การศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมฐานชีวภาพในยางไนไตรล์

STUDY OF BLACK RICE HUSK ASH AS BIO-BASED FILLER IN NITRILE RUBBER

เดชาธร ฉันทรักษ์

DAECHATORN CHANTARUK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-SC-M-014-002

การศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมฐานชีวภาพในยางไนไตรล์

STUDY OF BLACK RICE HUSK ASH
AS BIO-BASED FILLER IN NITRILE RUBBER

เดชาธร ฉันทรักษ์

DAECHATORN CHANTARUK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-SC-M-014-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF BLACK RICE HUSK ASH
AS BIO-BASED FILLER IN NITRILE RUBBER

DAECHATORN CHANTARUK

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

KMITL-2015-SC-M-014-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2015

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมฐานชีวภาพในยางไนไตรล์
STUDY OF BLACK RICE HUSK ASH AS BIO-BASED FILLER IN NITRILE RUBBER

นักศึกษา นายเดชาธร ฉันทรักษ์
รหัสประจำตัว 54651109
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี	(ลายมือชื่อ)
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตริรุฬห์	(ลายมือชื่อ)
รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย	(ลายมือชื่อ)
รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด	(ลายมือชื่อ)

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 26 ธันวาคม พ.ศ. 2557 เวลา 09.00 – 12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 316 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุษณี ธนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่...๒๐...**เดือน**.........**พ.ศ**...๕๘...

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมฐานชีวภาพในยางไนไตรล์
นักศึกษา	นายเดชาธร ฉันทรักษ์
รหัสประจำตัว	54651109
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. อิทธิพล แจ้งชัด

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำ (Black Rice Husk Ash; BRHA) จากโรงไฟฟ้าพลังชีวมวลเป็นสารตัวเติมฐานชีวภาพในยางไนไตรล์ (Acrylonitrile Butadiene Rubber; NBR) โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของยาง ได้แก่ ผลของการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 และพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบ ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำ และเปรียบเทียบการใช้เถ้าแกลบดำกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ สามารถ เตรียมตัวอย่างโดยการผสมยางกับเถ้าแกลบดำ และสารเติมแต่งต่างๆ ด้ วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จากนั้นทำการหาพฤติกรรมการเชื่อมโยงแล้วเตรียม ชิ้นยางตัวอย่างด้วยการอัดขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตและศึกษาสัณฐานวิทยา จากการวิเคราะห์พบว่า BRHA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอยู่ในช่วง 6.1-128.9 μm มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 6.18-17.30 m^2/g มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ในปริมาณ 74 % และมีหมู่ฟังก์ชันไซลานอลกับไซลอกเซนเหมือนกับซิลิกาชนิดตกตะกอน การปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ส่งผลต่อเวลาเริ่มเชื่อมโยง และเวลาเชื่อมโยงยาง NBR ลดลง ในด้านสมบัติเชิงกลการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (M100) และค่าความแข็งแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น ค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดลดลง และจากสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตพบว่าเมื่อปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ทำให้ยางผสมสูตรมีค่ามอดุลัสสะสมมากกว่า และค่า tan δ น้อยกว่ายางผสมสูตรที่ไม่ปรับปรุงเถ้าแกลบดำ ขนาดอนุภาค BRHA ที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมโยงของยางผสมสูตรอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดมีเวลาเชื่อมโยงลดลงเล็กน้อย และเมื่อ BRHA มีขนาดอนุภาคเล็กลงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ BRHA ส่งผลให้มีค่าความหนืดมูนนี่ ค่าทอร์กสูงสุด และเกิดการเสียสภาพแบบเกิดการเชื่อมโยง (Marching) มีแนวโน้มสูงขึ้น ในด้านสมบัติเชิงกลพบว่าการใช้ BRHA ปริมาณมากขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น จนมีปริมาณ BRHA 100 phr ให้ค่าดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้าพบว่า BRHA จัดเป็นสารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง โดยสามารถลดต้นทุนและปรับปรุงสมบัติบางประการของยางไนไตรล์ได้

คำสำคัญ: ยางไนไตรล์, ยางเอ็นบีอาร์, เถ้าแกลบดำ, สารคู่ควบ, สารตัวเติมฐานชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	STUDY OF BLACK RICE HUSK ASH AS BIO-BASED FILLER IN NITRILE RUBBER
Student	Mr. Daechatorn Chantaruk
Student ID	54651109
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Ittipol Jangchud

ABSTRACT

In this thesis, Black Rice Husk Ash (BRHA) from a biomass power plant was studied as a bio-based filler for Acrylonitrile Butadiene Rubber (NBR). Various factors were investigated such as surface modification of BRHA by silane coupling agent (Si-69) and polyethylene glycol (PEG), particle sizes of BRHA and BRHA loading. Comparative study between BRHA and commercial fillers was also carried out. NBR was first mixed with BRHA and other additives by a two-roll mill. Compounds were then tested for cure characteristics and shaped by compression molding technique to study mechanical properties, dynamic mechanical thermal properties and morphology. Particle sizes of BRHA were in a range of 6.1 – 128.9 μm and specific surface area of BRHA was in a range of 6.18 – 17.30 m^2/g. Silica composition in BRHA was about 74%. From FT-IR, it was found that silanol and siloxane groups of BRHA were taken place similar to precipitated silica. It was found that the surface modification of BRHA affected cure characteristics of NBR by decreasing scorch and cure times. When the treated BRHA was used, tensile strength, rubber modulus (M100) and tear strength of vulcanized NBR were increased, whereas, compression set was decreased. In addition, the rubber compounds with BRHA treated by both silane coupling agent and PEG had higher storage modulus and lower tan delta values than those with untreated BRHA. Particle sizes of BRHA had insignificant effect to cure characteristics of NBR whereas cure time of NBR with ground BRHA had slightly decreased effect. Moreover, smaller particle sizes of BRHA yielded an increase in mechanical properties

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dramatically. Furthermore, increasing amount of BRHA was found that the Mooney viscosity, maximum torque and marching cure behavior of NBR had an increasing trend. Addition of BRHA 100 phr seemed to be the optimum loading to yield rubbers with good mechanical properties. In other words, BRHA seems to be a promising candidate as semi-reinforcing and cost-effective filler for NBR.

Keywords: Acrylonitrile butadiene rubber, NBR, Black rice husk ash (BRHA), Coupling agent and Bio-filler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด ที่กรุณาอบรมสั่งสอนให้ความรู้คำปรึกษาข้อเสนอแนะและความเอาใจใส่เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บริษัท เอส .เค. โพลีเมอร์ จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์สารเคมีสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ โรงไฟฟ้าชีวมวล บริษัท ไบโอ -แมส เพาเวอร์ จำกัด จ.ชัยนาท ที่กรุณาอนุเคราะห์เถ้าแกลบดำสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ คุณสุดใจ สอนสะอาด คุณปราณี บุณวัฒน์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า - คุณทหารลาดกระบังที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ชาวพอลิเมอร์ทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ การชี้แนะ และเป็นกำลังใจและบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้ที่มีส่วนช่วยเหลือ และให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาตลอดจนสำเร็จสมบูรณ์

เดชาธร ฉันทรักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.. I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. III

กิตติกรรมประกาศ.. V

สารบัญ.. VI

สารบัญตาราง.. XI

สารบัญรูป.. XIII

บทที่ 1 บทนำ.. 1

1.1 ที่มา และความสำคัญของงานวิจัย.. 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.. 4

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.. 4

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.. 5

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 ยางไนไตรล์.. 6

2.1.1 โครงสร้างทางเคมี และสมบัติ.. 7

2.1.2 การจัดเกรดยางไนไตรล์.. 8

2.1.3 การผสมเคมียางไนไตรล์.. 9

2.1.4 การใช้งานยางไนไตรล์.. 10

2.2 สารเติมแต่ง (Additives).. 11

2.2.1 สารเชื่อมโยง (Crosslinking agents).. 12

2.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators).. 14

2.2.3 สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activators).. 15

2.2.4 สารแอนติออกซิแดนต์ (Antioxidants).. 15

2.2.5 สารคู่ควบ (Coupling agents).. 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.6 สารตัวเติม (Fillers) ... 16

2.3 เถ้าแกลบ ... 19

2.3.1 สัณฐานวิทยาของแกลบ ... 19

2.3.2 องค์ประกอบของแกลบ ... 20

2.3.3 การแบ่งประเภทของเถ้าแกลบ ... 22

2.3.4 ประโยชน์ของแกลบ ... 23

2.4 ซิลิกา (Silica) ... 24

2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของซิลิกา ... 28

2.4.2 ลักษณะทางเคมีของพื้นผิว ... 29

2.4.3 ปัญหาของการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ... 29

2.4.4 สารคู่ควบไซเลน ... 30

2.4.5 บทบาทของสารคู่ควบไซเลน ... 31

2.5 เขม่าดำ (Carbon black) ... 33

2.5.1 ชนิด และวิธีการผลิตเขม่าดำ ... 33

2.5.2 รูปร่าง และโครงสร้างของเขม่าดำ ... 34

2.5.3 ยางบาวด์ (Bound rubber) ... 35

2.5.4 ยางออกคลู๊ด (Occluded rubber) ... 35

2.6 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ... 36

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ... 38

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย ... 46

3.1 แผนการดำเนินงาน ... 46

3.2 สารเคมี ... 47

3.3 อุปกรณ์ และเครื่องมือ ... 49

3.4 วิธีการทดลอง ... 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1 การเตรียมเถ้าแกลบดำ………...…………………......……….……...…… 50

3.4.2 การบดละเอียดเถ้าแกลบดำ………..….. 51

3.4.3 การตรวจสอบ และวิเคราะห์เถ้าแกลบดำ………...….............................…... 51

3.4.4 การเตรียมเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69.............. 52

3.4.5 การเตรียมยางผสมสูตร…....………………...……………....…………..… 52

3.5 การทดสอบยางผสมสูตร…..................................……..…………………...…… 55

3.5.1 การทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)...………....………....…… 55

3.5.2 พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร (Cure characteristic)…................... 55

3.5.3 การขึ้นรูปยางเชื่อมโยง……..........................…..…………...………...…… 57

3.5.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยง…….............…….......................… 58

3.5.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile tests)…………..……………………… 58

3.5.4.2 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด………..……………………….... 60

3.5.4.3 การทดสอบความแข็งกด……………..……………………………… 60

3.5.4.4 การทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set)........... 61

3.5.4.5 การทดสอบการสึกหรอ……………………………………………… 61

3.5.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตด้วยเทคนิค DMTA…………. 62

3.5.6 การศึกษาการบวมตัวของยางผสมสูตรในตัวทำละลาย…………………..… 62

3.5.7 การศึกษาสัณฐานวิทยา.. 63

บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผล.. 64

4.1 การวิเคราะห์เถ้าแกลบดำ……………………………………………………..… 65

4.2 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69..................... 69

4.2.1 การยืนยันการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69....................... 69

4.2.2 พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร……………………………………… 71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3 การบวมตัวของยางผสมสูตรในตัวทำละลาย.................................... 73
4.2.4 สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร.................................... 74
4.2.5 สัณฐานวิทยาของยางที่มีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติม.................................... 78
4.2.6 สมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตของยางผสมสูตร.................................... 80
4.3 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำ.................................... 82
4.3.1 พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร.................................... 82
4.3.2 สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร.................................... 83
4.4 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำ.................................... 88
4.4.1 พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร.................................... 88
4.4.2 สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร.................................... 90
4.5 ผลของการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์เทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น 95
4.5.1 การยืนยันการปรับปรุงซิลิกาชนิดตกตะกอนด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69.................................... 96
4.5.2 พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร.................................... 97
4.5.3 สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร.................................... 98
4.5.4 สมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตของยางผสมสูตร.................................... 100
4.5.5 การวิเคราะห์ต้นทุน และสมบัติของยางผสมสูตร.................................... 102

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.................................... 105
5.1 สรุปผลการวิจัย.................................... 105
5.2 ข้อเสนอแนะ.................................... 106

เอกสารอ้างอิง.................................... 108

ภาคผนวก.................................... 113

ภาคผนวก ก ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของเถ้าแกลบดำ.................................... 114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข การทดสอบสมบัติเชิงกล.. 119

ภาคผนวก ค การทดสอบการบวมตัว.. 123

ภาคผนวก ง การทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัต.......................... 126

ภาคผนวก จ การคำนวณราคาต้นทุนวัตถุดิบ.. 129

ภาคผนวก ช ขนาดตะแกรงร่อน... 133

ประวัติผู้เขียน.. **134**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ตัวอย่างรายชื่อของผู้ผลิตยางไนไตรล์.. 6

2.2 แสดงอัตราส่วนระหว่างสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกับกำมะถันในระบบต่างๆ.......... 13

2.3 องค์ประกอบของแกลบ.. 20

2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ.. 23

2.5 องค์ประกอบของซิลิกาจากธรรมชาติชนิดต่างๆ... 25

2.6 สมบัติบางประการของซิลิกาจากธรรมชาติชนิดต่างๆ.. 26

2.7 องค์ประกอบของซิลิกาจากการสังเคราะห์ชนิดต่างๆ.. 27

2.8 สมบัติบางประการของซิลิกาจากการสังเคราะห์ชนิดต่างๆ... 27

2.9 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดต่างๆ.. 38

3.1 สมบัติบางประการของซิลิกา (Tokusil® 255).. 48

3.2 สมบัติบางประการของเขม่าดำ (N 330)... 48

3.3 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนต เกรด GCC... 48

3.4 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ... 54

4.1 อักษรย่อที่ใช้ในงานวิจัย... 64

4.2 ปริมาณของเถ้าแกลบดำขนาดต่างๆ จากโรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวล................................ 65

4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำจากโรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวล.............................. 66

4.4 ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย และพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าแกลบดำในแต่ละขนาด 69

4.5 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยง และความหนืดมูนนี่ของ
ยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr...................................... 72

4.6 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่ออุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว........................ 81

4.7 สมบัติเชิงกลของเถ้าแกลบดำบดละเอียด.. 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.7 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยง และความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr........ 84

4.8 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยง และความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตรที่มี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ........ 90

4.9 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย พื้นที่ผิวจำเพาะ และความหนาแน่นรวมของสารตัวเติมชนิดต่างๆ........ 96

4.10 ผลของการเปรียบเทียบเถ้าแกลบดำกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยง และความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตรโดยมีสารตัวเติมปริมาณ 60 phr........ 98

4.11 ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และมอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด ความแข็งแรงฉีกขาด และค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร........ 99

4.12 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางผสมสูตรเมื่อใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 60 phr........ 102

4.13 ราคาวัตถุดิบรวมที่ใช้ในการผลิตยางผสมสูตร........ 103

4.14 สมบัติต่างๆ และราคาของยางผสมสูตรที่มีสารตัวเติมเทียบกับยางผสมสูตรที่ไม่มีสารตัวเติม........ 104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างของยางไนไตรล์.. 8

2.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยางไนไตรล์.. 11

2.3 ชนิดการเชื่อมโยงกำมะถัน 13

2.4 โครงสร้างของเมล็ดข้าว.. 19

2.5 โครงสร้างของเซลลูโลส.. 21

2.6 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส.. 22

2.7 โครงสร้างของลิกนิน.. 22

2.8 การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลิกา.. 28

2.9 ลักษณะของหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา.. 29

2.10 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน Si-69... 32

2.11 ปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับสารคู่ควบไซเลน Si-69.. 32

2.12 โครงสร้างของเขม่าดำ.. 35

2.13 ภาพวาดแสดงโครงสร้างของเขม่าดำ Bound rubber และ Occluded rubber รวมเป็น ส่วนเสริมแรง (Reinforcing entity)... 36

3.1 เครื่องแยกขนาด... 50

3.2 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง.. 52

3.3 เครื่องวัดความหนืดมูนนี... 55

3.4 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน.. 56

3.5 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางผสมสูตรแสดงเวลาเชื่อมโยง และเวลาเริ่มเชื่อมโยง... 56

3.6 ลักษณะชิ้นทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด... 57

3.7 ลักษณะชิ้นงานทดสอบการสึกหรอ... 58

3.8 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์... 59

3.9 ตัวอย่างกราฟความเค้น – ความเครียด (Stress-strain curve) ของตัวอย่างประเภทยาง........ 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.10 เครื่องวัดความแข็งกด.. 60

3.11 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด.. 61

4.1 สเปกทรา FTIR ของ ก) เถ้าแกลบดำ และ ข) ซิลิกาชนิดตกตะกอน.............................. 66

4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำจาก SEM ของ ก) F-BRHA(#1), (ข) F-BRHA(#2), (ค) F-BRHA(#3), ที่กำลังขยาย 500 (ซ้าย) และ 5000 (ขวา)................ 67

4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำจาก SEM ของ (ก) F-BRHA(#4) และ (ข) F-BRHA-G) ที่กำลังขยาย 500 (ซ้าย) และ 5000 (ขวา).................................. 68

4.4 สเปกทรา FTIR ของ ก) เถ้าแกลบดำไม่ได้ปรับปรุงผิว และ ข) เถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69.. 70

4.5 ปฏิกิริยาของซิลิกาในเถ้าแกลบดำ และชนิดตกตะกอนกับด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69........ 71

4.6 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr.. 72

4.7 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการบวมตัวในตัวทำละลายไดคลอโร-มีเทนของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr............................ 73

4.8 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในตัวทำละลายไดคลอโร-มีเทน เป็นเวลา 3 วัน ของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr...... 74

4.9 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr.. 75

4.10 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr.. 75

4.11 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืดของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr................................ 76

4.12 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr.. 76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.13 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งกด (Shore A) ของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr 77

4.14 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดเป็นเวลา 22 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C ของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr 77

4.15 แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจาก SEM (ก) BRHA(#4); (ข) BRHA(#4), S; (ค) BRHA(#4), P และ (ง) BRHA(#4), P+S ที่กำลังขยาย 1000 (ซ้าย) และ 5000 (ขวา) เท่า 79

4.16 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่ามอดุลัสสะสมของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr 80

4.17 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่า tan δ ของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr 81

4.18 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr 83

4.19 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr 84

4.20 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr 85

4.21 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความมอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืดของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr 85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.22 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr 86

4.23 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งกด (Shore A) ของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr 86

4.24 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดเป็นเวลา 22 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 70°C ของยางผสมสูตรที่มีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr 87

4.25 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำจาก SEM ของ F-BRHA(#1) (ซ้าย) และ F-BRHA-G (ขวา) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า 88

4.26 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ 89

4.27 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ 91

4.28 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ 92

4.29 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ 92

4.30 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความมอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืดของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ 93

4.31 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งกด (Shore A) ของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ 93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.32 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดเป็นเวลา 22 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C ของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ...... 94

4.33 สเปกทรา FT-IR ของ ก) ซิลิกาชนิดตกตะกอนไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และ ข) ซิลิกาชนิดตกตะกอนที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69...... 96

4.34 ผลของการเปรียบเทียบเถ้าแกลบดำกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรโดยมีสารตัวเติมปริมาณ 60 phr...... 98

4.35 ค่ามอดุลัสสะสมของยางผสมสูตรเมื่อใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 60 phr...... 101

4.36 ค่า tan δ ของยางผสมสูตรเมื่อใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 60 phr...... 102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

แม้ปัจจุบันข้าวจะไม่ใช่สินค้าที่ทำรายได้หลักเข้าประเทศเหมือนเช่นในอดีต แต่ประเทศไทยยังเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าประเทศไทยมีผลผลิตข้าวมากเพียงใด จากข้อมูลในปัจจุบัน (พ.ศ. 2556-2557)ประเทศไทยมีการผลิตข้าวเป็นจำนวนมากถึง 36 ล้านตันต่อปี และจากข้อมูลขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ ทั่วโลกมีการเกี่ยวข้าวมากกว่า 750ล้านตันต่อปี [1]ข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวได้เมื่อนำมาผ่านกระบวนการสีจะได้เมล็ดข้าวกับเปลือกข้าวหรือแกลบ ซึ่งแกลบจะมีน้ำหนักประมาณ 22.5-25.2% ของข้าวเปลือก [2]ซึ่งจากกระบวนการผลิตข้าวนั้นจะมีแกลบเป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมากตามปริมาณข้าวที่เก็บเกี่ยวได้โดยทั่วไปแกลบจะถูกนำมาใช้ประโยชน์ ซึ่งวิธีที่นิยมคือ การนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าในโรงงานไฟฟ้าชีวมวล เพราะแกลบมีค่าความร้อนเฉลี่ย 3,880 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (kcal/kg) เมื่อเทียบกับค่าความร้อนเฉลี่ยที่ได้จากไม้ฟืน ที่มีค่า 4,475 kcal/kg ซึ่งมีค่ามากกว่าเล็กน้อยนอกจากนี้แกลบยังได้รับความนิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมากที่สุดในบรรดาชีวมวล (Biomass) ทั้งหมด เพราะแกลบมีความชื้นต่ำและไม่ต้องผ่านเครื่องย่อยก่อนนำไปเผาไหม้ อย่างไรก็ดี สิ่งที่เป็นความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างการเผาแกลบกับไม้ฟืนคือ ปริมาณเถ้า โดยแกลบจะให้เถ้าออกมามากกว่าไม้ฟืนถึง 7 เท่า ทำให้มีเถ้าแกลบที่หลงเหลือจากกระบวนการเผาเป็นจำนวนมากด้วยเช่นกัน และเถ้าแกลบนั้น สามารถฟุ้งกระจายได้ปัจจุบัน มีการกำจัดเถ้าแกลบด้วยวิธีการกองเก็บ และฝังกลบ ทำให้ เถ้าแกลบกลายเป็นปัญหาสำคัญสำหรับโรงงานสีข้าว และโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากก่อให้เกิดมล ภาวะทางอากาศ และเป็นภาระในการบำบัด

นักวิทยาศาสตร์พบว่า ในเถ้าแกลบมีซิลิกา (Silica; SiO_2) เป็นองค์ประกอบประมาณ 70-90 % [3]และเถ้าแกลบมีความพรุน (Porosity) มากน้ำหนักเบามีพื้นที่ผิวมากมีสมบัติดูดซับ (Absorbent) ดีอีกทั้งมีสมบัติเป็นฉนวนด้วยแกลบที่เผาในระบบเปิดจะได้เถ้าแกลบ 2 ชนิดคือ เถ้าแกลบดำ (Black rice husk ash; BRHA) และเถ้าแกลบขาว (White rice husk ash; WRHA) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเตาเผาและสภาวะการเผาที่มีต่อความสมบูรณ์ของการสันดาปในเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเถ้าแกลบดำเกิดจากการเผาที่อุณหภูมิต่ำจะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก และมีองค์ประกอบของคาร์บอนร่วมอยู่ด้วยเนื่องจากการเผาที่ไม่สมบูรณ์ (Incompletd combustion)ในขณะที่เมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นทำให้เกิดการเผาที่สมบูรณ์มากขึ้น จะมีเถ้าแกลบขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และพบปริมาณซิลิกาที่สูงกว่าเถ้าแกลบดำ แต่มีความหนาแน่นรวมที่น้อยทำให้เกิดการฟุ้งกระจายได้ง่าย [4]ในปัจจุบันจึงมีงานวิจัยการนำเถ้าแกลบมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมคอนกรีต เซรามิก และ การนำเถ้าแกลบมาสกัดเอาซิลิกา เพื่อนำไป ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังได้การมีวิจัยการนำเถ้าแกลบมาใช้ประโยชน์เป็นสารตัวเติมในยางด้วยเช่นกันซึ่งมีงานวิจัยการนำเถ้าแกลบ ดำไปใช้เป็นสารตัวเติม เช่น งานวิจัยของ Pattamaprom C. et.al. [5] ทำการศึกษาผลของการใช้เถ้าแกลบ ดำเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติดัดแปร เช่น ยางธรรมชาติกราฟ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleatednatural rubber; MNR) ยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์ (Epoxidizednatural rubber; ENR) และยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีน - พรอพิลีนไดอีน (Natural rubber blend ethylene-propylene dienerubber; NR/EPDM) เมื่อใส่สารตัวเติมเถ้าแกลบ ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 75 μm ในปริมาณ 45 phr ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางทุกชนิดไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปมากจากยางที่ไม่ได้ใส่สารตัวเติม เมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติมเถ้าแกลบกับซิลิกาชนิดตกตะกอนในปริมาณเท่ากันซิลิกาชนิดตกตะกอน สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ ดีกว่า เถ้าแกลบดำ อย่าง เห็นได้ ชัดเจน และจากงานวิจัยที่ผ่านมาของรสิมาจันทร์จำปา [6]ได้ทำการศึกษาการนำเถ้าแกลบดำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติพบว่าเถ้าแกลบดำมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา และ หาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในเถ้าแกลบดำด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (Total organic carbon analyzer; TOC) พบว่ามีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในเถ้าแกลบดำ 4.45% การใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol;PEG)และสารคู่ควบไซเลนชนิดเมอร์แคปโท (Mercaptosilane; Si-69)ปรับปรุงเถ้าแกลบดำส่งผลต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เถ้าแกลบดำที่มีขนาดเล็กให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าขนาดใหญ่ เมื่อเพิ่มปริมาณ เถ้าแกลบดำ (5-100 phr) ทำให้พฤติกรรมการเชื่อมโยงเร็วขึ้น แต่สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ด้อยลง และจากการเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้าชนิดอื่นๆ สามารถกล่าวได้ว่าเถ้าแกลบดำจัดเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรงในยางธรรมชาติ จากงานวิจัยที่ผ่านมา เถ้าแกลบดำไม่สามารถเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติได้ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใช้มีขนาดอนุภาคใหญ่ (41-279 μm)และมีองค์ประกอบ ของซิลิกาที่ขั้วสูงส่งผลให้มีความ ไม่เข้ากับยางธรรมชาติที่ไม่มีขั้ว

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมยางในประเทศไทยใช้ยางไนไตรล์ (Acrylonitrile butadiene rubber; NBR) ปริมาณมากถึง 26,000 ตันต่อปี [7]เนื่องจากยางไนไตรล์เป็นยางที่มีขั้ว จึงถู กเลือกใช้งานในวัสดุที่ต้องการให้ทนทานต่อน้ำมันและจาระบี ที่ไม่มีขั้ว ในอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลหรือยานยนต์ เช่น ชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ชุดเกียร์ส่งกำลังที่มีน้ำมันหล่อลื่นเป็นสารหล่อลื่นหรือรถเครนยกของต้องใช้น้ำมันเป็นตัวส่งถ่ายกำลังดังนั้นผลิตภัณฑ์ซีล (Seals) หรือยางทนน้ำมัน ยาง NBR จึงมีบทบาทความสำคัญในการใช้งานในชิ้นส่วนอุปกรณ์ยานยนต์หรือเครื่องจักรกล ซึ่ง ในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจะมีการใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางและเพื่อลดต้นทุนในการผลิต การเลือกชนิดและปริมาณของสารตัวเติม ขึ้นอยู่กับการ นำไปใช้ในงานของผลิตภัณฑ์ เป็นปัจจัยหลัก [8]โดยสารตัวเติมที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบันคือเขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate; $CaCO_3$) เป็นต้นเขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่มีการใช้งานในทางอุตสาหกรรมมากที่สุดเนื่องจากมีสมบัติการเสริมแรงที่ดีแต่เขม่าดำได้มาจากการเผาของน้ำมันปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หมดไป (Non-renewable source) และใช้พลังงานในการผลิตสูงมีราคาขึ้นลงตามราคาน้ำมันในขณะที่ซิลิกาจัดเป็นสารเสริมแรงอีกตัวหนึ่งที่มีการใช้งานมากเนื่องจากให้สมบัติเชิงกลที่ดีรองจากเขม่าดำ และสามารถปรับแต่งสีชิ้นงานได้ง่ายแต่ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีขั้วสูงก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องการเกาะกลุ่มกัน และการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง อีกทั้งยังมีราคาต่อหน่วยที่ค่อนข้างสูงซึ่งจากโครงสร้างของเถ้าแกลบดำที่มีองค์ประกอบหลักทางเคมีที่มีขั้วสูงอย่างซิลิกาทำให้เกิดปัญหา เช่นเดียวกับสารตัวเติมซิลิกาเนื่องจากที่ผิว ซิลิกาประกอบไปด้วยหมู่ไซลานอล (Silanol) ที่สามารถดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงและซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) ที่เติมลงไปเพื่อเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงลดลงส่งผลให้ระบบต้องใช้เวลาในการเชื่อมโยงยางนานขึ้นและไม่สามารถควบคุมความสม่ำเสมอของเวลาในการเชื่อมโยงยางที่แน่นอนได้ทั้งยังลดความหนาแน่นเชื่อมโยงของชิ้นงานส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง [9] มีผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับซิลิกาเสริมแรงมากมายโดยพยายามหาวิธีในการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของซิลิกาทั้งการใช้ความร้อนสารเคมีหรือการใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) [10-11] ซึ่งจากวิธีดังกล่าวข้างต้นการใช้สารคู่ควบเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดและการใช้ไซเลนเป็นสารคู่ควบได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่า จากที่กล่าวมาข้างต้นเถ้าแกลบเป็นของเหลือจากภาคเกษตรกรรมสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติม ได้เพราะเถ้าแกลบดำมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกา นอกจากนี้ยังมีคาร์บอนที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ร่วมอยู่ด้วย ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สามารถเสริมแรงในยางได้ และอาจทำให้ยางที่ใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมมีสมบัติต่างๆ อยู่ระหว่างการใช้ซิลิกากับเขม่าดำเป็นสารตัวเติมในยาง จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ เถ้าแกลบดำนั้นไม่สามารถเสริมแรงได้ในยางธรรมชาติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเถ้าแกลบดำกับยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วที่แตกต่างกัน และยังมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่เกินไป ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษา การใช้เถ้าแกลบดำ เป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ ซึ่งเป็นยางที่มีขั้ว อาจส่งผลให้มีอันตรกิริยากับเถ้าแกลบดำที่ดีกว่ายางธรรมชาติ โดยนำเถ้าแกลบดำจากโรงไฟฟ้าชีวมวลจ .ชัยนาทมาทำการปรับปรุงด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)เพื่อป้องกันการดูดสาร เร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงและสารคู่ควบ ไซเลน Si-69 ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางเพื่อช่วยในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคสารตัวเติมกับยา ง และศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำ ขนาดและปริมาณของเถ้าแกลบดำ แล้วทำการเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติยางไนไตรล์ลดต้นทุนในการผลิต และเพื่อนำวัสดุเหลือใช้ (เถ้าแกลบดำ) มาใช้ประโยชน์ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์(NBR)โดยศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และสารคู่ควบไซเลน Si-69ผลของขนาดเถ้าแกลบดำ ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำและการเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ

1.3ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการวิเคราะห์เถ้าแกลบดำได้แก่ขนาดอนุภาคพื้นที่ผิวจำเพาะองค์ประกอบทางเคมีและหมู่ฟังก์ชัน
2. ศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของยาง ได้แก่ ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วยPEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ในปริมาณ 5และ 3% โดยน้ำหนักของเถ้าแกลบดำตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุง พื้นผิว ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำ ได้แก่ 100-150, 150-200, 200-250 และน้อยกว่า 250 meshและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เถ้าแกลบดำชนิดบดละเอียด และผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่ใช้เป็นสารตัวเติมได้แก่ 0, 20, 40, 60, 80, 100และ 120phr

3. ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของการใช้เถ้าแกลบดำกับสารตัวเติมทางการค้าชนิดอื่นในยางไนไตรล์ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต เขม่าดำ และซิลิกา

โดยศึกษาสมบัติต่างๆของยางที่เตรียมได้ได้แก่

- พฤติกรรมการเชื่อมโยง (Cure characteristics) ได้แก่ เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time; t_{s2}) เวลาเชื่อมโยง (Cure time; t_{c90}) และดัชนีความเร็วเชื่อมโยง (Cure rate index; CRI)
- สมบัติเชิงกลได้แก่ความแข็งแรงดึง(Tensile strength)เปอร์เซ็นต์การดึงยืดณจุดขาด (%Elongation at break) มอดุลัสของยางที่ 100เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (M100) ความแข็งแรงฉีกขาด(Tear strength)ความแข็งกด(Hardness) และการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set)
- สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical thermal analysis; DMTA)
- สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เถ้าแกลบดำสามารถเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงในยางไนไตรล์และช่วยลดต้นทุนได้
2. เพื่อเพิ่มมูลค่าพัฒนาการใช้ประโยชน์เถ้าแกลบดำและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการทิ้งของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวล (ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง)
3. เพื่อเป็นแนวทางที่ใช้ในการศึกษาสารตัวเติมเถ้าแกลบดำในการนำไปประยุกต์ใช้ในพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางไนไตรล์

ยางไนไตรล์นับเป็นยางใช้งานเฉพาะอย่างเพื่อวัตถุประสงค์หลัก โดยเฉพาะด้านการทนน้ำมัน ทนต่อตัวทำละลายเชื้อเพลิงและจาร ะบี ยางไนไตรล์เป็นยางที่สามารถใช้เทคโนโลยีตามแบบยางทั่วไป หลังจากการค้นพบวิธีการโคพอลิเมอไรเซชัน (Co-polymerization) ของสไตรีน (Styrene) และบิวทาไดอีน (Butadiene) ในปี พ.ศ. 2472 ทำให้สามารถเตรียมโคพอลิเมอร์ (Copolymer) ระหว่างอะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) และบิวทาไดอีนได้สำเร็จในห้องปฏิบัติการในปี พ.ศ. 2473 หลังจากนั้นจึงได้ผลิตทางการค้าออกสู่ตลาดในชื่อของ Buna® N โดยบริษัทไบเออร์ จำกัด ในปี พ.ศ. 2483 และใช้ชื่อนี้มาจนถึงปัจจุบัน [12-13]

ปัจจุบันปริมาณการใช้ยางไนไตรล์ประมาณ 2 แสนตันต่อปี โดยมีผู้ผลิตมากกว่า 30 บริษัทในชื่อทางการค้าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ยางไนไตรล์เป็นวัสดุหลักที่ใช้งานในกรณีที่ต้องการให้ทนต่อน้ำมัน ดังนั้นงานส่วนใหญ่ของยางไนไตรล์จะใช้เป็นอุปกรณ์ในเครื่องยนต์เครื่องจักรเครื่องพิมพ์และอุตสาหกรรมอาหารในรูปของซีล ปะเก็น ท่อลูกกลิ้ง และยางบุเบรค (Brake-lining) เป็นต้น [12-13]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างรายชื่อของผู้ผลิตยางไนไตรล์ [14]

บริษัทผู้ผลิต	ชื่อทางการค้า	สถานที่ตั้ง
Dwory SA	KER®	Poland, Oswiecim
Carom SA	Carom®	Romania
Eliokem Chemicals	Chemigum®	France, Le Havre USA, Akron
Hyundai Petrochemical Co., Ltd.	Seetec®	Korea, Daesan
Industrias Negromex SA de CV	Emulprene®	Mexico
JSR Corporation	JSR®	Japan, Yokkaichi
Korea KumhoPetrochemical Co., Ltd.	Kosyn®	Korea, Seoul

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

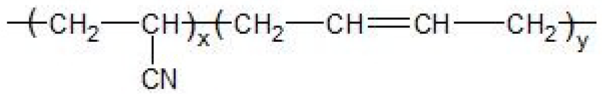
บริษัทผู้ผลิต	ชื่อทางการค้า	สถานที่ตั้ง
Lanxess Elastomers	Krynac®	France, La Wantzenau
Lanxess Inc.	Krynac®	Canada, Sarnia
Lanzhou Chemical Industry	NBR®	China
Nantes Industry Co., Ltd.	Nantex®	Taiwan, Kaohsiung
Negromex Industrias, SA de CV	N-xxxx®	Mexico
Nitriflex Industria e Comercio SA	Nitriflex® N	Brazil, Rio de Janeiro
ParaTec Elastomers LLC	Paracril Paraclean Paracril OZO®	Mexico, Altamira
Petrobras Energia SA	Arnipol®	Argentina, Buenos Aires
PetroChina Jilin Petrochemical Co., Ltd.	NBR®	China, Jilin
Petroflex Industria e Comercio SA	Petroflex®	Brazil
Polimeri Europa S. p. A.	Europrene® N	Italy, Milan
Sibur Krasnoyarsky zavod SK	SKN®	Russia, Krasnoyarsk
Sibur Voronezhsyntezkauchuk	Sibur Nitrilast®	Russia, Voronezh
Zeon Chemicals Europe Ltd.	Breon Nipol Polyblack®	Wales, Sully South Glamorgan
Zeon Chemicals LP	Nipol®	USA, Louisville
Zeon Corporation	Nipol®	Japan, Kawasaki

2.1.1 โครงสร้างทางเคมีและสมบัติ [15]

ยางไนไตรล์เป็นโคพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile monomer) และมอนอเมอร์บิวทาไดอีน (Butadiene monomer) ซึ่งประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ตั้งแต่ 18-51 % จากโครงสร้างโมเลกุล จะเห็นได้ว่าในส่วนของอะคริโลไนไตรล์มีหมู่ฟังก์ชัน –CN อยู่ทำให้โมเลกุลของยางชนิดนี้มีความเป็นขั้วสูง ยางชนิดนี้จึงมีสมบัติเด่นคือทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม และตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี ในขณะที่ส่วนของบิวทาไดอีนที่มีอยู่โมเลกุลเป็นส่วนที่ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยืดหยุ่น และเป็นตำแหน่งที่โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงในปฏิกิริยาเชื่อมโยง โดยที่โครงสร้างทางเคมีของยางไนไตรล์แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของยางไนไตรล์

สมบัติของยางไนไตรล์ แปรผันโดยตรงตามสัดส่วนของปริมาณอะคริโลไนไตรล์ที่มีอยู่ในโมเลกุล โดยทั่วไปเมื่อปริมาณของอะคริโลไนไตรล์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้สมบัติของยางไนไตรล์เปลี่ยนไปดังนี้

- ความทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียม และตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้น
- การกระเด้งกระดอนต่ำลง
- การเปลี่ยนรูปถาวรด้อยลง
- การซึมผ่านของก๊าซลดลง
- ความทนทานต่อความร้อนสูงขึ้น
- ความทนทานต่อโอโซนสูงขึ้น
- ความแข็งและความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น
- ความต้านทานการขัดถูเพิ่มขึ้น
- ความหนาแน่นสูงขึ้น

นอกจากสมบัติต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ปริมาณอะคริโลไนไตรล์ยังส่งผลโดยตรงต่อค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อีกด้วย กล่าวคือค่า T_g สูงขึ้นตามปริมาณอะคริโลไน-ไตรล์ที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปค่า T_g ของยางไนไตรล์อยู่ในช่วง -35 ถึง 0°C

2.1.2 การจัดเกรดยางไนไตรล์ [14]

ยางไนไตรล์มีหลายเกรดเนื่องจากการผลิตต่างๆ กันออกไป เช่น

- มีการแปรสัดส่วนระหว่างอะคริโลไนไตรล์กับบิวทาไดอีนทำให้ได้ยางที่มีความทนทานต่อน้ำมันต่างๆ กัน
- มีการผสมกับพอลิเมอร์อื่น เช่น พีวีซี เป็นต้น เพื่อให้ได้ยางที่แปรรูปได้ดีขึ้น และทนทานต่อโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีการเติมพลาสติไซเซอร์ เช่น ไดเอทิลเฮซิลพทาเลต (Di-(2-ethylhexyl) phthalate; DOP) ในปริมาณมากเข้าไปในโมเลกุลทำนองเดียวกับ Oil-extended rubber เพื่อลดต้นทุน และเพื่อผสมกับพีวีซีได้ง่าย
- มีการเติมมอนอเมอร์คาร์บอกซีเลต (Carboxylated monomer) เข้าไปทำให้ยางมีลักษณะพิเศษในการเชื่อมโยง และความทนทานต่อการสึกหรอ
- มีการเติมอนุมูลอิสระไดไวนิลเบนซิน (Divinyl benzene) ลงไปได้เป็นแบบยางที่มีการเชื่อมโยง (Crosslink rubber) เพื่อทำให้ยางสามารถมีการแปรรูปได้ง่าย เป็นต้น
- มีการเติมไฮโดรเจน (Hydrogen; H_2) เข้าไปในโมเลกุลทำให้ยางมีสมบัติด้านทน ต่อความร้อน และโอโซนดีขึ้น

นอกจากนั้นมีการแบ่งเกรดย่อยออกไปตาม ค่าความหนืด (Viscosity) ของยางตามขนาดโมเลกุลอีกด้วย [13]

2.1.3 การผสมเคมียางไนไตรล์ [15]

โดยภาพรวมแล้ว การผสมเคมียางไนไตรล์ จะคล้ายคลึงกับยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากยาง NBR มีความเป็นขั้วสูง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ของสารเคมีที่ใช้กับยางไนไตรล์ด้วย สารเคมี 2 กลุ่มที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษ ได้แก่

1. สารกลุ่มที่ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยง โดยเฉพาะกำมะถัน เพราะกำมะถันจะเข้ากันกับยางไนไตรล์ได้ยาก ดังนั้น ในการออกสูตรการผสมเคมีของยางไนไตรล์ จึงควรใช้กำมะถันในปริมาณที่ต่ำ (เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติหรือยางสไตรีนบิวทาไดอีน) หรืออาจใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่สามารถแตกตัวให้กำมะถันแทนการใช้กำมะถัน (ใช้ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-EV) หรือแบบประสิทธิภาพ (EV)) ซึ่งระบบการคงรูปแบบหลังนี้จะช่วยทำให้ยางเชื่อมโยงที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนได้ดี และมีค่าการเสียรูปถาวรจากการกดอัดต่ำ นอกจากนี้ เนื่องจากบิวทาไดอีนในยางไนไตรล์ มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาคงรูปช้ากว่าไอโซพรีน ดังนั้นในการออกสูตรยางควรใช้สัดส่วนของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงต่อกำมะถันสูงกว่าสัดส่วนที่ใช้ในยางธรรมชาติ สารตัวเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่นิยมใช้กับยางไนไตรล์ ได้แก่ MBTS ซัลฟีนาไมด์ ไธยูแรม ไดไธโอคาร์บาเมต และกัวนิดีน สำหรับในกรณีที่ต้องการยางเชื่อมโยงที่มีความทนทานต่อความร้อนสูงมากๆ อาจใช้ TMTD อย่างเดียวได้โดยไม่ต้องใช้กำมะถันหรืออาจเติมกำมะถันลงไปเล็กน้อย (0.25 phr) หรือใช้สารเร่งปฏิกิริยาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมโยงที่สามารถแตกตัวแล้วให้กำมะถันประมาณ (0.5 phr) แทนได้ เนื่องจากกำมะถันสามารถละลายในยางไนไตรล์ได้ยาก ทำให้กำมะถันกระจายตัวเข้าไปในเนื้อยางได้ไม่ดีซึ่งอาจส่งผลให้ยางเกิดการเชื่อมโยงได้ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน ดังนั้นในระหว่างการผสมจึงต้องทำการเติมกำมะถันเข้าไปในช่วงต้นของการผสมเพื่อเพิ่มระยะเวลาการผสมให้กำมะถันเข้ากับยางได้มากขึ้นหรืออาจเลือกใช้กำมะถันเกรดพิเศษที่มีแมกนีเซียมคาร์บอเนตเคลือบอยู่ที่พื้นผิว (MC-sulfur) แทนการใช้กำมะถันเกรดทั่วไป

