

Polydisperse model

Volume result

Focus = 300 mm

Residual = 1.573%

Concentration = 0.012%

Obscuration = 17.95%

d (0.5) = 7.93 µm

d (0.1) = 2.03 µm

d (0.9) = 37.56 µm

D [4,3] = 14.41µm

Span = 4.48

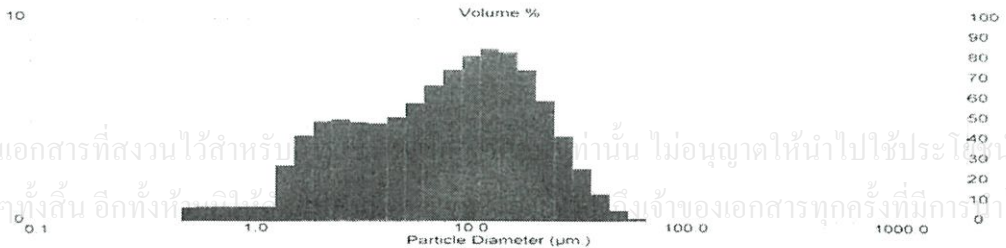
Sauter mean ( D[3,2] ) = 4.97 µm

Mode = 7.64 µm

Specific surface area = 1.2062 sq.m./gm.

Density = 1.00 gm./c.c.

Size (Lo) µm	Result in %	Size (Hi) µm	Result below %	Size (Lo) µm	Result in %	Size (Hi) µm	Result below %
0.50	0.84	1.32	0.84	25.46	4.22	31.01	85.90
1.32	3.18	1.60	4.02	31.01	4.23	37.79	90.13
1.60	4.87	1.95	8.88	37.79	3.93	46.03	94.06
1.95	5.70	2.38	14.58	46.03	3.00	56.09	97.06
2.38	5.82	2.90	20.40	56.09	1.66	68.33	98.72
2.90	5.60	3.53	26.00	68.33	0.70	83.26	99.41
3.53	5.46	4.30	31.46	83.26	0.33	101.44	99.74
4.30	5.60	5.24	37.06	101.44	0.19	123.59	99.93
5.24	5.98	6.39	43.04	123.59	0.06	150.57	99.99
6.39	6.32	7.78	49.37	150.57	0.01	183.44	100.00
7.78	6.37	9.48	55.74	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	6.16	11.55	61.90	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	5.73	14.08	67.62	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	5.16	17.15	72.79	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	4.62	20.90	77.40	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	4.28	25.46	81.68	492.47	0.00	600.00	100.00



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง... เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 (ต่อ) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด 3 ชั่วโมง

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i0.10000

Polydisperse model

Volume result

Focus = 300 mm

Residual - 1.209%

Concentration = 0.012%

Obscuration - 18.97 %

d (0.5) = 7.81 µm

d (0.1) = 1.85 µm

d (0.9) = 57.97 µm

D [4,3] = 23.25 µm

Span = 7.18

Sauter mean ( D[3,2] ) = 4.62 µm

Mode = 2.11 µm

Specific surface area = 1.2980 sq.m./gm.

Density = 1.00 gm./c.c.

Size (Lo) µm	Result in %	Size (Hi) µm	Result below %	Size (Lo) µm	Result in %	Size (Hi) µm	Result below %
0.50	1.38	1.32	1.38	25.46	3.21	31.01	80.58
1.32	4.26	1.60	5.64	31.01	3.17	37.79	83.76
1.60	6.11	1.95	11.75	37.79	3.04	46.03	86.80
1.95	6.63	2.38	18.38	46.03	2.77	56.09	89.57
2.38	6.10	2.90	24.48	56.09	2.38	68.33	91.95
2.90	5.22	3.53	29.70	68.33	1.87	83.26	93.82
3.53	4.62	4.30	34.32	83.26	1.32	101.44	95.14
4.30	4.64	5.24	38.96	101.44	0.91	123.59	96.05
5.24	5.17	6.39	44.13	123.59	0.82	150.57	96.86
6.39	5.74	7.78	49.87	150.57	0.92	183.44	97.78
7.78	5.88	9.48	55.75	183.44	0.98	223.51	98.76
9.48	5.57	11.55	61.32	223.51	0.82	272.31	99.58
11.55	4.92	14.08	66.24	272.31	0.41	331.77	100.00
14.08	4.20	17.15	70.44	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	3.63	20.90	74.07	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	3.30	25.46	77.38	492.47	0.00	600.00	100.00