2. สารกลุ่มที่ทำให้ยางนิ่ม เช่น น้ำมัน ฯลฯ สารกลุ่มนี้ใช้เติมลงไปในยางไนไตรล์เพื่อช่วยในกระบวนการแปรรูป (ลดความหนืดของยาง) ปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ โดยเฉพาะสมบัติความเหนียวติด สมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ และความยืดหยุ่นของยาง เป็นต้น สำหรับสารทำให้ยางนิ่มที่นิยมใช้กันมากกับยางไนไตรล์ได้แก่ น้ำมันอะโรมาติก และสารเคมีในกลุ่มอีเทอร์หรือเอสเทอร์ เช่น DOP หรือ Tritolyl phosphate เป็นต้น ส่วน Xylene formaldehyde resin และ Coumarone resin เป็นสารที่ช่วยเพิ่มสมบัติความเหนียวติดกันให้แก่ยางไนไตรล์ได้เป็นอย่างดี ส่วนสารทำให้ยางนิ่มที่นิยมใช้กับยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ที่ไม่มีขั้วอื่นๆ เช่น น้ำมันพาราฟิน หรือแนพทานิกนั้นสามารถเข้ากับยางไนไตรล์ได้น้อยมาก เนื่องจากยางไนไตรล์มีความเป็นขั้วสูง แม้ว่าการเติมสารกลุ่มที่ทำให้ยางนิ่มจะช่วยปรับปรุงสมบัติหลายๆ ด้านของยางไนไตรล์ แต่ในเวลาเดียวกันการเติมสารกลุ่มนี้ทำให้สมบัติเชิงกลรวมถึงความทนทานต่อน้ำมัน และสารเคมีของยางลดลงนอกจากนี้เมื่อถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูง สารกลุ่มนี้อาจระเหยออกไปทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ และขนาดของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ด้วยเหตุนี้การเลือกใช้สารกลุ่มเหล่านี้จึงควรทำด้วยความระมัดระวัง และต้องพิจารณาถึงสภาพการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ด้วย สำหรับในกรณีที่ต้องการใช้งานผลิตภัณฑ์ยางไนไตรล์ที่สภาวะอุณหภูมิสูง ควรเลือกใช้สารทำให้ยางนิ่มชนิดที่ระเหยได้ยากซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น พอลิเมอร์ เป็นต้น ตัวอย่างของสารระเหยยากได้แก่ Polypropylene sebacate และ Dibutyl carbitol formal เป็นต้น แต่สารทำให้ยางนิ่มที่ระเหยยากเหล่านี้มักมีราคาแพงกว่าสารทำให้ยางนิ่มทั่วไปมาก

2.1.4 การใช้งานยางไนไตรล์ [15]

ยางชนิดนี้ส่วนใหญ่ถูกใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน ทนทานต่อความร้อน และต้านทานการขัดถูได้ดี ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ยางที่ทำจากยางไนไตรล์ได้แก่ ปะเก็นน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางโอริง ยางซีล ยางเชื่อมข้อต่อ สายพานลำเลียง ท่อดูดหรือส่งน้ำมัน ท่อยางเสริมแรง ยางบุ ยางเคลือบลูกกลิ้ง รองเท้าบูท พื้นและส้นรองเท้า เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยางไนไตรล์ [16]

2.2 สารเติมแต่ง (Additives) [8]

สารเติมแต่งของยาง หมายถึงสารเคมีต่างๆ ที่ผสมลงไปในยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ การให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับยางสามารถเร่งได้โดยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางดิบหรือยางไม่เชื่อมโยง (Green rubber หรือ Uncured rubber) ส่วนยางที่เข้าทำปฏิกิริยาเคมีแล้วเรียกว่า ยางเชื่อมโยง (Vulcanized rubber) สารเคมีต่างๆ ที่ใช้ผสมลงไปในยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการอาจจำแนกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

1. สารเชื่อมโยง (Crosslinking agents) เช่น กำมะถัน สารประเภทที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ และสารประเภทเปอร์ออกไซด์

2. สารเร่งปฏิกิริยา การเชื่อมโยง (Accelerators) คือ สารเคมีที่ใส่ในยางเพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น

3. สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activators) เช่น กรดสเตียริก และซิงค์ออกไซด์

4. สารตัวเติม (Fillers) ได้แก่ เคลย์ ซิลิกา เขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

5. พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) คือ อาจเป็นสารที่ทำให้ยางนิ่มโดยทางเคมี หรือสารทำให้ยางนิ่มโดยทางกายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Protective agents) เช่น สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidants) และสารต้านทานปฏิกิริยาโอโซน (Antiozonants)

7. สารพิเศษอื่นๆ (Miscellaneous ingredients) ได้แก่ สารที่ทำให้เกิดสี (Colorants) สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents) และสารหน่วง (Retarders) เป็นต้น

2.2.1 สารเชื่อมโยง (Crosslinking agents)

สารเชื่อมโยงที่สำคัญของยาง ได้แก่ กำมะถัน (Sulfur) เปอร์ออกไซด์ (Peroxides) และสารประกอบออกไซด์ของโลหะบางชนิด นิยมใช้สารเร่งปฏิกิริยา การเชื่อมโยง และสารกระตุ้นการเชื่อมโยงผสมเข้ากับยาง แล้วให้อุณหภูมิสูงภายหลังการขึ้นรูปเป็นรูปร่างผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ อุณหภูมิสูงทำให้สารเชื่อมโยงต่างๆ เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) เชื่อมโยงโครงสร้างโมเลกุลยางแล้วเปลี่ยนโครงสร้างเส้นตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ มีเสถียรภาพของรูปร่าง และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น การเชื่อมโยงยางทำให้ยางมีสมบัติเปลี่ยนไป คือ

- มีความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
- มีมอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
- มีความยืดหยุ่น (Elasticity) ดีขึ้น
- มีฮิสเทอรีซีส (Hysteresis) ลดลง
- มีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Permanent set) ลดลง หรือมีเสถียรภาพของรูปร่างเพิ่มขึ้น
- เหนียวติด (Sticky) น้อยลง
- เปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซต ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ทนต่ออุณหภูมิ แสง และการใช้งานนานขึ้น

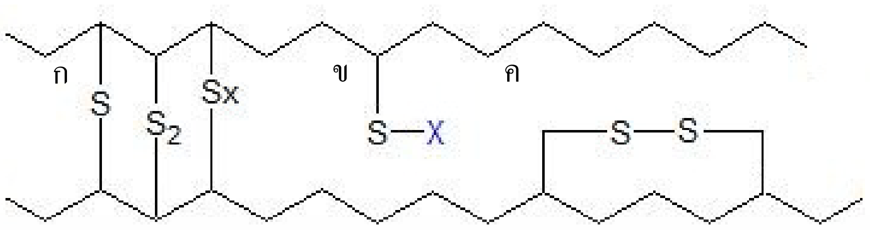
การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน

กำมะถันเป็นสารทำให้ยางคงรูปหรือสารเชื่อมโยงที่นิยมใช้มากที่สุด ประมาณ 90 % และนิยมใช้กับยางที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated rubber) ได้แก่ ยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene Butadiene Rubber; SBR) ยางบิวทาไดอีน (BR) และยางไนไตรล์ (NBR) เป็นต้น เมื่อเติมกำมะถันเข้าไปในยางแล้วให้ความร้อน กำมะถันทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างโมเลกุลของยาง เรียกว่า เกิดการเชื่อมโยง ทำให้ยางคงรูป

โดยทั่วไปปริมาณของกำมะถันที่เติมในผลิตภัณฑ์ยางอยู่ในช่วง 0.5-3.0 phr ปริมาณที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิด และปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา การเชื่อมโยง โดยสมบัติต่างๆ ของยางที่เชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกำมะถันนั้นมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของการเชื่อมโยง (Type of crosslink) และจำนวนของการเชื่อมโยง (Degree of crosslink) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ชนิดการเชื่อมโยงกำมะถัน [17]

ก. การเชื่อมโยงของกำมะถันแบบโมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic) ไดซัลฟิดิก (Disulfidic) และพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic) ตามลำดับ

ข. การเชื่อมโยงของกำมะถันแบบเพนแดนท์ (Pandant sulfur)

ค. การเชื่อมโยงของกำมะถันภายในสายโซ่โมเลกุลของยาง (Intramolecular linkage)

ชนิดของการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันขึ้นอยู่กับชนิดของ สารเร่งปฏิกิริยา การเชื่อมโยง และอัตราส่วนของ สารเร่งปฏิกิริยา การเชื่อมโยงกับกำมะถัน ดังนั้นการเชื่อมโยงยางด้วยกำมะถันจึงมีระบบการเชื่อมโยงใหญ่ๆ 3 ระบบ คือ

1. ระบบทั่วไป (Conventional vulcanization; CV)
2. ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficient vulcanization; SEV)
3. ระบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization; EV)

สำหรับอัตราส่วนของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกับกำมะถันในระบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนระหว่างสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกับกำมะถันในระบบต่างๆ [18]

ระบบ	ปริมาณกำมะถัน (phr)	ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (phr)	อัตราส่วนสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงต่อกำมะถัน
ระบบทั่วไป (CV)	2.0-3.5	1.2-0.4	0.1-0.6
ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (SEV)	1.0-1.7	2.5-1.2	0.7-2.5
ระบบประสิทธิภาพ (EV)	0.4-0.8	5.0-2.0	2.5-1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเติมกำมะถันลงในยางควรเติมหลังจากเติมสารเคมีทั้งหมดแล้ว เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเชื่อมโยงก่อนกำหนด แต่ยางบางชนิด เช่น NBR ซึ่งกำมะถันมีความสามารถในการกระจายในยางได้ไม่ดี จำเป็นต้องใส่กำมะถันเข้าไปตั้งแต่เริ่มต้นเพื่อช่วยให้ มีการกระจายเพิ่มขึ้น การผสมกำมะถันเข้าไปในยางในปริมาณมาก เมื่อตั้งทิ้งไว้กำมะถันที่เป็นส่วนเกินจะแพร่ออกมาที่ผิวยาง เรียกว่า เกิดการบลูม (Blooming) การแก้ปัญหาของการที่กำมะถันเกิดการเคลื่อนที่มาอยู่ที่ผิวยางสามารถทำได้โดยผสมกำมะถันเข้าไปในยางที่อุณหภูมิต่ำที่สุดเท่าที่ทำได้ หรืออาจใช้กำมะถันชนิดไม่ละลาย (Insoluble sulfur) แทนกำมะถันธรรมดาซึ่งเป็นชนิดละลาย (Soluble sulfur) แต่กำมะถันชนิดไม่ละลาย ไม่คงตัว จึงมีการเปลี่ยนรูปเป็นกำมะถันชนิดละลายอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง และถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะเปลี่ยนเป็นกำมะถันชนิดละลายภายใน 10-20 นาที ดังนั้นในกระบวนการแปรรูปยาง ต้องให้อุณหภูมิต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้กำมะถันชนิดไม่ละลายเปลี่ยนรูป ในการนำไปใช้งาน อาจใช้กำมะถันชนิดไม่ละลายปนกับกำมะถันชนิดละลายได้ เช่น ใช้กำมะถันชนิดไม่ละลาย 70 % ของปริมาณทั้งหมด ทำให้ลดการตกผลึกของกำมะถันที่ผิวยางได้

ข้อดีของการใช้กำมะถัน คือ กำมะถันมีราคาค่อนข้างถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ และการกระจายตัวในยางได้ดี

ข้อเสียของการใช้กำมะถัน คือ มีแนวโน้มทำให้เกิดการเคลื่อนที่มาอยู่ที่ผิวยาง มีการติดสีของซัลไฟด์ เมื่อนำยางที่ผสมกำมะถันไปอบ มีความต้านทานต่อความร้อนไม่ดี และไม่สามารถใช้ได้กับยางที่อิ่มตัว

2.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยา การเชื่อมโยงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันเพราะปฏิกิริยาระหว่างกำมะถัน และยางเกิดขึ้นได้ช้ามาก การเติมสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงลงไปในปริมาณเพียงเล็กน้อยช่วยเร่งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเร็วขึ้น ส่งผลให้ลดระยะเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยง สารเร่งปฏิกิริยา การเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจน และกำมะถันเป็นองค์ประกอบ หลักเกณฑ์ทั่วไปในการเลือกใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ได้แก่

1. สารเร่งปฏิกิริยากรเชื่อมโยงที่ใช้ต้องทำให้ยางคอมพาวด์ที่ได้มีระยะเวลา เริ่มเชื่อมโยงที่ยาวเพียงพอที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหายางตายในระหว่างกระบวนการผลิต

2. เมื่อปฏิกิริยาเชื่อมโยงเริ่มเกิดขึ้น สารเร่งปฏิกิริยา การเชื่อมโยง ที่ดีต้องทำให้ยางคอมพาวด์มีอัตราเร็วในการเชื่อมโยงที่สูง และยางที่ได้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สารเร่งปฏิกิริยา การเชื่อมโยง ที่ใช้ต้องเหมาะสมกับอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยง

4. สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่ใช้ต้องไม่ก่อให้เกิดปัญหาการบลูม

2.2.3 สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นการเชื่อมโยงเป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้น หรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยา การเชื่อมโยง ดังนั้นอาจเรียกสารนี้ว่าสารกระตุ้นสารเร่ง ลักษณะสำคัญของตัวกระตุ้นคือมีความเป็นด่าง (Alkaline) นอกจากใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นตัวกระตุ้นแล้ว อาจใช้ลิเทียมออกไซด์ (Li_2O) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และสารจำพวกเอมีน (Amine) โดยปกติในอุตสาหกรรมใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นการเชื่อมโยงประมาณ 2-5 phr แต่ถ้าใช้มากกว่า 5 phr ขึ้นไปแสดงว่ามีจุดมุ่งหมายอื่นนอกเหนือจากการใช้เป็นสารกระตุ้นการเชื่อมโยง การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณสูงทำให้การถ่ายเทความร้อนในยางรวดเร็วขึ้นเหมาะสมกับการทำชิ้นงานที่มีความหนาโดยเฉพาะกับการบ่มแบบใช้อากาศร้อน โดยสารกระตุ้นการเชื่อมโยง ที่ใช้ร่วมกับซิงค์ออกไซด์ คือ กรดไขมัน (Fatty acid) ที่มีจำนวนคาร์บอน 12-18 อะตอม เช่น กรดสเตียริก เกิดเป็นซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) และกรดลอรีอิก เกิดเป็นซิงค์ลอรีเอ ต (Zinc laureate) โดยปกติใช้กรดสเตียริกในอุตสาหกรรมยางประมาณ 1-3 phr นอกจากกรดสเตียริกทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นการเชื่อมโยงแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricants) ในการผสมยางทำให้ความหนืดของยางลดลง

2.2.4 สารแอนติออกซิแดนต์ (Antioxidants)

แอนติออกซิแดนต์เป็นสารต้านการเสื่อมของยาง ใส่เพื่อหน่วงให้อายุการเสื่อมของยางอันเนื่องจากการกระตุ้นของออกซิเจน โอโซน ความร้อน แสง โลหะ และการหักงอไปมาช้าลง ซึ่งมีผลทำให้หน้ายางแตก การใส่สารแอนติออกซิแดนต์นับว่าจำเป็น เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านอายุของยาง แม้แต่ยางสังเคราะห์บางชนิดที่มีสมบัติดีด้านอายุในตัวของมันเอง เช่น ยางคลอโรพรีน ยางอีพีอาร์ และอีพีดีเอ็ม เป็นต้น ยังแนะนำให้ใส่สารต้านการเสื่อมลงไปในปริมาณเล็กน้อย

สารต้านทานการเสื่อมสภาพแบ่งเป็นสองประเภทใหญ่ๆ ตามการตกสี คือ ชนิดตกสี (Staining antioxidant) ซึ่งเป็นสารประกอบประเภทเอมีน เช่น ฟีนิล -เบตา-แนฟธิลามีน (Phenyl-ß-naphthylamine; PBN) และชนิดไม่ตกสี (Non-staining antioxidant) ซึ่งเป็นสารประกอบประเภทฟีนอล สารประกอบประเภทเอมีนจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าประเภทฟีนอล มีราคาถูกกว่า แต่ทำให้ยางมีสีคล้ำกว่า โดยที่ใช้ในประมาณ 1 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 สารคู่ควบ (Coupling agents)

สารคู่ควบเป็นตัวช่วยยึดระหว่างสารตัวเติมกับยางให้ยึดกันได้ดีขึ้น ทำให้สมบัติทางกายภาพดีขึ้น เช่น ผลของสารคู่ควบไซเลนทำให้มอดุลัส ความต้านทานต่อการสึกหรอ การเปลี่ยนรูปถาวรของยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมดีขึ้นมาก

ไซเลนเป็นสารที่มีสูตรทั่วไปเป็น R-Si-$(OR)_3$-R เป็นหมู่อะมิโนเมอร์แคบโต ไวนิลอีพอกซี หรือ Methacryloxy เป็นต้น –OR เป็นหมู่ Alkoxy ในการใช้งาน Alkoxy ถูกไฮโดรไลซ์เกิดเป็นไซลานอล

$$\text{-Si-OR} \xrightarrow{H_2O} \text{-Si-OH + ROH} \quad (2.1)$$

ไซลานอลสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารตัวเติมชนิดอนินทรีย์ เช่น ผิวของซิลิกา เคลย์ หรือโลหะออกไซด์ เป็นต้น ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ R- ซึ่งเป็นหมู่ฟังชันก์ที่ สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้ดี ดังนั้น ไซเลนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดหรือประสานให้ยางกับสารตัวเติมอนินทรีย์ โดยที่วิธีการใช้ไซเลนทำได้โดยผสมกับสารตัวเติม ซึ่งสารคู่ควบไซเลนมีหลายชนิด เช่น γ-Aminopropyltrimethoxy silane ($H_2NC_3H_6Si(OC_2H_5)$) และ ß-Mercaptoethyltriethoxy silane ($HSC_2H_4Si(OC_2H_6)_3$) เป็นต้น

2.2.6 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมเป็นวัสดุที่อยู่ในรูปของแข็ง มีขนาดอนุภาคเล็ก เช่น เขม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น สารเหล่านี้ใส่ลงไปเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ กันดังนี้

1. เพื่อลดต้นทุนการผลิต โดยจะต้องมีราคาถูกกว่ายาง
2. เพื่อปรับปรุงเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของยาง โดยทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นและมอดุลัสสูงขึ้น ส่วนสมบัติอื่นๆ เช่น ความทนแรงดึง ความต้านทานการสึกหรอ อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นกับชนิดของยาง และชนิดของสารตัวเติม
3. เพื่อช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เช่น ทำให้ยางที่ผ่านการอัดรีดมีผิวเรียบหรือช่วยควบคุมความหนาในการทำยางแผ่น
4. เพื่อลดการพองตัวของยางในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารตัวเติมส่วนใหญ่แบ่งออกได้ 2 กลุ่มคือ

1. สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ (Reinforcing filler) คือสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปในยางหรืออิลาสโตเมอร์แล้วช่วยให้ยางหรืออิลาสโตเมอร์มีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ทนต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) สูงขึ้น ส่วนใหญ่มีขนาดอนุภาค 180-600 อังสตรอม (Å)

2. สารตัวเติมไม่เสริมประสิทธิภาพ (Diluent filler) สารตัวเติมชนิดนี้มีราคาถูกมีขนาดอนุภาคใหญ่ตั้งแต่ 10,000 Å ขึ้นไป

ปัจจัยที่มีผลต่อการเสริมแรงของสารตัวเติม [8, 18]

ในการเติมสารตัวเติมเพื่อเสริมแรงให้กับยางมีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณาเนื่องจากจะมีผลอย่างมากต่อสมบัติของยาง ปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่

1. ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิวจำเพาะ (Particle size and Specific surface area)

สารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็กให้การเสริมแรงแก่ยางได้ดีเพราะสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยของน้ำหนัก (หรือเรียกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ) สูง จึงทำให้พื้นที่ที่จะเกิดแรงกระทำระหว่างยางกับสารตัวเติมเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด ความแข็งกด และความต้านทานต่อการ สึกหรอ จึงสูงขึ้นตามพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติม โดยทั่วไปแล้วสารตัวเติมเสริมแรง เช่น เขม่าดำมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กมาก และขนาดอนุภาคปฐมภูมิเหล่านี้ไม่อยู่กันอย่างเดี่ยวๆ แต่จะหลอม (Fused) หรืออยู่รวมกันเป็นก้อนที่เรียกว่าแอกกรีเกต (Aggregate) อย่างไรก็ดีเนื่องจากแอกกรีเกตแต่ละกลุ่มมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ดังนั้นแอกกรีเกตจึงจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่าแอกโกลเมอเรต (Agglomerate)

2. โครงสร้างของสารตัวเติม (Filler structure)

โครงสร้างของสารตัวเติมมีอิทธิพลต่อการเสริมแรง เนื่องจาก อนุภาคของสารตัวเติมบางชนิด เช่น เขม่าดำไม่อยู่กันอย่างเดี่ยวๆ แต่อยู่รวมกันเป็นก้อนแอกกรีเกต ซึ่งการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนดังกล่าว ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของสารตัวเติมที่เรียกว่าโครงสร้างสารตัวเติมปฐมภูมิ (Primary filler structure) โครงสร้างสารตัวเติมปฐมภูมิที่เกิดขึ้นนี้มีความแข็งแรงสูงมาก และไม่สามารถถูกทำลายได้ด้วยแรงเชิงกลในระหว่างกระบวนการผสม การรวมกลุ่มกันของก้อนแอกกรีเกตทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของสารตัวเติมที่เรียกว่าโครงสร้างของสารตัวเติมทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Secondary filler structure) ซึ่งโครงสร้างแบบนี้ไม่แข็งแรง และสามารถถูกทำลายได้ง่ายด้วยแรงเชิงกล

3. ความว่องไวทางปฏิกิริยาของพื้นผิว (Specific surface activity)

ปกติสารตัวเติมมีหมู่ฟังก์ชันเคมีชนิดต่างๆ เกาะติดหรือถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิว เช่น บนพื้นผิวของเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมาย เช่น ฟีนอลิก (Phenolic; C_6H_5OH) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl; -OH) ควิโนน (Quinone) คาร์บอกซิล (Carboxyl; -COOH) และแลกโทน (Lactone) รวมถึงอนุมูลอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับโมเลกุลของยางได้ แต่สำหรับสารตัวเติมที่มีสีขาว เช่น ซิลิกาส่วนใหญ่มีหมู่ฟังก์ชันเคมีจำพวกออกไซด์ (Oxide) ของโลหะหรือหมู่ไซลานอล (Silanol group; -SiOH) เป็นองค์ประกอบอยู่บนพื้นผิวยางที่มีความเป็นขั้วสูง เช่น ยางไนไตรล์ และยางคลอโรพรีน เป็นต้น ทำปฏิกิริยาได้ดีกับพื้นผิวของสารตัวเติมที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่น หมู่ไซลานอลหรืออะตอมของคลอรีน (Chlorine; Cl) เป็นต้น ถ้าความว่องไวทางปฏิกิริยาของสารตัวเติมลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงด้อยลง เช่น เมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวของเขม่าดำด้วยกระบวนการที่เรียกว่า Graphitization โดยการนำเขม่าดำไปเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,600 ถึง 3,000°C เป็นเวลาหลายชั่วโมง ความร้อนที่สูงมากเช่นนี้ทำให้หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำสลายตัวไป จึงทำให้เขม่าดำสูญเสียความว่องไวทางปฏิกิริยา ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงของเขม่าดำลดลง โดยค่าความว่องไวทางปฏิกิริยาของพื้นผิวบ่งบอกด้วยปริมาณของยางบาวด์ (Bound rubber) ซึ่งยางบาวด์คือส่วนของยางที่ไม่สามารถถูกสกัดออกมาจากสารตัวเติมได้โดยใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม (ตัวทำละลายที่สามารถละลายยางได้ดี) ยางส่วนนี้เกาะติดอยู่กับสารตัวเติมในลักษณะคล้ายเจล

4. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH value)

แม้ว่าค่าความเป็นกรด -เบส ของสารตัวเติมไม่ได้มีอิทธิพลโดยตรงต่อการเสริมแรงในยาง แต่เนื่องจากค่าความเป็นกรด -เบส ของสารตัวเติมส่งผลกระทบโดยตรงต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง สารตัวเติมที่มีฤทธิ์เป็นกรด สามารถหน่วง (Retard) ปฏิกิริยาเชื่อมโยง ดังนั้นค่าความเป็นกรด-เบส ของสารตัวเติมจึงส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของยางเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เถ้าแกลบ

แกลบข้าว (Rice husk; RH) คือ ผลผลิตที่ได้จากการสีข้าวเป็นเปลือกของข้าวสาร เป็นส่วนที่เหลือใช้จากการผลิตข้าวสาร ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่สำคัญชนิดหนึ่งในการสีข้าวจะได้ปริมาณแกลบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเปลือกข้าว ในข้าวเปลือกมีแกลบปริมาณ 22.5-25.2 % [2] เมล็ดมีลักษณะเป็นรูปทรงรีเม็ดยาวสีเหลืองอมน้ำตาลหรือเหลืองนวลแล้วแต่ภูมิประเทศที่มีการปลูกข้าว ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 แกลบเมื่อนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวลแล้วกลายเป็นเถ้าแกลบ (RHA) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกาโดย สามารถนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี และการเผาที่อุณหภูมิสูงซิลิกาในเถ้าแกลบมีทั้งที่เป็นซิลิกาผลึก (Crystalline silica) และซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) โดยซิลิกาผลึกสามารถแบ่งย่อยเป็นหลายชนิดตามความแตกต่างของรูปร่าง ลักษณะผลึก และความหนาแน่นของซิลิกา รูปร่างของผลึกมีหลายแบบ เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ และเส้นยาว [19]

รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเมล็ดข้าว [20]

2.3.1 สัณฐานวิทยาของแกลบ [19]

ผิวนอกของแกลบมีลักษณะเป็นเซลล์ที่เป็นรูปเหลี่ยม ซึ่งมีความเข้มข้นของซิลิกาสูง ถูกปิดทับด้วยคิวติเคิล (Cuticle) หนา และมีขนสั้นๆ อยู่บนผิว ภายในประกอบด้วยเส้นใยและเซลล์ที่ประกอบด้วยเส้นใยต่างๆ ชั้นกลางมีปริมาณซิลิกาอยู่ต่ำกว่าชั้นนอก โดยทั่วไปอาจสรุปโครงสร้างเนื้อเยื่อของแกลบได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ผนังเซลล์ชั้นนอก (Primary cell wall) ประกอบด้วยเซลล์ลักษณะเป็นปุ่มที่มีปริมาณซิลิกาอยู่สูง
   - สเคอร์เรนไคมา (Sclerenchyma) ประกอบด้วยเส้นใยต่างๆ อันประกอบด้วยลิกนิน และซิลิกา
   - พาเรนไคมา (Parenchyma) เป็นเซลล์ลักษณะคล้ายฟองน้ำมีรูพรุน และมีรูปร่างแตกต่างกันไป
2. ผนังเซลล์ชั้นใน (Secondary cell wall) ประกอบด้วยเส้นใยที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน

2.3.2 องค์ประกอบของแกลบ [21]

แกลบมีลักษณะเหนียว แข็งคล้ายไม้ มีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ และมีปริมาณเถ้าสูง โดยทั่วไปแกลบจะมีขนาด 5-10 mm กว้างประมาณ 1-2 mm หนาประมาณ 0.5 mm ซึ่งแกลบมีองค์ประกอบตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของแกลบ [22]

สมบัติ	**ร้อยละ**
ความชื้น	8.1-11.5
สารประกอบอนินทรีย์	16.4-18.3
กำมะถัน	0.1-0.2
เซลลูโลส	42.1-46.6
ลิกนิน	19.1-22.8
เพนโทแซน	13.9-18.3
แป้ง	7.6-7.9
โปรตีน	1.8-1.9
ไขมัน	0.28-0.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกลบมีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้

1. คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิ-เซลลูโลส (Hemicellulose) เฮมิเซลลูโลสคือ กลูโคไซเลน (Glucoxylan) ที่สามารถสลายตัวด้วยน้ำ (Hydrolysis) ไปเป็นไซโลส (Xylose) ได้ ส่วนแป้งนั้นมีอยู่ในแกลบเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส แสดงได้ดังในรูปที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ

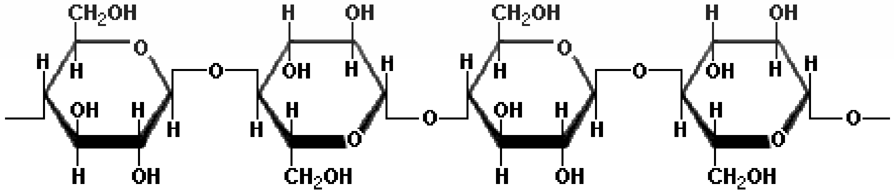
2. โปรตีนในแกลบมีอยู่ประมาณ 1.8–1.9 %

3. ไขมัน (Lipids) ปริมาณที่พบอยู่ในแกลบมีอยู่ตั้งแต่ 0.28-0.31 % โดยปกติแล้วส่วนของแกลบมีไขมัน เป็นองค์ประกอบอยู่ไม่เกิน 1 % ไขมันส่วนเกินนั้นพบว่ามาจากรำข้าวที่ติดอยู่หลังจากผ่านกระบวนการสีข้าว

4. ลิกนิน (Lignin) และคิวติน (Cutin) ส่วนใหญ่จะพบลิกนินอยู่รวมกับเฮมิเซลลูโลส พบมากในบริเวณผนังเซลล์ คือ ประมาณ 70 % ของทั้งหมด ซึ่งโครงสร้างของลิกนินแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 คิวตินเป็นสารพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีชื่อเรียกว่า กรดไฮดรอกซีมอนอคาร์บอกซิลิก (Hydroxymonocarboxylic acid) มีสมบัติเป็นสารที่มีความลื่น และสามารถกันน้ำได้ ปกคลุมอยู่บริเวณผิวภายนอกของแกลบ

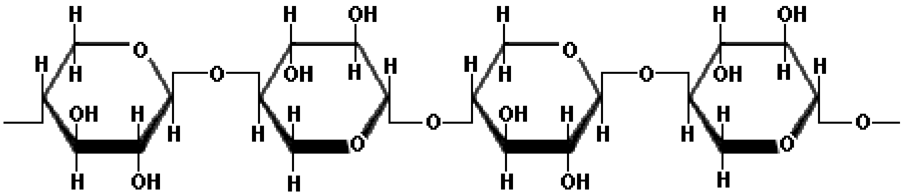
5. วิตามิน และกรดอินทรีย์ วิตามินที่พบในแกลบ ได้แก่ ไทอามิน (Thiamin) ไรโบฟลาวิน (Riboflavin) และไนอาซีน (Niacine) กรดอินทรีย์ที่พบมาก ได้แก่ กรดออกซาลิก (Oxalic acid) และกรดซิทริก (Citric acid) ส่วนกรดอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ได้แก่ กรดแอซิ -ติก (Acetic acid) กรดฟูมาลิก (Formaric acid) กรดมาลิก (Malic acid) และกรดของสารประกอบวงแหวน

6. สารประกอบอนินทรีย์ ในเถ้าแกลบที่ได้จากการเผามีสารอนินทรีย์อยู่ ซึ่งมีปริมาณ 16.4–18.3 % โดยน้ำหนัก ในเถ้าแกลบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก คือ มีประมาณ 85 % [22] ที่เหลือเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะอีกหลายชนิด

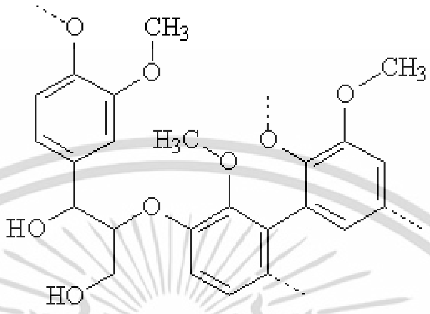


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเซลลูโลส [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [23]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของลิกนิน [23]

2.3.3 การแบ่งประเภทของเถ้าแกลบ [22, 24]

เถ้าแกลบที่ได้มีอนุภาคสีดำปนเทา ซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้คาร์บอนของเถ้าแกลบในอากาศ โดยทั่วไปจะก่อให้เกิดเถ้าซิลิกาซึ่งมีตั้งแต่สีเทาจนดำขึ้นอยู่กับสารเจือปนอนินทรีย์ และสารที่ไม่เกิดการเผาไหม้ ได้แบ่งประเภทของเถ้าแกลบเป็น เถ้าที่มีคาร์บอนสูง (High carbon char) เถ้าสีเทาที่มีคาร์บอนต่ำ (Low-carbon ash) และเถ้าสีขาวที่ไม่มีคาร์บอน (Carbon-free pink หรือ White ash)

แกลบข้าวประกอบด้วยเส้นใยโฟริสติก (Floristic) โปรตีน (Protein) และมีหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซี และไฮดรอกซิล เป็นต้น ซึ่งทำให้สามารถใช้เป็นตัวดูดซึมได้ และเมื่อเผาแกลบข้าวโดยควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 700°C ขี้เถ้าที่ได้มีสีดำ (BRHA) นั้นประกอบด้วย Amorphous silica แต่ถ้าทำการเผาเกิน 850°C แล้วขี้เถ้าที่ได้มีสีขาว (WRHA) ประกอบด้วย Crystalline silica โดย Amorphous silica มีขนาดอนุภาค 25 μm มีสีเทา และพีเอช เท่ากับ 8 และเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกันทำให้เกิดส่วนประกอบอื่นๆ ที่ต่างกันไปดังตารางที่ 2.4 ขนาดของอนุภาคแกลบข้าวที่มีขนาดเล็กมากเพียง 25 μm และมีรูพรุนจำนวนมาก ทำให้มีความสามารถในการดูดซึมและกระจายตัวได้ดีเมื่อนำไปผสมกับพลาสติก ทำให้พลาสติกที่ผสมขี้เถ้าแกลบข้าวมีความแข็งแกร่งมากขึ้น ขี้เถ้าแกลบข้าวถือว่าเป็นปอซโซแลน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่มีซิลิกาประกอบอยู่มากกว่า 85 % [22] จึงนิยมนำมาใช้ในการเสริมแรง นอกจากนั้นพบว่า วัสดุที่นำเอาขี้เถ้าแกลบข้าวไปผสมนั้นยังมีการซึมน้ำที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำ ทนต่อกรดและมีความสามารถในการรับแรงที่เพิ่มขึ้น 10-20 % ซึ่งสมบัติดังกล่าวนั้นให้ผลเหมือนกับการใช้ผงซิลิกา

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ [22]

องค์ประกอบ	ร้อยละ	
	เถ้าแกลบขาว	เถ้าแกลบดำ
SiO_2	97.00	74.85
K_2O	1.05	1.22
Na_2O	0.30	0.13
MgO	0.53	0.38
Fe_2O_3	0.25	0.13
CaO	0.77	0.40
MnO	0.14	0.16
TiO_2	0.01	0.01
Al_2O_3	0.27	0.23
P_2O_5	1.00	0.96
Loss on ignition (LOI)	0.20	21.00

2.3.4 ประโยชน์ของแกลบ [24]

ประโยชน์ของแกลบส่วนใหญ่จะนำมาใช้ประโยชน์โดยตรง เช่น

1. ใช้เป็นเชื้อเพลิง แกลบจะให้พลังงานความร้อนประมาณ 3,800 kcal/kg ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านไม้ที่ให้พลังงานความร้อนปรมาณ 4,500-5,000 kcal/kg จึงใช้แกลบแทนถ่านไม้ได้
2. ใช้ผสมกับดินเหนียวทำอิฐ จะทำให้อิฐที่ได้แข็งแรงและสามารถตัดเจาะรูหรือตอกตะปูได้
3. ใช้ผสมกับดิน ทำให้ดินร่วนซุย ไม่แน่นทึบ และช่วยให้ดินอุ้มน้ำดีขึ้น
4. ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น ไก่หรือสุกรโดยใช้แกลบรองพื้น ทำให้พื้นไม่แฉะ และไม่มีกลิ่นเหม็น
5. ใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ เช่น เป็ด ไก่ วัว ควาย เพื่อลดต้นทุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช โดยใช้ผสมกับปุ๋ยแอมโมเนียมฟอสเฟต (Ammonium phosphate; $(NH_4)_3PO_4$) ช่วยให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นจากการใช้ปุ๋ยอย่างเดียว 5-24 %

7. ใช้เป็นฉนวนความร้อน เช่น คลุมน้ำแข็งไม่ให้ละลายง่าย แกลบที่ใช้งานแล้วสามารถนำไปคลุมโคนต้นไม้ เพื่อช่วยให้ความชุ่มชื้น และช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำจากดินได้

8. ใช้เป็นสารตัวเติม และสารเติมแต่ง

9. ใช้ทำกระดาษแต่ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากเส้นใยมีขนาดสั้นเกินไปทำให้ได้กระดาษที่มีคุณภาพไม่ดี

10. ใช้เป็นตัวพา และสารดูดซับ แกลบที่มีความละเอียดแตกต่างกันสามารถนำมาใช้งานเป็นสารตัวพาและสารดูดซับสำหรับวิตามิน ยาฆ่าแมลง ยาปฏิชีวนะ และแร่ธาตุได้

11. เป็นแหล่งของซิลิกา ในแกลบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบประมาณ 20 % ซึ่งเป็นซิลิกาที่มีสารปนเปื้อนต่ำ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดี

2.4 ซิลิกา (Silica) [8, 18, 25]

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำอื่นๆ โดยเฉพาะซิลิกาที่ขนาดอนุภาคเล็ก ข้อดีของซิลิกาคือช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่น เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด ลดความร้อนสะสม เพิ่มความต้านทานการ สึกหรอ และเพิ่มการยึดเกาะกับองค์ประกอบอื่นๆ ในยางเป็นต้น เมื่อเทียบกับเขม่าดำที่มีพื้นที่ผิวเท่ากันแล้วซิลิกาทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่าเขม่าดำ เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ โดยเฉพาะค่ามอดุลัส และค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ เนื่องจากซิลิกามีอันตรกิริยากับยางธรรมชาติต่ำกว่าเขม่าดำ การใช้งานซิลิกาจึงนิยมใช้สารคู่ควบเติมลงไปด้วย เช่น สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ทำหน้าที่เคลือบผิวอนุภาคซิลิกาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคทำให้สมบัติของยางดีขึ้น

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ได้จากทั้งธรรมชาติ และการสังเคราะห์ สมบัติของซิลิกาขึ้นกับหลายปัจจัยได้แก่

- ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิว
- ปริมาณน้ำในโครงสร้าง (Extent of hydration)
- สมบัติทางกายภาพ เช่น พีเอช องค์ประกอบทางเคมี การดูดซับน้ำมัน ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากซิลิกาประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน และออกซิเจนจึงมีหมู่ไซลานอลชนิดต่างๆ บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำที่สามารถเกาะติดบนพื้นผิว และยังมีผลต่อความเป็นกรดบนพื้นผิวของซิลิกาอีกด้วย จากความมีขั้วหรือความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของซิลิกาทำให้สารตัวเติมชนิดนี้สามารถเสริมแรงได้ดีในยางที่มีขั้ว เช่น ยางไนไตรล์หรือยางคลอโรพรีนมากกว่ายางที่ไม่มีขั้ว เช่น ยางธรรมชาติ และยางเอสบีอาร์

ซิลิกาสามารถแบ่งได้หลายชนิดดังนี้

1. ซิลิกาจากธรรมชาติ หรือซิลิกาชนิดบด (Ground silica)

ซิลิกาจากธรรมชาติ หรือซิลิกาชนิดบด เป็นซิลิกาที่ได้จากธรรมชาติโดยการขุดจากเหมือง แล้วทำการบดให้มีขนาดเล็กเป็นผลึกโดยธรรมชาติ ซิลิกาชนิดบดนิยมใช้เติมเพื่อลดต้นทุนเนื่องจากมีราคาถูก และช่วยเพิ่มสมบัติการทนความร้อน สามารถแบ่งย่อยได้ 3 ชนิดคือ ซิลิกาผลึก (Crystalline silica) ซิลิกาผลึกเล็ก (Microcrystalline silica) และซิลิกาไดอะตอมเมเชียส (Diatomaceous silica) ซึ่งแสดงองค์ประกอบ และสมบัติของซิลิกาจากธรรมชาติในตารางที่ 2.5-2.6

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของซิลิกาจากธรรมชาติชนิดต่างๆ [25]

องค์ประกอบ	Crystalline silica	Microcrystalline silica	Diatomaceous silica
SiO_2	99.7	99.9	86.9
Al_2O_3	0.101	0.18	3.1
Fe_2O_3	0.023	0.02	1.1
CaO	<0.01	0.04	0.41
MgO	<0.01	0.01	0.65
TiO_2	0.019	-	0.18
LiO	0.25	0.25	3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 สมบัติบางประการของซิลิกาจากธรรมชาติชนิดต่างๆ [25]

สมบัติ	Crystalline silica	Microcrystalline silica	Diatomaceous silica
Average particle size (μm)	1.9-8.8	2.1-8.2	3.0-8.0
Density (g/cm^3)	2.65	2.05	-
Surface area; BET N_2 (m^2/g)	0.54-2.06	3.6-6.0	-
Oil absorption; ASTM D-281	24.1-36.2	26.0-30.0	105-135
Mohs hardness	6.5-7.0	6.5-7.0	6.5-7.0

2. ซิลิกาชนิดสังเคราะห์ (Synthetic silica)

ซิลิกาชนิดสังเคราะห์มีลักษณะเป็นผงสีขาวขนาดเล็กสามารถแบ่งย่อยได้ 2 ชนิดคือ ซิลิกาชนิดไอ (Fumed silica) และซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica)

- ซิลิกาชนิดไอหรือซิลิกาชนิดไพโรเจนิก (Pyrogenic silica) เตรียมได้จากปฏิกิริยาเคมีในสภาวะเป็นไอที่อุณหภูมิสูงเกิดจากซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (Silicon tetrachloride; $SiCl_4$) เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ในตะเกียงเผาของไฮโดรเจน และออกซิเจน ควันหรือไอของผลิตภัณฑ์ควบแน่นกลายเป็นก้อนซิลิกาขนาดเล็ก มาก ประมาณ 20 nm ติดที่ผิวลูกกลิ้งหมุน สรุปเป็นสมการเคมีดังนี้

$$2H_2 + O_2 + SiCl \longrightarrow SiO_2 + 4HCl \quad (2.2)$$

อนุภาคซิลิกาชนิดนี้เกิดการหลอมรวมกันเป็นกลุ่มก้อนแอกกรีเกตและอาจเกิดการรวมกลุ่มเป็นก้อนแอกโกลเมอเรต ขนาด และพื้นที่ผิวของซิลิกาชนิดนี้สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วนของสารตั้งต้นจากปฏิกิริยา จากนั้นเป็นขั้นตอนการแยกขนาดโดยลมหมุน (Cyclone) หรือตะแกรงร่อน กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl) ที่ตกค้างจากปฏิกิริยาอาจดูดซับที่ผิวของอนุภาคสามารถกำจัดออกได้ด้วยการผ่านอากาศร้อนชื้น (Humid hot-air) ซิลิกาชนิดนี้มีความบริสุทธิ์หรือปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์สูง มีปริมาณความชื้นต่ำ (ประมาณ 1-2 %) และมีอนุภาคขนาดเล็กจึงมีประสิทธิภาพการเสริมแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ซิลิกาชนิดตกตะกอนสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาในสภาวะของเหลวซึ่งมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าในสภาวะไอ ซิลิกาชนิดนี้ได้จากการตกตะกอนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid; H_2SO_4) หรือของผสมของกรดเกลือแร่กับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังสมการ

$$Na_2O.n.SiO_2 + H_2SO_4 \longrightarrow n.SiO_4 + Na_2SO_4 + H_2O \quad (2.3)$$

หรือ

$$Na_2O.n.SiO_2 + CO_2 \longrightarrow n.SiO_4 + Na_2SO_4 + H_2O \quad (2.4)$$

$$Na_2SO_4 + HCl \longrightarrow 2NaCl + CO_2 + H_2O \quad (2.5)$$

สมบัติของซิลิกาชนิดนี้สามารถควบคุมได้จากหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นสารตั้งต้น อัตราการใส่สารตั้งต้น อุณหภูมิความเป็นกรด-เบส ฯลฯ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกกรองล้างทำความสะอาดทำให้แห้ง และบดให้มีขนาดที่ต้องการซิลิกาชนิดตกตะกอนมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์น้อยกว่า และมีปริมาณความชื้นสูง ซึ่งแสดงองค์ประกอบ และสมบัติของซิลิกาสังเคราะห์ในตารางที่ 2.7-2.8

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของซิลิกาจากการสังเคราะห์ชนิดต่างๆ [25]

องค์ประกอบ	**Fumed silica**	**Precipitated silica**
SiO_2	> 98.3	94.0
Al_2O_3	0.3-1.3	-
CaO	-	0.63
Na_2O	-	0-1.5
NaCl	-	1.7
LiO	2	5

ตารางที่ 2.8 สมบัติบางประการของซิลิกาจากการสังเคราะห์ชนิดต่างๆ [25]

สมบัติ	**Fumed silica**	**Precipitated silica**
Primary particle size (μm)	0.007-0.040	0.01-0.30
Average particle size (μm)	0.8	8.0-10.0
Density (g/cm^3)	2.2	2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

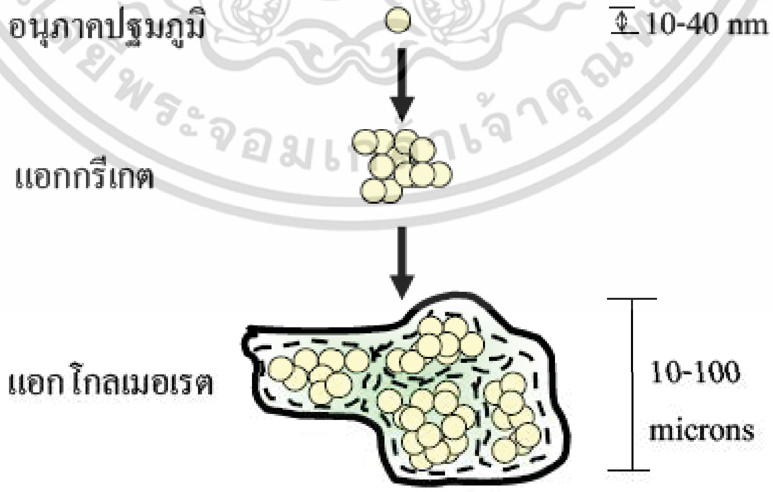
ตารางที่ 2.8 (ต่อ)

สมบัติ	Fumed silica	Precipitated silica
% Moisture	<1.5	6
Silanol group (no./nm^2)	2.4	1.5-10.0
Surface area; BET N_2 (m^2/g)	50-400	60-300
Oil absorption; ASTM D-281	150-250	160-200
Mohs hardness	6.5-7.0	6.5-7.0

จากการเปรียบเทียบสมบัติของซิลิกาจากธรรมชาติ (ตารางที่ 2.6) และซิลิกาจากการสังเคราะห์ (ตารางที่ 2.8) เห็นได้ว่าซิลิกาจากการสังเคราะห์มีพื้นที่ผิวมากกว่าเพราะมีขนาดเล็กจึงมีประสิทธิภาพการเสริมแรงดีกว่าแต่ดูดความชื้นจากบรรยากาศมากกว่า [25]

2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของซิลิกา

โครงสร้างซิลิกาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-40 nm ซิลิกาไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ ในรูปของอนุภาคปฐมภูมิ แต่จับกลุ่มรวมกันเป็นก้อนเรียกว่า แอกกรีเกต เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิซึ่งโครงสร้างนี้ไม่ถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสม นอกจากนี้แอกกรีเกตของซิลิกายังชอบจับกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่มากขึ้น เรียกว่าแอกโกเมอ - เรต เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

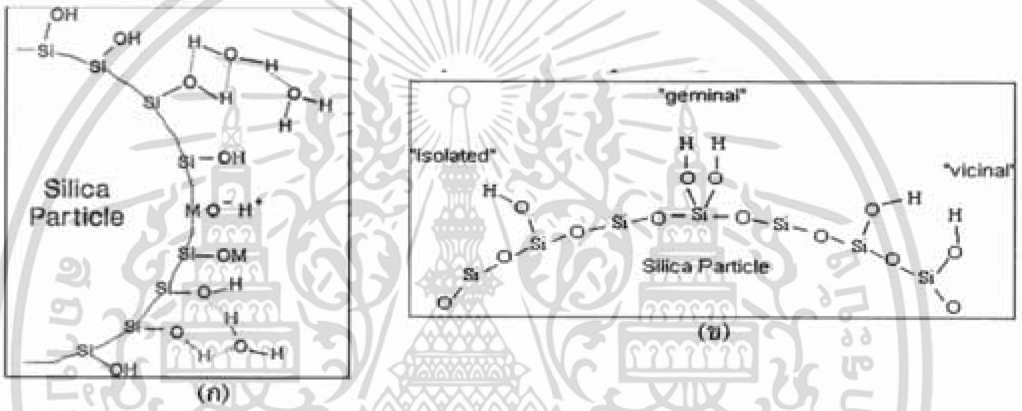


รูปที่ 2.8 การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลิกา [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ลักษณะทางเคมีของพื้นผิว

ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวซิลิกาเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างที่ควบคุมระดับการเสริมแรงของซิลิกา เพราะลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเป็นตัวบ่งชี้ระดับของอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา โดยทั่วไปบนพื้ผิวซิลิกาประกอบด้วยหมู่ไซลานอลปกคลุมอยู่อย่างหนาแน่น (4-5 หมู่ต่อ 100 Å) ซึ่งหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกานี้เกาะอยู่ในหลายลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.9 หมู่ไซลานอลทำให้พื้นผิวซิลิกามีความเป็นกรด และมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หมู่ไซลานอลสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ ที่มีอยู่ในยางคอมพาวด์ได้ เช่น สารคู่ควบไซเลน น้ำ หรือไกลคอล เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ลักษณะของหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา [8]

2.4.3 ปัญหาของการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

เนื่องจากบนพื้นผิวซิลิกามีหมู่ไซลานอลในปริมาณมาก ซึ่งหมู่ไซลานอลนี้ทำให้อนุภาคของซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกันสูง ซิลิกาจึงอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่อย่างเหนียวแน่น เพราะอันตรกิริยาหรือแรงดึงดูดที่ยึดกลุ่มก้อนซิลิกาเข้าด้วยกันคือพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีความแข็งแรงค่อนข้างมากด้วยเหตุนี้ ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ยากกว่าเขม่าดำ สำหรับในกรณีที่เติมซิลิกาลงไปในยางในปริมาณค่อนข้างมาก กลุ่มก้อนของซิลิกาเข้ามาอยู่ใกล้กันมากจนทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกลุ่มก้อนของซิลิกาด้วยกันเอง เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติมนี้ทำให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดสูงขึ้น ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปด้วยความยากลำบากและทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตมากยิ่งขึ้น การเติมสารเติมแต่งบางชนิดที่สามารถเข้าไปจับกับหมู่ไซลานอลได้ง่ายลงไป ช่วยทำให้กลุ่มก้อนของซิลิกาแตกตัวออกได้ง่ายยิ่งขึ้น ความหนืดของยางคอมพาวด์จึงลดลง ทำให้กระบวนการผสม และการขึ้นรูปเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น ตัวอย่างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเติมแต่งดังกล่าว ได้แก่ ซิงค์ออกโทเอต (Zinc octoate) หรือ เฮกซะเมทิลีนเททรามีน (HEXA) รวมถึงสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงในกลุ่มกัวนิดีน เช่น ไดฟีนิลกัวนิดีน (DPG) เป็นต้น

นอกจากนี้หมู่ไซลานอลบนพื้นผิวซิลิกายังสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ดี โดยทั่วไปซิลิกามีความชื้นประมาณ 4-7 % ซึ่งความชื้นที่จับอยู่กับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวซิลิกานี้นอกจากจะทำให้ซิลิกาแตกตัว และกระจายตัวในยางได้ยากขึ้นเล็กน้อยแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาคงรูปของยางได้อีกด้วย โดยทั่วไปถ้าปริมาณความชื้นในซิลิกาสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการคงรูปยางในระบบที่ใช้กำมะถันยาวขึ้น เพราะซิลิกาที่อิ่มตัวด้วยน้ำสามารถหน่วงปฏิกิริยาคงรูป ทำให้ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงมากขึ้น อย่างไรก็ดีความชื้นบางส่วนถูกไล่ออกไปในระหว่างกระบวนการผสมยางเพราะอุณหภูมิของยางในระหว่างการผสมสูง ทำให้น้ำหรือความชื้นบางส่วนระเหยออกไปด้วยเหตุนี้ การผสมยางที่อุณหภูมิแตกต่างกันจึงสามารถทำให้เกิดความแปรปรวนของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้เช่นกัน

อนึ่งปัญหาสำคัญอีกอย่างที่มักพบเมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมคือปัญหาเรื่องการคงรูปยาง เพราะบนพื้นผิวซิลิกามีหมู่ไซลานอลที่สามารถดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น DPG รวมไปถึงสารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์ (Znic complex) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นการเชื่อมโยงสำหรับปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน การดูดซับดังกล่าวทำให้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงหรือสารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์มีปริมาณลดลง ซึ่งส่งผลทำให้ยางมีระดับของการคงรูปลดลงด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปผู้ผสมยางสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้โดยการเติมสารประกอบในกลุ่มไกลคอลหรือกลุ่มเอมีนลงไป เพราะสารประกอบเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา ทำให้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงหรือสารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์ที่ถูกดูดซับ โดยหมู่ไซลานอลมีปริมาณลดลง ปฏิกิริยาเชื่อมโยงสามารถเกิดได้เร็วขึ้น ตัวอย่างที่สำคัญของสารประกอบเหล่านี้ได้แก่ ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ไตรเอทาโนลามีน และ HEXA เป็นต้น นอกจากการเติมสารประกอบดังกล่าวแล้ว การปรับลำดับการเติมสารเคมีในระหว่างการผสม สามารถช่วยลดปัญหาการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์ได้ด้วยเช่นกัน

2.4.4 สารคู่ควบไซเลน

สารคู่ควบไซเล นเป็นสารที่เพิ่มความสามารถในการยึดติดกันระหว่างพอลิเมอร์ ที่เป็นสารอินทรีย์กับพื้นผิวอนินทรีย์ นอกจากนี้สารคู่ควบยังใช้เป็นตัวเคลือบพื้นผิวหรือปรับปรุงสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวอีกด้วยความหนาของชั้นสารคู่ควบไซเลนที่มีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มการยึดติดของพื้นผิวเท่ากับความหนาของการจัดเรียงตัวแบบชั้นเดียวซึ่งเปลี่ยนไปตามประเภทของสารตัวอย่าง สารคู่ควบที่นิยมใช้ เช่น ออกาโนฟังก์ชันแนลไซเลน (Organofunctional silane) นำมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติการยึดติดเส้นใยแก้วกับพอลิเมอร์หลายชนิด และยังถูกใช้ในการปรับปรุงความสามารถในการเข้ากัน (Compatibility) ของซิลิเซียสฟิลเลอร์ (Siliceous fillers) ในพวกเรซิน (Resin) และพอลิเมอร์

การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในยางที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมช่วยทำให้ยางมีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาเกรด HS-200 และเขม่าดำเกรด N-285 ซึ่งมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 20-22 nm พบว่าเมื่อไม่ได้ใส่สารคู่ควบ เมอร์-แคปโทไซเลน ในยาง เอสบีอาร์ ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงมีค่าความร้อนสะสมสูง ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดสูง ค่ามอดุลัสต่ำ และค่าความต้านทานต่อการ สึกหรอ ต่ำกว่ายาง เอสบีอาร์ ที่ใช้ผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรง แต่ถ้ามีการเติม เมอร์แคปโทไซเลน ลงไปเพียง 1.5 phr หรือประมาณ 2.5 % ของน้ำหนักซิลิกาช่วยทำให้ค่าความร้อนสะสม และการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดต่ำลง ในขณะที่มีค่ามอดุลัส และค่าความต้านทานต่อการสึกหรอสูงขึ้นใกล้เคียงกับเมื่อใช้เขม่าดำ [8]

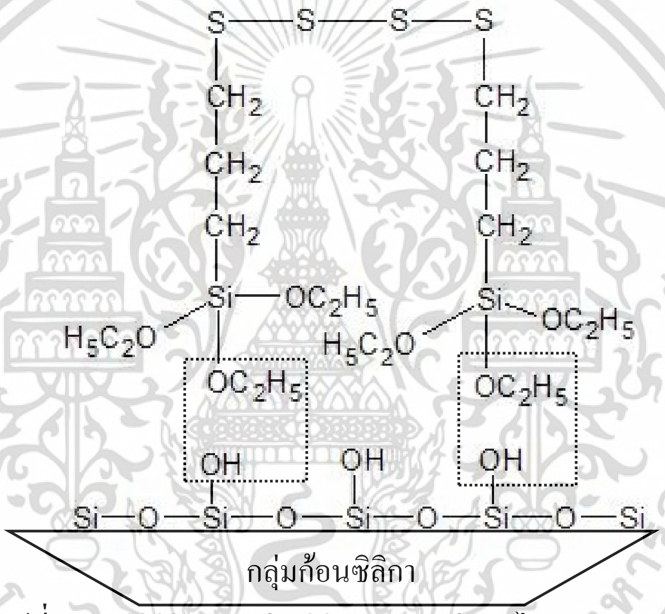
2.4.5 บทบาทของสารคู่ควบไซเลน

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกา และลดปัญหาต่างๆ เมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม เทคโนโลยีที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือการใช้สารคู่ควบไซเลน โดยทั่วไปการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกาสูงขึ้นเพราะสารคู่ควบไซเลนประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมี 2 หมู่ที่แตกต่างกัน คือ หมู่อัลคอกซี (Alkoxy (-OR)) เช่น หมู่เมทอกซี ($-OCH_3$) หรือ หมู่เอทอกซี ($-OC_2H_5$) และหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ (Organo-functional group) เมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงไป หมู่อัลคอกซีซึ่งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของโมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกาเกิดเป็นพันธะไซลอกเซนที่มีความเสถียร และมีการปลดปล่อยแอลกอฮอล์ออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทำให้ซิลิกามีความเป็นขั้วและมีอันตรกิริยาระหว่างกันลดลง ซิลิกาจึงเข้ากับยาง ไม่มีขั้วได้ดีขึ้น และสามารถแตกตัวกระจายตัวในยางได้ง่ายยิ่งขึ้น ทำให้ความหนืดลดลง สามารถไหลและขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ส่วนหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งช่วยทำให้ ซิลิกาเข้ากับยางได้ง่ายเพราะหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์นี้

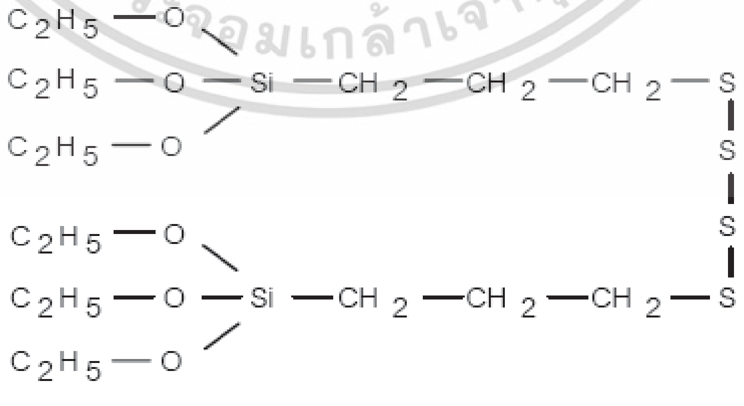
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความเป็นขั้วต่ำจึงเข้ากับยาง ไม่มีขั้วได้ง่าย นอกจากนี้ในหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ยังมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ โดยกำมะถันในสารคู่ควบไซเลนเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้นด้วยเหตุนี้สารคู่ควบไซเลนจึงทำหน้าที่เปรียบเสมือนสะพานเชื่อมระหว่างซิลิกากับยาง ทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาสูงขึ้น ประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกาจึงสูงขึ้น ส่งผลให้ยางผสมสูตรมีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น

สารคู่ควบที่เป็นที่รู้จักกันดี ได้แก่ สารคู่ควบไซเลน Si-69 (Bis-(3-triethoxysilylpropyl tetrasulfide); TESPT) (รูปที่ 2.11) และ Si-264 (3-Thiocyanatopropyl-triethoxy silane; TCPTS) [27]



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับสารคู่ควบไซเลน Si-69 [8]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน Si-69 [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำได้จากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ หรือการแตกตัว เนื่องจากความร้อน (Thermal cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ เขม่าดำจัดเป็นสารตัวเติมที่สำคัญที่สุดและมีปริมาณการใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากเขม่าดำมีราคาถูกสามารถใส่เขม่าดำในยางได้ในปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) และที่สำคัญที่สุดคือเขม่าดำสามารถช่วยเสริมแรงให้กับยางอย่างมากอาจทำให้ความแข็งแรง (Strength) ของยางเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ของยาง เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น การใช้เขม่าดำมีข้อเสียคือผลิตภัณฑ์ยางที่ใส่สารตัวเติมเขม่าดำจะมีสีดำ เช่น ยางรถยนต์ และสายพานเป็นต้น [8]

2.5.1 ชนิด และวิธีการผลิตเขม่าดำ

1. เขม่าดำชนิดเฟอร์เนส (Furnace blacks)

เขม่าดำชนิดเฟอร์เนสเป็นชนิดที่นิยมใช้แพร่หลายทั่วไป และมีปริมาณการใช้งานมากที่สุด เขม่าดำชนิดนี้ผลิตได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเชื้อเพลิง คือ ก๊าซธรรมชาติ หรือน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel oil) เผาไหม้ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนที่มากเกินพอเกิดเป็นอากาศร้อนหมุนวนภายในเตาเผาบริเวณเผาไหม้ (Combustion zone) น้ำมันวัตถุดิบนิยมใช้เป็นน้ำมันหนักที่เหลือจากกระบวนการกลั่นน้ำมัน (Refinery heavy oil) ที่มีสารอะโรมาติกปริมาณมากถูกฉีดเข้าไป ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กลายเป็นกากคาร์บอนลักษณะเป็นก้อนเขม่าดำปริมาณมากซึ่งถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว (Quench) ด้วยน้ำ เขม่าดำชนิดเฟอร์เนสมีโครงสร้างเป็นก้อนกลมติดกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า "แอกกรีเกต" มีโครงสร้างมากขนาดเล็ก (ประมาณ 10-100 nm) มีปริมาณออกซิเจนต่ำ (มีน้อยกว่า 1 %) เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวเกิดเป็นสารไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ที่มีหมู่ฟังก์ชันอะตอมออกซิเจนบางประเภทหรือออกซีไฮโดรคาร์บอน (Oxyhydrocarbons) ปริมาณเล็กน้อย พื้นผิวของเขม่าดำเป็นกลางหรือเป็นเบสเล็กน้อย (พีเอชประมาณ 8)

2. เขม่าดำชนิดเทอร์มอล (Thermal blacks)

เขม่าดำชนิดเทอร์มอลเกิดจากการแตกตัว (Cracking) ของน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนที่บริเวณผิวร้อนภายในเตาเผาอุณหภูมิสูงได้เป็นเขม่าดำที่ไม่ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิไดซ์ (Unoxydized blacks) เขม่าดำชนิดนี้มีขนาดใหญ่ (ประมาณ 100-150 nm) ลักษณะเป็นก้อนกลมโครงสร้างน้อยและมีพื้นที่ผิวน้อย

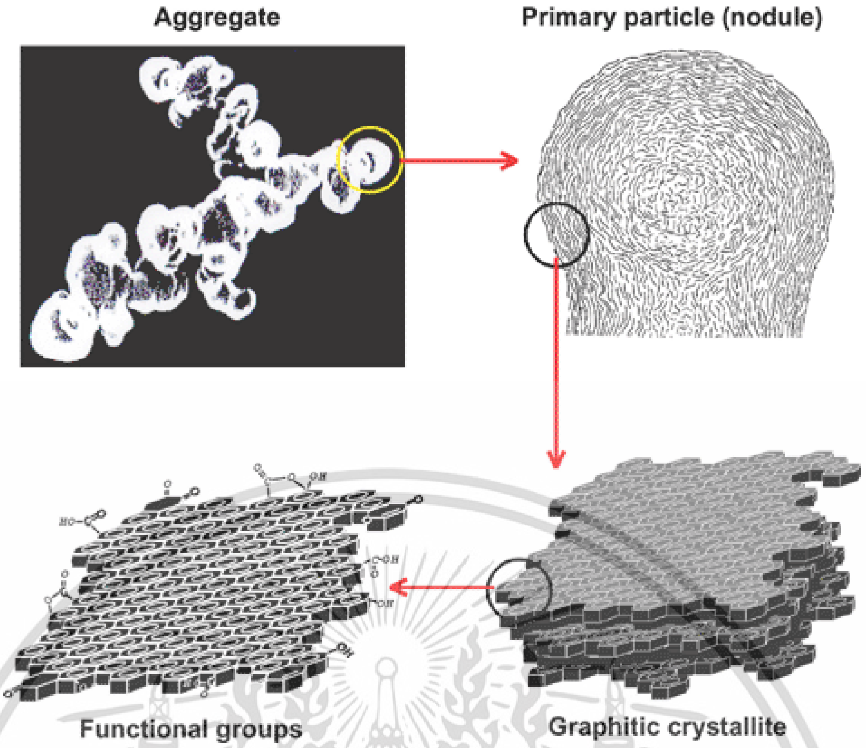
3. เขม่าดำชนิดชัลแนล (Channel blacks)

เขม่าดำชนิดชัลแนล มีกระบวนการผลิตเขม่าดำชนิดนี้ค่อนข้างเก่าล้าสมัยจึงไม่เป็นที่นิยมใช้ เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติที่ตะเกียงเผาทำให้เกิดเขม่าเกาะสะสมที่ผิวภายในท่อเหล็ก (Channel iron) เย็นที่ต่อยาวไปมาเป็นอนุกรม ทำให้ได้เขม่าดำชนิดชัลแนลมีพื้นผิวที่ถูกออกซิไดซ์มีความเป็นกรด ขนาดเล็กมาก (ประมาณ 1-3 nm) การใช้เขม่าดำชนิดนี้มีผลหน่วงปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของยางเนื่องจากมีความเป็นกรด

2.5.2 รูปร่าง และโครงสร้างของเขม่าดำ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเขม่าดำที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM) เห็นว่าเขม่าดำมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนกลมติดกันอย่างไม่เป็นระเบียบมีรูปร่างคล้ายพวงองุ่น (Grape-like structure) กลุ่มก้อนของอนุภาคที่ติดกันนี้คือ "แอกกรีเกต" เกิดจากการหลอมติดของอนุภาคขนาดเล็กๆ ที่เรียกว่า "โนดูล" (Nudules) ซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของเขม่าดำแต่ละโนดูลเกิดจากการเรียงตัวหลายๆ ชั้นของแผ่นแกรไฟต์ (Graphitic layer planes) เป็นผลึกเรียงเป็นวงขยายออกตามแนวรัศมีโครงสร้างผลึกของเขม่าดำไม่เป็นระเบียบเหมือนแกรไฟต์ เช่น มีระยะห่างระหว่างชั้นมากกว่า (ประมาณ 3.5 Å) มีอะตอมที่หายไป (Missing atoms) และอาจมีหมู่ฟังก์ชันหรืออะตอมของธาตุอื่นด้วย เช่น ออกซิเจน โครงสร้างของเขม่าดำแสดงดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของเขม่าดำ [28]

2.5.3 ยางบาวด์ (Bound rubber)

ยางบาวด์คือ ยางส่วนที่ติดอยู่กับโครงสร้างของเขม่าดำยางบาวด์จะยึดติดกับโครงสร้างเขม่าดำอย่างแข็งแรงมากจะไม่หลุดออกแม้ว่าทำการสกัดยางผสมเขม่าดำด้วยตัวทำละลายที่ดี

การเกิดยางบาวด์เป็นหลักฐานที่เด่นชัดว่ายางเกิดอันตรกิริยากับเขม่าดำ เช่น เกิดการยึดเกาะทางกายภาพ (Physical adhesion) เกิดพันธะเคมีเกิดการยึดเกาะทางเคมีหรือ การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ฯลฯ ทำให้ยางเกิดการยึดเกาะที่ดีบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของโครงสร้างเขม่าดำไม่ถูกตัวทำละลายที่ดีสกัดออก

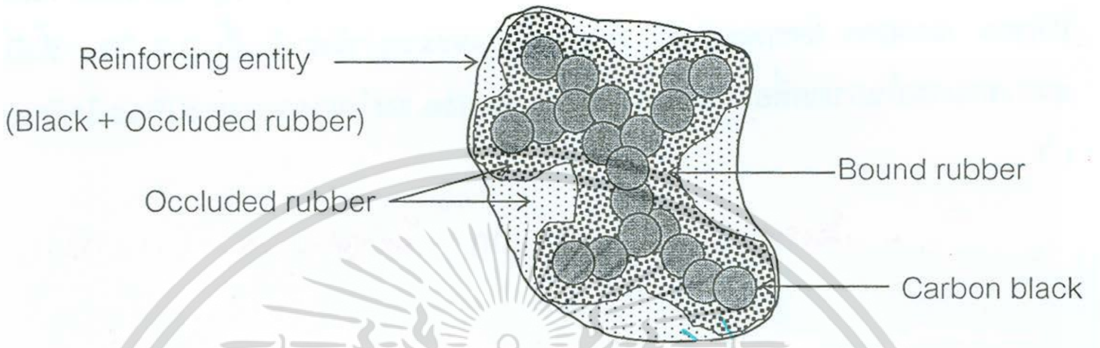
ปริมาณยางบาวด์ในยางผสมเขม่าดำจะสัมพันธ์กับลักษณะของเขม่าดำกล่าวคือ เขม่าดำที่มีโครงสร้างมาก และมีขนาดเล็กหรือพื้นที่ผิวสูงเกิดยางบาวด์ปริมาณมากส่งผลให้เกิดการเสริมแรงของเขม่าดำมากขึ้น

2.5.4 ยางออกคลู๊ด (Occluded rubber)

ยางออกคลู๊ดคือ ยางส่วนที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่าง (Voids) ในโครงสร้างแอกกรีเกตของเขม่าดำดังรูปที่ 2.13 ยางออกคลู๊ดมีความหมายกว้าง และครอบคลุมส่วนของยางบาวด์กล่าวคือ ยางออกคลู๊ดมีความหมายรวมยางที่อยู่ภายในช่องว่างของเขม่าดำที่ไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ รวมกับยางที่เกิดอันตรกิริยา เช่น พันธะเคมีการยึดเกาะเชิงกลฯ ข้อดีของยางออกคลู๊ดคือยางออกคลู๊ดที่แทรกอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่องว่างของเขม่าดำในยางมากขึ้นหรือเพิ่มอัตราส่วนโดยปริมาตรของเขม่าดำในยาง (Effective volume fraction of carbon black) ทำให้ยางผสมเขม่าดำมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ปริมาณยางออกคลู๊ดสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาตรช่องว่างในเขม่าดำ ดังนั้นเขม่า ดำที่มีโครงสร้างมาก ทำให้ เกิดยางออกคลู๊ดมากขึ้น [25]



รูปที่ 2.13 ภาพวาดแสดงโครงสร้างของเขม่าดำ Bound rubber และ Occluded rubber รวมเป็นส่วนเสริมแรง (Reinforcing entity) [25]

2.6 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) [8, 25]

แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมสีขาวที่ได้จากธรรมชาติเกิดจากการสะสมตะกอนเป็นเวลานาน เช่น ซากเปลือกหอยต่างๆ เป็นองค์ประกอบสำคัญของเปลือกโลกที่มีมากชนิดหนึ่ง แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเพิ่มเนื้อที่นิยมใส่ผสมพอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนการผลิต เช่น พลาสติก ยาง สี สิ่งทอ กาว พรม ฯลฯ เนื่องจากมีความขาว (Whiteness) สมบัติความเสียดทานต่ำ มีหลายขนาดให้เลือกใช้ และมีราคาถูก แต่มีข้อจำกัดคือมีความหนาแน่นสูง (ประมาณ 2.72 g/cm^3) ไม่ทนกรด ไม่สามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่สัมผัสกับกรด เนื่องจากจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทำปฏิกิริยากับกรด แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมอนินทรีย์ มักจับตัวเป็นก้อนจึงนิยมใช้สารช่วยกระจายตัว เช่น กรดสเตียริกเคลือบสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัว นอกจากนี้ยังไม่มีประสิทธิภาพการเสริมแรง (Non-reinforcing filler) หรือสามารถเสริมแรงเพียงเล็กน้อย จึงนิยมใช้ผสมเพื่อเพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว

แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถเตรียมได้จากการบดแห้ง (Dry grinding) บดเปียก (Wet grinding) และการตกตะกอน (Precipitation) การบดแห้งมีกระบวนการผลิตที่ง่าย โดยการให้แรงบดให้แตก (Crushing) ทำให้เป็นผง (Pulverizing) และแยกขนาดโดยการใช้ลมเป่า แคลเซียม-คาร์บอเนตชนิดบดแห้งมีความบริสุทธิ์ต่ำ และมีขนาดใหญ่ (ขนาดมากกว่า 12 μm) กระบวนการบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปียกจะทำการชะล้างสิ่งเจือปนที่มีสี และแยกขนาดโดยการหมุนปั่นความเร็วสูง จะได้แคลเซียม - คาร์บอเนตขนาดเล็กกว่า และมีความบริสุทธิ์สูงกว่า

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนสามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น กระบวนการโซล์เวย์ (Solvay) รีคาร์บอเนชัน (Recarbonation) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ตัวอย่างการผลิตโดยกระบวนการรีคาร์บอเนชันเป็นวิธีที่สำคัญ และง่ายที่สุด สามารถแสดงได้ดังสมการ

Calcination : $CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$ (2.6)

Hydration : $CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2$ (2.7)

Carbonation : $Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$ (2.8)

กระบวนการผลิตเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (Calcination) ของหินปูน (Limestone) ที่ประมาณ 900ºC เพื่อให้ได้แคลเซียมออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นเป็นขั้นตอนการทำปฏิกิริยากับน้ำ ให้ได้สารละลายสีขาวคล้ายน้ำนมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในขั้นตอนที่สามเป็นปฏิกิริยาคาร์บอเนชันโดยการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านสารละลายแคลเซียม - ไฮดรอกไซด์ในถังปฏิกรณ์ที่เรียกว่าคาร์บอเนเตอร์ (Carbonator) การละลายแล้วตกตะกอนใหม่ทำให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความบริสุทธิ์สูง อนุภาคขนาดเล็ก ช่วยเสริมแรงเมื่อใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ แต่มีราคาแพง

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด (ธรรมชาติ) มีปริมาณ $CaCO_3$ ประมาณ 94 % ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนมีปริมาณ $CaCO_3$ มากกว่า 98 % แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารอนินทรีย์มีขั้ว สามารถเข้ากับยางที่มีขั้วมากกว่ายางที่ไม่มีขั้ว และอาจจับตัวเป็นก้อนไม่กระจายตัวในยางเช่นเดียวกับสารตัวเติมอนินทรีย์อื่นๆ ดังนั้นการเคลือบสารบางประเภท เช่น กรดสเตียริกหรือชันสน เพื่อช่วยเพิ่มกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง สมบัติบางประการของแคลเซียม - คาร์บอเนตชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดต่างๆ [25]

สมบัติ	Ground $CaCO_3$		Precipitated $CaCO_3$
	Fine	Coarse	
Average particle size (μm)	3-14	17	0.07
Desity (g/cm^3)	2.71	2.71	2.55-2.65
Surface area, BET (m^2/g)	0.9-2.2	-	11-26
Oil absoption, ASTM D-281	5-21	5-6	28–58
Mohs hardness	2.5-3	3	2.5-3

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sae-Oui P. et.al. [29] ศึกษาการใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติโดยเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้าอื่นๆ เถ้าแกลบมีส่วนประกอบของซิลิกา และเหมือนเขม่าดำ เพราะเถ้าแกลบเป็นของเหลือจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทั้งซิลิกา และเขม่าดำได้รับการยอมรับว่าเป็นสารตัวเติมเสริมแรงหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางเพื่อเพิ่มสมบัติบางอย่างของยาง เช่น มอดุลัส และความแข็งแรงดึง ในการศึกษาครั้งนี้มีเถ้าแกลบ 2 เกรด (เกรดที่มีคาร์บอนต่ำ และคาร์บอนสูง) เมื่อใช้ทัลคัม เคลย์ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา เขม่าดำ และเถ้าแกลบ พบว่าการใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติทำให้ยางเชื่อมโยงมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่า (ค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด มอดุลัส ความแข็งกด และความต้านทานต่อการ สึกหรอ) เมื่อเทียบกับการใช้สารตัวเติมเสริมแรงอย่างซิลิกา และเขม่าดำ จัดได้ว่าเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงแม้ว่าจะทำการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบด้วยการเติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 แต่มีผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติของยาง เพราะเถ้าแกลบมีอนุภาคขนาดใหญ่ และบนพื้นผิวเถ้าแกลบมีหมู่ไซลานอลน้อยกว่าบนผิวของซิลิกาทางการค้าทำให้สารคู่ควบไซเลนที่เติมลงไปเกิดอันตรกิริยาได้ไม่ดีเท่าที่ควร

Arayapranee W. et.al. [30] ศึกษาการประยุกต์ใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติโดยทำการเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้า (ซิลิกา และเขม่าดำ) พบว่าเถ้าแกลบมีส่วนประกอบของซิลิกา และยังมีองค์ประกอบของคาร์บอนเหมือนเขม่าดำแต่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกา และเขม่าดำ ผลของพฤติกรรมการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบ (0-40 phr) ความหนืดมูนนี่ และเวลาเชื่อมโยงยางลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งกดเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดลดลง ค่ามอดุลัส และความต้านทานต่อการ สึกหรอนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อใช้เถ้าแกลบกับเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ จะส่งผลให้สมบัติต่างๆ มีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำและซิลิกา เนื่องจากซิลิกา และเขม่าดำมีอนุภาคที่เล็ก และพื้นที่ผิวที่มากกว่า จากผลโดยรวมแสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบสามารถใช้เป็นสารตัวเติมที่ถูกกว่าสำหรับยางเชื่อมโยงที่ไม่ต้องการการเสริมแรง

เอกชัย วิมลมาลา และคณะ [31] ศึกษาผลของการปรับปรุงเถ้าลอย (Fly ash; FA) ด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 เพื่อเป็นสารเติมแต่งในยางเอสบีอาร์ ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยด้วยเทคนิค (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR) และ (X-ray fluorescence spectroscopy; XRF) ตามลำดับ จากนั้นทำศึกษา พฤติกรรมการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร จากการทดลองพบว่าเถ้าลอยมีองค์ประกอบของซิลิกา และโลหะออกไซด์อื่นๆ เป็นองค์ประกอบและมีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกับซิลิกาเกรดการค้า โดยพบหมู่ฟังก์ชันกลุ่มไซลานอล การใช้เถ้าลอยเป็นสารตัวเติมส่งผลให้เวลาเชื่อมโยงลดลง เนื่องจากในองค์ประกอบของเถ้าลอยมีกลุ่มโลหะออกไซด์ อาทิเช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น การ เชื่อมโยง จึงทำให้เกิด Zinc complex เร็วขึ้น ส่งผลให้ยางเชื่อมโยงเร็วขึ้นด้วย และการปรับปรุงเถ้าลอยด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 ส่งผลให้เวลาเชื่อมโยงยางลดลง เนื่องจากอนุมูลอิสระของกำมะถันจากสารคู่ควบไซเลนพร้อมจะเข้าทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับยาง ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงสมบูรณ์ได้เร็วขึ้น และการปรับปรุงเถ้าลอยส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลต่างๆ มากกว่าการใช้เถ้าลอยไม่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 เนื่องจากการปรับปรุงเถ้าลอยด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 ทำให้การยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของยางกับเถ้าลอยดีขึ้น ทำให้มีช่องว่างระหว่างวัฏภาคของยางกับเถ้าลอยน้อยลง

Sombatsompop N. et.al. [27] ศึกษาผลของการใช้เถ้าลอย และซิลิกาชนิดตกตะกอนเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ โดยทำการศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล และความต้านทานน้ำมัน (Oil resistance) ของยางไนไตรล์ที่มีปริมาณ เขม่าดำ 60 phr และปริมาณที่แตกต่างกันของซิลิกาจากเถ้าลอย และซิลิกาชนิดตกตะกอน จากการทดลองพบว่าการใช้ เขม่าดำ และซิลิกาชนิดตกตะกอนเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์จะช่วยลดเวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยง และส่งผลให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น และพบว่ายางไนไตรล์มีค่าความแข็งกดมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมทุกชนิด ซึ่งการใช้ซิลิกาชนิดตกตะกอนกับเขม่าดำเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ให้สมบัติที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีกว่าการใช้ซิลิกาจากเถ้าลอยกับเขม่าดำเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ เพราะว่าซิลิกาชนิดตกตะกอนกับซิลิกาจากเถ้าลอยมีอนุภาคขนาด ใหญ่ และจำนวนหมู่ฟังก์ชันของไซลานอลน้อยกว่าซิลิกาชนิดตกตะกอน ซึ่งสามารถสรุปได้จากผลการทดลองว่า อนุภาคซิลิกาจากเถ้าลอยสามารถนำมาเพิ่มมูลค่าโดยการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุนในยางไนไตรล์ได้

Pattamaprom C. et.al. [5] ทำการศึกษาผลของการใช้เถ้าแกลบ เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติดัดแปลง โดยทำการวิเคราะห์เถ้าแกลบและดัดแปลงยางธรรมชาติ เป็นยางธรรมชาติกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MNR) ยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์ (ENR) และยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (NR/EPDM) โดย จากการทดลองพบว่า เถ้าแกลบมีขนาดอนุภาคประมาณ 75 μm พื้นที่ผิวจำเพาะ 8.15 m^2/g และเมื่อใส่สารตัวเติมเถ้าแกลบในปริมาณ 45 phr ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของยางทุกชนิดไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปมากจากยางที่ไม่ได้ใส่สารตัวเติม พบว่าค่ามอดุลัสของ MNR และ ENR มีค่าสูงกว่า NR แต่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง การใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมจะให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดในปริมาณ 5 phr ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณ ที่น้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ซิลิกาชนิดตกตะกอนเป็นสารตัวเติมส่งผลให้สมบัติเชิงกล ของยางเชื่อมโยงดีขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากเถ้าแกลบมีขนาดอนุภาคใหญ่ และ หมู่ฟังก์ชันไซลานอล น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกาชนิดตกตะกอน

ชุลีพันธ์ พันธุ์เอี่ยม [32] ศึกษาสมบัติของวัสดุยางผสมระหว่างยางไนไตรล์ กับยางไฮโดรจิเนตอะไครโลไนไทรล์บิวทาไดอีน (Hydrogenated Acrylonitrile Butadiene; HNBR) ที่มีเขม่าดำเป็นสารตัวเติมหลัก ปริมาณ 80 phr และปรับเปลี่ยนปริมาณสัดส่วนของ ยาง NBR ในปริมาณ 10-30 phr โดยศึกษาถึงระบบการเชื่อมโยง 2 แบบ ดังนี้ การเชื่อมโยงระบบ กำมะถัน และระบบเปอร์ออกไซด์ ในงานนี้ใช้สารตัวเติมผงเถ้าลอย และผงซิลิกาเกรดการค้า (ในช่วง 0-50 phr) ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 4 % โดยน้ำหนักของซิลิกาที่เป็นสารตัวเติมรอง (Secondary filler) ทำการทดสอบสมบัติการไหล และพฤติกรรมการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ การทดสอบความต้านทานการบวมตัวในน้ำมันไฮดรอลิก การบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิกที่มีต่อสมบัติของวัสดุยางผสม และการทดสอบสภาวะการใช้งานจริงด้วยเครื่องทดสอบซีล รวมถึงการนำวัสดุยางผสมสูตรวิจัยมาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า ผลการทดสอบพบว่า การเติม HNBR ใน NBR ไม่ส่งผลต่อสมบัติโดยรวมของวัสดุยางผสมทั้งระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน และเปอร์ออกไซด์ และการเติมสารแอนติออกซิแดน ต์ไม่ส่งผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อสมบัติโดยรวมของวัสดุยางผสมที่ใช้การเชื่อมโยงระบบ กำมะถัน แต่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิก แต่ทำให้สมบัติทางด้านการไหล และการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกลของยางที่ใช้การเชื่อมโยงระบบเปอร์ออกไซด์ลดลง สำหรับผลของการเติมสารตัวเติมซิลิกาพบว่า การเติมซิลิกาเกรดการค้าในยางผสม NBR กับ HNBR ที่มีผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติม มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่าการเติมซิลิกาจากเถ้าลอย สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางผสมไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อทดสอบแช่ชิ้นงานในน้ำมันไฮดรอลิก ในขณะที่การบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันส่งผลทำให้ค่ามอดุลัส ความแข็งกดเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์การ ดึงยืด ณ จุดขาดลดลง การท ดสอบสภาวะการใช้งานจริงด้วยเครื่องทดสอบซีล พบว่า ยางผสมสูตรวิจัยมีสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า ยางผสมในงานวิจัยนี้ที่เหมาะสม คือ ยางผสมที่มีการเชื่อมโยงระบบ กำมะถันที่สัดส่วนยางไนไตรล์กับ HNBR เท่ากับ 90:10 และมีสารตัวเติมซิลิกาเกรดการค้าที่ 30 phr และผงเถ้าลอยที่ 20 phr ส่วนในยางผสมที่มีการเชื่อมโยงระบบเปอร์ออกไซด์ที่สัดส่วน NBR กับ HNBR เท่ากับ 90:10 ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง โดยพิจารณาจากสมบัติด้านต่างๆ และต้นทุนวัตถุดิบ