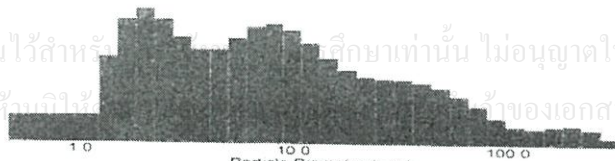
10

Volume %

100  
90  
80  
70  
60  
50  
40  
30  
20  
10  
0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้...  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้... ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.1



1000.0

ตารางที่ ข-2 (ต่อ) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด 3 ชั่วโมง

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i0.10000

Polydisperse model

Volume result

Focus = 300 mm

Residual = 1.209%

Concentration = 0.012%

Obscuration = 18.97 %

d (0.5) = 7.81 µm

d (0.1) = 1.85 µm

d (0.9) = 57.97 µm

D [4,3] = 23.25 µm

Span = 7.18

Sauter mean ( D[3,2] ) = 4.62 µm

Mode = 2.11 µm

Specific surface area = 1.2980 sq.m./gm.

Density = 1.00 gm./c.c.

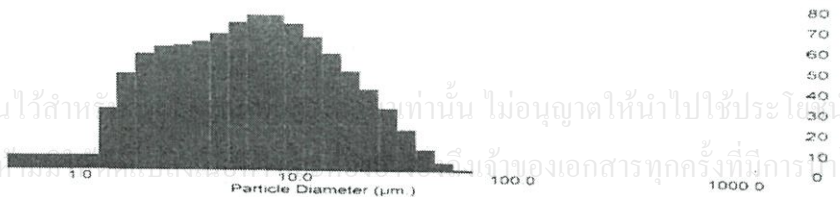
Size (Lo) µm	Result in %	Size (Hi) µm	Result below %	Size (Lo) µm	Result in %	Size (Hi) µm	Result below %
0.50	1.38	1.32	1.38	25.46	3.21	31.01	80.58
1.32	4.26	1.60	5.64	31.01	3.17	37.79	83.76
1.60	6.11	1.95	11.75	37.79	3.04	46.03	86.80
1.95	6.63	2.38	18.38	46.03	2.77	56.09	89.57
2.38	6.10	2.90	24.48	56.09	2.38	68.33	91.95
2.90	5.22	3.53	29.70	68.33	1.87	83.26	93.82
3.53	4.62	4.30	34.32	83.26	1.32	101.44	95.14
4.30	4.64	5.24	38.96	101.44	0.91	123.59	96.05
5.24	5.17	6.39	44.13	123.59	0.82	150.57	96.86
6.39	5.74	7.78	49.87	150.57	0.92	183.44	97.78
7.78	5.88	9.48	55.75	183.44	0.98	223.51	98.76
9.48	5.57	11.55	61.32	223.51	0.82	272.31	99.58
11.55	4.92	14.08	66.24	272.31	0.41	331.77	100.00
14.08	4.20	17.15	70.44	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	3.63	20.90	74.07	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	3.30	25.46	77.38	492.47	0.00	600.00	100.00

10

Volume %

100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง... เป็นเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Malvern Instruments Ltd  
Malvern, U.K

MasterSizer X Ver. 1 1a  
Serial No. 6209

P. 5  
05 Mar 15 15:36

ตารางที่ ข-2 (ต่อ) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด 3 ชั่วโมง

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i0.10000

Polydisperse model

Volume result

Focus = 300 mm

Residual = 0.668 %

Concentration = 0.013 %

Obscuration = 19.96 %

d (0.5) = 7.11 µm

d (0.1) = 1.99 µm

d (0.9) = 38.21 µm

D [4,3] = 14.26µm

Span = 5.09

Sauter mean ( D[3,2] ) = 4.74 µm

Mode = 7.11 µm

Specific surface area = 1.2671 sq.m./gm.

Density = 1.00 gm./c.c.