วีรยา วรคันธ์ และคณะ [33] ศึกษาการเสริมแรงของยางธรรมชาติด้วยซิลิกาผสมระหว่างเถ้าลอย กับซิลิกาชนิดตกตะกอน โดยทำการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าลอยด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 ปริมาณ 2 % โดยน้ำหนักของเถ้าลอย มาทำการศึกษาปริมาณเถ้าลอย 0-40 phr และขนาดอนุภาคเถ้าลอยช่วงต่างๆ ที่น้อยกว่า 150 μm จากนั้น ทำการเลือกปริมาณซิลิกาของเถ้าลอย และขนาดอนุภาคเถ้าลอยที่เหมาะสมไปศึกษาต่อด้วยการนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงร่วมกับซิลิกาชนิดตกตะกอนเป็นซิลิกาผสม (เถ้าลอย : ซิลิกาชนิดตกตะกอน) ด้วยสัดส่วนต่างๆ ดังนี้ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ซึ่งทำการศึกษาทั้งระบบที่ไม่ปรับปรุง และปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาชนิดตกตะกอนด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 ปริมาณ 2 % โดยน้ำหนักของซิลิกาผสม โดยทำการตรวจสอบสมบัติต่างๆ ของยางผสมสูตร ได้แก่ พฤติกรรมการเชื่อมโยง ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด และความต้านทานการสึกหรอ จากการทดลองพบว่า ผลจากปริมาณเถ้าลอยที่แตกต่างกันให้ค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด และความต้านทานการสึกหรอลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น ผลจากขนาดอนุภาคเถ้าลอยพบว่าการใช้เถ้าลอยขนาดอนุภาค 25 μm ทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ สูงที่สุด และในการผสมเถ้าลอยกับซิลิกาชนิดตกตะกอนนั้น การเติมซิลิกาผสมปริมาณ 10 phr ทั้งกรณีไม่ปรับปรุง และปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาชนิดตกตะกอนให้พฤติกรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมโยงยาง และสมบัติเชิงกลโดยรวมของยางเชื่อมโยงที่ไม่แตกต่างกันในทุกสัดส่วนของซิลิกาผสม ในขณะที่ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาผสมปริมาณ 40 phr ที่มีสัดส่วนของเถ้าลอยต่อซิลิกาชนิดตกตะกอน เท่ากับ 50:50, 25:75 และ 0:100 จะมีสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดระหว่างระบบที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวกับปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาตกตะกอน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอนุภาคเถ้าลอยที่มีขนาดเล็กให้สมบัติเชิงกลดีกว่าขนาดใหญ่ และการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสมบัติเชิงกล

ปิยะภรณ์ นิลทุ้ย และคณะ [34] ศึกษาสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต พฤติกรรมการคืนกลับตัว (Elastic recovery) ทางอิลาสติก (Elastic) ของยางไนไตรล์ที่มีสารเสริมแรงด้วยสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา สำหรับงานระบบไฮดรอลิกโดยการเติมสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา 2 ชนิดคือ ซิลิกาชนิดตกตะกอนและผงซิลิติน (Sillitin) ซึ่งซิลิตินคือ สารตัวเติมที่ ได้จากแร่ควอทซ์ (Quartz) และแร่เกาลิไนต์ (Kaolinite) มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักสูงถึง 70 % และมีกลุ่มของสารประกอบโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบรอง โดยทำการศึกษา ในปริมาณ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ที่มีเขม่าดำเป็นสารตัวเติมหลักที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติก 10 phr ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวเติม โดยศึกษาขนาดรูปร่างตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF และศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วย SEM ศึกษาสมบัติการไหล และพฤติกรรมการเชื่อมโยงสมบัติเชิงกลทางด้านการ เสียรูปถาวรหลังการ กดอัด และสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต จากผลการทดลองพบว่าการเติมสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาไม่ส่งผลต่อเวลาการไหลในแม่พิมพ์ และเวลาการเชื่อมโยง ยางไนไตรล์ที่มีสารตัวเติมผงซิลิติน มีค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดน้อยกว่าซิลิกาชนิดตกตะกอน นอกจากนี้ยางไนไตรล์ที่มีสารตัวเติมซิลิกาชนิดตกตะกอนมีค่ามอดุลัสสะสมสูง และมีค่า tan δ ต่ำกว่าการเติมผงซิลิติน ซึ่งแสดงถึงสมบัติอิลาสติกของยางไนไตรล์เพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกาชนิดตกตะกอนมีองค์ประกอบของซิลิกาในปริมาณมากและมีอนุภาคขนาดเล็ก จึงส่งผลทำให้มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันไซลานอล บนพื้นผิวของอนุภาคมาก และสามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางกับสารคู่ควบไซเลนดีกว่าผงซิลิติน ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลยางเลื่อนไถล และสามารถเก็บพลังงานเพื่อคืนกลับตัวได้ดีกว่า สำหรับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของยางไนไตรล์ที่มีสารตัวเติมผงซิลิตินสูงกว่าสารตัวเติมซิลิกาชนิดตกตะกอน เนื่องจากผงซิลิตินมีปริมาณซิลิกาเพียง 72.60 % ทำให้ต้องใส่ในปริมาณที่มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้ได้ปริมาณซิลิกาเท่ากันกับซิลิกาชนิดตกตะกอน จึงส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลยางถูกจำกัดอิสระ ต้องใช้พลังงานความร้อนที่มากกว่าในการทำให้โมเลกุลยางสั่นไหว

Wang L. L. et.al. [35] ศึกษาคอมโพสิตระหว่างยางไนไตรล์กับเขม่าดำ (NBR/CB) ซึ่งใช้แผ่นกราไฟต์ (Expanded graphite; EG) ที่มีขนาดแตกต่างกัน คือ อนุภาคไมโครเมตรและนาโนเมตรเป็นสารเสริมแรงในคอมโพสิต เพื่อศึกษาผลของสมบัติเชิงกล และสมบัติการขัดถูคือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction; COF) และอัตราการสึกหรอ (Specific wear rate; Ws) โดยเปรียบเทียบกับคอมโพสิตระหว่างยางไนไตรล์กับเขม่าดำ ในขณะที่ผลกระทบของการกระจายตัว และปริมาณของกราไฟต์ที่ใช้มีผลต่อสมบัติการ สึกหรอภายใต้สภาวะแห้ง หลังจากผ่านการทดสอบการ สึกหรอ พื้นผิวที่เสียสภาพจะถูกนำมาทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษากลไกของการสึกหรอของชิ้นงาน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปริมาณกราไฟต์เพียงเล็กน้อยมีประสิทธิภาพที่สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอของคอมโพสิตได้ และเมื่อเพิ่มปริมาณของกราไฟต์ของคอมโพสิต จะแสดงแนวโน้มที่ลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอ จากการศึกษาผลของขนาดสารเสริมแรงที่ใช้พบว่า เมื่อใช้กราไฟต์ที่มีขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตร ส่งผลให้สมบัติเชิงกลและสมบัติการ สึกหรอ ที่ด้อยกว่าการใช้กราไฟต์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร เนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่ดีของกราไฟต์ที่มีขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตร จากการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการนำกราไฟต์ที่มีอนุภาคระดับนาโนจะทำให้เกิดการกระจายตัวดี มีความเสียดทานต่ำและคงทนต่อการสึกหรอได้ดี

นฤมล ศีรประจันทร์ และคณะ [36] ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าปาล์มดำ (Black Palm Ash; BPA) มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการใช้งาน ได้แก่ แหล่งเถ้าปาล์มดำ การใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ผลของปริมาณการเติมเถ้าปาล์มดำ และผลของขนาดเถ้าปาล์มดำ โดยเน้นศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยง ของ ยาง และสมบัติเชิงกลของยาง จากการทดลองพบว่า เถ้าปาล์มดำทั้งสองแหล่ง (โรงไฟฟ้าชีวมวล และโรงงานปาล์มน้ำมัน) ไม่แตกต่างกันในองค์ประกอบเคมี โดยพบว่าเถ้าปาล์มนั้นมีองค์ประกอบของซิลิกาเป็นหลัก จากศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าปาล์มดำ พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วย PEG ทำให้พฤติกรรมการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด จากการศึกษาผลของปริมาณเถ้าปาล์มดำ (10, 30, 50 และ 70 phr) พบว่า ปริมาณเถ้าปาล์มดำไม่มีผลต่อพฤติกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมโยง แต่มีผลให้สมบัติเชิงกลของยางลดลง ในการศึกษาขนาดอนุภาคเถ้าปาล์มดำ (100-150, 150-200, 200-250 และเล็กกว่า 250 mesh) พบว่า เถ้าปาล์มดำขนาดเล็กให้พฤติกรรมการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเถ้าปาล์มดำขนาดใหญ่ จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า เถ้าปาล์มดำกระจายได้ดีในยางธรรมชาติ และมีการยึดติดกันได้ดี ไม่พบช่องว่างบริเวณรอยต่อ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า สามารถใช้เถ้าปาล์มดำขนาดใหญ่ที่เคลือบ PEG เป็นสารเพิ่มเนื้อลดต้นทุน หรือเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง

รสิมา จันทร์จำปา [6] ทำการศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำ (BRHA) จากโรงไฟฟ้าพลังชีวมวลเป็นสารตัวเติมในยางโดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของยาง ได้แก่ ผลของปริมาณ สารตัว เติม (5-100 phr) และผลของขนาดอนุภาคในงานวิจัยนี้ได้ใช้ยางธรรมชาติเกรด RSS 3 เป็นตัวแทนยาง เตรียมตัวอย่างโดยการผสมยางธรรมชาติกับเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง จากนั้นทำการหาพฤติกรรมการเชื่อมโยงแล้วเตรียมแผ่นยางตัวอย่างด้วยการอัดขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลและศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการตรวจสอบ และวิเคราะห์เถ้าแกลบดำ พบว่ามีขนาดอยู่ในช่วง 41-279 μm และมีพื้นที่ผิว 0.024-0.212 m^2/g มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก 74 % นอกจากนี้เถ้าแกลบดำยังมีองค์ประกอบของคาร์บอนร่วมอยู่ด้วย เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบดำ (5-100 phr) พบว่าเวลาเริ่มเชื่อมโยง เวลาเชื่อมโยงเนื่องจากเมื่อปริมาณเถ้าแกลบดำเพิ่มขึ้นจะเป็นการลดความเป็นฉนวนความร้อนของยาง ผสมสูตร จึงทำให้ยางนำความร้อนได้ดีขึ้น ส่งผลให้สามารถเชื่อมโยงได้เร็วขึ้น และมีค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเถ้าแกลบดำที่ใช้มีอนุภาคที่ใหญ่และพื้นที่ผิวน้อย เกิดการแทรกสอดเป็นยางบาวด์ได้น้อยส่งผลให้เกิดตำหนิของชิ้นงานในการเกิดการเสียสภาพเมื่อรับแรงได้มากขึ้น แต่ ค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด และค่าความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีอัตราส่วนของอนุภาคของแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเทียบสมบัติโดยรวมกับสารตัวเติมซิลิกาและเขม่าดำ พบว่าเถ้าแกลบดำให้การเสริมแรงที่ด้อยกว่า เนื่องจากเถ้าแกลบดำมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และพื้นที่ผิวน้อยกว่าซิลิกา และเขม่าดำ จึงสรุปได้ว่าเถ้าแกลบดำแสดงสมบัติเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรงในยางธรรมชาติ

จากงานวิจัยข้างต้น พบว่ามีการนำเถ้าแกลบดำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางอย่างแพร่หลาย ซึ่งจากการวิเคราะห์เถ้าแกลบ ดำด้วยเทคนิคต่างๆ นั้น พบว่าเถ้าแกลบดำมีองค์ประกอบซิลิกา เป็นส่วนมาก และพบหมู่ฟังก์ชันไซลานอล ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับซิลิกาทางการค้า นอกจากนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เถ้าแกลบดำยังมีองค์ประกอบของคาร์บอนร่วมอยู่ด้วย และการปรับปรุงเถ้าแกลบ ดำด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น และเวลาเชื่อมโยงน้อยลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าแกลบ ดำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง พื้นผิว แต่การใช้เถ้าแกลบ ดำเป็นสารตัวเติมนั้นยังแสดงสมบัติเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง เนื่องจากเถ้าแกลบ ดำมีขนาดอนุภาคใหญ่ และมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย และจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่าการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และ Si-69 ยังไม่เห็นผลที่ชัดเจน และการใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมนั้น ไม่สามารถเสริมแรงได้ในยางธรรมชาติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเถ้าแกลบดำกับยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วที่แตกต่างกัน และยังมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่เกินไป ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเถ้าแกลบดำมาเป็นสารตัวเติมในยางไนไตร์ล ซึ่งเป็นยางชนิดที่มีขั้ว อาจส่งผลให้มีอันตรกิริยากับเถ้าแกลบดำที่ดีกว่ายางธรรมชาติ แล้วทำการลดขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบดำให้มีขนาดเล็กลง เพื่อให้มีพื้นที่ในการเกิดอันตรกิริยากับยางได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสูตรยางที่ใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมเพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในยาง สังเคราะห์ โดยใช้ ยาง ไนไตรล์ ซึ่งงานวิจัยนี้มีขั้นตอนและวิธีดำเนินการของงานวิจัยดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 การตรวจสอบ และวิเคราะห์เถ้าแกลบดำ

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG ที่ 5 % โดยน้ำหนักของเถ้าแกลบดำ เปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ใช้ PEG และผลของการเติมสารคู่ควบ ไซเลน Si-69 ที่ 3 % โดยน้ำหนักของเถ้าแกลบดำ

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของขนาดเถ้าแกลบดำที่ขนาด 100-150, 150-200, 200-250, เล็กกว่า 250 mesh และเถ้าแกลบดำบดละเอียด

ตอนที่ 4 ศึกษาผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่เหมาะสมในการเตรียมยางผสมสูตรที่ 0, 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 phr

ตอนที่ 5 ศึกษาผลการเสริมแรงของเถ้าแกลบดำเทียบกับสารตัวเติมเขม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต

ทดสอบสมบัติของยางที่เตรียมได้ ดังนี้

1. การทดสอบสมบัติเชิงกล
    - ความแข็งแรงดึง
    - เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด
    - มอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด
    - ความแข็งแรงฉีกขาด
    - ความแข็งกด
    - การเสียรูปถาวรหลังการกดอัด
2. ศึกษาการบวมตัว (Swell) ของยางผสมสูตรในตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดสอบสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตด้วย Dynamic mechanical thermal analyzer (DMTA)

4. การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย Scanning electron microscope (SEM)

3.2 สารเคมี

1. ยางไนไตรล์ (NBR) : KRYNAC® 3950 F บริษัท Lanxess (thailand) จำกัด
2. เถ้าแกลบดำ (BRHA) จากโรงไฟฟ้าชีวมวล บริษัท Bio-mass power จำกัด
3. ซิลิกา (Silica) เกรด Tokusil® 255 บริษัท Tokuyama siam siliga จำกัด
4. เขม่าดำ (Carbon black) เกรด N330 บริษัท Thai carbon black public จำกัด
5. แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) เกรด Ground Calcium Carbonate (GCC) บริษัท Thaipolychemicals จำกัด
6. สารคู่ควบไซเลน (Bis(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide; Si-69) เกรดการค้า บริษัท Evonik industries จำกัด
7. พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG) : PEG 4000 บริษัท Condea จำกัด
8. สารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง (Antioxidant) : TMQ บริษัท Lanxess deutschland gmbh จำกัด
9. น้ำมัน Parlenox W บริษัท Chemical solution จำกัด
10. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) เกรดการค้า บริษัท Univenture จำกัด
11. กรดสเตียริก (Stearic acid) บริษัท Pt. Cisadane raya chemical จำกัด
12. สารเชื่อมโยงกำมะถัน (Sulfur; S) เกรดการค้า บริษัท Best T.J. group จำกัด
13. สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (N-cyclohexyl-2-benzothiazolesulfenamide; CBS) บริษัท Uniroyal chemical จำกัด
14. สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Mercaptobenzothiazole disulfide; MBTS) บริษัท Uniroyal chemical จำกัด
15. สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Tetramethylthiuram disulfide; TMTD) บริษัท Flexsys additive จำกัด
16. เอทานอล (Ethanol) 95 % เกรดการค้า องค์การสุรากรมสรรพสามิต
17. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck Thailand จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18.ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) บริษัท Lab solution and engineering จำกัด

19.กรดอะซิติก (Acetic acid) เข้มข้น 85 % เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck Thailand จำกัด

20.น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

21. โพแทสเซียมโบรไมด์(Potassium bromide; KBr) เกรดวิเคราะห์ บริษัทCarlo erba จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของซิลิกา (Tokusil® 255)

สมบัติ	**ค่าที่ได้**
พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area)	165 m^2/g
pH (5% suspension)	7
ความหนาแน่น (Density)	2.2 g/cm^3
ขนาดอนุภาค (Particle size)	0.018 μm
SiO_2 (Hydrated base)	88 %
Ignition loss	4.7 %

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของเขม่าดำ (N 330)

สมบัติ	**ค่าที่ได้**
ปริมาณคาร์บอน (Carbon content)	94.8 %
ปริมาณเถ้า (Ash content)	0.7 %
สารระเหย (Volatile matter)	2.0 %
พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area)	71-85 m^2/g
ความชื้น (Moisture)	2.5 %
ความหนาแน่น (Density)	1.8 g/cm^3
ขนาดอนุภาค (Particle size)	0.02-0.03 μm

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนต เกรด GCC

สมบัติ	**ค่าที่ได้**
ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต	98.5 %
พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area)	9.0 m^2/g
ความชื้น (Moisture)	<0.2%
ความหนาแน่น (Density)	2.7 g/cm^3
ขนาดอนุภาค (Particle size)	2.90 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

1. เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง(Two-roll mill) รุ่น LRM 200 บริษัท Labtech Engineering จำกัด

2. เครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น FOR LP-2020 บริษัท Labtechengineering จำกัด

3. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่น SMV-201 บริษัท Shimizu จำกัด

4. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน (Moving die rheometer; MDR) รุ่น II F 150 บริษัท นิชิโกโชวจิ จำกัด

5. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine; UTM) รุ่น LR 5K บริษัท ลอยด์อินสทรูเมนท์ จำกัด

6. เครื่องวัดความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester) รุ่น SE-104DC บริษัท เอทีเอสฟาร์เอสพี เอ จำกัด

7. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (Total organic carbon analyzer; TOC) รุ่น SOLID SAMPLE MODULE SSM-5000 A บริษัท Shimizu จำกัด

8. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DMTA (Dynamic mechanical thermal analyzer) รุ่น DMTA-V บริษัท Metec instrument จำกัด

9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) รุ่น S-3400N บริษัท Hithchi high-technolodies Europe จำกัด

10. เครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบ (XRF) รุ่น SRS 3400 บริษัท บรูเคอร์ เอ จี จำกัด

11. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) รุ่น SPECTRUM GX บริษัท Perkin Elmer Spectrum จำกัด

12. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) รุ่น Mastersizer 3000 บริษัท Malvern จำกัด

13. เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี Brunauer-emmett-teller (BET) รุ่น Auto SORB-1 บริษัท ควันทาโครม จำกัด

14. เครื่องวัดการสึกหรอ (Akron abrasion tester) รุ่นYC-2130 บริษัท Scilution จำกัด

15. เครื่องวัดความหนาแน่น (Density) รุ่น MD-200S บริษัท สิทธิพร แอสโซซิเอส จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16.เครื่องแยกขนาด (Sieve shaker) (ขนาด 100, 150, 200 และ 250 เมช) บริษัท นัมเฮง จำกัด

17.เครื่องบดความเร็วสูงชนิดบอลมิล (High speed ball mill) บริษัท Cerawan จำกัด

18.เครื่องอัดแรงลม บริษัท Ceast Co., Ltd.

19.แม่แบบ (Mold) ขนาด 150×150×2 mm^3

20.แม่แบบสำหรับชิ้นงานการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด

21.อุปกรณ์ทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด

22.ตู้อบความร้อน (Hot air oven) บริษัท Scientific promotion จำกัด

23.เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analysis balance) รุ่น 404 MSCS บริษัท Precisa จำกัด

24.เครื่องปั่นกวนชนิดใบพัด

25.อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมเถ้าแกลบดำ

นำเถ้าแกลบดำที่ได้มาจากโรงงาน ไฟฟ้าชีวมวล มาร่อนผ่านตะแกรง กรองจำนวน 4 ชั้น เพื่อให้ได้เถ้าแกลบดำขนาด ดังนี้ 100-150, 150-200, 200-250 และเล็กกว่า 250 mesh โดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาด (รูปที่ 3.1) และอบเถ้าแกลบดำที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 3.1 เครื่องแยกขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การบดละเอียดเถ้าแกลบดำ

นำเถ้าแกลบดำขนาดอนุภาคเล็กกว่า 250 mesh มาบดละเอียดด้วยเครื่องบดความเร็วสูงชนิดบอลมิล โดยที่หม้อบดและลูกบดทำจากไฮอะลูมิน่า (High alumina) นำเถ้าแกลบดำ 200 กรัม และน้ำปราศจากไอออน 400 กรัม ใส่ในหม้อบดขนาดบรรจุ 900 กรัม ทำการบดที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเถ้าแกลบดำที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.3 การตรวจสอบและวิเคราะห์เถ้าแกลบดำ

1. วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ (XRF) เตรียมตัวอย่าง โดยชั่งเถ้าแกลบดำ 0.5 กรัม ผสมกับกรดบอริก 4.5 กรัม นำมาบดด้วย เครื่องบด 1 นาที จากนั้นนำมาอัดเม็ดด้วยความดัน 150 กิโลนิวตัน เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำ ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมี ด้วย เครื่อง XRF โดยทำการทดสอบที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ เถ้าแกลบดำด้วย เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) โดยนำเถ้าแกลบดำ 3 มิลลิกรัมมาบดรวมกับ KBr แล้วนำไปอัดให้เป็นแผ่น สภาวะที่ใช้คือที่ความยาวคลื่น 4000-600 cm^{-1} โดยทำการสแกน 6 ครั้งต่อตัวอย่างความละเอียด ที่ใช้คือ 4 cm^{-1}

3. วิเคราะห์หาขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำ ที่มีขนาด 100-150, 150-200, 200-250, เล็กกว่า 250 เมช และเถ้าแกลบดำบดละเอียดด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค โดยนำเถ้าแกลบดำปริมาณ 5-10 กรัม มาทำให้อนุภาคกระจายตัวในน้ำปราศจากไอออน และทำการตรวจวัดขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ จากแหล่งกำหนดแสง He-Ne (He-Ne Laser) ที่ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร โดยทำการตรวจวัด 3 ครั้งต่อตัวอย่าง

4. วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะเถ้าแกลบดำ ที่มีขนาด 100-150, 150-200, 200-250, เล็กกว่า 250 เมช และเถ้าแกลบดำบดละเอียดด้วยวิธี Brunauer-emmett-teller (BET) เตรียมตัวโดยการอบเถ้าแกลบดำที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นและสารระเหยต่างๆ ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 77.3 K โดยใช้ปริมาณเถ้าแกลบดำประมาณ 0.02-0.05 กรัม

5. วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำ ที่มีขนาด 100-150, 150-200, 200-250, เล็กกว่า 250 เมช และเถ้าแกลบดำบดละเอียดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราด (SEM) เตรียมตัวอย่างโดยนำเถ้าแกลบดำแต่ละขนาดมาโปรยบนแป้นติดชิ้นงาน แล้วทำการเคลือบทองคำ

3.4.4 การเตรียมเถ้าแกลบดำ หรือซิลิกาที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 [31, 33]

1. ชั่งสารคู่ควบไซเลน Si-69 ปริมาณ 3 กรัม และละลายเอทานอล 50 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. ปั่นกวน และปรับพีเอชให้มีค่าประมาณ 5 ด้วยกรดอะซิติก
3. ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
4. สเปรย์สารละลายไซเลน Si-69 จนหมดลงบนเถ้าแกลบดำ หรือซิลิกาปริมาณ 100 กรัม ให้ทั่วถึง
5. อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลาย

3.4.5 การเตรียมยางผสมสูตร

1. ชั่งยางไนไตรล์ และสารเคมีต่างๆ ตามตารางที่ 3.4
2. ทำการผสมด้วยเครื่อง ผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ดังรูปที่ 3.2 โดยใส่ยางไนไตรล์เพื่อทำให้ยางพันรอบลูกกลิ้ง และเติม TMQ ทำการผสมโดยการกรีดและพับยาง (Cut and fold) เพื่อให้เกิดการกระจายตัว ใช้เวลาประมาณ 2 นาที (ในกรณีของยางผสมสูตรที่ไม่มีสารตัวเติม ข้ามไปข้อ 4)

รูปที่ 3.2 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง

3. ใส่สารตัวเติมเถ้าแกลบดำ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา หรือเขม่าดำ (ในกรณีของสารตัวเติมเถ้าแกลบดำ และซิลิกา จะใส่ PEG ในขั้นตอนนี้ด้วย) ทำการผสมให้เข้ากันโดยการกรีดและพับยางเพื่อให้เกิดการกระจายตัว ใช้เวลาประมาณ 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใส่น้ำมัน Parlenox W โดยค่อยๆ ใส่ระหว่างลูกกลิ้ง ทำการผสมให้เข้ากันโดยการกรีดและพับยางเพื่อให้เกิดการกระจายตัว ใช้เวลาประมาณ 5 นาที

5. เติม กำมะถัน กรดสเตียริก ซิงค์ออกไซด์ และ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง ต่างๆ โดยค่อยๆ ใส่ระหว่างลูกกลิ้ง ทำการผสมให้เข้ากัน โดยการกรีดและพับยาง เพื่อให้เกิดการกระจายตัวพร้อมทั้งใส่สารต่างๆ ที่เหลือจากกระบวนการผสม ใช้เวลาประมาณ 10 นาที

6. ทำการผสมโดยการกรีดและพับยางอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สารต่างๆ เกิดกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งเวลาในการผสมครบ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ

สารเคมี	ปริมาณ (phr)										
	สูตรที่ 1	**สูตรที่ 2**	**สูตรที่ 3**	**สูตรที่ 4**	**สูตรที่ 5**	**สูตรที่ 6**	**สูตรที่ 7**	**สูตรที่ 8**	**สูตรที่ 9**	**สูตรที่ 10**	**สูตรที่ 11**
NBR	100										
F-BRHA(#1)	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-
F-BRHA(#2)	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-
F-BRHA(#3)	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-
F-BRHA(#4)	20	20	20	20	-	-	-	-	-	-	-
F-BRHA-G	-	-	-	-	-	-	-	20, 40, 60,... ,120	-	-	-
Carbon black	-	-	-	-	-	-	-	-	60	-	-
Silica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60	-
Calcium carbonate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60
Si-69*	-	-	3	3	3	3	3	3	-	3	-
PEG 4000*	-	5	-	5	5	5	5	5	-	5	-
Parlenox W	20										
TMQ	1										
Zinc oxide	5										
Stearic acid	2										
Sulfur	1										
CBS	1										
TMTD	0.3										
MBTS	1										

หมายเหตุ : *Si-69 และ PEG 4000 คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเถ้าแกลบดำ

F-BRHA(#1) หมายถึงเถ้าแกลบดำที่ผ่านการแยกขนาด 100-150 mesh

F-BRHA(#2) หมายถึงเถ้าแกลบดำที่ผ่านการแยกขนาด 150-200 mesh

F-BRHA(#3) หมายถึงเถ้าแกลบดำที่ผ่านการแยกขนาด 200-250 mesh

F-BRHA(#4) หมายถึงเถ้าแกลบดำที่ผ่านการแยกขนาดเล็กกว่า 250 mesh

F-BRHA-G หมายถึงเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบยางผสมสูตร

สมบัติของยางผสมสูตร ทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ดังนี้

3.5.1 การทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)

การหาค่าความหนืดมูนนี่ ทำตามมาตรฐาน ASTM D1646 [37] ด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ ดังรูปที่ 3.3 โดยใช้จานหมุนขนาดใหญ่ (L) ที่อุณหภูมิ 100°C โดยชิ้นงานมีความหนาประมาณ 1 cm เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4-5 cm จำนวน 2 ชิ้น ใช้เวลาในการ ตามมาตรฐาน ML 1+4 (100°C)

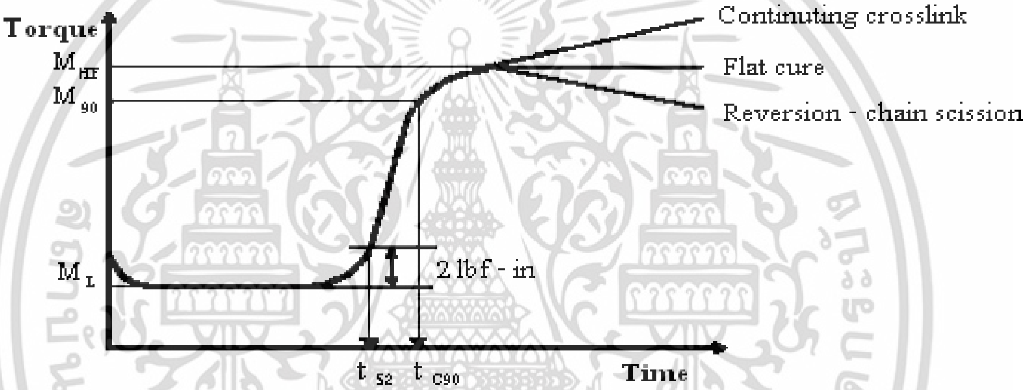
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่

3.5.2 พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร (Cure characteristic)

ศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยงด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน (MDR) ดังรูปที่ 3.4 ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2084-11 [38] โดยตัดชิ้นยางผสมสูตรมีความหนาประมาณ 1 cm ทดสอบด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน ที่อุณหภูมิ 150°C จานสั่นหมุนทำมุม ±3 องศา ทำการหาเวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{s2}) เวลาเชื่อมโยง ($t_{c(90)}$) ของยางแต่ละสูตร ดังรูปที่ 3.5 และดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (CRI) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน



รูปที่ 3.5 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางผสมสูตร แสดงเวลาเชื่อมโยง และเวลาเริ่มเชื่อมโยง [38]

เมื่อ M_L คือ ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)

M_{HF} คือ ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)

M_{HR} คือ ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟที่สูงสุดแล้วลดลง (Reversion)

M_H คือ ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟในเวลาที่ทดสอบ เมื่อกราฟเพิ่มขึ้น (Marching)

M_{90} คือ ค่าแรงบิดที่ 90 % ของการเชื่อมโยง สามารถคำนวณได้จาก

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

t_{s2} คือ เวลาเริ่มเชื่อมโยงหรือสกอร์ช เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยง จนแรงบิดเพิ่ม 2 kgf.cm เทียบกับแรงบิดต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

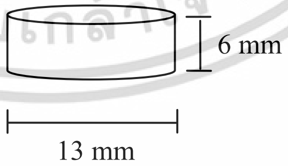
$$\text{Cure Rate Index (CRI)} = \frac{100}{t_{c90} - t_{s2}} \qquad (3.1)$$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีลักษณะของ กราฟเชื่อมโยง เป็นการเสียสภาพแบบเกิดการเชื่อมโยง หรือมีความชันเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันระหว่างช่วงการเชื่อมโยงสมบูรณ์ (Curing phase) กับช่วงหลังเชื่อมโยงสมบูรณ์ (Overcure phase) ที่ไม่ชัดเจน ผู้ทำวิจัยจึงได้ทำการกำหนดค่าแรงบิดสูงสุดด้วยการลากกราฟเพื่อหาจุดตัดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟเชื่อมโยงในช่วงการเชื่อมโยงสมบูรณ์

3.5.3 การขึ้นรูปยางเชื่อมโยง

1. ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้ใส่แม่แบบสำหรับอัดเป็นแผ่น 150×150×2 mm^3 แล้วนำแม่แบบใส่เครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) เพื่อทำการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น โดยทำการกดอัดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลาเท่ากับ $t_{c(90)}$×1.2 (คูณ 1.2 เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่แบบไปสู่ชิ้นงานยาง)

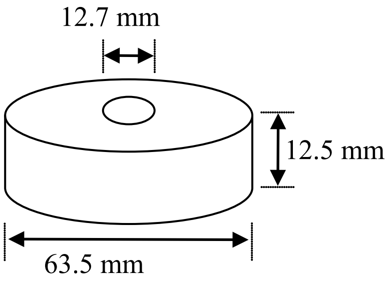
2. นำยางผสมสูตรที่เตรียมได้มากดอัดขึ้นรูปในแม่แบบสำหรับชิ้นงานที่ใช้ทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด ใส่เครื่องกดอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา $t_{c(90)}$+2 นาที (เนื่องจากแม่แบบที่ใช้มีความหนาของเหล็ก และชิ้นงานมีความหนาจึงจำเป็นต้องเพิ่มเวลาให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์) ซึ่งชิ้นงานทดสอบที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะชิ้นทดสอบการเสียรูปถาวรการกดอัด [39]

3. นำยางผสมสูตรที่เตรียมได้มากดอัดขึ้นรูปในแม่แบบสำหรับชิ้นงานทดสอบการสึกหรอ ใส่ในเครื่องกดอัดขึ้นรูปที่อุณภูมิ 150°C เป็นเวลา $t_{c(90)}$+5 นาที (เนื่องจากแม่แบบที่ใช้มีความหนาของเหล็ก และชิ้นงานมีความหนาจึงจำเป็นต้องเพิ่มเวลาให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์) โดยทำการอัดขึ้นรูปที่บริษัท Rubber Intertrade จำกัด ซึ่งชิ้นงานทดสอบที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ลักษณะชิ้นงานทดสอบการสึกหรอ

3.5.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยง

3.5.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile tests)

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง ทดสอบอเนกประสงค์ (UTM) ดังรูปที่ 3.8 ตามมาตรฐาน ASTM D412 [40] โดยนำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.3 (1) มาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell shape)

กำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

ความเร็วในการดึงยืด	500	mm/min
ความยาวเกจ หรือความยาวเริ่มต้น	25	mm
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	5	kN
จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ	8	ชิ้น

รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ (รูปที่ 3.9) ที่ได้นำมาหาค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุที่รับได้เมื่อให้แรงดึง (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาได้จากสมการ

ความแข็งแรงดึง = F/A (3.2)

เมื่อ F = แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดสูงสุด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (mm^2)

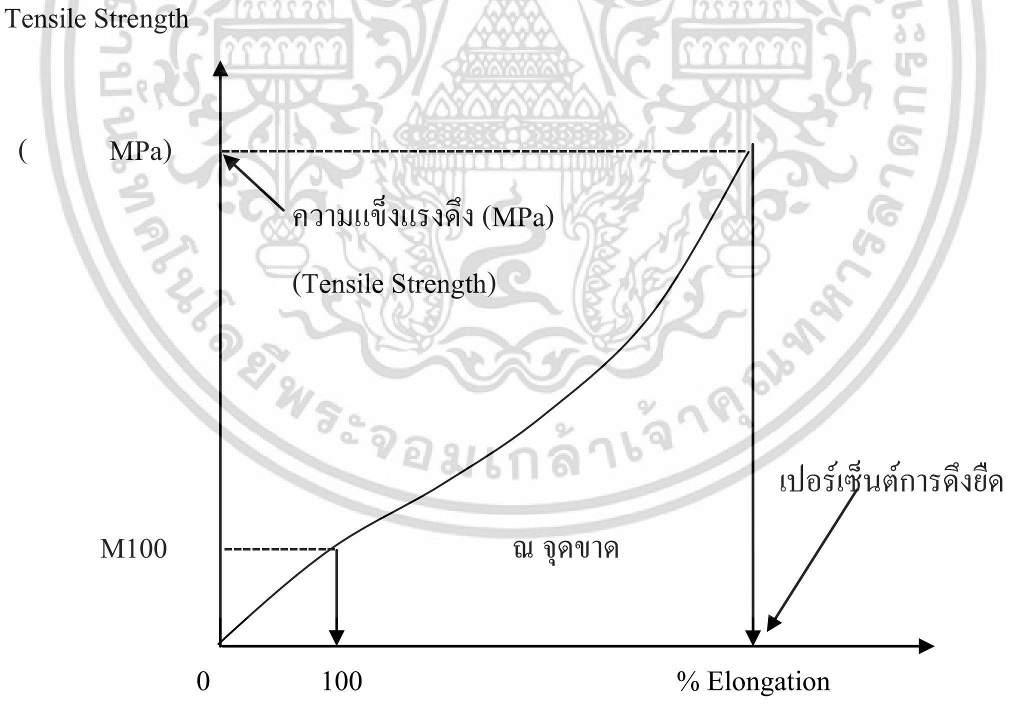
- เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) หาได้จากสมการ

เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด $= \frac{l - l_0}{l_0} \times 100$ (3.3)

เมื่อ l = ความยาวสุดท้าย ณ จุดขาดของชิ้นงาน (mm)

l_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm)

- ค่ามอดุลัสของยาง (Rubber modulus) เป็นค่าความเค้น (Stress) ที่เปอร์เซ็นต์ความเครียดหนึ่งๆ เช่น M100 คือ ความเค้นที่ 100 % การดึงยืด ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างกราฟความเค้น – ความเครียด (Stress-strain curve) ของตัวอย่างประเภทยาง [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4.2 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM) ดังรูปที่ 3.8 ตามมาตรฐาน ASTM D624 [41] โดยนำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.3 (1) มาตัดเป็นรูปปีกนก โดยกำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

ความเร็วในการดึงยืด	500	mm/min
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	5	kN
จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ	8	ชิ้น

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) โดยหาได้จากสมการ

ความแข็งแรงฉีกขาด = F/d (3.4)

เมื่อ F = แรงที่ใช้สูงสุดในการทำให้ชนิดงานเสียสภาพ (N)

d = ความหนาของชนิดงานโดยเฉลี่ย (mm)

3.5.4.3 การทดสอบความแข็งกด

โดย นำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.3 (1) มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดแบบน้ำหนักคงที่ (Dead load hardness tester) ชนิด Shore A ดังรูปที่ 3.10 ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D2240 [42] ซึ่งอ่านค่าความแข็งกดได้โดยตรงจากเครื่อง จากการกดที่ตัวอย่าง โดยการนำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้มาซ้อนกันให้ หนาอย่างน้อย 6 mm ค่าความแข็งกดอ่านได้หลังจากกดเป็นระยะเวลา 5 วินาที ใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 10 ชิ้นในแต่ละสูตร โดยทำการทดสอบ 10 ครั้ง คือ 10 จุดในการกดต่อหนึ่งชิ้นงานทดสอบ

รูปที่ 3.10 เครื่องวัดความแข็งกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4.4 การทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set)

ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 395-89 (Test Method B) [39] โดยนำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.3 (2) มาวัดความหนาของชิ้นงานทดสอบ นำไปวางระหว่างแผ่นเหล็กทั้งสองของอุปกรณ์สำหรับทดสอบการอัดที่มีแท่งเหล็กกั้น (Spacer bars) เพื่อกำหนดระยะในการอัดยาง อัดชิ้นทดสอบให้มีความหนาเท่ากับแท่งเหล็กกั้น ซึ่งความหนาจะลดลงจากเดิมประมาณ 25 % ต่อมานำอุปกรณ์สำหรับทดสอบการอัดที่มีชิ้นทดสอบอยู่ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.11 เข้าไปในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดนำชิ้นทดสอบออกจากอุปกรณ์ทดสอบมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 3.0 นาที วัดความหนาของชิ้นทดสอบโดยทดสอบ 4 ชิ้นต่อ 1 สูตร คำนวณผลดังสมการที่ 3.5

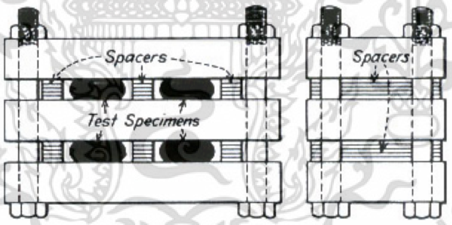
$$\% C_B = [(t_0 - t_1)/(t_0 - t_n)] \times 100 \qquad (3.5)$$

เมื่อ C_B คือ การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (%)

t_0 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบเริ่มต้น (mm)

t_1 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังอบ (mm)

t_n คือ ความหนาของแท่งเหล็กกั้น (mm)



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด [39]

3.5.4.5 การทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอ ตามมาตรฐาน BS-903 ด้วยเครื่อง Akron abrasion tester โดยนำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.3 (3) มาทำการทดสอบที่บริษัท Rubber Intertrade จำกัด ชิ้นงานจะถูกหมุนด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที และระนาบของล้อหินขัดกับระนาบของชิ้นงานจะทำมุมกัน 15 องศา หินขัดจะถูกดันด้วยแรง 45 N ก่อนการทดสอบจะทำการเปิดผิวหน้าของชิ้นงานเป็นจำนวน 300 รอบ และทำการทดสอบ 3,000 รอบ หลังจากนั้น หาน้ำหนักที่สูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของชิ้นทดสอบ และคำนวณเป็นปริมาตรสูญเสีย ซึ่งสามารถคำนวณปริมาตรที่สูญเสียได้จาก สมการ ดังนี้

$$\Delta V_c = \frac{\Delta m}{\rho} \tag{3.6}$$

เมื่อ ΔV_c คือ ปริมาตรของยางที่สูญเสีย

Δm คือ น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบที่สูญเสียไป

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของยาง

โดยที่ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรสามารถหาได้จากการวัดด้วยเครื่องหาความหนาแน่น

3.5.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตด้วยเทคนิค DMTA

นำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.3 (1) มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ขนาด 6×40×2 mm^3 แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง DMTA โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ [34]

รูปแบบในการทดสอบ	Tension geometry	
ขนาดของกรอบยึดชิ้นงาน	Medium Frame	
ความถี่	1.0	Hz
อุณหภูมิ	-150 ถึง 150	°C
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	2	°C/min

โ ดยเครื่อง DMTA รายงานผลเป็นกราฟแสดง ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus; E') ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus; E") และค่าแทนเดลต้า (tan δ)

3.5.6 การศึกษาการบวมตัวของยางผสมสูตรในตัวทำละลาย

การ ศึกษาการบวมตัวของยางผสมสูตร ในตัวทำละลาย (Solvent swelling method) ทดสอบโดยเตรียมชิ้นงานยาง เชื่อมโยงขนาด 20×20×2 mm^3 ทำการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานก่อนนำไปแช่ลงในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) ปริมาณ 25 mm จากนั้นนำชิ้นงานออกจาก ตัวทำละลายแล้วชั่งน้ำหนักทุก 24 ชั่วโมง [43] นำผลที่ได้มาคำนวณดังสมการ

$$S = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100 \tag{3.7}$$

เมื่อ S = เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยางผสมสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W_0 = น้ำหนักของยางผสมสูตรก่อนแช่ในตัวทำละลาย (กรัม)

W_i = น้ำหนักของยางผสมสูตรหลังแช่ในตัวทำละลาย (กรัม)

3.5.7 การศึกษาสัณฐานวิทยา

นำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้จาก 3.5.3 (1) ไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 นาที แล้วหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) จากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมได้ไป ทำการเคลือบทองคำ แล้วศึกษาชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเถ้าแกลบดำ และรอยต่อระหว่างวัฏภาคระหว่างเถ้าแกลบดำกับยางไนไตรล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำ เป็นสารตัวเติม (Filler) ในยางไนไตรล์ (NBR) โดยนำเถ้าแกลบดำมาทำการ แยกขนาดด้วยการร่อน และทำการบดละเอียด จากนั้นนำไปผสมกับยางไนไตรล์และสารเคมีด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ได้ยางผสมสูตร แล้วทำการอัดขึ้นรูป จากนั้นทำการศึกษา โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 หัวข้อดังนี้

- ผลของการใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และสารคู่ควบไซเลน Si-69ในปริมาณ5 และ 3 % โดยน้ำหนักเถ้าแกลบดำตามลำดับ
- ผลของ ขนาดเถ้าแกลบดำ ที่มีผลต่อยาง ไนไตรล์ ได้แก่ 100-150, 150-200, 200-250, เล็กกว่า 250 mesh และเถ้าแกลบดำบดละเอียด
- ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำ ที่มีผลต่อยาง ไนไตรล์ ได้แก่0, 20, 40, 60, 80, 100และ 120phr
- ผลของการใช้เถ้าแกลบดำในยางไนไตรล์เทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต เขม่าดำ และซิลิกา

ซึ่งได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง สมบัติเชิงกล สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต และสัณฐานวิทยา สำหรับอักษรย่อของสูตรที่ใช้ในงานวิจัย แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อที่ใช้ในงานวิจัย

อักษรย่อ	คำอธิบายอักษรย่อ
F-BRHA(#1)	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการแยกขนาด 100-150 mesh (106-149 μm)
F-BRHA(#2)	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการแยกขนาด 150-200 mesh (75-106 μm)
F-BRHA(#3)	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการแยกขนาด 200-250 mesh (63-75 μm)
F-BRHA(#4)	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการแยกขนาดเล็กกว่า 250 mesh (>63 μm)
F-BRHA-G	เถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียด
BRHA(#1)	ยาง NBR ผสม F-BRHA(#1)
BRHA(#2)	ยาง NBR ผสม F-BRHA(#2)
BRHA(#3)	ยาง NBR ผสม F-BRHA(#3)
BRHA(#4)	ยาง NBR ผสม F-BRHA(#4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

อักษรย่อ	คำอธิบายอักษรย่อ
BRHA-G	ยาง NBR ผสม F-BRHA-G
BRHA.., P	ยาง NBR ผสมเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG ในปริมาณ 5 % โดยน้ำหนักเถ้าแกลบดำ
BRHA.., S	ยาง NBR ผสมเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 ในปริมาณ 3 % โดยน้ำหนักเถ้าแกลบดำ
BRHA.., P+S	ยาง NBR ผสมเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ในปริมาณ 5 และ 3 % โดยน้ำหนักเถ้าแกลบดำตามลำดับ
Gum	ยาง NBR ที่ไม่มีสารตัวเติม (No Filler)
CC	ยาง NBR ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต
Si, P+S	ยาง NBR ผสมซิลิกาที่ปรับปรุงสารตัวเติมด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ในปริมาณ 5 และ 3 % โดยน้ำหนักซิลิกาตามลำดับ
CB	ยาง NBR ผสมเขม่าดำ

4.1 การวิเคราะห์เถ้าแกลบดำ

เถ้าแกลบดำจากโรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวล (จังหวัดชัยนาท) เมื่อทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ4 ชั้นพบว่ามีเถ้าแกลบดำ F-BRHA(#4) ในปริมาณมากที่สุด คือ 43.89 % โดยน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 4.2หลังจากนั้น นำมาบดละเอียดได้เถ้าแกลบดำทั้งหมด 5 ขนาดดังนี้ F-BRHA(#1),F-BRHA(#2),F-BRHA(#3),F-BRHA(#4) และ F-BRHA-Gและเมื่อนำเถ้าแกลบดำมาวิเคราะห์หาสารประกอบด้วยเทคนิค XRF แสดงในตารางที่ 4.3เห็นว่าเถ้าแกลบดำนี้มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณ74 %

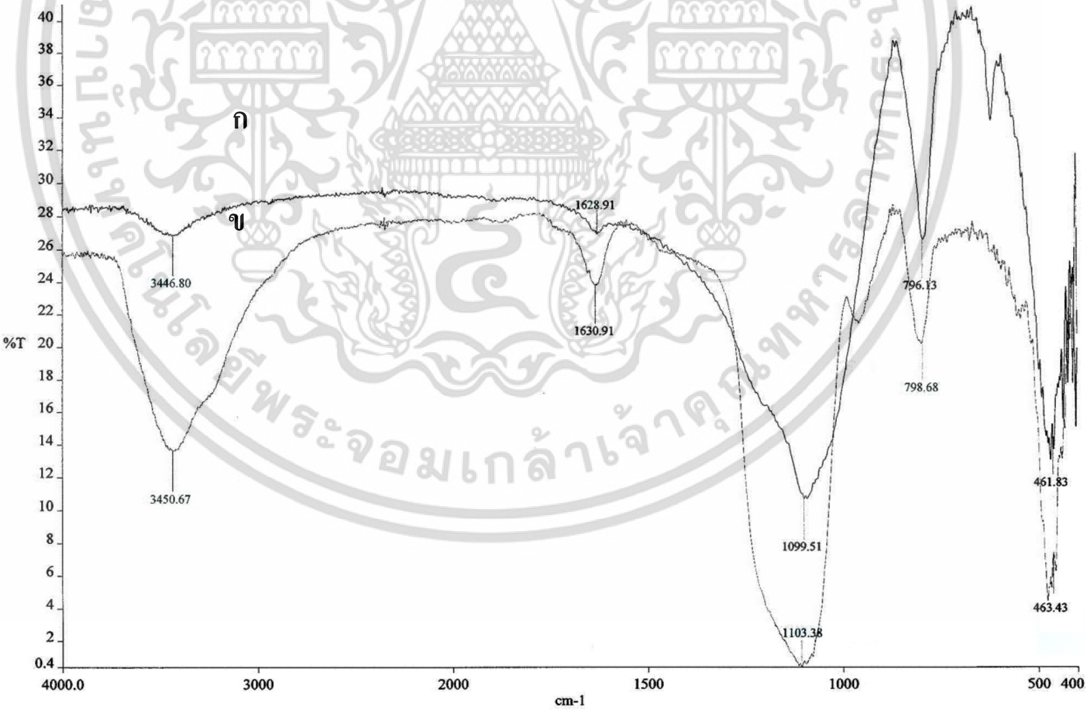
ตารางที่ 4.2ปริมาณของเถ้าแกลบดำขนาดต่างๆ จากโรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวล

เถ้าแกลบดำ	ปริมาณ (% โดยน้ำหนัก)
F-BRHA(#1)	9.72
F-BRHA(#2)	18.44
F-BRHA(#3)	27.42
F-BRHA(#4)	43.89
Residue	0.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำจากโรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวล

สารประกอบ	ปริมาณ(% โดยน้ำหนัก)
SiO_2	74.00
K_2O	11.80
Na_2O	3.10
MgO	2.35
Fe_2O_3	2.35
CaO	2.35
MnO	0.75
TiO_2	1.21
Al_2O_3	0.29
P_2O_5	1.26
Loss on ignition (LOI)	0.54

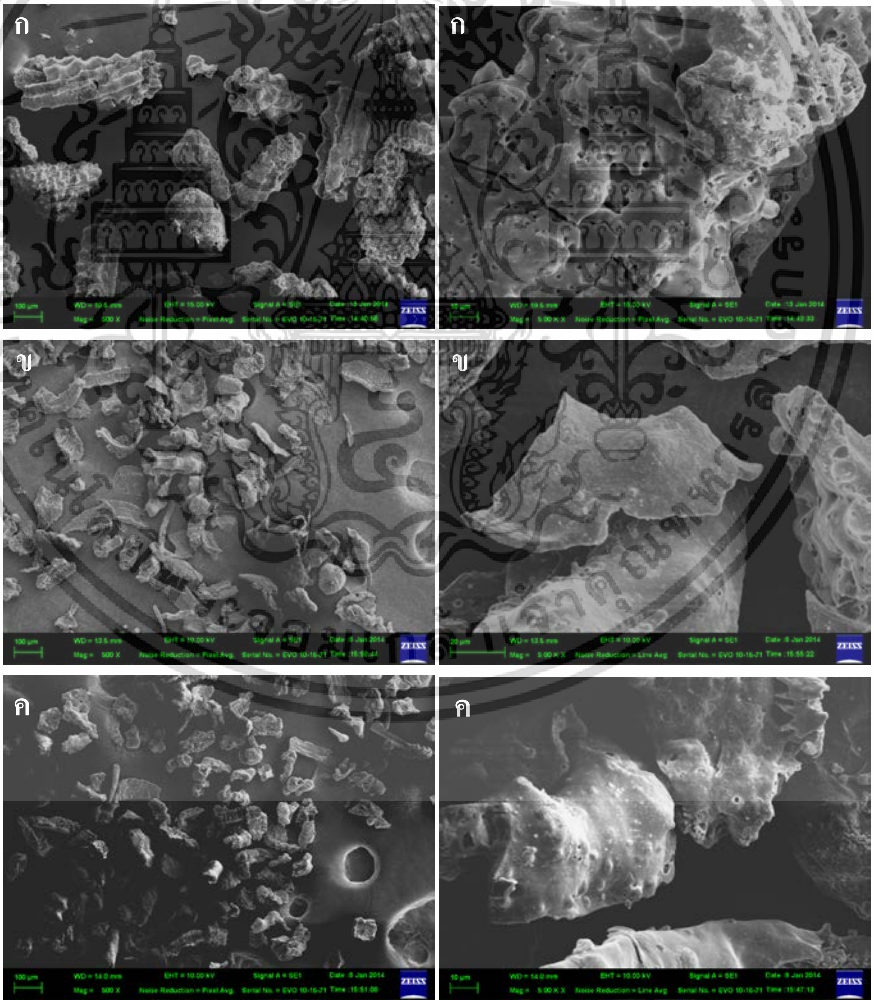


รูปที่ 4.1 สเปกทราFT-IR ของ ก) เถ้าแกลบดำ และ ข) ซิลิกาชนิดตกตะกอน

จากรูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเถ้าแกลบดำ (ก)และซิลิกาชนิดตกตะกอน (ข) โดยใช้เทคนิค FT-IR พบแถบดูดกลืนที่ประมาณ 3450 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่น

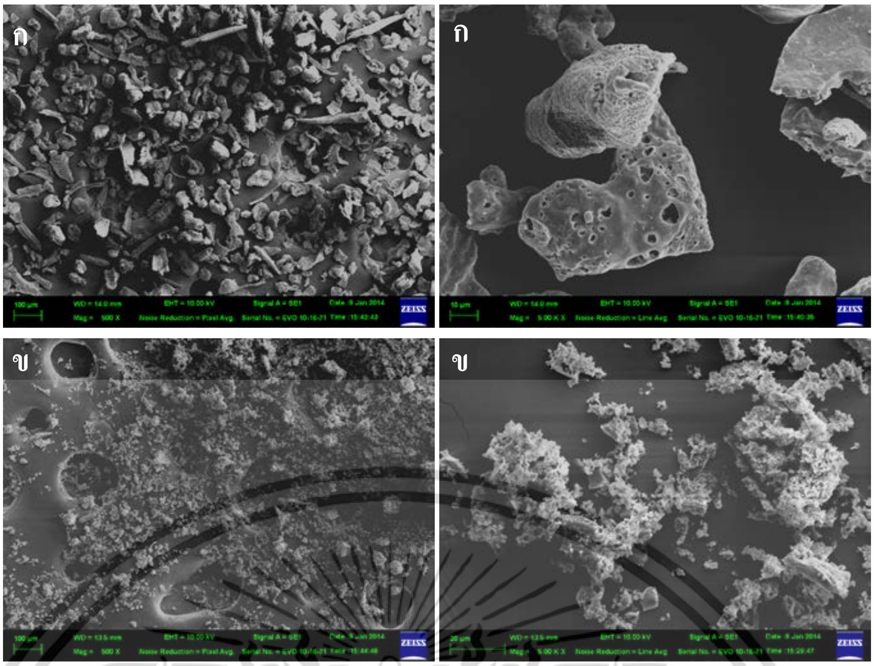
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบยืด (Stretching vibration) ของหมู่ไซลานอล แถบดูดกลืนที่ประมาณ 1103 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ฟังก์ชันไซลอกเซนและแถบการดูดกลืนที่ประมาณ 463และ 798 cm^{-1}แสดงถึงการสั่นแบบหักงอ (Bending vibration) ของหมู่ไซลอกเซน ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าทั้งซิลิกาชนิดตกตะกอนและเถ้าแกลบดำมีหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่เหมือนกัน แต่ซิลิกาชนิดตกตะกอนมีหมู่ไซลานอลในปริมาณที่มากกว่า โดยตรวจพบการปรากฏสัญญาณอย่างเห็นได้ชัดของหมู่ฟังก์ชันไซลอกเซน ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลอง ที่พบจากงานวิจัยของ ช.วยากรณ์ เพ็ชญไพศิษฏ์และคณะ [44]พบว่าเมื่อนำเถ้าแกลบ ไปตรวจวัดโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR ตรวจพบสัญญาณอย่างเห็นได้ชัดของหมู่ฟังก์ชันไซลอกเซน (Si-O-Si) ที่ความยาวคลื่น 1076 cm^{-1}ในขณะที่ปรากฏสัญญาณของหมู่ฟังก์ชันไซลานอล (Si-OH) ที่ความยาวคลื่น 3200-3750cm^{-1}



รูปที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำจาก SEMของ (ก) F-BRHA(#1); (ข) F-BRHA(#2) และ (ค) F-BRHA(#3) ที่กำลังขยาย 500 (ซ้าย) และ 5000 (ขวา) เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำจาก SEMของ (ก) F-BRHA(#4) และ (ข) F-BRHA-Gที่กำลังขยาย 500 (ซ้าย) และ 5000 (ขวา) เท่า

จาก รูปที่ 4.2-4.3แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ เถ้าแกลบดำขนาดต่างๆ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเทคนิค SEMพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ เถ้าแกลบดำที่กำลังขยาย 500 และ 5000 เท่าอนุภาคของ เถ้าแกลบดำ มีการกระจายตัว ดีไม่จับตัวรวมกันเป็นก้อน มีรูพรุน มีรูปร่างที่หลากหลายมีทั้งที่เป็นแท่งและแผ่นเหลี่ยม แต่เมื่อทำการบดละเอียดเถ้าแกลบดำ ทำให้อนุภาคเถ้าแกลบดำแตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆ จากนั้นทำการตรวจสอบขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำในแต่ละขนาดด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) และพื้นที่ผิวจำเพาะ จากเทคนิค BET ซึ่งแสดงดังตารางที่4.4 พบว่าเถ้าแกลบดำเกรด F-BRHA(#1) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย ประมาณ 128.9 μm และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 6.1 m^2/g และเมื่อนำเถ้าแกลบดำไปบดละเอียด (F-BRHA-G) ทำให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงอย่างเห็นได้ชัดโดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 6.1 μmและมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 17.3 m^2/g จะสังเกตได้ว่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำมีลักษณะเป็นรูพรุน (แสดงในรูปที่ 4.2-4.3) เมื่อทำการทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะเป็นจะตรวจวัดทั้งพื้นที่ผิวสัมผัสภายนอก และพื้นที่ผิวภายในรูพรุน เมื่อทำการบดละเอียดทำให้เกิดการแตกออกของอนุภาค ส่งผลให้เถ้าแกลบดำบดละเอียดมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าแกลบดำขนาดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยและพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าแกลบดำในแต่ละขนาด

	F-BRHA (#1)	F-BRHA (#2)	F-BRHA (#3)	F-BRHA (#4)	F-BRHA-G
ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย (μm)	128.9±1	87.3±1	67.7±0	41.1±1	6.1±0.9
พื้นที่ผิวจำเพาะ; BET (m^2/g)	6.1	13.8	15.9	16.3	17.3

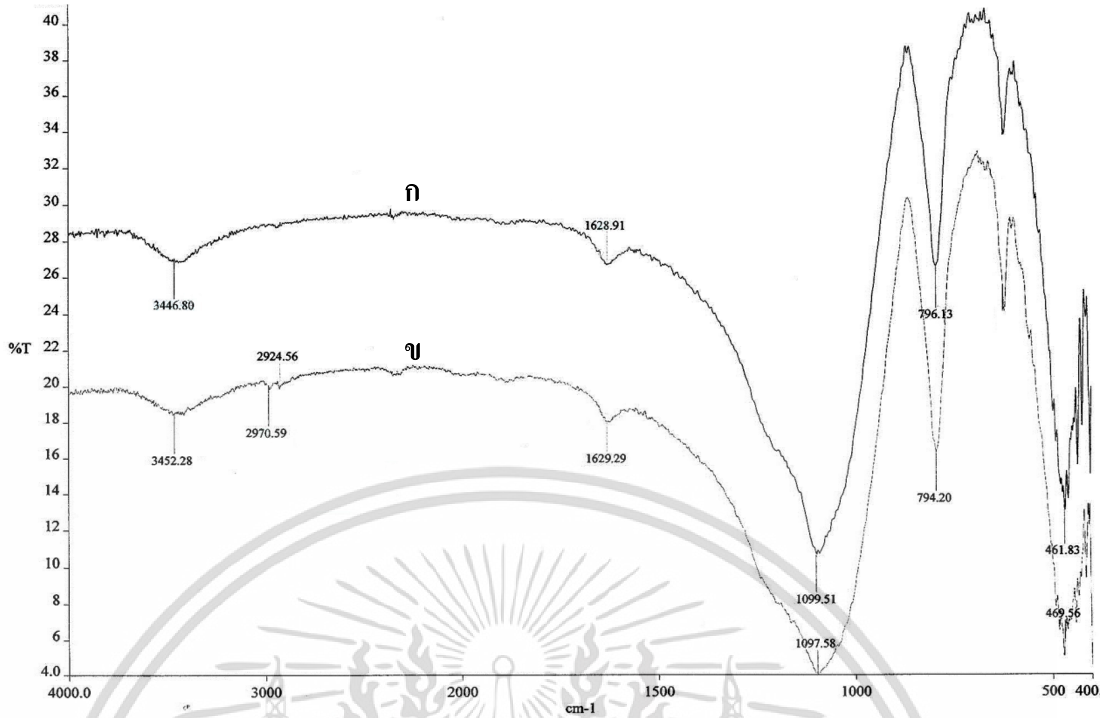
4.2 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วยPEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69

จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวโดยใช้เทคนิค SEM พบว่าเถ้าแกลบดำมีโครงสร้าง ลักษณะเป็นรูพรุน ดังรูปที่ 4.2 นอกจากนี้ จากผลการวิเคราะห์ เถ้าแกลบ ดำด้วยเทคนิค XRFและ FT-IR ในตารางที่ 4.2และ รูปที่ 4.1แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบดำมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบจำนวนมากถึงประมาณ 74%และตรวจพบหมู่ฟังก์ชันไซลานอลในเถ้าแกลบดำ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ มีขั้วจึงทำการเคลือบผิวอนุภาคเถ้า แกลบ ดำด้วย PEG เพื่อป้องกันการดูด ซับ สารเคมีเชื่อมโยงที่มีขั้ว เช่น ซิงค์ออกไซด์ และสารเร่งปฏิกิริยา การเชื่อมโยง เป็นต้นและใ ช้สารคู่ควบไซเลน Si-69 เพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา [8]งานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ที่มีผลต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกล ของยางโดยใช้เถ้าแกลบดำ BRHA(#4) ในปริมาณ 20 phrเนื่องจากข้อจำกัดทางวัตถุดิบในการทดลอง

4.2.1การปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69

ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 ซึ่งสามารถทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าแกลบดำด้วยเทคนิค FT-IR ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

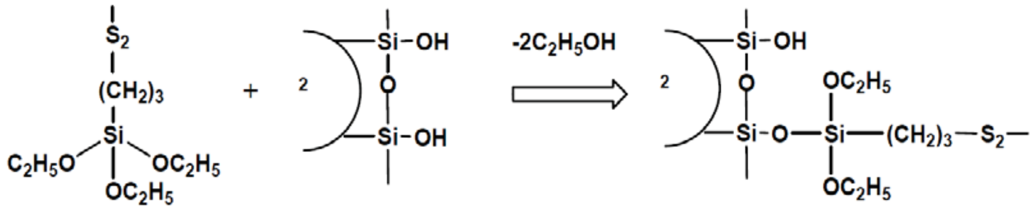


รูปที่ 4.4 สเปกทราFT-IR ของ ก) เถ้าแกลบดำไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวและ ข) เถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเถ้าแกลบดำทั้งที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 มีแถบดูดกลืนที่ประมาณ 3450 cm^{-1}ซึ่งการแสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ไซลานอล แถบการดูดกลืนที่ประมาณ 1100 cm^{-1}ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ไซลอกเซนและแถบการดูดกลืนที่ประมาณ 465และ 795 cm^{-1}แสดงถึงการสั่นแบบหักงอของหมู่ไซลอกเซน แต่สำหรับแถบการดูดกลืนที่พบหลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 คือ แถบการดูดกลืนที่ประมาณ 2927-2970 cm^{-1}ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ฟังก์ชัน CH_2ในโมเลกุลของสารคู่ควบไซเลน Si-69 ที่อยู่บนพื้นผิวเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 นอกจากนี้ยังพบว่ามีแถบดูดกลืนที่ประมาณ 1100 cm^{-1}กว้างมากขึ้น แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่ไซลอกเซน เนื่องมาจากหมู่อัลคอกซี (Alkoxy) ของสารคู่ควบไซเลน Si-69 นั้นทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาในเถ้าแกลบดำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามปฏิกิริยาที่แสดงในรูปที่ 4.5ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับผลการ ทดลอง ในงานวิจัย ของ เชาวน์ ศรีเพชรดี [45]และงานวิจัยของ ปิยะภรณ์นิลทุ้ย และคณะ [34] ได้ทำการปรับปรุงซิลิกาชนิดตกตะกอนด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 แล้วทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าหลังจากที่ทำการปรับปรุงซิลิกาชนิดตกตะกอนด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 ปรากฏแถบดูดกลืนในช่วง 2800-3000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบยืดของหมู่ฟังก์ชัน C-H ของสารคู่ควบไซเลน Si-69 บนผิวของอนุภาคซิลิกาชนิดตกตะกอน



รูปที่ 4.5 ปฏิกิริยาของซิลิกาในเถ้าแกลบดำและชนิดตกตะกอนด้วยสารคู่ควบไซเลนSi-69 [45]

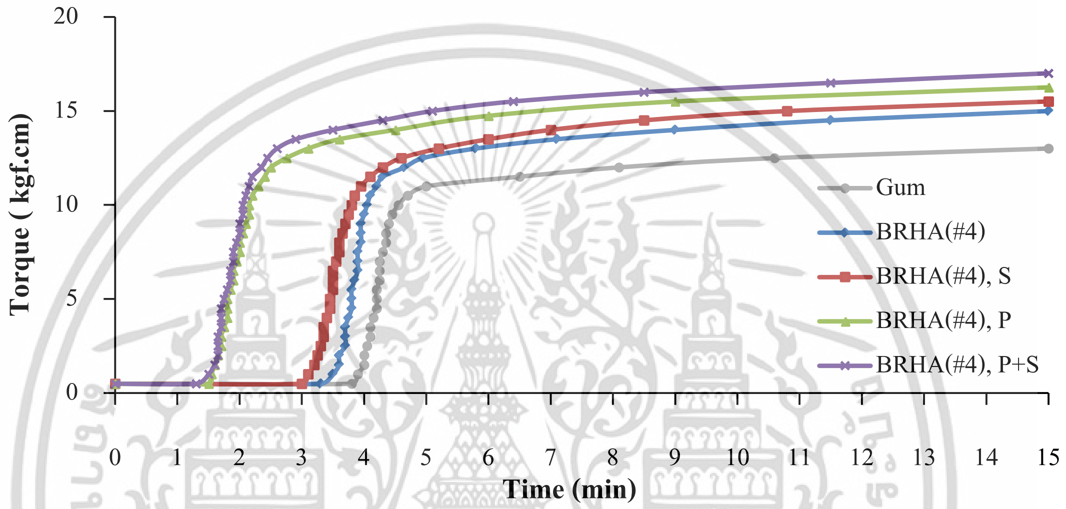
4.2.2พฤติกรรมเชื่อมโยงของยางผสมสูตร

การ ศึกษา พฤติกรรมการเชื่อมโยง ของยาง ได้แก่ เวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{s2})เวลาเชื่อมโยง (t_{c90})และดัชนีอัตราเร็วการเชื่อมโยง (CRI)งานวิจัยนี้ได้ทดสอบด้วยเครื่องเอ็มดีอาร์ที่อุณหภูมิ 150°C นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าความหนืดมูนนี่ที่สภาวะ ML (1+4) ที่อุณหภูมิ 100°C โดยที่ยางผสมสูตรถูกควบคุมขนาดของเถ้าแกลบดำคือBRHA(#4) ในปริมาณ 20 phr

จากรูปที่ 4.6และตารางที่ 4.5แสดงให้เห็น ว่า เมื่อใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติม (BRHA(#4)) ทำให้มีพฤติกรรมการเชื่อมโยงที่เร็วกว่ายางผสมสูตร ไม่มีสารตัวเติม ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมทำให้สามารถนำความร้อนได้ดีกว่า เพราะมีปริมาณยางที่เป็นฉนวนทางความร้อนน้อยลงทำให้ยางผสมสูตรสามารถนำความร้อนได้ดีขึ้น นอกจากนี้เถ้าแกลบดำยังมีองค์ประกอบของโลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activator)ได้เหมือนซิงค์ออกไซด์ เมื่อปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG (BRHA(#4), Pและ BRHA(#4), P+S)นั้นมีเวลาเริ่มเชื่อมโยง เวลาเชื่อมโยงน้อย กว่าและค่าดัชนีอัตราเร็วการเชื่อมโยง มากกว่ายางผสมสูตรที่ ไม่ได้ปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG(BRHA(#4)และ BRHA(#4), S)เนื่องจาก PEG ไปเคลือบผิวเถ้าแกลบดำโดยไปจับหมู่ฟังก์ชัน (- OH) ของไซลานอลบนพื้นผิว จึงลดความมีขั้ว ซึ่งช่วยลดการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงหรือสารกระตุ้นการเชื่อมโยงของเถ้าแกลบดำ ส่งผลให้สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้เร็วขึ้น [8]ในขณะที่ยางผสมสูตรที่ปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 (BRHA(#4), Sและ BRHA(#4), P+S)ส่งผลให้เวลาเชื่อมโยงลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ สูตรที่ไม่ได้ปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 (BRHA(#4)และ BRHA(#4), S)ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเอกชัย วิมลมาลา และคณะ [31]ที่การปรับปรุงเถ้าลอยด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69ส่งผลให้เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมโยงลดลงเนื่องจากอนุมูลอิสระของกำมะถันจากสารคู่ควบไซเลน Si-69 นั้นพร้อมเข้าไปเกิดพันธะเชื่อมโยงที่สมบูรณ์ได้เร็วขึ้น และจากผลการทดลองการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 นั้นพบว่าไม่มีผลต่อค่าความหนืดมูนนี่อย่างมีนัยสำคัญและพบว่ายางผสมสูตรเกิดการเสียสภาพในลักษณะเส้นกราฟมีความชันมากขึ้นหรือมีค่ามอดุลัสของยางมากขึ้น (Marching modulus) แสดงว่ายางมีองศาการเชื่อมโยงมากขึ้น เนื่องจากเกิดการเสียสภาพแบบเชื่อมโยง ซึ่งเป็นที่ทราบโดยทั่วกันว่ายางไนไตรล์มีลักษณะการเสียสภาพแบบเชื่อมโยง [17, 25]



รูปที่ 4.6 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ20phr

ตารางที่ 4.5 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงและความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ20 phr

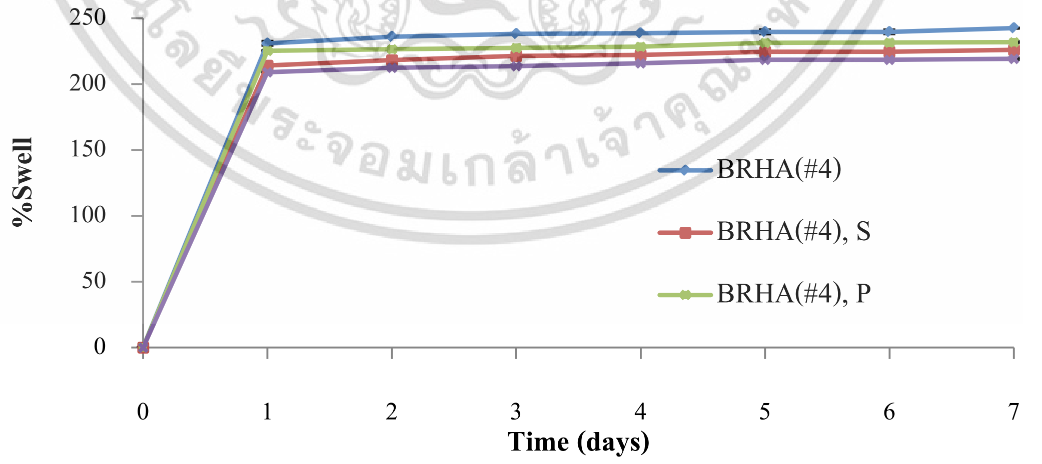
Rubber formula	**Mooney viscosity (ML1+4 (100°C))**	**M_L (kgf.cm)**	**M_H (kgf.cm)**	**t_{s2} (min)**	**t_{c90} (min)**	**CRI (min^{-1})**
Gum	21.9	1.0	10.5	3.8	4.6	125.0
BRHA(#4)	25.1	0.5	11.0	3.4	4.1	142.8
BRHA(#4), S	24.8	0.5	11.3	3.2	3.8	166.6
BRHA(#4), P	26.1	0.5	11.5	1.6	2.1	200.0
BRHA(#4), P+S	25.5	0.5	12.0	1.6	2.1	200.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3การบวมตัวของยางผสมสูตรในตัวทำละลาย

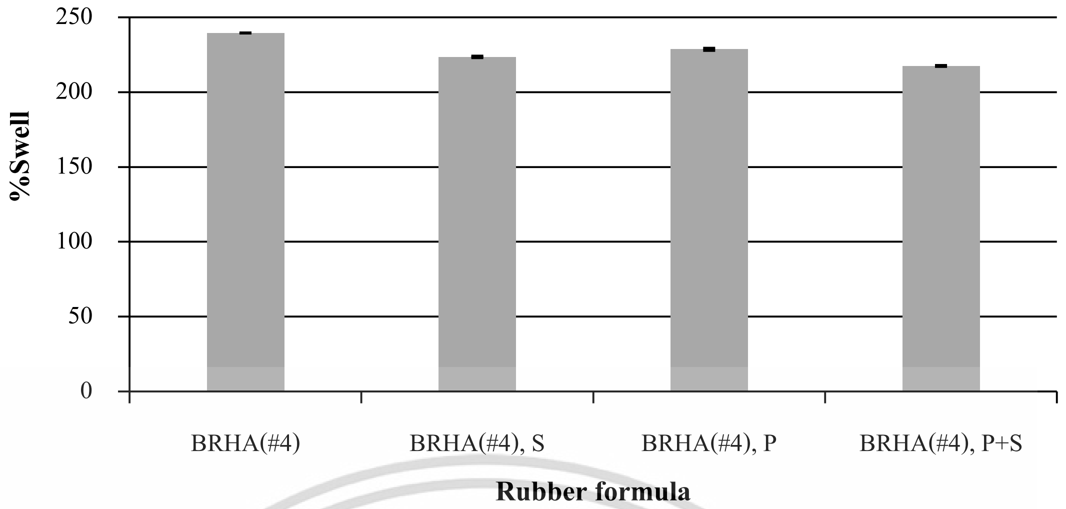
ค่าการบวมตัว (Swell) นั้นมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นเชื่อมโยงของยาง ซึ่งเป็นสมบัติที่ใช้บ่งบอกถึงสมบัติการเสียรูปถาวรของยาง โดยยางที่มีความหนาแน่นเชื่อมโยงสูงทำให้ยางคงสมบัติของยางได้แก่ ความยืดหยุ่น ความแข็งแรง เสถียรภาพทางรูปร่าง ดังนั้นเมื่อยางได้รับแรงกระทำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างและเมื่อปล่อยแรงกระทำทำให้ยางสามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้ดีกว่ายางที่มีความหนาแน่นเชื่อมโยงที่ต่ำกว่า ทั้งนี้ในงานวิจัยทำการ ศึกษาการบวมตัวของยางผสมสูตร ที่มีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phrในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน โดยทำการศึกษาพฤติกรรมการบวมและนำเสนอในรูปเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยาง

จากรูปที่ 4.7-4.8แสดงพฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายไดคลอโรมีเทนของยางผสมสูตร พบว่ายางผสมสูตรทุกสูตรมีลักษณะการบวมตัวคงที่โดยใช้เวลา 3วัน โดยที่ ยางผสม สูตร BRHA(#4) มีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวสูงที่สุด และการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG (BRHA(#4), P) หรือสารคู่ควบไซเลน Si-69 (BRHA(#4), S)นั้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การบวมตัวลดลงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญแต่เมื่อทำการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 (BRHA(#4), P+S)ส่งผลให้มีค่าการบวมตัวน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจาก PEG ช่วยลดการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงหรือสารกระตุ้นการเชื่อมโยงของเถ้าแกลบดำทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์มากขึ้นและสารคู่ควบไซเลน Si-69 มีกำมะถันอยู่ในโครงสร้างด้วยจึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่มากกว่า กล่าวคือ BRHA(#4), P+S มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงมากกว่ายางผสมสูตรอื่นๆ



รูปที่ 4.7 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการบวมตัวในตัวทำละลายไดคลอโร - มีเทนของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

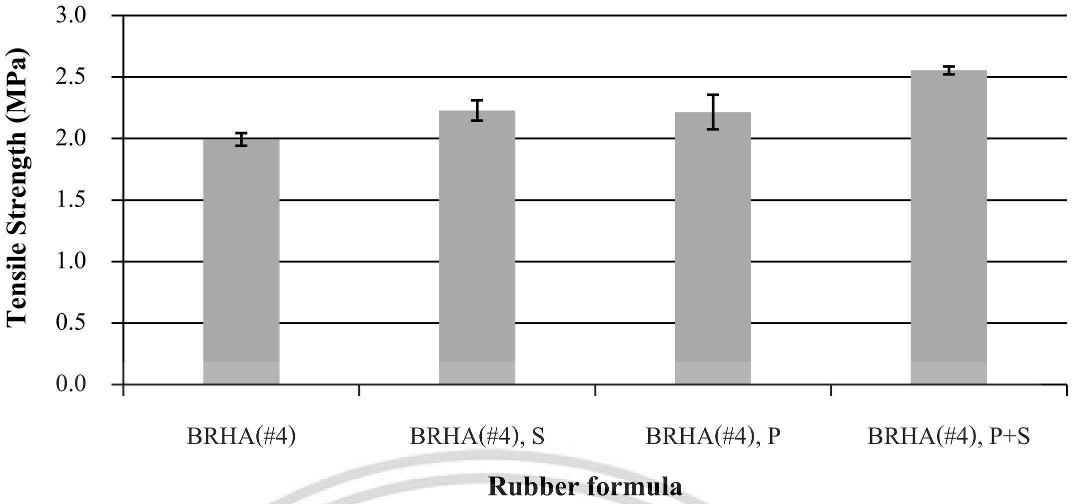


รูปที่ 4.8 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในตัวทำละลายไดคลอโร - มีเทน เป็นเวลา 3 วัน ของยางผสมสูตร โดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ20 phr

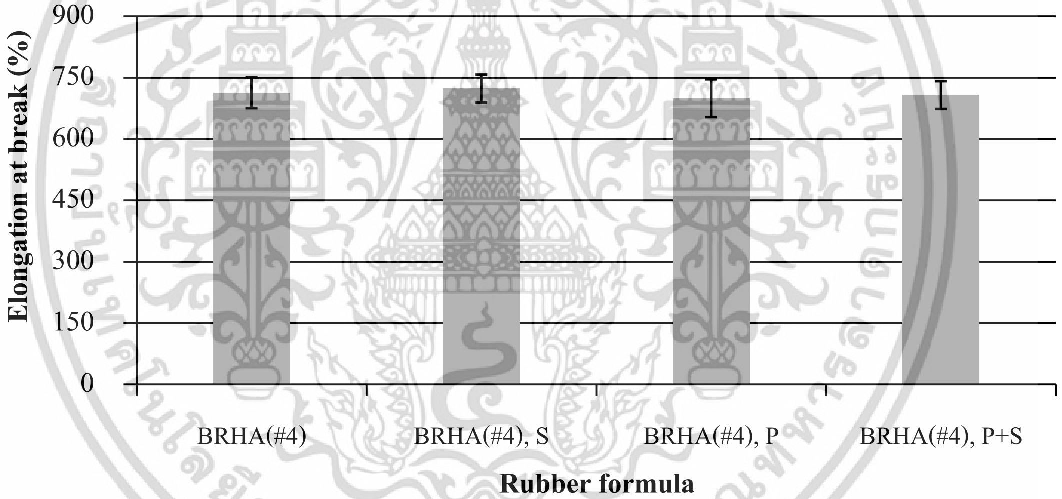
4.2.4 สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร

ในการศึกษาสมบัติเชิงกลต่างๆ ของยางผสมสูตรถูกควบคุมขนาดของเถ้าแกลบดำ BRHA(#4) ในปริมาณ 20 phrจากรูปที่ 4.9-4.12เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืดและความแข็งแรงฉีกขาด พบว่ายางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำชนิดไม่ปรับปรุง (BRHA(#4)) นั้นมีค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสของยางที่ 100เปอร์เซ็นต์ดึงยืดและความแข็งแรงฉีกขาดที่ต่ำกว่ายางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำปรับปรุงด้วย PEG (BRHA(#4), P) หรือ Si-69 (BRHA(#4), S)และเมื่อปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 (BRHA(#4), P+S)ให้ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด และความแข็งแรงฉีกขาดมากที่สุด เนื่องจาก PEG ไปเคลือบผิวเถ้าแกลบดำ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์มากขึ้น และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ซึ่งเป็นสารคู่ควบเมอร์แคปโทไซเลนมีหมู่ฟังก์ชันที่ปลายทั้งสองด้าน ด้านหนึ่ง เป็นหมู่อัลคอกซี (Alkoxy) ทำปฏิกิริยากับไซลานอลบนพื้นผิวของเถ้าแกลบดำ ส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นองค์ประกอบของกำมะถันอะตอมจึงสามารถทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับยางได้ ส่งผลให้ รอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interphase)ยางกับสารตัวเติมเถ้าแกลบดำมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งสารคู่ควบไซเลน Si-69 นั้นมีกำมะถันอยู่ในโครงสร้างด้วยจึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่มากกว่า แต่ การปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลนSi-69 ไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งกด ของยางผสมสูตร อย่างมีนัยสำคัญ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.10และ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

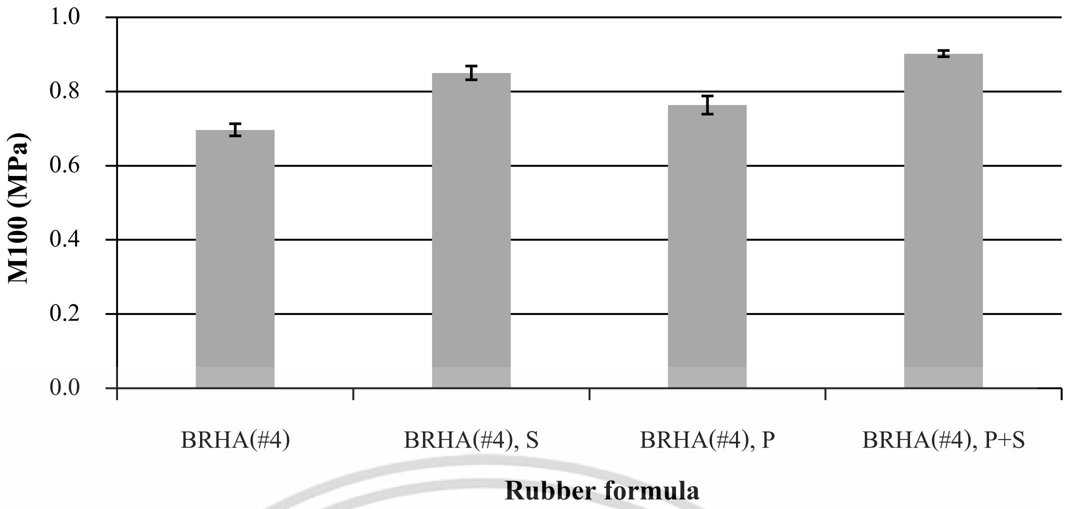


รูปที่ 4.9 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร โดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ20 phr

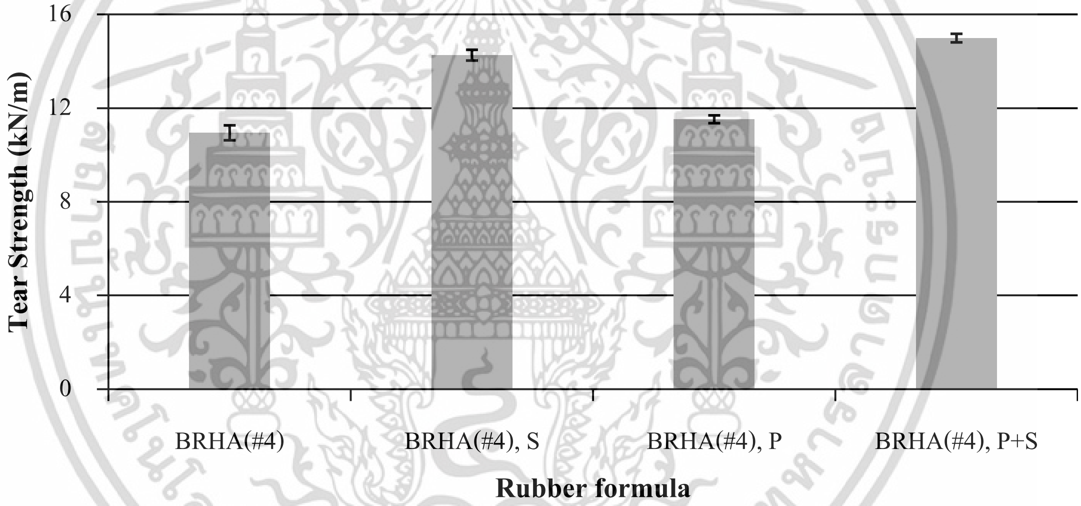


รูปที่ 4.10 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร โดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

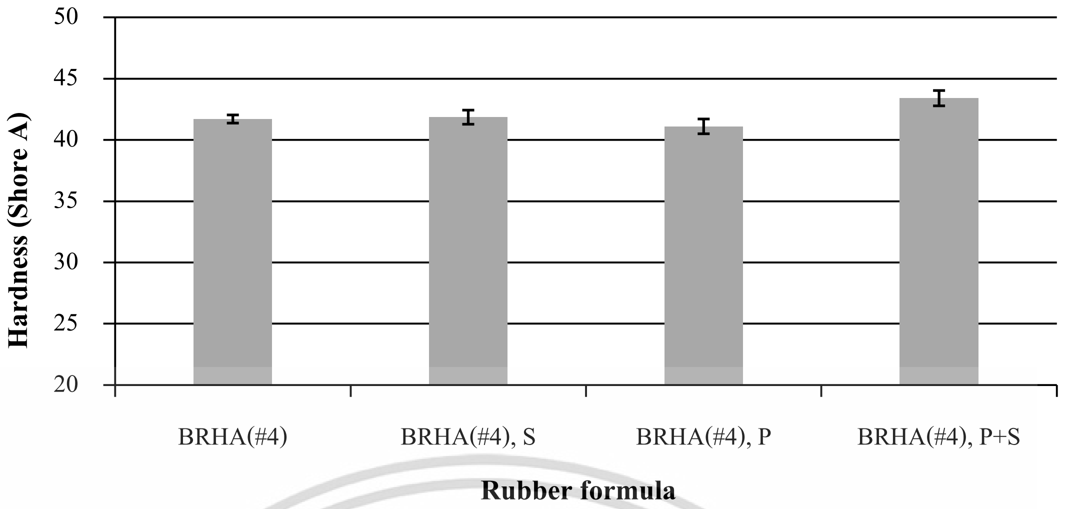


รูปที่ 4.11 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 100เปอร์เซ็นต์ดึงยืดของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr