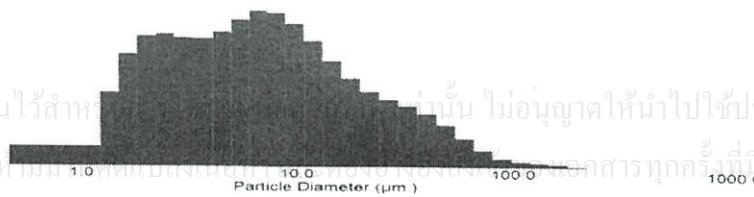
Size (Lo) µm	Result in %	Size (Hi) µm	Result below %	Size (Lo) µm	Result in %	Size (Hi) µm	Result below %
0.50	0.89	1.32	0.89	25.46	3.49	31.01	86.44
1.32	3.37	1.60	4.26	31.01	3.38	37.79	89.82
1.60	5.17	1.95	9.42	37.79	3.13	46.03	92.95
1.95	6.07	2.38	15.49	46.03	2.67	56.09	95.62
2.38	6.23	2.90	21.73	56.09	2.02	68.33	97.64
2.90	6.06	3.53	27.79	68.33	1.31	83.26	98.95
3.53	5.96	4.30	33.74	83.26	0.69	101.44	99.64
4.30	6.13	5.24	39.87	101.44	0.27	123.59	99.91
5.24	6.50	6.39	46.37	123.59	0.07	150.57	99.98
6.39	6.70	7.78	53.07	150.57	0.01	183.44	99.99
7.78	6.50	9.48	59.57	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	5.97	11.55	65.54	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	5.25	14.08	70.79	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	4.54	17.15	75.33	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	3.98	20.90	79.31	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	3.64	25.46	82.95	492.47	0.00	600.00	100.00

10

Volume %

100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า...  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Malvern Instruments Ltd  
Malvern, U.K.

MasterSizer X Ver. 1.1a  
Serial No. 6209

P. 1  
05 Mar 15 15.5

ตารางที่ ข-2 (ต่อ) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด 3 ชั่วโมง

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i0.10000

Polydisperse model

Volume result

Focus = 300 mm

Residual = 1.887 %

Concentration = 0.017 %

Obscuration = 23.20 %

d (0.5) = 8.35  $\mu\text{m}$

d (0.1) = 2.06  $\mu\text{m}$

d (0.9) = 32.77  $\mu\text{m}$

D [4,3] = 44.37  $\mu\text{m}$

Span = 3.68

Sauter mean ( D[3,2] ) = 5.12  $\mu\text{m}$

Mode = 10.62  $\mu\text{m}$

Specific surface area = 1.1722 sq.m./gm.

Density = 1.00 gm./c.c.

Size (Lo) $\mu\text{m}$	Result in %	Size (Hi) $\mu\text{m}$	Result below %	Size (Lo) $\mu\text{m}$	Result in %	Size (Hi) $\mu\text{m}$	Result below %
0.50	0.85	1.32	0.85	25.46	3.16	31.01	89.35
1.32	3.05	1.60	3.90	31.01	1.89	37.79	91.24
1.60	4.61	1.95	8.51	37.79	0.88	46.03	92.13
1.95	5.33	2.38	13.84	46.03	0.22	56.09	92.35
2.38	5.37	2.90	19.21	56.09	0.00	68.33	92.35
2.90	5.15	3.53	24.35	68.33	0.00	83.26	92.35
3.53	5.05	4.30	29.40	83.26	0.00	101.44	92.35
4.30	5.36	5.24	34.75	101.44	0.00	123.59	92.35
5.24	6.01	6.39	40.76	123.59	0.00	150.57	92.35
6.39	6.72	7.78	47.48	150.57	0.00	183.44	92.35
7.78	7.17	9.48	54.65	183.44	0.00	223.51	92.35
9.48	7.35	11.55	62.00	223.51	0.08	272.31	92.43
11.55	7.22	14.08	69.22	272.31	0.47	331.77	92.90
14.08	6.69	17.15	75.92	331.77	1.38	404.21	94.28
17.15	5.77	20.90	81.68	404.21	2.78	492.47	97.07
20.90	4.51	25.46	86.20	492.47	2.93	600.00	100.00

10

Volume %

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่ว่าการใช้เอกสารนี้...  
 Malvern Instruments Ltd  
 MasterSizer X Ver 1.1a  
 Serial No 6209

05 Mar 15 15