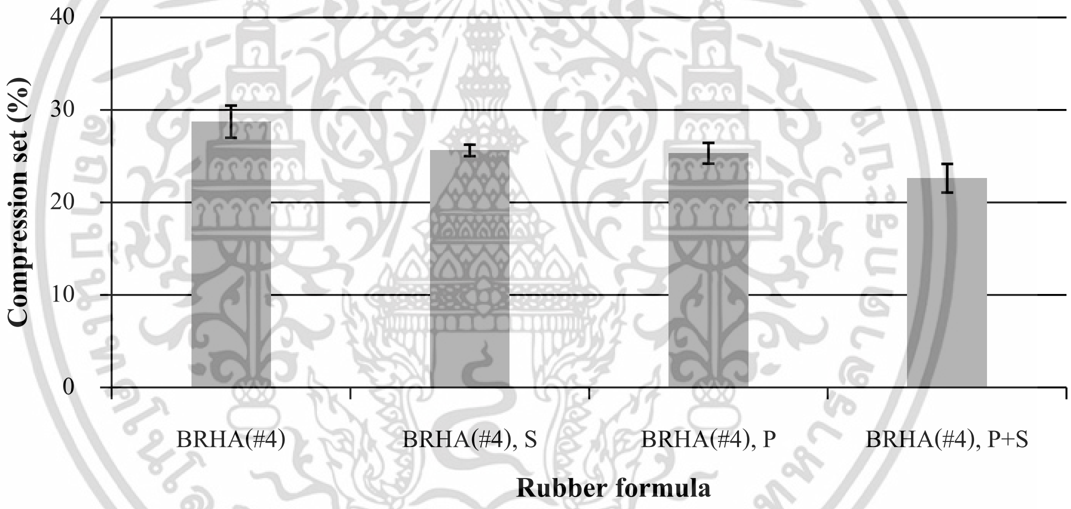


รูปที่ 4.12 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งกด (Shore A) ของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ20 phr



รูปที่ 4.14 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดเป็นเวลา 22 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 70°C ของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr

การเสียรูปถาวร (Permanent set) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ยังคงอยู่หลังปลดปล่อยแรงจากภายนอกที่มากระทำ โดยในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (Compression set) ซึ่งโดยทั่วไปการที่ยางสามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้เนื่องมาจากโมเลกุลของยางที่เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ที่ทำหน้าที่ดึงโครงสร้างกลับสู่รูปร่างเดิมเมื่อปล่อยแรง ทำให้ไม่เกิดการเลื่อนผ่านอย่างไม่คืนกลับของสายโซ่ ดังนั้นความสามารถในการยืด คืนกลับของยางสู่รูปร่างเดิมหรือการเสียรูปถาวรจึงขึ้นกับการเชื่อมโยงของยางจากรูปที่ 4.14

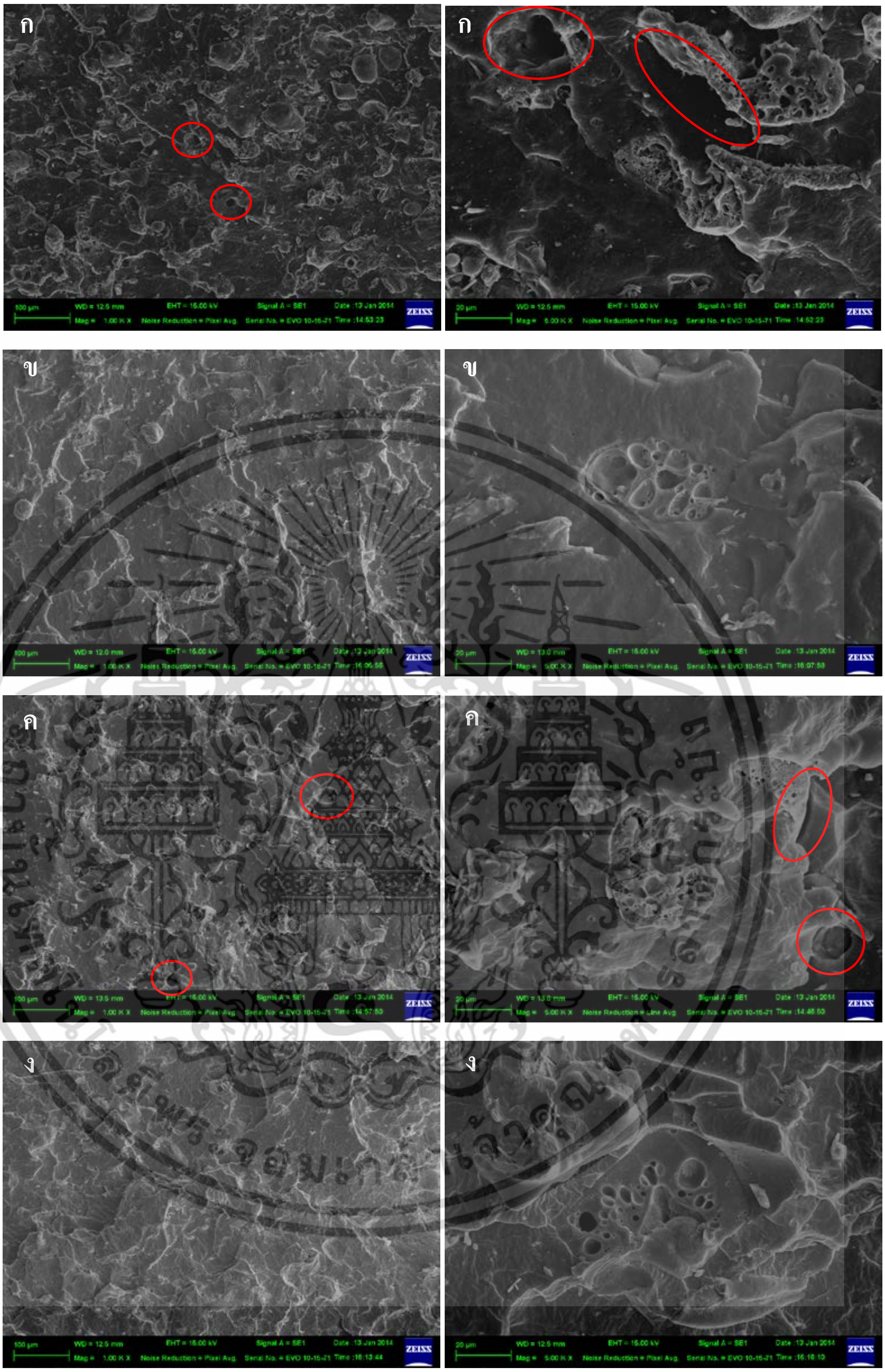
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดที่อุณหภูมิ 70°Cเป็นเวลา 22 ชั่วโมง นั้นพบว่าการใช้เถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (BRHA(#4)) มีค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดมากที่สุด แต่เมื่อทำ การปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG (BRHA(#4), P) หรือสารคู่ควบไซเลนSi-69 (BRHA(#4), S) ส่งผลให้มีค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ทำให้ค่าการเสียรูปถาวรลดลงเล็กน้อยจากยางผสมสูตร (BRHA(#4)) ในขณะที่การปรับปรุงพื้นผิวเถ้าแกลบดำทั้ง PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 (BRHA(#4), P+S) ทำให้มีค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ส่งผลให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคของเถ้าแกลบดำกับยางมีความแข็งแรงมากขึ้นดังที่กล่าวไว้ข้างต้น และทำให้มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงมากที่สุด ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.3

4.2.5สัณฐานวิทยาของยางที่มีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติม

ในการศึกษาพื้นผิวตัดขวางของยางผสมสูตรนั้น มีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phrด้วยเทคนิค SEMโดยทำการเตรียมตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำจากรูปที่ 4.15ที่กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่าเถ้าแกลบดำมีการกระจายตัวในยางผสมสูตรอย่างสม่ำเสมอในเมตริกซ์ทุกสูตร และที่กำลังขยาย 5000 เท่า พบว่ายางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำที่ไม่ได้ผ่านปรับปรุง (BRHA(#4)) และเถ้าแกลบดำปรับปรุงด้วย PEG (BRHA(#4), P) เป็นสารตัวเติมมีการหลุดออกของเถ้าแกลบดำทำให้พื้นผิวตัดขวางของยางผสมสูตรมีลักษณะเป็นรูและมีช่องว่างระหว่างอนุภาคเถ้าแกลบดำกับยางไนไตรล์(วงกลมสีแดง) เนื่องจาก PEG นั้นไม่ได้ช่วยให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคเถ้าแกลบดำกับยางมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อทำการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 (BRHA(#4), S และ BRHA(#4), P+S) ไม่พบช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคเถ้าแกลบดำกับยางและการหลุดออกของอนุภาคแล้วทำให้เกิดหลุมของเถ้าแกลบดำเนื่องจากสารคู่ควบไซเลน Si-69 ส่งผลให้รอยต่อระหว่างวัฏภาค ยางกับสารตัวเติมเถ้าแกลบดำมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังที่กล่าวไว้ในตอนที่ 4.2.1 เป็นหลักฐานแสดงให้เห็นว่า การยึดเกาะบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นเมื่อปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลนSi-69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

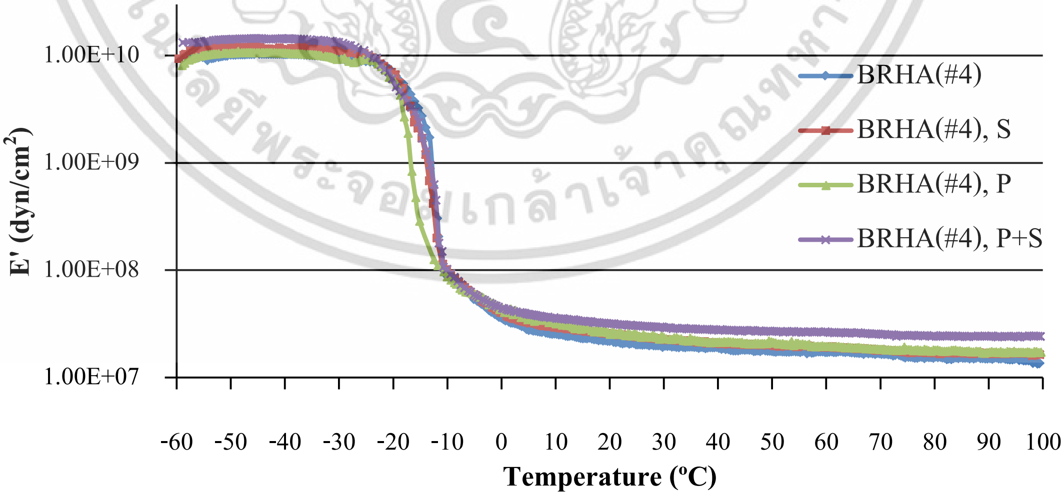


รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจาก SEM ของ (ก) BRHA(#4); (ข) BRHA(#4), S; (ค) BRHA-(#4), P และ (ง) BRHA(#4), P+S ที่กำลังขยาย 1000 (ซ้าย) และ 5000 (ขวา) เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

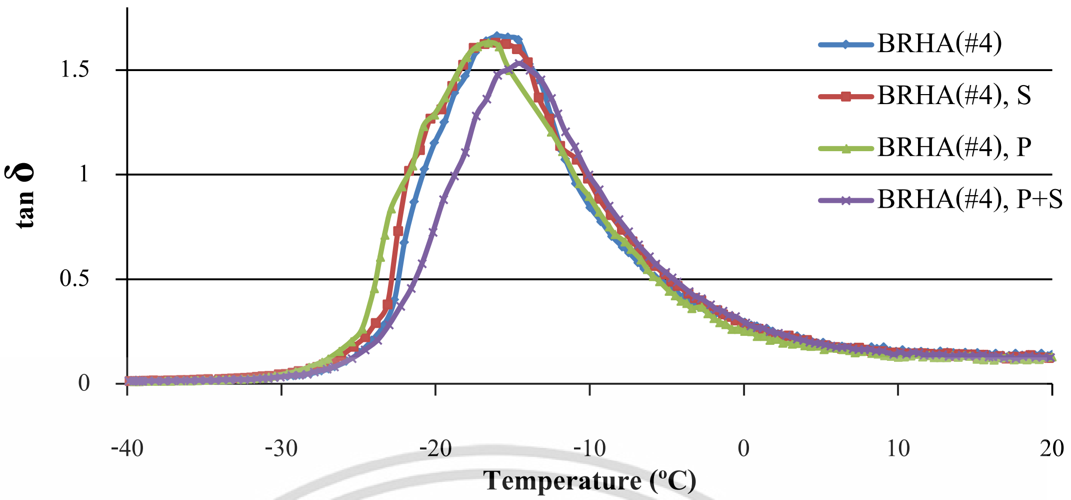
4.2.6สมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตของยางผสมสูตร

การทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตนั้น เป็นการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุที่ได้รับแรงสั่นอย่างต่อเนื่อง โดยในการทดสอบให้ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus)และค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus)เป็นฟังก์ชันของความถี่กับอุณหภูมิจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างค่ามอดุลัสสูญเสียและค่ามอดุลัสสะสม ได้เป็นค่า tanδซึ่ง สามารถหาอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g)ของวัสดุได้ จากการศึกษาผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อสมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตของยางผสมสูตรด้วยเครื่อง DMTA แสดงดังรูปที่ 4.16และ4.17 พบว่ายางผสมสูตร BRHA(#4), S และ BRHA(#4), P ส่งผลให้ค่ามอดุลัสสะสมของยางผสมสูตรเพิ่มขึ้น และค่าแอมพิจูดของ tan δ ลดลงเล็กน้อย และยางผสมสูตร BRHA(#4), P+S มีค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้น และค่าแอมพิจูดของ tan δ ลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงเถ้าแกลบด้วย PEG ทำให้ยางผสมสูตรมีการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งพันธะเชื่อมโยงที่มากขึ้นนั้นและในกรณีการใช้สารคู่ควบไซเลน Si-69 ปรับปรุงเถ้าแกลบดำ ทำให้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างเมตริกซ์ยางกับเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 ช่วยให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้ยางผสมสูตรสามารถเก็บพลังงานเพื่อการคืนตัวกลับได้ดีกว่ายางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำไม่ปรับปรุงแต่ไม่ส่งผลให้อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางผสมสูตรดังแสดงในตารางที่4.6



รูปที่ 4.16 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่ามอดุลัสสะสมของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่า tanδของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr

ตารางที่ 4.6 ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางผสมสูตร

ยางผสมสูตร	**อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (°C)**
BRHA(#4)	-16.8
BRHA(#4), S	-16.5
BRHA(#4), P	-16.6
BRHA(#4), P+S	-15.5

จากการศึกษาสมบัติต่างๆจากผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลนSi-69 สามารถสรุปได้ว่า เมื่อทำการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อ ลักษณะในการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร เนื่องจากการใช้ PEGป้องกันการดูดสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง และสารกระตุ้นการเชื่อมโยง ส่งผลให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาการเชื่อมโยงลดลงและยังส่งผลให้มีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากขึ้น นอกจากนี้การใช้สารคู่ควบไซเลน Si-69ส่งผลให้รอยต่อระหว่างวัฏภาค ยางกับเถ้าแกลบดำมีความแข็งแรงมากขึ้นดังนั้นในการทดลองตอนต่อไปจึงมีการใช้ PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ปรับปรุงเถ้าแกลบดำในปริมาณ 5 และ 3 % โดยน้ำหนักของเถ้าแกลบดำตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำ

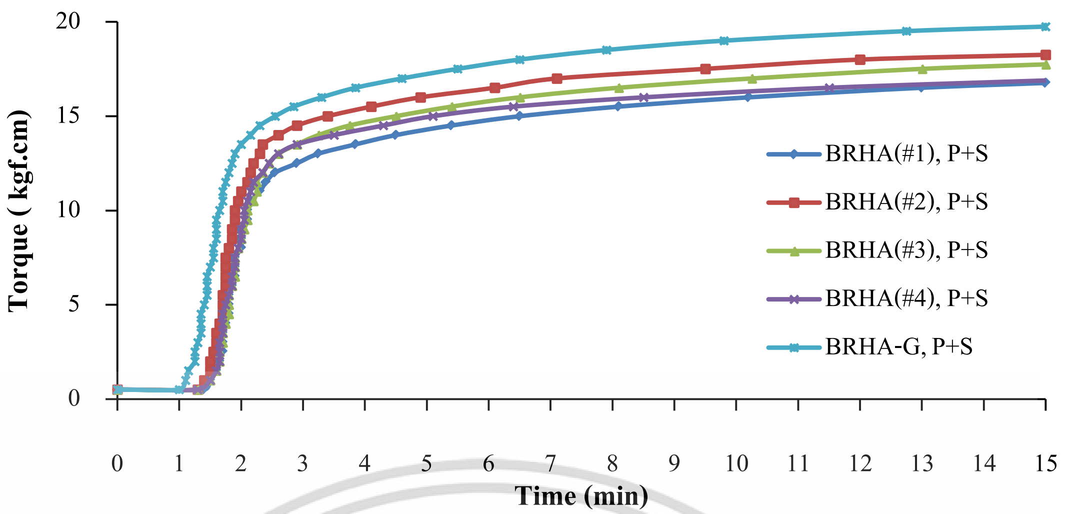
ในอุตสาหกรรมยางขนาดของสารตัวเติมเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเสริมแรงของยาง จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของรสิมา จันทร์จำปา [6] พบว่าการใช้เถ้าแกลบดำขนาดเล็กกว่า 250 mesh หรือ F-BRHA(#4) เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ แสดงสมบัติเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง เนื่องจากเถ้าแกลบดำ F-BRHA(#4) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใหญ่ แต่สามารถนำมาลดต้นทุนได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการบดละเอียดเถ้าแกลบดำให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงด้วยเครื่องบดความเร็วสูงชนิดบอลมิล เป็นเวลา 30 นาที ทำให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงจาก 41.1 เหลือเพียง6.1 μm และจากการทดลองข้างต้น โดยน้ำหนักของเถ้าแกลบดำตามลำดับพบว่ายางที่ผสมเถ้าแกลบดำมีสมบัติต่างๆ โดยรวมดีที่สุดเมื่อทำการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69

การทดลองตอนนี้เป็นการศึกษาผลของขนาดอนุภาคเถ้า แกลบดำ ใช้เถ้าแกลบดำ F-BRHA(#1), F-BRHA(#2), F-BRHA(#3), F-BRHA(#4) และF-BRHA-G เป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ในปริมาณ20phr โดยทำการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ในปริมาณ 5 และ 3 % โดยน้ำหนักของเถ้าแกลบตามลำดับ

4.3.1 พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร

ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงและความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตร แสดงในรูปที่ 4.18และตารางที่ 4.7โดยทำการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ในปริมาณ 5 และ 3% ของเถ้าแกลบดำตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดส่ งผลให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง กับเวลาเชื่อมโยงลดลง เล็กน้อย เมื่อเทียบกับยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำขนาดอื่นๆเนื่องจากการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำพบว่าเถ้าแกลบดำที่มีอนุภาคขนาดใหญ่มีรูพรุนปริมาณมากทำให้อาจ PEG ไม่สามารถทำการเคลือบผิวเถ้าแกลบดำได้อย่างทั่วถึงจึงอาจเกิดการดูดสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงหรือสารกระตุ้นการเชื่อมโยงแต่การบดละเอียดเถ้าแกลบดำให้แตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆ ทำให้มีลักษณะเป็นรูพรุนน้อยลงดังแสดงในรูปที่ 4.4ส่งผลให้ PEG สามารถเคลือบผิวเถ้าแกลบดำได้อย่างทั่วถึงมากขึ้นและมีค่าแรงบิดสูงสุด (M_H) สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเถ้าแกลบดำบดละเอียดนั้นมีขนาดอนุภาคเล็ก และมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าเถ้าแกลบดำขนาดอื่นๆ ทำให้มีพื้นที่ที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับเถ้าแกลบดำเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้มีค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าเพิ่มมากขึ้นแต่การใช้ยางที่ผสมเถ้าแกลบดำขนาดต่างๆ ไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดมูนนี่อย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20phr

ตารางที่ 4.7 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงและความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20phr

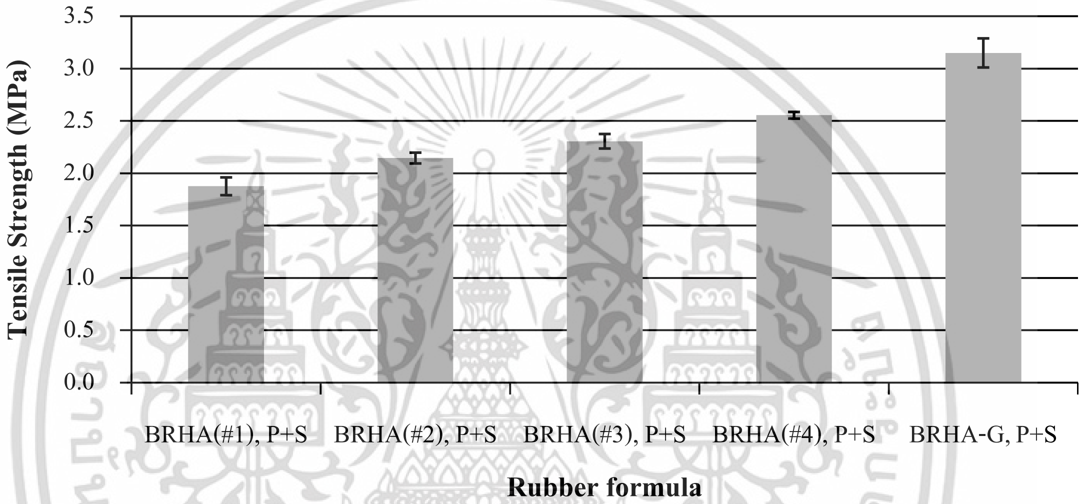
Rubber formula	Mooney viscosity	M_L (kgf.cm)	M_H (kgf.cm)	t_{s2} (min)	t_{c90} (min)	CRI (min^{-1})
BRHA(#1), P+S	23.9	0.5	13.3	1.5	2.1	166.6
BRHA(#2), P+S	24.7	0.5	13.0	1.5	2.1	166.6
BRHA(#3), P+S	24.9	0.6	12.3	1.6	2.2	174.2
BRHA(#4), P+S	25.5	0.5	12.0	1.6	2.1	200.0
BRHA-G, P+S	25.6	0.7	14.3	1.3	1.8	208.3

4.3.2 สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร

จากรูปที่ 4.19-4.22เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มอดุลัสของยางที่ 100เปอร์เซ็นต์ดึงยืด และความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรที่มีเถ้าแกลบดำขนาดต่างๆ เป็นสารตัวเติม พบว่า เถ้าแกลบดำที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุด (BRHA(#1), P+S) ส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืดและความแข็งแรงฉีกขาดมีค่าน้อยที่สุดและเมื่อขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำ

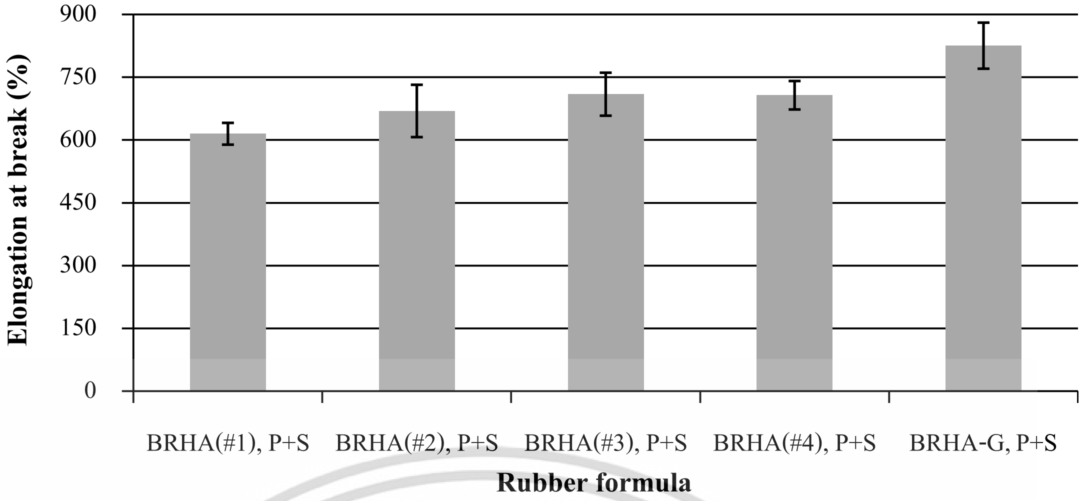
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้มีค่ามากขึ้น ซึ่งมากที่สุดเมื่อใช้เถ้าแกลบดำ (BRHA-G, P+S) เนื่องจากเถ้าแกลบดำที่มีขนาดเล็กลงและมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นทำให้มีพื้นที่ที่เกิดแรงกระทำระหว่างยางกับเถ้าแกลบดำเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าจากรูปที่ 4.23เป็นการศึกษา ความแข็งกด ของยางผสมสูตรที่มีเถ้าแกลบขนาดต่างๆเป็นสารตัวเติม พบว่าเถ้าแกลบดำทุกขนาดมีค่าความแข็งกดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากค่าความแข็งกดมีความสัมพันธ์กับความแข็งของวัสดุ ถึงแม้ว่ายางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำที่มีขนาดแตกต่างกัน แต่มีเถ้าแกลบดำที่เป็นอนุภาคของแข็งในปริมาณเท่ากันจึงไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งกด

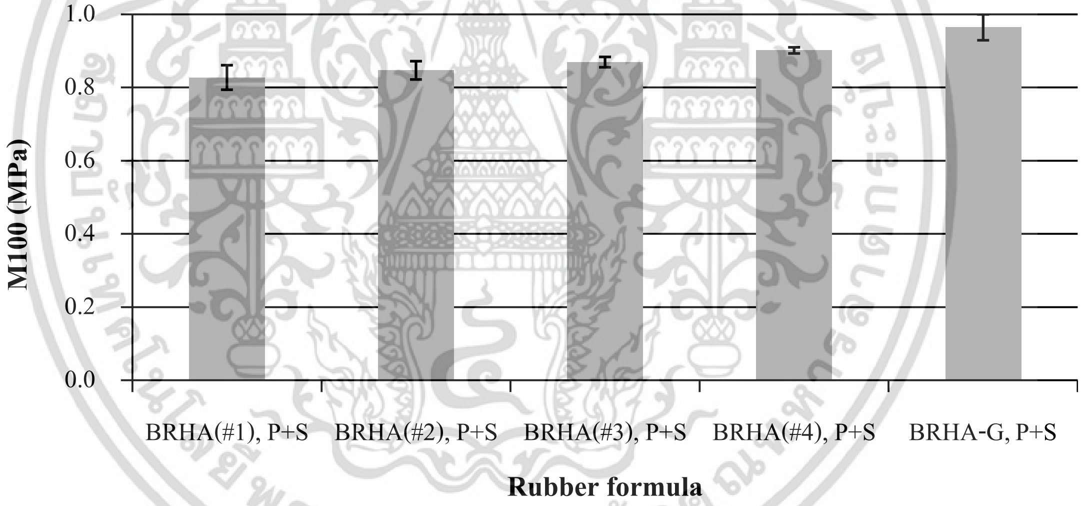


รูปที่ 4.19 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

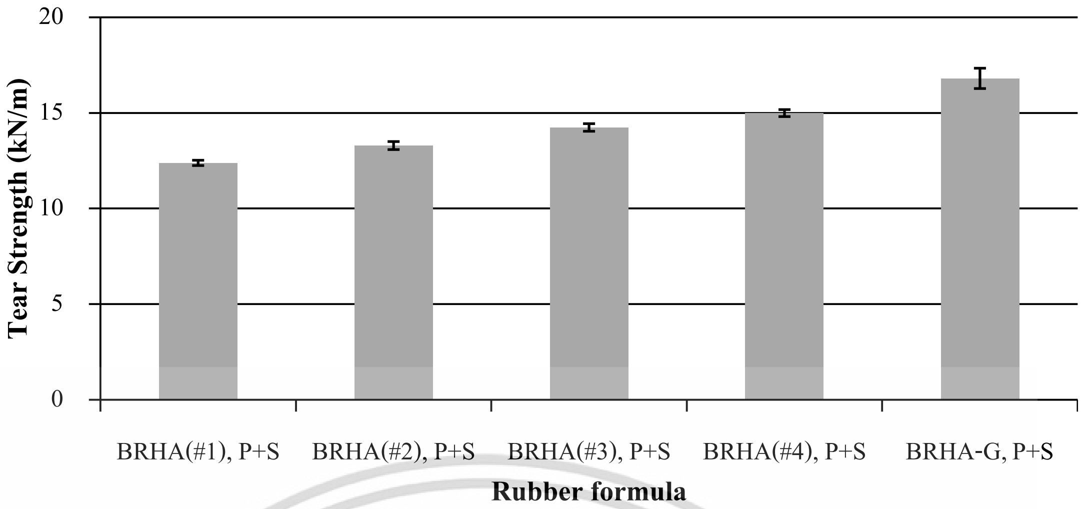


รูปที่ 4.20 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr

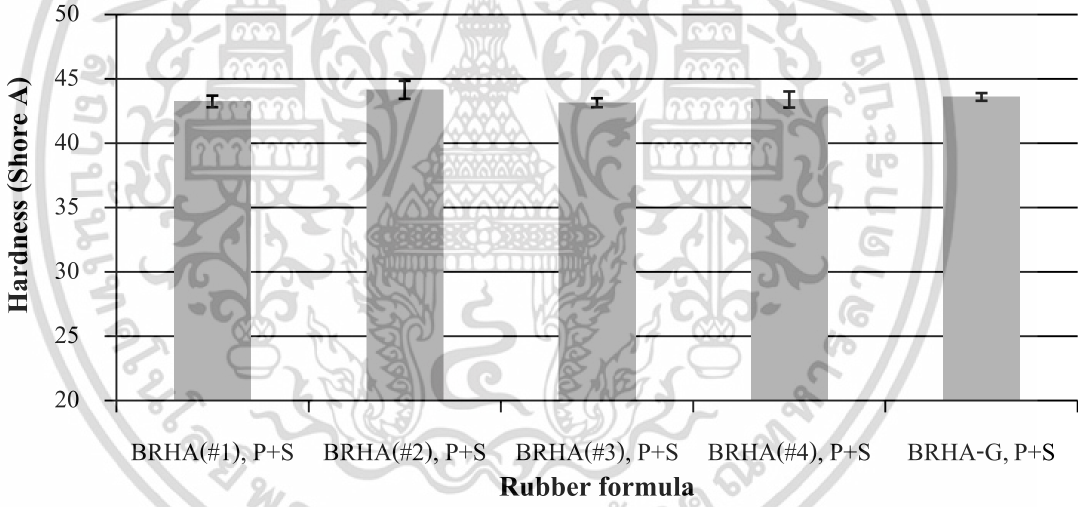


รูปที่ 4.21 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความมอดุลัสของยางที่ 100เปอร์เซ็นต์ดึงยืดของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

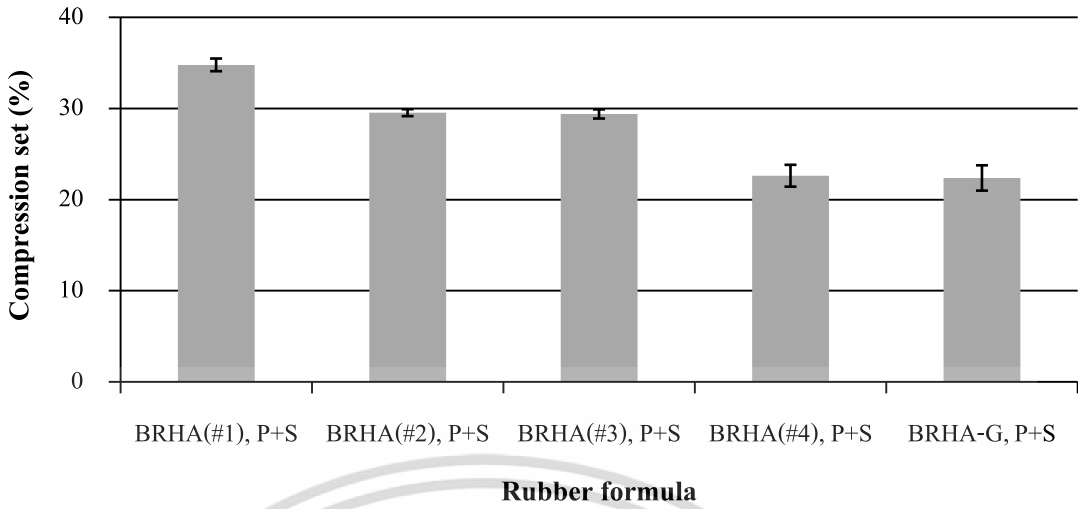


รูปที่ 4.22 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr



รูปที่ 4.23 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งกด (Shore A) ของยางผสมสูตรโดยมีเถ้าแกลบดำที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ 20 phr

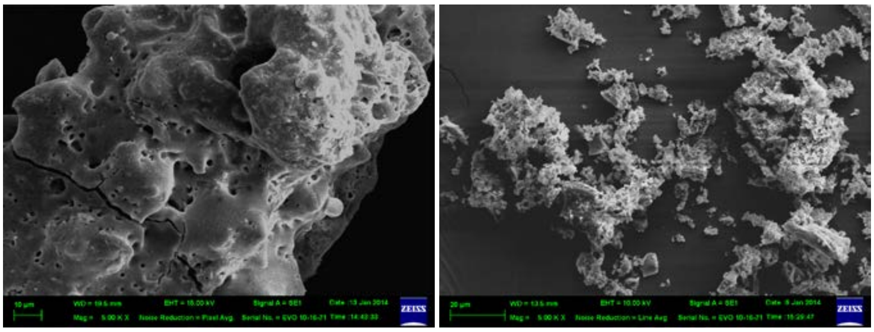
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ของยางผสมสูตรที่มีเถ้าแกลบดำ ที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมปริมาณ20 phr

จากรูปที่ 4.24เป็นการศึกษาค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดยางผสมสูตรโดยที่มีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติม 20 phrที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง พบว่าเมื่อใช้เถ้าแกลบดำที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (BRHA(#1), P+S) เกิดการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดมากที่สุด และการเสียรูปหลังการกดอัดน้อยลงตามขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำที่เล็กลงที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางผสมสูตร ซึ่งมีค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดน้อยที่สุดเมื่อใช้เถ้าแกลบดำชนิดบดละเอียด (BRHA-G, P+S) เนื่องจากสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำมีลักษณะเป็นรูพรุนเมื่อใช้เถ้าแกลบดำที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันเถ้าแกลบดำที่มีอนุภาคขนาดใหญ่นั้นมีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ โดยจากรูปที่ 4.25แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบดำ F-BRHA(#1) นั้นมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ แต่เมื่อนำเถ้าแกลบดำมาบดละเอียด (F-BRHA-G) เกิดการแตกของอนุภาคเถ้าแกลบดำส่งผลให้มีลักษณะที่เป็นรูพรุนน้อยลง ทำให้เมื่อได้รับแรงกดอัดยางจึงเข้าไปแทรกในเข้าไปอยู่ในรูพรุนของเถ้าแกลบดำอนุภาคขนาดใหญ่ได้มากกว่าเถ้าแกลบดำที่อนุภาคขนาดเล็ก จึงทำให้ค่าการเสียรูปถาวรมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อใช้เถ้าแกลบดำที่มีขนาดเล็กลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำจาก SEM ของ F-BRHA(#1)(ซ้าย) และ F-BRHA-G (ขวา) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

จากการศึกษาสมบัติต่างๆ จากผลของขนาดเถ้าแกลบดำ โดยใช้เถ้าแกลบดำขนาดต่างๆ คือ F-BRHA(#1),F-BRHA(#2), F-BRHA(#3), F-BRHA(#4) และ F-BRHA-G จากนั้นทำการปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 สามารถสรุปได้ว่า เมื่อใช้เถ้าแกลบดำ F-BRHA-G เป็นสารตัวเติมส่งผล อย่างมีนัยสำคัญต่อ สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร เนื่องจากอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีขนาดเล็กการกระจายตัวได้ดีกว่าและมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า ทำให้มีพื้นที่ที่เกิดแรงกระทำระหว่างยางกับเถ้าแกลบดำมากกว่าอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นในการทดลองตอนต่อไปจึงมีการใช้ BRHA-G ในทุกสูตร

4.4 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำ

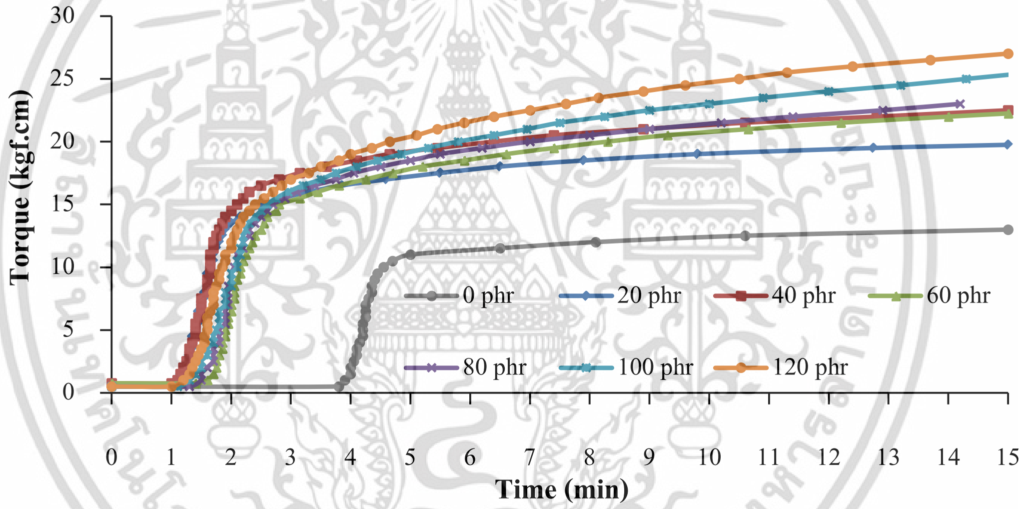
เถ้าแกลบดำเป็นของเหลือจากโรงงานไฟฟ้าที่ใช้ชีวมวล (แกลบเป็นเชื้อเพลิง) ในการผลิต ซึ่งมีปริมาณเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากและมีราคาถูก จึงสามารถนำมาเป็นสารลดต้นทุนได้เป็นอย่างดี งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาหาปริมาณที่ใช้ได้สูงสุดและผลกระทบต่อสมบัติต่างๆของยางผสมสูตร โดยศึกษาผลของปริมาณ เถ้าแกลบดำในยางผสมสูตรได้แก่ 0, 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 phrซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นยางผสมสูตรที่มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด เมื่อปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 แล้วใช้เถ้าแกลบดำ F-BRHA-G เป็นสารตัวเติมในยางผสมสูตร ในการทดลองนี้จึง ทำการปรับปรุง เถ้าแกลบดำ F-BRHA-G ด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลนSi-69 ที่ 5 และ 3%โดยน้ำหนักของเถ้าแกลบดำตามลำดับ

4.4.1 พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร

การศึกษาปริมาณเถ้า แกลบดำที่มีผลต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง ผสมสูตร จากรูปที่ 4.26และตารางที่ 4.8 พบว่ายางผสมสูตรที่ไม่มีสารตัวเติม (0 phr) จะมีเวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงมากกว่ายางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำเนื่องจากยางเป็นฉนวนทางความร้อน ทำให้ยางผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำสามารถนำความร้อนได้ดีกว่า แต่ในขณะที่การใช้เถ้าแกลบดำในปริมาณที่แตกต่างกันนั้นไม่ส่งผลต่อเวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงอย่างนัยสำคัญแต่เมื่อปริมาณเถ้าแกลบดำในยางผสมสูตรเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการเสียสภาพแบบเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น (Marching) สังเกตได้จากกราฟในช่วง Overcureมีความชันเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเถ้าแกลบดำเป็นอนุภาคของแข็งเมื่อมีปริมาณมากขึ้นซึ่งจะมีปริมาณของเนื้อยางลดน้อยลงทำให้ยางผสมสูตรสามารถนำความร้อนได้ดีขึ้นและจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเถ้าแกลบดำกับยางมากขึ้น ส่งผลให้มีค่าแรงบิดสูงสุดมีแนวโน้มสูงขึ้น และทำให้ค่าความหนืดมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำปริมาณมากเถ้าแกลบดำจะเกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลยาง ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ยากกว่ายางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำปริมาณน้อย



รูปที่ 4.26 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงและความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตรที่มี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

Filler content (phr)	Mooney viscosity (ML1+4 (100°C))	M_L (kgf.cm)	M_H (kgf.cm)	t_{s2} (min)	t_{c90} (min)	CRI (min^{-1})
0	21.9	1.0	10.5	3.8	4.6	125.0
20	25.6	0.7	14.2	1.3	1.8	208.3
40	27.4	0.7	15.2	1.2	1.8	171.4
60	29.4	0.7	16.2	1.3	1.9	171.4
80	35.2	0.7	15.9	1.5	2.2	145.8
100	39.7	0.7	16.2	1.5	2.1	171.4
120	39.8	0.7	17.5	1.4	2.1	145.8

4.4.2 สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร

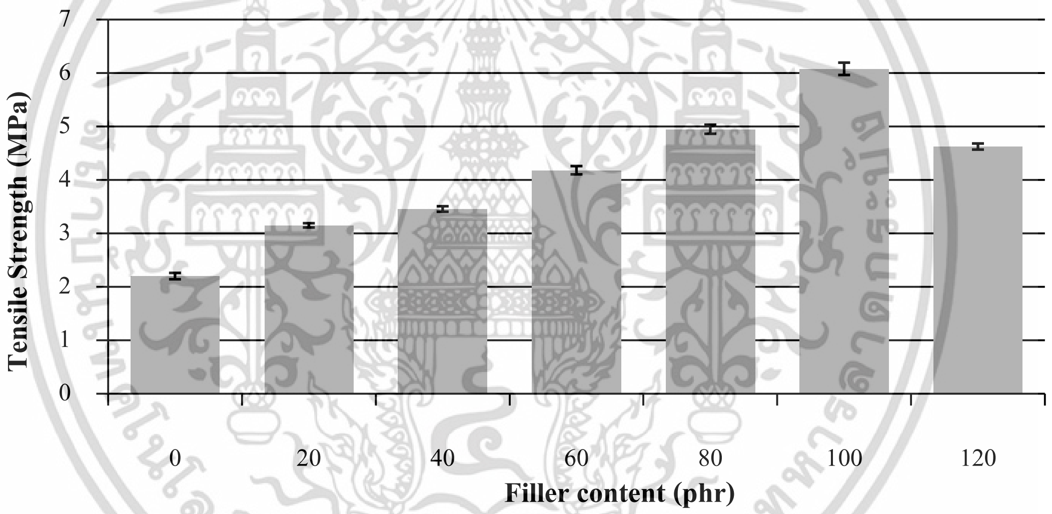
ในการศึกษาผลของปริมาณเถ้าแกลบดำต่อสมบัติเชิงกลต่างๆ ของยางผสมสูตรถูกควบคุมขนาดของเถ้าแกลบดำ F-BRHA-G และปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 จากรูปที่ 4.27-4.29เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึง มอดุลัส ของยาง ที่ 100เปอร์เซ็นต์ดึงยืดเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดและความแข็งแรงฉีกขาดพบว่าปริมาณเถ้าแกลบดำมากขึ้น (0, 20, 40, 60, 80และ100phr) ส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงขึ้นจนถึงปริมาณ 100 phrซึ่งมีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 6.07 MPaและ 30.28 kN/m ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อปริมาณเถ้าแกลบดำมากขึ้นทำให้มีปริมาณพื้นผิวที่เกิดอัตรกิริยาระหว่างยางกับเถ้าแกลบดำตัวเติมได้มากขึ้น ซึ่งจะ เกิดการแทรกสอดเกิดเป็นยางบาวด์ (Bound rubber)ได้มากขึ้นด้วยจึงทำให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นแต่เมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าแกลบดำมากขึ้นไปอีก (120 phr)ให้สมบัติความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรลดลง เนื่องจากยางผสมสูตรมีเถ้าแกลบดำมากเกินไปพื้นที่ผิวของเถ้าแกลบดำมีปริมาณมากจนยางล้อมรอบได้ไม่ทั่วถึงทำให้เถ้าแกลบดำเกาะกลุ่มกันส่งผลให้มี รอยตำหนิ หรือช่องว่างของชิ้นงานซึ่งเกิดการเสียสภาพได้ง่ายเมื่อรับแรง

ในทางตรงกันข้ามเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดนั้นมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อยางผสมสูตรมีเถ้าแกลบดำในปริมาณมากขึ้น เนื่องจากผลของปรากฏการณ์การขยายความเครียด (Strain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

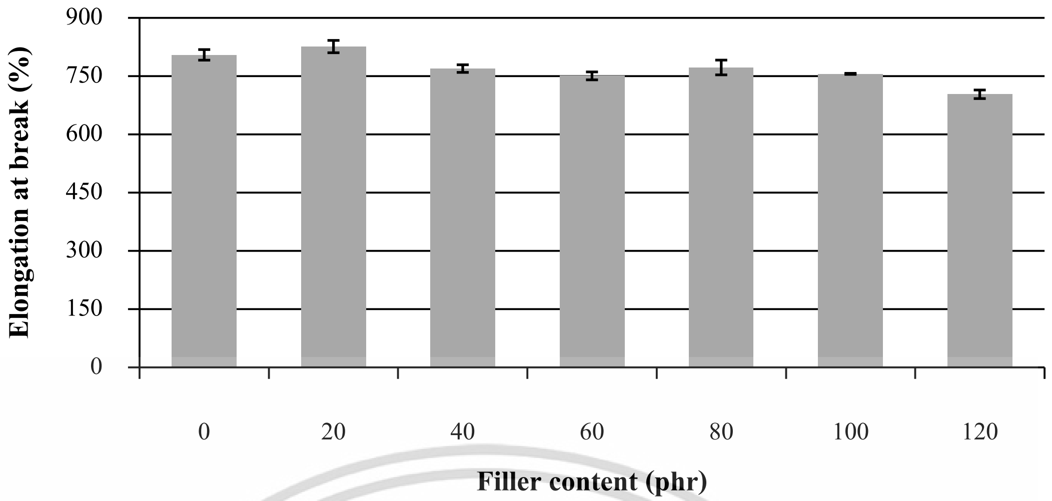
amplification effect) [25]กล่าวคือ ยางผสมสูตรที่มีเถ้าแกลบดำในปริมาณมาก ซึ่งจะทำให้มีปริมาณยางที่สามารถยืดตัวลดน้อยลง เมื่อเกิดการดึงยืด เถ้าแกลบดำที่เป็นอนุภาคของแข็งไม่สามารถเกิดการยืดตัวได้ ทำให้ยางได้รับความเครียด (Strain) มากกว่ายางผสมสูตรที่มีเถ้าแกลบดำปริมาณน้อย ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดน้อยลง

จากรูปที่ 4.30และ 4.31เป็นการศึกษามอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืดและความแข็ง-กดของยางผสมสูตรที่มีเถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมปริมาณต่างๆ พบว่าปริมาณเถ้าแกลบดำเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับกฎของของผสม (Ruleofmixture) กล่าวคือ สมบัติของของผสมรวม ขึ้นกับสมบัติและปริมาณของแต่ละองค์ประกอบย่อยในวัสดุ [17] ดังนั้น การเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีความแข็งมากกว่ายาง จึงทำให้ของผสมมีความแข็งสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าแกลบดำที่เพิ่มขึ้น

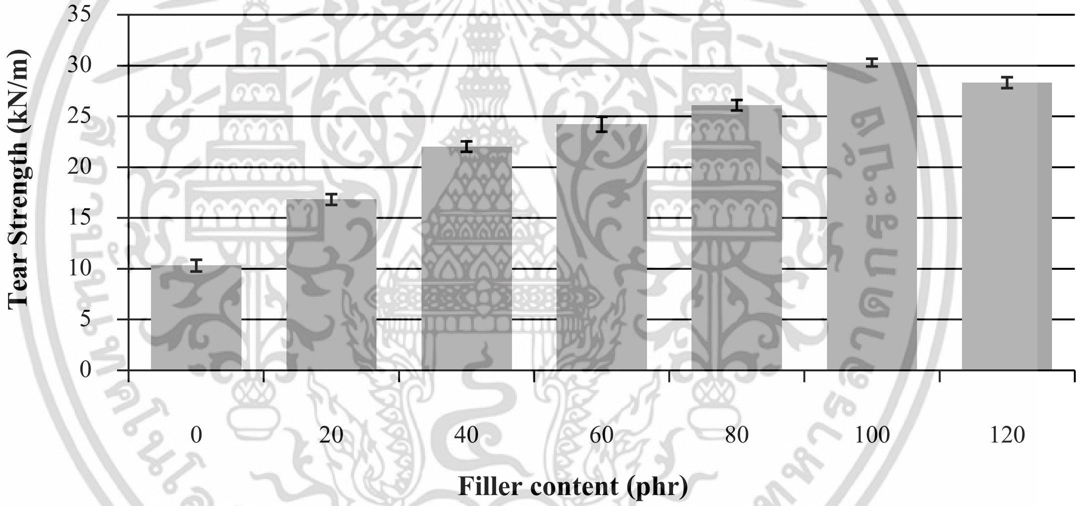


รูปที่ 4.27 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

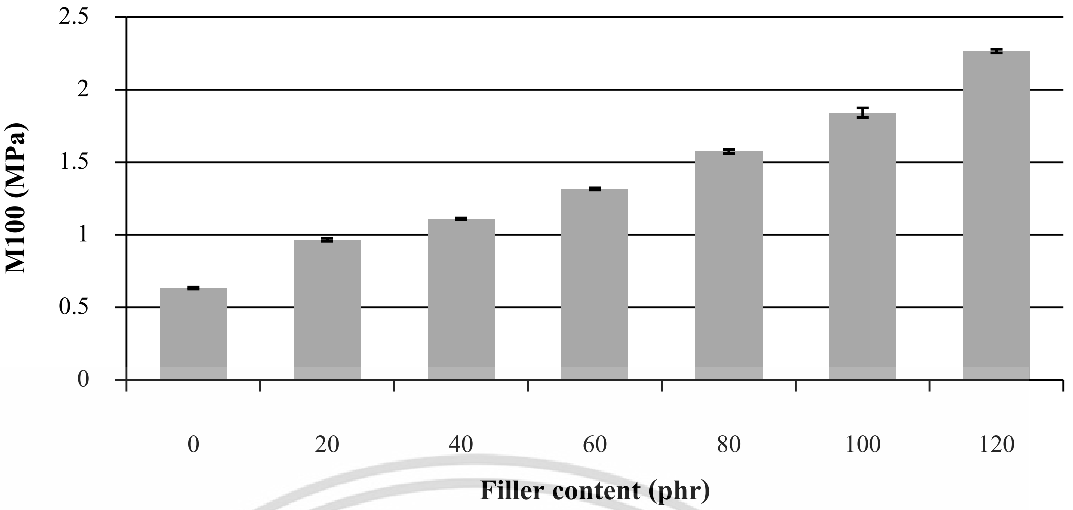


รูปที่ 4.28 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

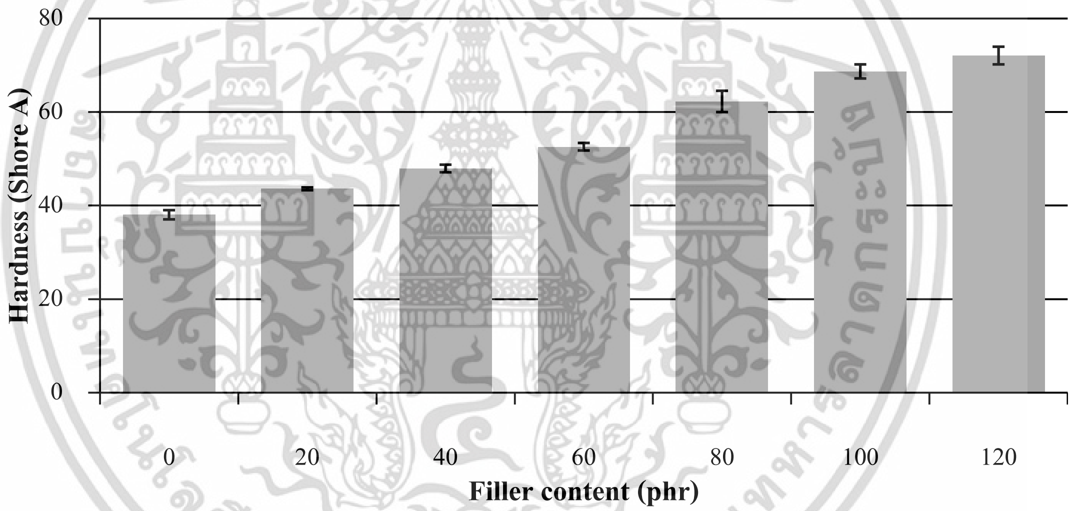


รูปที่ 4.29 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

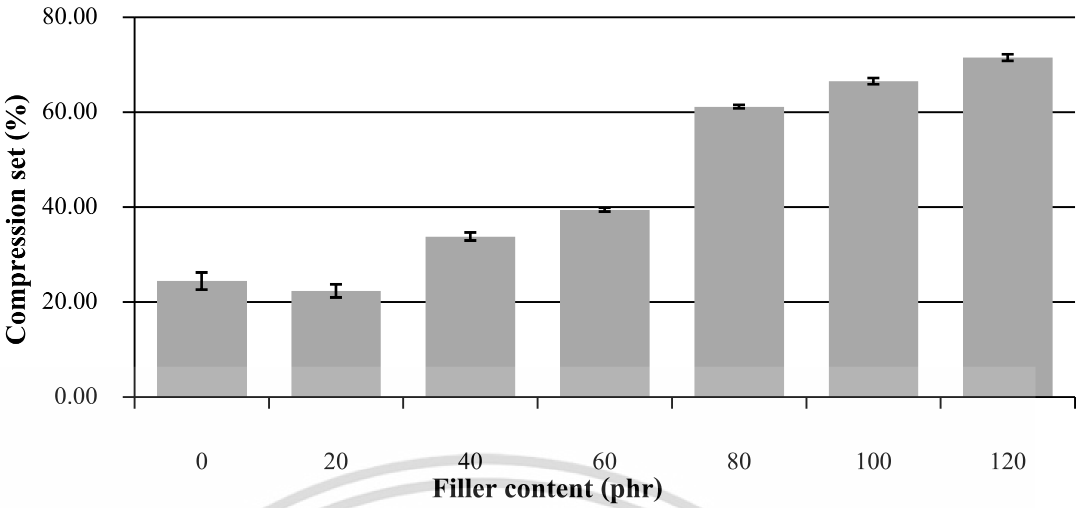


รูปที่ 4.30 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความมอดุลัสของยางที่ 100เปอร์เซ็นต์ดึงยืดของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.31 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าความแข็งกด (Shore A) ของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำที่มีต่อค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดเป็นเวลา 22 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 70°C ของยางผสมสูตรโดยมี BRHA-G, P+S เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.32เป็นการศึกษาค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดยางผสมสูตรโดยที่มีเถ้าแกลบดำ (BRHA-G, P+S) เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 70 ºC เป็นเวลา 22 ชั่วโมง พบว่ายางไนไตรล์มีพฤติกรรมการคืนตัวกลับน้อยลงเมื่อได้รับแรงกดอัดเมื่อมีเถ้าแกลบดำปริมาณมากขึ้น ซึ่งเป็นที่ทราบทั่วกันว่าเมื่อปริมาณของสารตัวเติมมากขึ้น ส่งผลให้การเสียรูปถาวรหลังการกดอัดมากขึ้นด้วย [34]เนื่องจากการเติมเถ้าแกลบดำในปริมาณที่มากขึ้นทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ยางได้รับแรงกระทำเพิ่มขึ้นจากการต้านทานการถูกแรงกดอัด ทำให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งหรือเกิดการแตกหักของพันธะเชื่อมโยงมากขึ้น [34]นอกจากนี้ เนื่องจากสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่มีลักษณะเป็นรูพรุน เมื่อมีปริมาณเถ้าแกลบดำมากขึ้น ทำให้ยางเข้าไปแทรกในเข้าไปอยู่ในรูพรุนหลังจากได้รับแรงกดอัดได้มากขึ้น ส่งผลให้เมื่อปล่อยแรงกดอัดยางผสมสูตรจึงสามารถคืนกลับตัวได้น้อยลง กล่าวคือมีเปอร์เซ็นต์การเสียรูปถาวรหลังการกดอัดมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลของการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์เทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมยางมีการใช้สารตัวเติมกันอย่างแพร่หลาย โดยสารตัวเติมที่ใช้มีทั้งชนิดเสริมแรงและไม่เสริมแรง เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของยางผสมสูตรและลดต้นทุนในการผลิต ปริมาณของสารตัวเติมที่นิยมใช้อยู่ในช่วง 50-100 phrซึ่งปริมาณการใช้สารตัวเติมนั้นขึ้นกับความต้องการที่จะปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของยางผสมสูตร โดยที่การใช้สารตัวเติมในปริมาณมากส่งผลให้ยางมีความหนืดสูง ทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิต และยังทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของสารตัวเติมเพราะสารตัวเติมบางชนิดมีปัญหาการกระจายตัว เช่น เขม่าดำ [8, 25] ในงานวิจัยนี้จึงได้นำสารตัวเติมทางการค้าที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางทั้งหมด 3 ชนิด คือ เขม่าดำ (N330) ซิลิกา (Tokusil® 255)และแคลเซียมคาร์บอเนต (GCC)มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ ซึ่งสารตัวเติมชนิดต่างๆ มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.9โดยจากผลการทดลองข้างต้น พบว่าเถ้าแกลบดำให้สมบัติโดยรวมที่ดีที่สุด เมื่อใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 (BRHA-G, P+S) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์แกลบดำนั้น พบซิลิกาในปริมาณมาก แสดงถึงการเป็นสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาในการทดลองนี้จึงทำการปรับปรุงสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาอื่นๆ ด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ในปริมาณ 5 และ 3 % โดยน้ำหนักของสารตัวเติมตามลำดับ แล้วทำการควบคุมปริมาณสารตัวเติมทุกชนิดในปริมาณ 60 phrในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบ ของการใช้ BRHA-G, P+S เทียบกับสารตัวเติม ทางการค้า เพื่อให้ทราบถึงศักยภาพของการนำเถ้าแกลบดำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ อย่างไรก็ดี การเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้าอาจไม่สามารถเปรียบเทียบได้อย่าง แม่นยำ ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมแต่ละชนิดมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ทำให้ปริมาตรของสารตัวเติมในยางผสมสูตร (Volume faction) มีปริมาณไม่เท่ากัน นอกจากนี้สารตัวเติมแต่ละชนิดอาจส่งผลให้การเชื่อมโยงของสารเคมียางไม่เท่ากันรวมทั้งความสามารถในการกระจายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

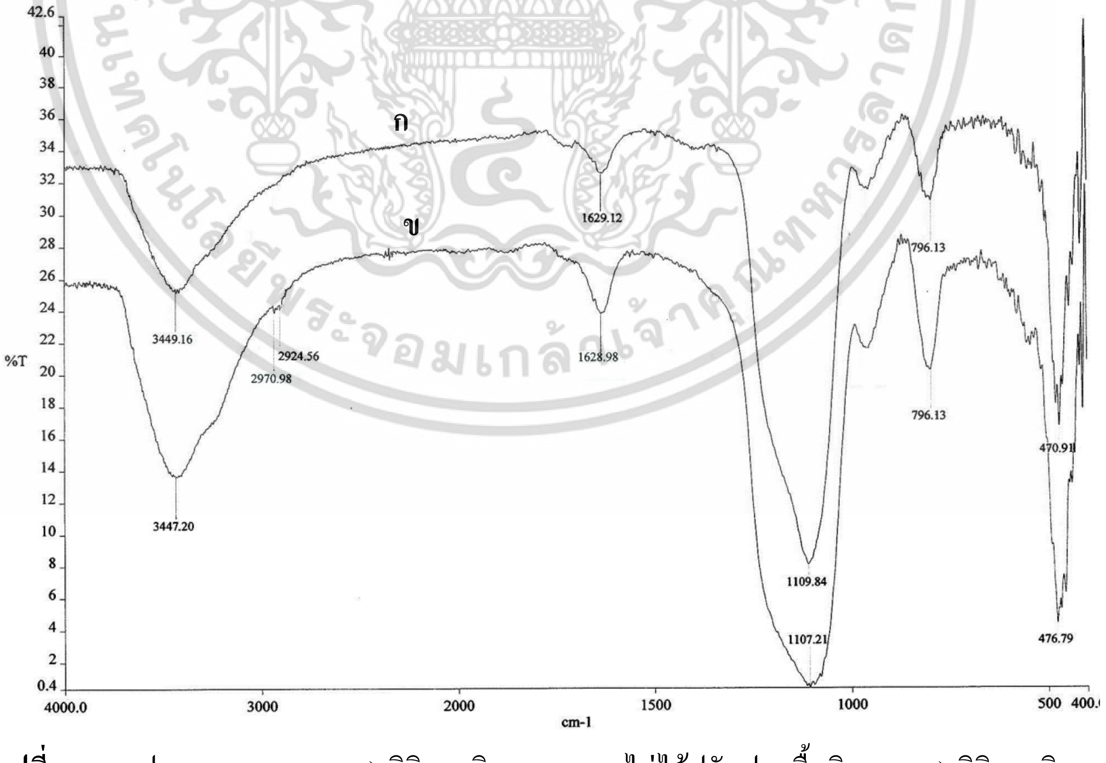
ตารางที่ 4.9 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย พื้นที่ผิวจำเพาะและความหนาแน่นรวมของสารตัวเติมชนิดต่างๆ

สารตัวเติม	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ BET (m²/g)	ความหนาแน่น (g/cm³)	ความแข็ง
BRHA-G	6.10	17.3	1.7-1.8*	n/a
Calcium carbonate	2.00	9.0	2.7	2.8-3.0
Precipitated silica	0.018	165.0	2.2	6.5-7.0
Carbon black	0.02–0.03	71.0-85.0	1.8	2.0-2.9

<u>**หมายเหตุ**</u>: สารตัวเติม Calcium carbonate Precipitate silicaและ Carbon blackเป็นข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

* หมายถึง ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [24, 29]

4.5.1 การปรับปรุงซิลิกาชนิดตกตะกอนด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69



รูปที่ 4.33 สเปกทราFT-IR ของ ก) ซิลิกาชนิดตกตะกอนไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และ ข) ซิลิกาชนิดตกตะกอนที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69

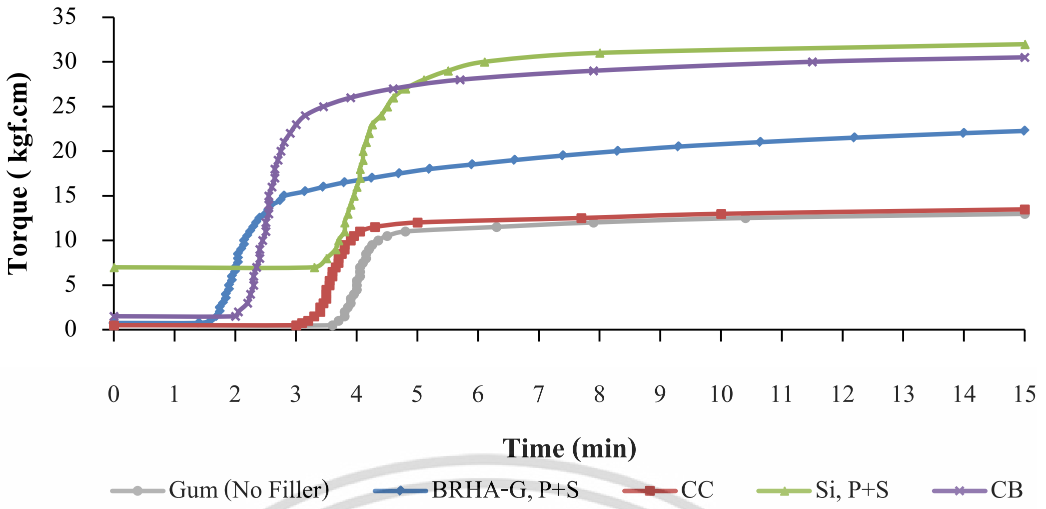
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.33แสดงแถบดูดกลืนจากเทคนิค FT-IR ของซิลิกาชนิดตกตะกอนที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 พบว่าเมื่อปรับปรุงซิลิกาชนิดตกตะกอนด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 ปรากฏแถบการดูดกลืนที่ประมาณ 2924-2982 cm^{-1}ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ฟังก์ชัน CH_2ในโมเลกุลของสารคู่ควบไซเลน Si-69 และพบว่ามีแถบดูดกลืนที่ประมาณ 1100 cm^{-1}กว้างมากขึ้น แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่ไซลอกเซน เนื่องมาจากหมู่อัลคอกซี (Alkoxy) ของสารคู่ควบไซเลน Si-69 นั้นทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาเช่นเดียวกับการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลนดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.1

4.5.2พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร

พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ดังแสดงรูปที่ 4.34 และตารางที่ 4.10พบว่ายางผสมสูตรที่มีสารตัวเติมทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงลดลง รวมถึงดัชนีการเชื่อมโยงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบการยางผสมสูตรที่ไม่มีสารตัวเติม เนื่องจากเมตริกซ์ยางมีความเป็นฉนวนความร้อน ในขณะที่สารตัวเติมเถ้าแกลบดำและสารตัวเติมทางการค้าต่างๆ มีความสามารถในการนำความร้อนดีกว่าเมื่อเทียบกับยาง เมื่อใส่สารตัวเติมในยางผสมสูตรทำให้ยางผสมสูตรสามารถนำความร้อนได้ดีขึ้นส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้เถ้าแกลบดำกับสารตัวเติมทางการค้าชนิดต่างๆ พบว่ามีเวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงน้อยกว่า และมีค่าดัชนีการเชื่อมโยงมากกว่าสารตัวเติมทางการค้าทุกชนิดเนื่องจากการวิเคราะห์เถ้าแกลบดำด้วยเทคนิค XRF พบว่าเถ้าแกลบดำมีองค์ประกอบของโลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยงเหมือนซิงค์ออกไซด์ ทำให้ช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้มากขึ้นนอกจากนี้การใช้เถ้าแกลบดำส่งผลให้มีค่าแรงบิดสูงสุดและค่าความหนืดมูนนี่มากกว่าการใช้สารตัวเติมทางการค้าแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากเถ้าแกลบดำมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่าจึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับเมตริกซ์ยางได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต อย่างไรก็ตามการใช้สารตัวเติมทางการค้าซิลิกาและเขม่าดำ พบว่ามีค่าแรงบิดสูงสุดและค่าความหนืดมูนนี่มากกว่าเถ้าแกลบดำเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะในการเกิดอันตรกิริยากับเมตริกซ์ยางมากกว่าเถ้าแกลบดำเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 ผลของการเปรียบเทียบเถ้าแกลบดำกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร โดยมีสารตัวเติมปริมาณ 60 phr

ตารางที่ 4.10 ผลของการเปรียบเทียบเถ้าแกลบดำกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการเชื่อมโยงและความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตร โดยมีสารตัวเติมปริมาณ 60 phr

Rubber formula	Mooney viscosity (ML1+4 (100°C))	M_L (kgf.cm)	M_H (kgf.cm)	t_{s2} (min)	t_{c90} (min)	CRI (min^{-1})
Gum (No Filler)	21.9	0.5	10.5	3.8	4.6	125.0
BRHA-G, P+S	29.4	0.7	16.0	1.3	1.9	171.4
CC	25.1	0.5	11.5	3.3	3.9	166.6
Si, P+S	115.7	7.0	31.0	3.7	4.4	162.5
CB	49.7	1.5	26.0	2.2	2.8	166.7

4.5.3 สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร

ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ค่าความแข็งแรงฉีกขาดและค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรดังตารางที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ พบว่าการใช้เถ้าแกลบดำสามารถเสริมแรงได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากเถ้าแกลบดำมีองค์ประกอบของซิลิกาในปริมาณมาก และมีหมู่ฟังก์ชันไซลานอลบริเวณพื้นผิวของเถ้าแกลบดำ เมื่อทำการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วยสารคู่ควบไซเลน Si-69 จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับเมตริกซ์ยางได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลให้รอยต่อระหว่างวัฏภาค ของเมตริกซ์ยางกับสารตัวเติมเถ้าแกลบดำมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรง กว่าแคลเซียมคาร์บอเนต แต่อย่างไรก็ตามสารตัวเติมซิลิกาและเขม่าดำสามารถเสริมแรงได้ดีกว่าเถ้าแกลบดำ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบดำมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ และพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าซิลิกากับเขม่าดำ (ตารางที่ 4.9) ถึงแม้ว่าเถ้าแกลบดำมีองค์ประกอบ และหมู่ฟังก์ชันไซลานอลเหมือนสารตัวเติมซิลิกาแต่ก็มีในปริมาณน้อยกว่า จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับเมตริกซ์ยางได้ไม่ดีเท่าซิลิกา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Arayapranee W. et.al [30]และรสิมา จันทร์จำปา [6] พบว่า เถ้าแกลบไม่สามารถเสริมแรงได้เหมือนกับซิลิกา และเขม่าดำเนื่องจากเถ้าแกลบมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ และมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าซิลิกา และเขม่าดำและ Sombatsompop N. et.al.[27] ศึกษาการใช้เถ้าลอย ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกา มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ พบว่าไม่สามารถเสริมแรงได้เหมือนการใช้สารตัวเติมซิลิกาเนื่องจากความแตกต่างของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และจำนวนหมู่ฟังก์ชันไซลานอลที่มีปริมาณน้อย

ตารางที่ 4.11ความแข็งแรงดึงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดและมอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืดความแข็งแรงฉีกขาดและค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร

ยางผสมสูตร	**Gum (No Filler)**	**BRHA-G, P+S**	**CC**	**Si, P+S**	**CB**
ความแข็งแรงดึง (MPa)	2.2	4.1	2.9	21.1	22.2
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด	804	750	791	1560	1104
มอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ดึงยืด (MPa)	0.63	1.31	0.77	1.58	1.79
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	10.3	24.2	11.2	98.1	71.2
ความแข็งกด (Shore A)	38	52	43	67	63
การเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (%)	24	39	41	42	38
ปริมาตรสูญเสีย (mm^3)	25	335	186	92	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดยางผสมสูตรที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมงแสดงดังตารางที่ 4.11พบว่ายางผสมสูตรที่ไม่มีสารตัวเติมเกิดการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดน้อยที่สุด เนื่องจากไม่มีอนุภาคของแข็งเข้าไปแทรกในเนื้อยางเลย จึงมีการกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้มากที่สุด และมีพฤติกรรมการคืนตัวกลับเมื่อได้รับแรงกดอัดน้อยลง เมื่อทำการใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ ลงในยางผสมสูตรในปริมาณ 60 phrเนื่องจากการใส่สารตัวเติมในปริมาณมาก จึงมีปริมาณของยางน้อยลง ทำให้ยางผสมสูตรที่มีสารตัวเติมได้รับแรงกระทำมากกว่ายางผสมสูตรที่ไม่มีสารตัวเติม ส่งผลให้เมื่อปล่อยแรงกดอัดยางผสมสูตรจึงสามารถคืนกลับตัวได้น้อยลง กล่าวคือมีเปอร์เซ็นต์การเสียรูปถาวรหลังการกดอัดมากขึ้น

การสึกหรอของยางผสมสูตรที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 60 phrแสดงดังตารางที่ 4.11พบว่ายางผสมสูตรที่ไม่มีสารตัวเติมมีค่าการสึกหรอน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมสูตรอื่นๆ เพราะยางผสมสูตรที่มีสารตัวเติมมีโอกาสเกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อวัฏภาค ส่งผลให้เกิดการเสียสภาพจากการสึกหรอมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมกับสารตัวเติมทางการค้าชนิดต่างๆ พบว่าเถ้าแกลบดำมีค่าการสึกหรอมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น เนื่องจากเถ้าแกลบดำมีอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้าชนิดอื่นๆ เมื่อเกิดการหลุดออกของอนุภาคขนาดใหญ่จะทำให้สูญเสียปริมาตรมากกว่าอนุภาคขนาดเล็กจึงส่งผลให้มีค่าการสึกหรอมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตถึงแม้ว่าเถ้าแกลบจะมีองค์ประกอบของซิลิกาที่ใช้ให้เกิดอันตรกิริยากับยางที่ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและเมื่อเปรียบเทียบเขม่าดำและซิลิกา พบมีค่าการสึกหรอน้อยกว่าเถ้าแกลบดำเนื่องจากเขม่าดำและซิลิกามีรอยต่อระหว่างวัฏภาคของยางกับสารตัวเติมที่แข็งแรงกว่าเถ้าแกลบดำดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

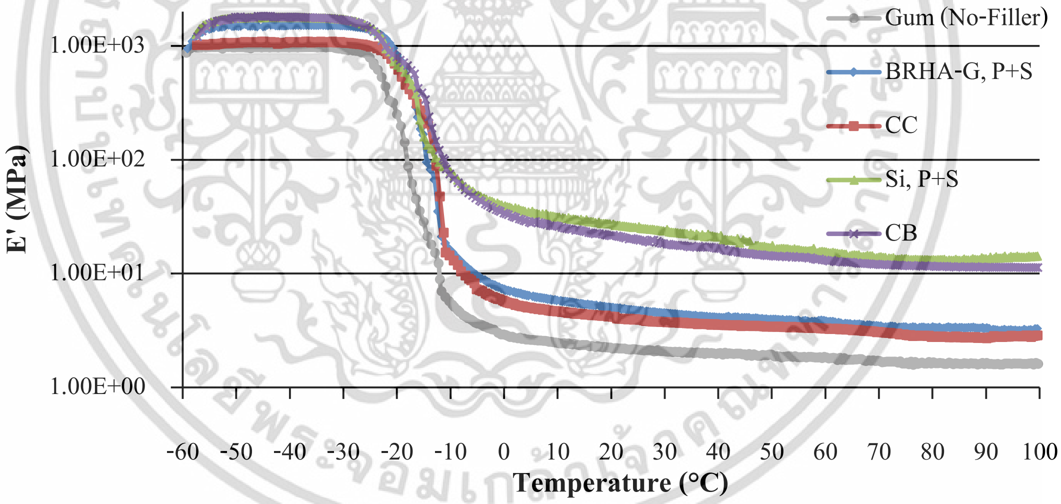
4.5.4สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตของยางผสมสูตร

การทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัต ของยางผสมสูตรต่างๆแสดงในรูปที่ 4.35 และ4.36 พบว่ายางผสมสูตรที่ไม่มีสารตัวเติม มีค่ามอดุลัสสะสมน้อยและค่าtan δมากที่สุด แล้วเมื่อทำการใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ พบว่า เมื่อใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในยางผสมสูตร ทำให้ค่ามอดุลัสสะสมมากกว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม ทั้งนี้เนื่องจากผลการวิเคราะห์ข้างต้นเถ้าแกลบดำสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้ดีทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคมีความแข็งแรง ยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมจึงสามารถเก็บพลังงานเพื่อคืนตัวกลับได้ดีกว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตทำให้ยางผสมสูตรเถ้าแกลบดำมีค่า tan δ ต่ำกว่ายางผสมสูตรแคลเซียมคาร์บอเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

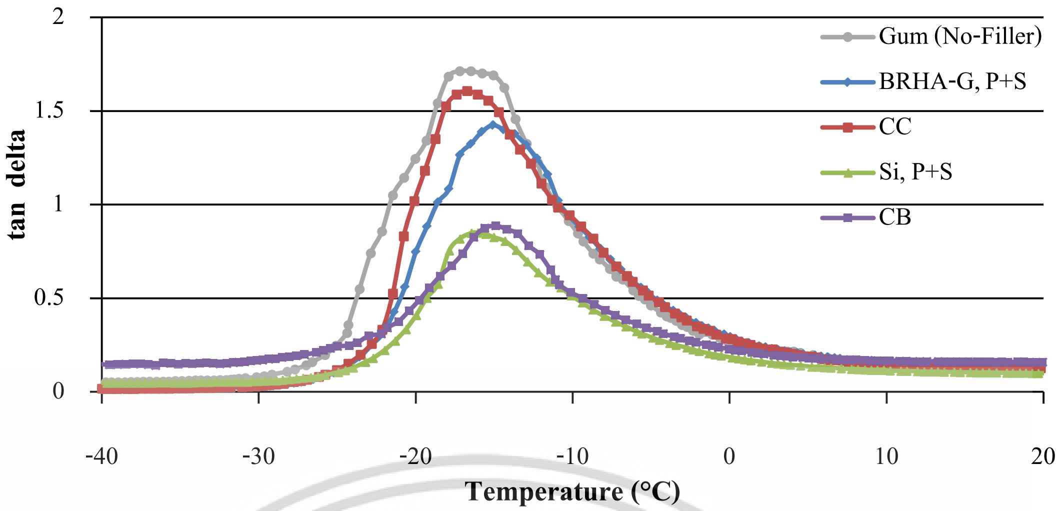
นอกจากนี้ยังส่งผลให้อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางผสมสูตรเพิ่มขึ้นดังที่แสดงในตารางที่4.12 เนื่องจากเถ้าแกลบดำเกิดอันตรกิริยากับเมตริกซ์ยางได้ดีทำให้สายโซ่โมเลกุลยางถูกจำกัดอิสระ จึงต้องใช้พลังงานความร้อนในการทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่มากกว่ายางผสมสูตรที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนต [34]

เมื่อทำการเปรียบเทียบสารตัวเติมเถ้าแกลบดำกับซิลิกา และเขม่าดำพบว่ายางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำมีค่ามอดุลัสสะสมน้อยกว่า และ tan δมากกว่าการใช้ซิลิกา และเขม่าดำเนื่องจากสารตัวเติมซิลิกามีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่ในปริมาณมาก และมีอนุภาคขนาดเล็ก และพื้นที่ผิวจำเพาะมาก จึงส่งผลทำให้มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันไซลานอลบนพื้นผิวของอนุภาคมาก [46]ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้ดีกว่าเถ้าแกลบดำ ทำให้มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่แข็งแรงกว่าและสารตัวเติมเขม่าดำที่มีโครงสร้างปฐมภูมิในปริมาณมากสามารถเกิดยางบาวด์ได้ ทำให้มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่แข็งแรงกว่าเถ้าแกลบดำ นอกจากนี้การใช้สารตัวเติมซิลิกากับเขม่าดำในยางผสมสูตรยังส่งผลให้อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางผสมสูตรเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังที่แสดงในตารางที่4.12



รูปที่ 4.35 ค่ามอดุลัสสะสมของยางผสมสูตรเมื่อใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 60 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ค่า tan δ ของยางผสมสูตรเมื่อใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 60 phr

ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางผสมสูตรเมื่อใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 60 phr

ยางผสมสูตร	**อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (°C)**
Gum (No Filler)	-17.9
BRHA-G, P+S	-15.0
CC	-16.7
Si, P+S	-14.0
CB	-14.3

4.5.5การวิเคราะห์ต้นทุน และสมบัติของยางผสมสูตร

ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต โดยการเปรียบเทียบราคาต้นทุนของยางผสมสูตรที่ไม่ใช้สารตัวเติม และยางผสมสูตรที่ใช้สารตัวเติม คือ เถ้าแกลบดำบดละเอียด แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ที่ปริมาณ 60 phrซึ่งวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตยางผสมสูตรที่มีน้ำหนัก 1 kg และ 1 m^3 แสดงดังตารางที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ราคาวัตถุดิบรวมที่ใช้ในการผลิตยางผสมสูตร

ราคาวัตถุดิบ*	Gum	BRHA-G, P+S	CC	Si, P+S	CB
ราคาสารตัวเติม (บาท/kg)	-	0.40	5.60	25.00	50.00
ราคาวัตถุดิบต่อน้ำหนัก (บาท/kg)	80.49	56.01	57.00	63.53	70.93
ราคาวัตถุดิบต่อปริมาตร (บาท/m^3)	84,672.45	67,579.48	74,161.10	79,631.24	85,795.32

หมายเหตุ: * คำนวณจากราคา โดยประมาณ ณ เดือน ธันวาคม 2557 และราคานี้ไม่รวมต้นทุนของเครื่องจักรการผลิต ค่าแรง ค่าไฟฟ้า และค่าเสื่อมของเครื่องจักร

นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบสมบัติระหว่างยางผสมสูตรที่ไม่ใช่สารตัวเติมกับยางผสมสูตรที่ใช้สารตัวเติมต่างๆ ที่ปริมาณ 60 phrซึ่งแสดงในตารางที่ 4.14พบว่าจากการเปรียบเทียบสมบัติของยางผสมสูตร เมื่อใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดเทียบกับสูตรที่ไม่มีสารตัวเติม พบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติบางประการได้ เช่น เวลาเชื่อมโยง ความแข็งแรงดึง (+90%) มอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (+107%) ความแข็งแรงฉีกขาด (+135%) ความแข็งกด (+38%)เป็นต้น และสามารถลดราคาต้นทุนการผลิตต่อ 1 kg และ 1 m^3(-30 และ -20% ตามลำดับ) อย่างไรก็ดีสมบัติบางประการที่ยังต้องการ การปรับปรุงเช่น การสึกหรอ (+1,228%) ซึ่งกล่าวได้ว่า จากผลของงานวิจัยนี้ การใช้เถ้าแกลบดำเพื่อเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์นั้น สามารถนำเถ้าแกลบดำมาใช้เพื่อลดต้นทุนได้คล้ายแคลเซียมคาร์บอเนต แต่เถ้าแกลบดำยังสามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 สมบัติต่างๆ และราคาของยางผสมสูตรที่มีสารตัวเติมเทียบกับยางผสมสูตรที่ไม่มีสารตัวเติม

สมบัติของยางผสมสูตร	ผลต่าง (%)			
	BRHA-G, P+S	CC	Si, P+S	CB
เวลาเริ่มเชื่อมโยง	-65	-13	-2	-42
เวลาเชื่อมโยง	-58	-15	-4	-39
ดัชนีอัตราการเชื่อมโยง	+36	+33	+30	+33
ความหนืดมูนนี่	+34	+14	+428	+126
ความแข็งแรงดึง	+90	+33	+890	+908
เปอร์เซ็นต์การดึงยืดณ จุดขาด	-6	-1	+94	+37
มอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด	+107	+22	+150	+184
ความแข็งแรงฉีกขาด	+135	+9	+852	+591
ความแข็งกด	+38	+15	+77	+67
การเสียรูปถาวรหลังการกดอัด	+61	+69	+74	+58
การสึกหรอ	+1,228	+636	+267	+28
ราคาวัตถุดิบต่อน้ำหนัก	-30	-29	-21	-11
ราคาวัตถุดิบต่อปริมาตร	-20	-12	-5	+1

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ยางผสมเถ้าแกลบดำมีสมบัติบางประการที่เหนือกว่า ยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นสารตัวเติมหลักในอุตสาหกรรมที่ลดต้นทุน (Non reinforcing filler) เช่น ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาด เป็นต้น อย่างก็ดีการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในยางผสมสูตรยังมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงที่ต่ำกว่าสารตัวเติมทางการค้า ได้แก่ เขม่าดำและซิลิกา อีกทั้งยังมีสมบัติบางประการที่ยังต้องทำการปรับปรุงคือ การสึกหรอ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเถ้าแกลบดำยังมีอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงต่ำกว่าสารตัวเติมทางการค้า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เถ้าแกลบดำมีศักยภาพในการทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมแรง (Semi-reinforcing filler) กล่าวคือสามารถใช้ลดต้นทุนและสามารถเสริมแรง ในยางไนไตรล์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำ (BRHA) เป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ (NBR) โดยทำการวิเคราะห์เถ้าแกลบดำ และศึกษาปัจจัยต่างๆ เพื่อให้สามารถเสริมแรงในยางไนไตรล์ได้ ได้แก่ ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำ และผลของปริมาณเถ้าแกลบดำ นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติต่างๆ ของยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมเพื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้า เขม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต จากการทดสอบสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

จากการวิเคราะห์เถ้าแกลบดำด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำมีซิลิกอนไดออกไซด์ หรือซิลิกาเป็นองค์ประกอบประมาณ 74%และจากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำ พบว่าเถ้าแกลบดำมีรูปร่างที่หลากหลาย เช่น แท่ง แผ่นเหลี่ยม เป็นต้น และมีรูพรุน แต่เมื่อทำการบดละเอียดเถ้าแกลบดำทำให้เกิดการแตกออกของอนุภาคเถ้าแกลบดำ ส่งผลให้เถ้าแกลบดำมีขนาดอนุภาคเล็กลง และมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ซึ่งเถ้าแกลบดำขนาดต่างๆ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 6.1–128.9 μm และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 6.1–17.3 m^2/g

การศึกษาผลของการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 พบว่าการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG ทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงลดลง และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงลดลงเล็กน้อย แต่ไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดมูนนี่ ในด้านสมบัติเชิงกลการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG หรือ สารคู่ควบไซเลน Si-69 ส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงดึงค่ามอดุลัสของยางที่ 100เปอร์เซ็นต์ดึงยืด ค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูง และค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดต่ำกว่าเถ้าแกลบดำที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว การปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตพบว่าเมื่อปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 ทำให้ยางผสมสูตรมีค่ามอดุลัสสะสมมากและมีค่าแอมพิจูดของ tan δต่ำที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์จำเป็นต้องปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลนSi-69 เพื่อปรับปรุงให้สมบัติโดยรวมดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลของขนาดเถ้าแกลบดำ (BRHA(#1), BRHA(#2), BRHA(#3), BRHA(#4) และ BRHA-G)พบว่ายางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง และเวลาเชื่อมโยงลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำขนาดอื่นๆ อาจเนื่องจากสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบดำที่เปลี่ยนไปของเถ้าแกลบดำเมื่อทำการบดละเอียด และการใช้เถ้าแกลบดำขนาดต่างๆ ไม่ส่งผลต่อความหนืดมูนนี่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เถ้าแกลบดำบดละเอียดและการใช้เถ้าแกลบดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัสยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดและค่าความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดมีแนวโน้มลดลง

การศึกษาผลของปริมาณเถ้าแกลบดำ (0-120 phr) พบว่าเมื่อปริมาณเถ้าแกลบดำเพิ่มมากขึ้น ไม่ส่งผลต่อเวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ส่งผลค่าทอร์กสูงสุด ความหนืดมูนนี่และเกิดการเสียสภาพแบบเชื่อมโยง มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในด้านสมบัติเชิงกลพบว่าการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในปริมาณ 100 phr มีค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงสุดที่ 6.07 MPa และ 30.28 kN/m ตามลำดับ และเมื่อเถ้าแกลบดำมีปริมาณมากขึ้นทำให้ค่ามอดุลัสยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด ค่าความแข็งกดและค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง

การศึกษาผลการใช้เถ้าแกลบดำเพื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้าอื่นๆ พบว่าการใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 เป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ ส่งผลให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงน้อยที่สุด ในด้านสมบัติเชิงกลต่างๆ และสมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตนั้น แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติม สามารถลดต้นทุน และสามารถปรับปรุงสมบัติบางประการของยางไนไตรล์อย่างไรก็ดียังต้องการปรับปรุงสมบัติการต้านทานการสึกหรอ จึงสามารถสรุปได้ว่าเถ้าแกลบดำบดละเอียดที่ปรับปรุงด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 มีศักยภาพเป็นสารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรงในยางไนไตรล์

5.2ข้อเสนอแนะ

1. ทำการบดเถ้าแกลบดำให้มีขนาดเล็กมากกว่านี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรง
2. เนื่องจากเถ้าแกลบดำบดละเอียดมีช่วงการกระจายตัวของอนุภาคมาก จึงควรแยกขนาดเถ้าแกลบดำบดละเอียดโดยผ่านตระแกรงร่อนเพื่อให้มีการกระจายของขนาดอนุภาคน้อยลง เพื่อลดจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากอนุภาคขนาดใหญ่ในชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาการนำเถ้าแกลบดำมาใช้แทนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้งานจริงในปัจจุบัน
4. ศึกษาแนวทางในการนำเถ้าแกลบดำมาใช้เป็นสารตัวเติมร่วมกับสารตัวเติมชนิดเสริมแรงอื่นๆ เพื่อเป็นการลดต้นทุนของการผลิตและปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้ดีขึ้น
5. ศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมในยางมีขั้วชนิดอื่นเช่น ยางคลอโรพรีน เพื่อเป็นแนวทางในการนำเถ้าแกลบดำไปใช้เป็นสารตัวเติมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. **"ผลผลิตข้าวโลก."**[Online].

Available :http://www.thairiceexporters.or.th/production.htm. 2557.

[2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทน. **"ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย."**[Online].

Available :http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=130%3A2010-05-07-08-10-57. 2552.

[3] บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์. **"เถ้าแกลบของเหลือสารพัดประโยชน์."**[Online].

Available :http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=865&Itemid=36. 2555.

[4] Ismail H., Nasaruddin M.N. and Ishiaku U.S. "White rice husk ash filled natural rubber compounds: the effect of multifunctional additive and silane coupling agents." **Polymer Testing.**, vol. 18, 1999. pp. 287-298

[5] Pattamaprom C., Bandidchutikun K., Sotananan S. and Phrommedetch S. "The Effect of Rubber Modification on Physical Properties of Rice Husk Ash Composites" **Thammasat International Journal of Science and Technology.**, vol. 13, 2008. pp. 36-43

[6] รสิมา จันทร์จำปา. **"การศึกษาเถ้าแกลบดำเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ."** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์,สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.

[7] ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, สำนักเศรษฐกิจการเกษตร. **"สถิติยางไทย."**[Online].

Available :http://www.rubberthai.com/statistic/stat_index.htm. 2557.

[8] พงษ์ธร แซ่อุย. **สารเคมียาง.** กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). 2548.

[9] Ansarifara A., Azharb A., Ibrahima N., Shiaha S.F. and Lawton J.M. "The use of a silanised silica filler to reinforce and crosslink natural rubber."**International Journal of Adhesion & Adhesives.**, vol. 25, 2005. pp. 77-86.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] Costa H.M., Abrantes T.A.S., Nunes R.C.R., Visconte L.L.Y. and Furtado C.R.G. “Design and analysis of experiments in silica filled natural rubber compounds-effect of castor oil.” **Polymer Testing.**, vol. 22, 2003. pp. 769–777

[11] PongprayoonT., YooprasertN., SuwanmalaP. and Hemvichian. K. “Rubber products prepared from silica modified by radiation-induced Admicellar polymerization.” **Radiation Physics and Chemistry.**, vol. 81, 2012. pp. 541–546

[12]พรพรรณ นิธิอุทัย . **ยางและเทคนิคการออกสูตรยาง** .: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตปัตตานี . 2540.

[13] วราภรณ์ ขจรไชยกูล . **เทคโนโลยียางสังเคราะห์** .กรุงเทพฯ : เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรเทคโนโลยียางธรรมชาติ สถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร . 2542.

[14] Robert K. C. **Handbook of SPECIALTY ELASTOMERS.**Boca Raton:Taylor & Francis Group, LLC. 2008.

[15] พงษ์ธรแซ่อุย. **ยางชนิดสมบัติและการใช้งาน .** กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2550.

[16] HI-TECHPOLYMER **“NBR Rubber Products”** [Online]. Available :http://www.hi-techpolymer.com/nbr-rubber-products.htm. 2014

[17] Morton M. **Rubber Technology, 3rd ed.** New York : Van Norstrand Reinhold. 1987

[18] พรพรรณนิธิอุทัย. **สารเคมีสำหรับยาง.** :คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตปัตตานี. 2528.

[19]Luh B.S. and Liu Y. K. **“Rice : Production and Utilization.”**Wesport. Connecticut. : AVI Publishing Co., Inc. USA. 1980.

[20] สำนักพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าว. **“เผยสูตรน้ำข้าวกล้องงอกขึ้นโต๊ะเสวย.”**[Online]. Available :http://erawan.loei.doae.go.th/story/ricekor.pdf. 2555.

[21] กรมควบคุมมลพิษ. **“แกลบวัสดุเหลือใช้ที่ไม่ไร้ประโยชน์.”**[Online]. Available :http://wqm.pcd.go.th/km/images/stories/agriculture/chaff.pdf. 2555.

[22] IshakZ A. M. and Bakar A. A. **“**An investigation on the potential of rice husk ash as fillersforepoxidized natural rubber (ENR)” **Polymer**., vol 31, 1995. pp 259-269

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[23] Scientific Psychic. **“Carbohydrates - Chemical Structure.”**[Online].

Available :http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates2.html. 2012.

[24] อนุชิต กิจสวัสดิ์ “ประโยชน์จากแกลบและเถ้าแกลบ ” **วิทยาศาสตร์สำหรับประชาชน ,** ฉบับที่ 411,2529.

[25] อิทธิพล แจ้งชัด. **เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง .** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง . 2553.

[26] พงษ์ธร แซ่อุย. **“การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมในยาง.”**[online].

Available :http://www.rubbercenter.org/rubbertech/Silica.pdf. 2552.

[27] Sombatsompop N., Wimolmala E. and Sirisinha C. “Fly Ash Particles and Precipitated Silica as Fillers in Rubbers. III. Cure Characteristics and Mechanical and Oil-Resistance Properties of Acrylonitrile–Butadiene Rubber” **Journal of Applied Polymer Science.,** vol. 110, 2008. pp. 2877-2883

[28] Nanopotal. **“Carbon black.”**[Online].

Available :http://nanoportal.gc.ca/default.asp?lang=En&n=64893C1E-1. 2012.

[29]Sae-Oui P.,Rakdee C. and Thanmathorn C. “Use of Rice Husk Ash as Filler in Natural Rubber Vulcanizates: In Comparison with Other Commercial Fillers” **Journal of Applied Polymer Science**., vol83, 2002. pp. 2485–2493

[30]Arayapranee W., Na-Ranong N. and Rempel G. L.“Application of Rice Husk Ash as Fillers in the Natural Rubber Industry” **Journal of Applied Polymer Science.,** vol. 98, 2004. pp. 34–41

[31]เอกชัย วิมลมาลา , ธีระศักดิ์ หมากผิน และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ . “การศึกษาวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางเอสบีอาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่ง โดยใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด Si69 สำหรับปรับปรุงผิวเถ้าลอย” **วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.,** ปีที่29, ฉบับที่ 3, 2549. หน้า353-373

[32]ชุลีพันธ์ พันธุ์เอี่ยม.**“สมบัติทางกลและการทนน้ำมันของยางผสมผงเขม่าดำ/ยางเอ็นบีอาร์/ ยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่เติมด้วยผงซิลิกาเกรดการค้าและผงเถ้าลอย”**วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2552.

[33]วีรยาวรคันธ์, ณรงค์ฤทธิ์สมบัติสมภพ, เอกชัยวิมลมาลาและศิรินทรทองแสง.“การ เสริมแรงของสารประกอบยางธรรมชาติด้วยซิลิกาผสมระหว่างเถ้าลอยและพรีซิพิเทต ซิลิกา” **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี .,**ปีที่ 12, ฉบับที่ 4, 2553. หน้า 9-20

[34]ปิยะภรณ์นิลทุ้ย, ศิริชัยก้านกิ่ง, ณรงค์ฤทธิ์สมบัติสมภพและเอกชัยวิมลมาลา . “การศึกษาเชิงกลพลวัตและพฤติกรรมการคืนกลับตัวทางอิลาสติกของยางเอ็นบีอาร์ที่มีผงเขม่าดำ เป็นสารเสริมแรงร่วมกับสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาสำหรับการใช้งานในระบบไฮดรอลิก” **วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี .,** ปีที่ 35, ฉบับที่ 2, 2555. หน้า 143-156

[35] Wang L. L., Zhang L. Q. and Tian M. “Mechanical and tribological properties of acrylonitrile–butadiene rubber filled with graphite and carbon black.” **Materials and Design.,**vol. 39, 2012. pp. 450–457

[36]นฤมล ศีรประจันทร์, กุลภัสสร แพงพันธุ์และคุณัญญา จันทร์ฉาย. **“การใช้เถ้าปาล์มดำเป็น สารตัวเติมในยางธรรมชาติ”**โครงงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต.สาขาเคมีอุตสาหกรรม, แขนงเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.

[37] American Society for Testing and Materials. “ASTM D1646 :Standard Test Methods for Rubber—Viscosity, Stress Relaxation, and Pre-Vulcanization Characteristics (Mooney Viscometer)”**In Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, USA,** 1993.

[38] American Society for Testing and Materials. “ASTM D2084-11 :Standard Test Method for Rubber Property-Vulcanization Using Oscillating Disk Cure Meter” **In Annual Book of ASTM Standards**, **Philadelphia, USA,** 1993.

[39] American Society for Testing and Materials.“ASTM D395-89 :Standard Test Methods for Rubber Property – Compression Set”**In Annual Book of ASTM Standards**, **Philadelphia, USA,** 1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[40] American Society for Testing and Materials. “ASTM D412 :Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension” ” **In Annual Book of ASTM Standards**, **Philadelphia, USA,** 1993.

[41] American Society for Testing and Materials. “ASTM D624 :Standard Test Method Tear Strength” **In Annual Book of ASTM Standards**, **Philadelphia, USA,** 1993.

[42] American Society for Testing and Materials. “ASTM D2240 :Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness” ” **In Annual Book of ASTM Standards**, **Philadelphia, USA,** 1993.

[43] Cao Z. Q., Wang D. G., Cong C. B., Wang Y. F. and Zhou Q. “Dependence of abrasion behavior on cross-linked heterogeneity in unfilled nitrile rubber” **Tribology International**., vol. 69, 2014. pp. 141-149

[44] ช.วยากรณ์เพ็ชญไพศิษฏ์ , สรัญญาพลอยประดับและปิยะพงศ์เทพกฤษณ์ . “ผลของยางธรรมชาติเหลวดัดแปรในยางคอมพาวด์ที่เติมเถ้าแกลบข้าวดำ ” **NU Science Journal**., ปีที่ 5, ฉบับที่ 1 2551. หน้า 92-107

[45] เชาวน์ ศรีเพชรดี . **“การศึกษาการใช้ซิลิกาเจลขนาดนาโนชนิดมีรูพรุน ที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบเพื่อเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยกระบวนการโซเจล** ”วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต . สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ , ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ , บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2553.

[46] Thongsang S., Sombatsompop N. and Ansarifar A. “Effect of Fly Ash Silica and Precipitated Silica Fillers on the Viscosity, Cure and Viscoelastic Properties of Natural Rubber” **Polymers for Advanced Technologies.**, vol. 19, No. 9, 2008. pp. 1296-1304

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

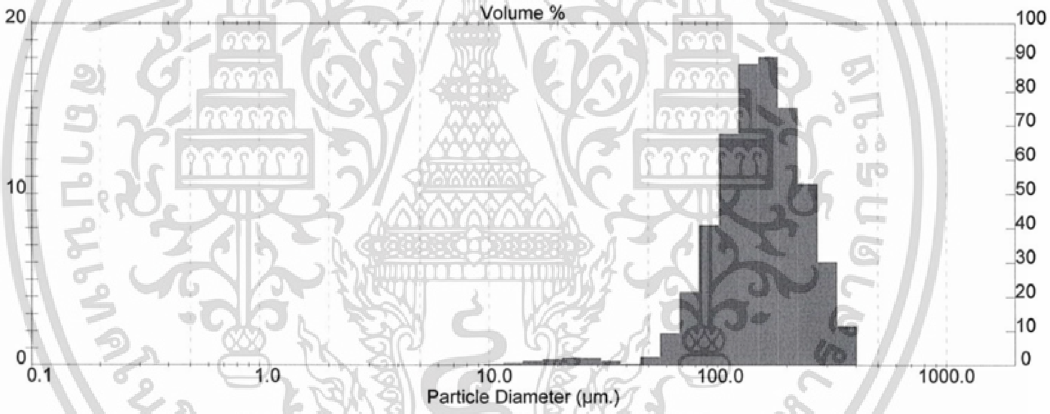
ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเถ้าแกลบดำ

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i 0.10000
Polydisperse model | Volume Result | Focus = 300 mm.

Residual = 0.939 % | Concentration = 0.400 % | Obscuration = 20.27 %
d (0 .5) = 153.82 μm | d (0.1) = 86.53 μm | d (0.9) = 261.60 μm
D [4, 3] = 164.92 μm | Span = 1.14
Sauter Mean (D[3,2]) = 127.70 μm | Mode = 154.81 μm
Specific Surface Area = 0.0470 sq. m. / gm | Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) μm	Result In %	Size (Hi) μm	Result Below %
0.50	0.00	1.32	0.00
1.32	0.00	1.60	0.00
1.60	0.00	1.95	0.00
1.95	0.00	2.38	0.00
2.38	0.00	2.90	0.00
2.90	0.00	3.53	0.00
3.53	0.00	4.30	0.00
4.30	0.00	5.24	0.00
5.24	0.00	6.39	0.00
6.39	0.00	7.78	0.00
7.78	0.00	9.48	0.00
9.48	0.07	11.55	0.07
11.55	0.13	14.08	0.21
14.08	0.24	17.15	0.44
17.15	0.35	20.90	0.79
20.90	0.44	25.46	1.24

Size (Lo) μm	Result In %	Size (Hi) μm	Result Below %
25.46	0.43	31.01	1.67
31.01	0.24	37.79	1.91
37.79	0.09	46.03	1.99
46.03	0.52	56.09	2.51
56.09	1.87	68.33	4.38
68.33	4.31	83.26	8.69
83.26	8.18	101.44	16.86
101.44	13.53	123.59	30.39
123.59	17.62	150.57	48.01
150.57	18.03	183.44	66.04
183.44	15.04	223.51	81.08
223.51	10.58	272.31	91.65
272.31	6.06	331.77	97.71
331.77	2.28	404.21	99.99
404.21	0.01	492.47	100.00
492.47	0.00	600.00	100.00



รูปที่ ก-1 ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของ BRHA(#1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i 0.10000
Polydisperse model

Volume Result

Focus = 300 mm.

Residual = 0.696 %
d (0 .5) = 103.97 µm
D [4, 3] = 116.46 µm
Sauter Mean (D[3,2]) = 86.91 µm
Specific Surface Area = 0.0690 sq. m. / gm

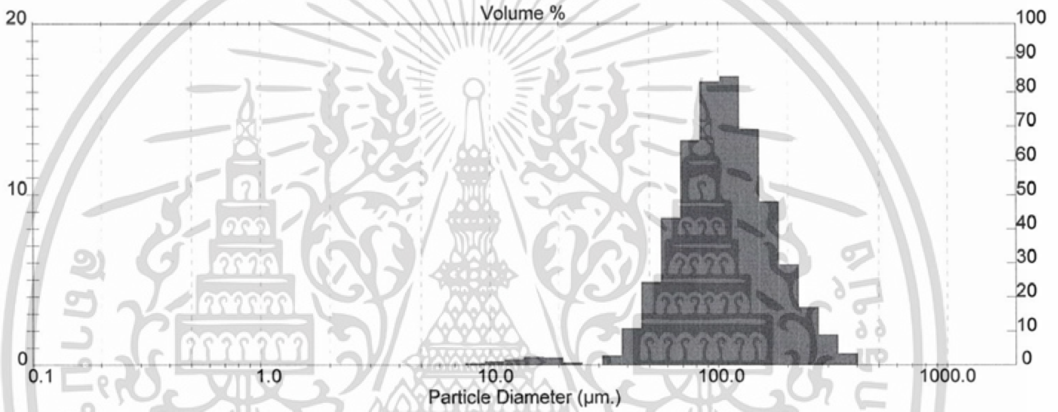
Concentration = 0.293 %
d (0.1) = 56.97 µm
Span = 1.31

Obscuration = 21.69 %
d (0.9) = 192.65 µm

Mode = 104.09 µm
Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.00	1.32	0.00
1.32	0.00	1.60	0.00
1.60	0.00	1.95	0.00
1.95	0.00	2.38	0.00
2.38	0.00	2.90	0.00
2.90	0.00	3.53	0.00
3.53	0.00	4.30	0.00
4.30	0.00	5.24	0.00
5.24	0.00	6.39	0.00
6.39	0.02	7.78	0.02
7.78	0.12	9.48	0.13
9.48	0.25	11.55	0.38
11.55	0.38	14.08	0.76
14.08	0.48	17.15	1.24
17.15	0.44	20.90	1.68
20.90	0.17	25.46	1.84

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
25.46	0.01	31.01	1.85
31.01	0.56	37.79	2.41
37.79	2.18	46.03	4.59
46.03	4.86	56.09	9.45
56.09	8.66	68.33	18.11
68.33	13.15	83.26	31.26
83.26	16.58	101.44	47.84
101.44	16.92	123.59	64.77
123.59	13.82	150.57	78.58
150.57	9.63	183.44	88.21
183.44	5.89	223.51	94.10
223.51	3.37	272.31	97.48
272.31	1.82	331.77	99.30
331.77	0.70	404.21	100.00
404.21	0.00	492.47	100.00
492.47	0.00	600.00	100.00



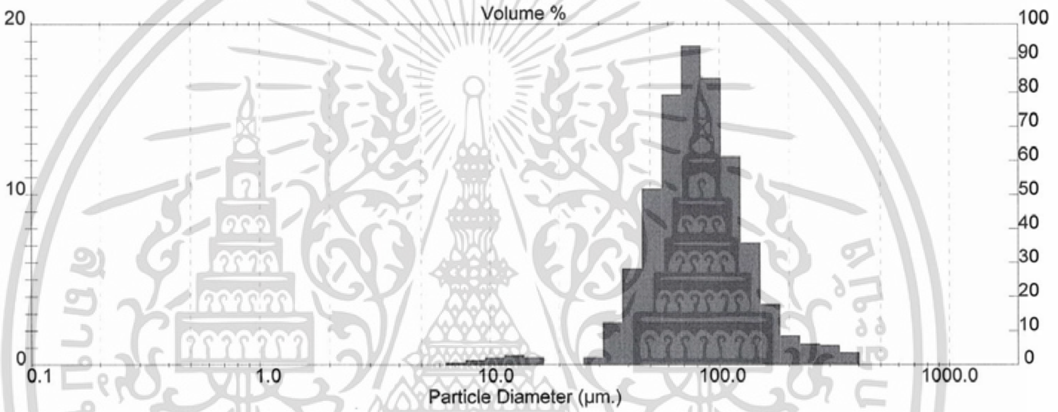
รูปที่ ก-2 ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของ BRHA(#2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i 0.10000
Polydisperse model — Volume Result — Focus = 300 mm.

Residual = 0.607 % — Concentration = 0.176 % — Obscuration = 17.33 %
d (0.5) = 78.66 µm — d (0.1) = 45.38 µm — d (0.9) = 142.76 µm
D [4, 3] = 90.24 µm — Span = 1.24
Sauter Mean (D[3,2]) = 67.22 µm — Mode = 76.47 µm
Specific Surface Area = 0.0893 sq. m. / gm — Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.00	1.32	0.00
1.32	0.00	1.60	0.00
1.60	0.00	1.95	0.00
1.95	0.00	2.38	0.00
2.38	0.00	2.90	0.00
2.90	0.00	3.53	0.00
3.53	0.00	4.30	0.00
4.30	0.00	5.24	0.00
5.24	0.00	6.39	0.00
6.39	0.14	7.78	0.14
7.78	0.29	9.48	0.43
9.48	0.46	11.55	0.89
11.55	0.57	14.08	1.45
14.08	0.44	17.15	1.90
17.15	0.01	20.90	1.91
20.90	0.00	25.46	1.91
25.46	0.45	31.01	2.36
31.01	2.48	37.79	4.84
37.79	5.67	46.03	10.51
46.03	10.31	56.09	20.82
56.09	15.84	68.33	36.66
68.33	18.71	83.26	55.37
83.26	16.83	101.44	72.20
101.44	12.23	123.59	84.43
123.59	7.17	150.57	91.60
150.57	3.56	183.44	95.16
183.44	1.71	223.51	96.87
223.51	1.24	272.31	98.12
272.31	1.16	331.77	99.28
331.77	0.72	404.21	100.00
404.21	0.00	492.47	100.00
492.47	0.00	600.00	100.00



รูปที่ ก-3 ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของ BRHA(#3)

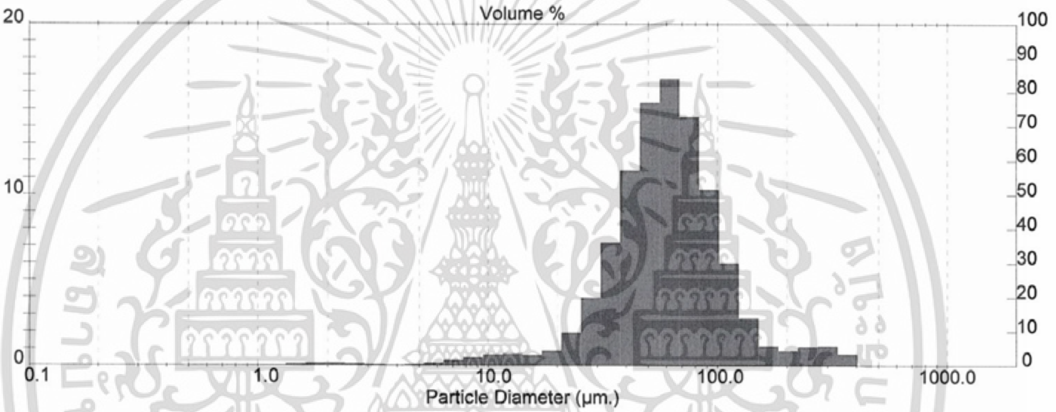
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i 0.10000
Polydisperse model | Volume Result | Focus = 300 mm.

Residual = 0.470 % | Concentration = 0.102 % | Obscuration = 16.82 %
d (0 .5) = 59.77 µm | d (0.1) = 30.34 µm | d (0.9) = 113.68 µm
D [4, 3] = 70.95 µm | Span = 1.39
Sauter Mean (D[3,2]) = 41.28 µm | Mode = 60.65 µm
Specific Surface Area = 0.1453 sq. m. / gm | Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.04	1.32	0.04
1.32	0.11	1.60	0.15
1.60	0.16	1.95	0.31
1.95	0.16	2.38	0.47
2.38	0.13	2.90	0.60
2.90	0.09	3.53	0.69
3.53	0.06	4.30	0.75
4.30	0.09	5.24	0.84
5.24	0.18	6.39	1.02
6.39	0.33	7.78	1.35
7.78	0.51	9.48	1.86
9.48	0.65	11.55	2.51
11.55	0.69	14.08	3.20
14.08	0.64	17.15	3.84
17.15	0.87	20.90	4.71
20.90	1.91	25.46	6.62

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
25.46	3.98	31.01	10.60
31.01	7.18	37.79	17.78
37.79	11.41	46.03	29.20
46.03	15.38	56.09	44.58
56.09	16.76	68.33	61.34
68.33	14.55	83.26	75.88
83.26	10.31	101.44	86.19
101.44	6.01	123.59	92.20
123.59	2.78	150.57	94.99
150.57	1.17	183.44	96.16
183.44	0.87	223.51	97.02
223.51	1.12	272.31	98.15
272.31	1.17	331.77	99.31
331.77	0.68	404.21	100.00
404.21	0.00	492.47	100.00
492.47	0.00	600.00	100.00



รูปที่ ก-4 ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของ BRHA(#4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i 0.10000
Polydisperse model

Volume Result

Focus = 300 mm.

Residual = 1.005 %
d (0.5) = 10.53 µm
D [4, 3] = 13.98 µm
Sauter Mean (D[3,2]) = 6.12 µm
Specific Surface Area = 0.9809 sq. m. / gm

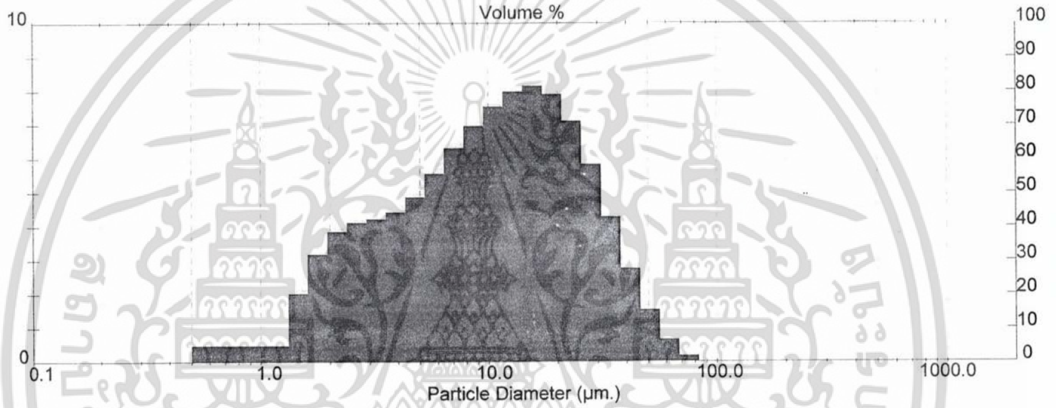
Concentration = 0.020 %
d (0.1) = 2.43 µm
Span = 2.65

Obscuration = 23.06 %
d (0.9) = 30.32 µm

Mode = 15.53 µm
Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.49	1.32	0.49
1.32	2.03	1.60	2.52
1.60	3.18	1.95	5.70
1.95	3.85	2.38	9.56
2.38	4.12	2.90	13.68
2.90	4.23	3.53	17.90
3.53	4.43	4.30	22.33
4.30	4.87	5.24	27.20
5.24	5.56	6.39	32.76
6.39	6.32	7.78	39.08
7.78	6.97	9.48	46.05
9.48	7.55	11.55	53.60
11.55	7.99	14.08	61.58
14.08	8.16	17.15	69.74
17.15	7.91	20.90	77.65
20.90	7.10	25.46	84.75

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
25.46	5.83	31.01	90.59
31.01	4.28	37.79	94.87
37.79	2.75	46.03	97.62
46.03	1.53	56.09	99.15
56.09	0.66	68.33	99.81
68.33	0.18	83.26	99.99
83.26	0.01	101.44	100.00
101.44	0.00	123.59	100.00
123.59	0.00	150.57	100.00
150.57	0.00	183.44	100.00
183.44	0.00	223.51	100.00
223.51	0.00	272.31	100.00
272.31	0.00	331.77	100.00
331.77	0.00	404.21	100.00
404.21	0.00	492.47	100.00
492.47	0.00	600.00	100.00



alvern Instruments Ltd.
alvern, U.K.

MasterSizer X Ver. 1.1a
Serial No. 6209

p.
30 Oct 14 15

รูปที่ ก-5 ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของ BRHA-G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ข-1 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และมอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (M100)

สูตร	**ความแข็งแรงดึง (MPa)**	**เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด**	**มอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (MPa)**	**ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)**
ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69				
BRHA(#4)	1.9±0.1	712±37	0.69±0.01	10.9±0.3
BRHA(#4), S	2.2±0.1	722±34	0.85±0.01	14.3±0.2
BRHA(#4), P	2.2±0.2	699±46	0.76±0.02	11.5±0.2
BRHA(#4), P+S	2.5±0.1	707±34	0.90±0.00	14.9±0.2
ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำ				
BRHA-G	2.2±0.1	819±15	0.77±0.01	11.5±0.4
BRHA(#1), P+S	1.9±0.1	615±26	0.82±0.03	12.4±0.13
BRHA(#2), P+S	2.1±0.1	669±62	0.84±0.02	13.3±0.2
BRHA(#3), P+S	2.3±0.1	709±51	0.87±0.01	14.2±0.2
BRHA(#4), P+S	2.5±0.0	707±34	0.90±0.00	14.9±0.2
BRHA-G, P+S	3.1±0.0	825±18	0.96±0.01	16.8±0.5
ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำ				
20 phr	3.1±0.0	825±15	0.965±0.01	16.8±0.5
40 phr	3.5±0.1	769±9	1.11±0.00	22.0±0.5
60 phr	4.2±0.1	750±10	1.31±0.00	24.2±0.7
80 phr	4.9±0.1	771±18	1.57±0.01	26.1±0.5
100 phr	6.1±0.1	755±1	1.84±0.03	30.2±0.4
120 phr	4.6±0.1	702±11	2.26±0.01	28.3±0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

สูตร	ความแข็งแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด	มอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (MPa)	ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)
ผลของการเปรียบเทียบเถ้าแกลบดำกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ				
Gum (No Filler)	2.2±0.1	804±13	0.63±0.00	10.3±0.6
BRHA-G, P+S	4.1±0.1	750±10	1.31±0.00	24.2±0.7
Calcium Carbonate	2.9±0.1	791±29	0.77±0.00	11.2±0.2
Silica, P+S	21.1±0.4	1560±7	1.58±0.01	98.1±1.9
Carbon Black	22.2±0.2	1104±18	1.79±0.02	71.2±0.8

ตารางที่ ข-2 ความแข็งกด และการเสียรูปถาวรหลังการกดอัด

สูตร	ความแข็งกด (Shore A)	การเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (%)
ผลของการปรับปรุงเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69		
BRHA(#4)	41±0	28±2
BRHA(#4), S	41±1	25±1
BRHA(#4), P	41±1	25±1
BRHA(#4), P+S	43±1	22±2
ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำ		
BRHA(#1), P+S	43±0	34±1
BRHA(#2), P+S	44±1	29±0
BRHA(#3), P+S	43±0	29±1
BRHA(#4), P+S	43±1	22±2
BRHA-G, P+S	43±0	22±3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 (ต่อ)

สูตร	ความแข็งกด (Shore A)	การเสียรูปถาวรหลังการกดอัด (%)
ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำ		
20 phr	43±0	22±2
40 phr	47±1	33±1
60 phr	52±1	39±1
80 phr	62±2	61±1
100 phr	68±2	66±1
120 phr	72±2	71±1
ผลของการเปรียบเทียบเถ้าแกลบดำกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ		
Gum (No Filler)	38±1	24±4
BRHA-G, P+S	52±1	39±1
Calcium Carbonate	43±1	41±2
Silica, P+S	67±1	42±2
Carbon Black	63±1	38±3

ตารางที่ ข-3 ค่าการสึกหรอ

สูตร	ปริมาตรสูญเสีย (mm^3)
Gum (No Filler)	25±4
BRHA-G, P+S	335±0
Calcium Carbonate	186±0
Silica, P+S	92±1
Carbon Black	32±6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การทดสอบการบวมตัว

วิธีการคำนวณการบวมตัวของยางผสมสูตรในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (Solvent swelling method)

เปอร์เซ็นต์การบวมตัวสามารถคำนวณได้จากสูตร

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

เมื่อ S = เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยางผสมสูตร

W_0 = น้ำหนักของยางผสมสูตรก่อนแช่ในตัวทำละลาย

W_i = น้ำหนักของยางผสมสูตรหลังแช่ในตัวทำละลาย

ตัวอย่างการคำนวณ

- สูตรที่ 1 BRHA(#4) ชิ้นที่ 1

จากการทดลองจะได้

น้ำหนักของยางผสมสูตรก่อนแช่ในตัวทำละลาย เท่ากับ 0.9569 กรัม

น้ำหนักของยางผสมสูตรหลังแช่ในตัวทำละลาย เท่ากับ 3.2754 กรัม

$$S = \frac{3.2754 - 0.9569}{0.9569} \times 100 = 242.29\ \%$$

ผลการทดลองอื่นๆแสดงในตารางที่ ข -1

ตารางที่ ค-1 แสดงน้ำหนักก่อนและหลังแช่ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน เป็นเวลา 3 วัน และเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยางผสมสูตร

สูตร	ชิ้น	น้ำหนักก่อนแช่ตัวทำละลาย (g)	น้ำหนักหลังแช่ตัวทำละลาย (g)	การบวมตัว (%)
BRHA(#4)	1	0.9569	3.2421	238
	2	0.9509	3.2152	238
	3	0.9079	3.0603	237
	4	0.9332	3.1520	237

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

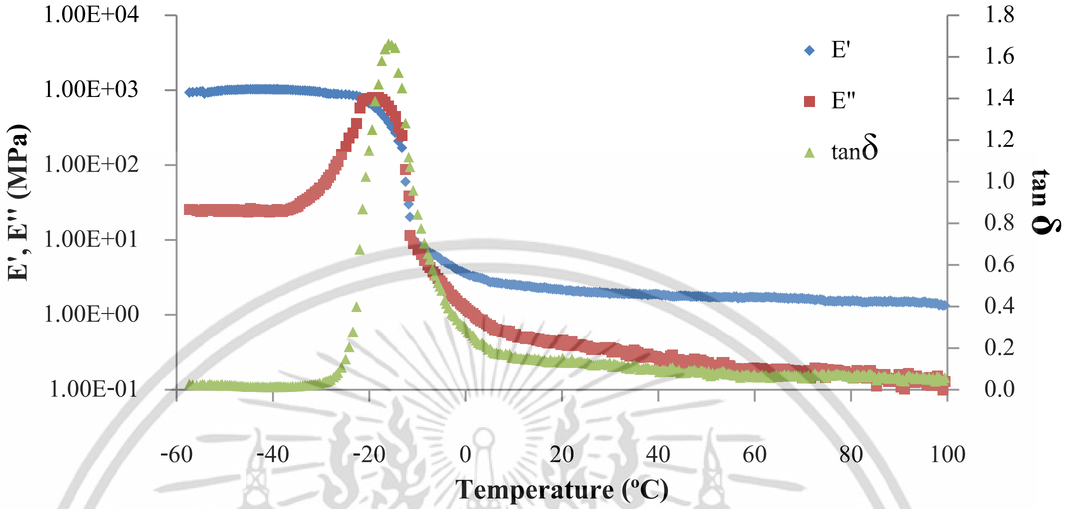
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

สูตร	ชิ้น	น้ำหนักก่อนแช่ตัวทำละลาย (g)	น้ำหนักหลังแช่ตัวทำละลาย (g)	การบวมตัว (%)
BRHA(#4)	5	0.9153	3.0960	238
BRHA(#4), S	1	0.9364	3.0051	220
	2	0.9490	3.0479	221
	3	0.9105	2.9316	221
	4	0.9253	2.9612	220
	5	0.9239	2.9820	222
BRHA(#4), P	1	0.9212	3.0193	227
	2	0.9372	3.0652	227
	3	0.9690	3.1732	227
	4	0.9347	3.0525	226
	5	0.9451	3.0993	227
BRHA(#4), P+S	1	0.9270	2.8961	212
	2	0.9326	2.9353	214
	3	0.9518	2.9857	213
	4	0.9244	2.9101	214
	5	0.9381	2.9102	210

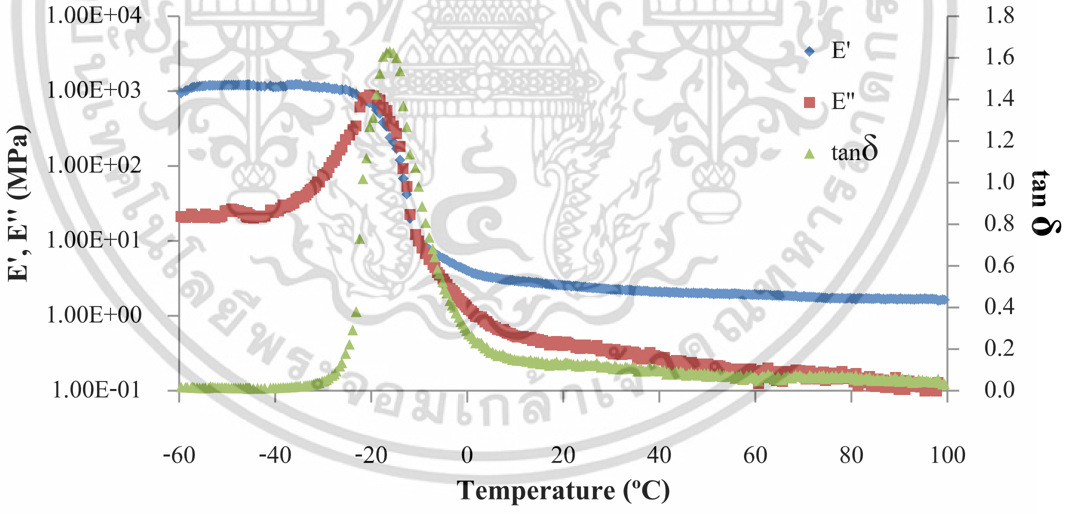
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัต

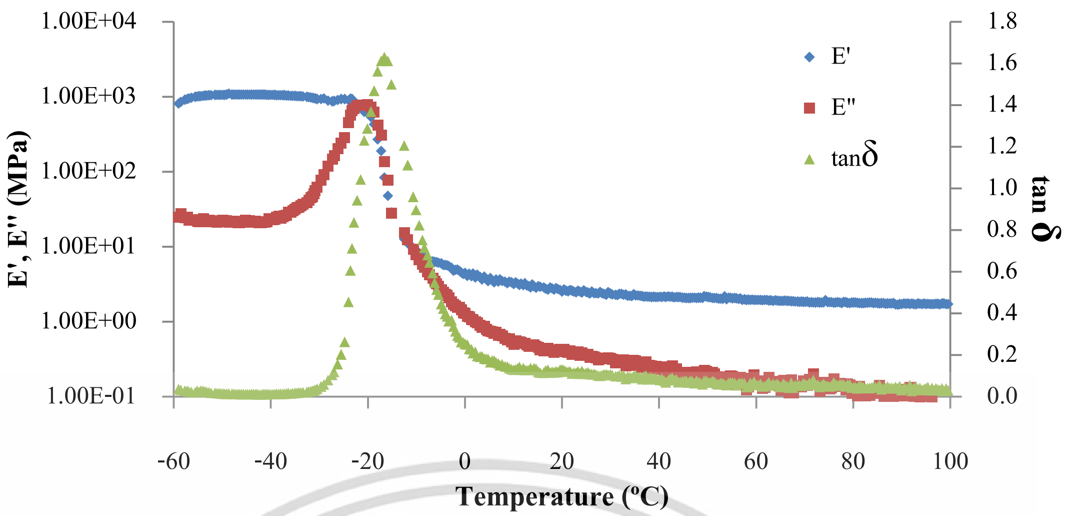


รูปที่ ง-1 BRHA(#4) 20 phr

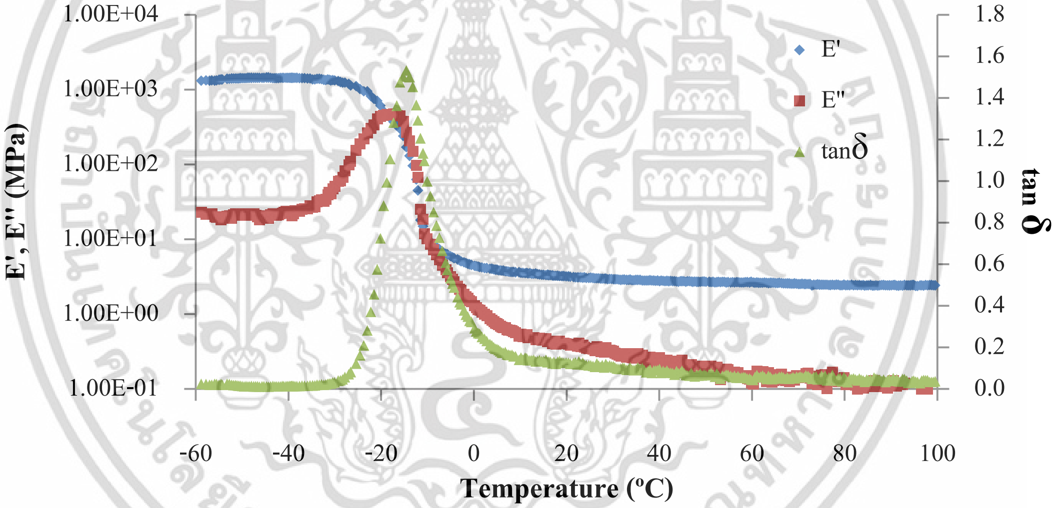


รูปที่ ง-2 BRHA(#4), S 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

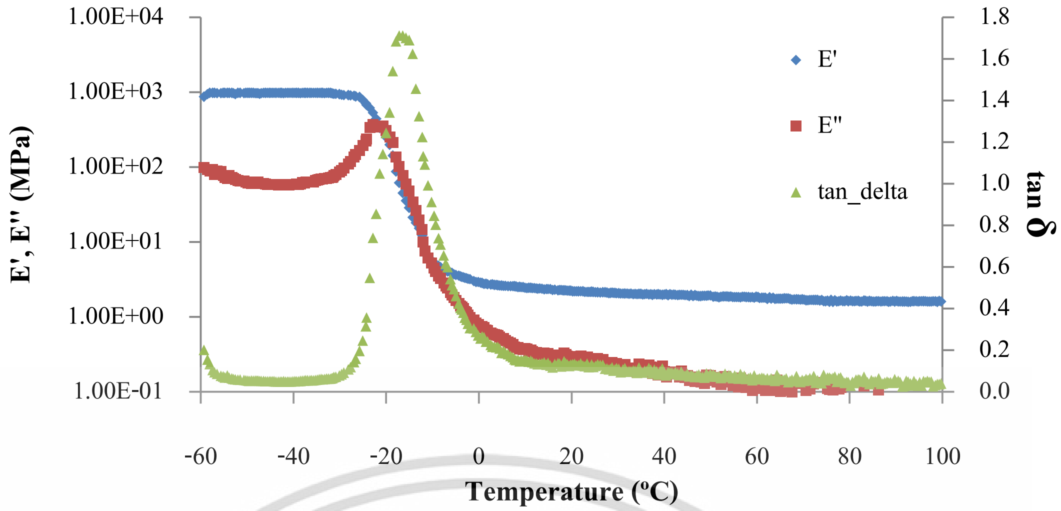


รูปที่ ง-3 BRHA(#4), P 20 phr

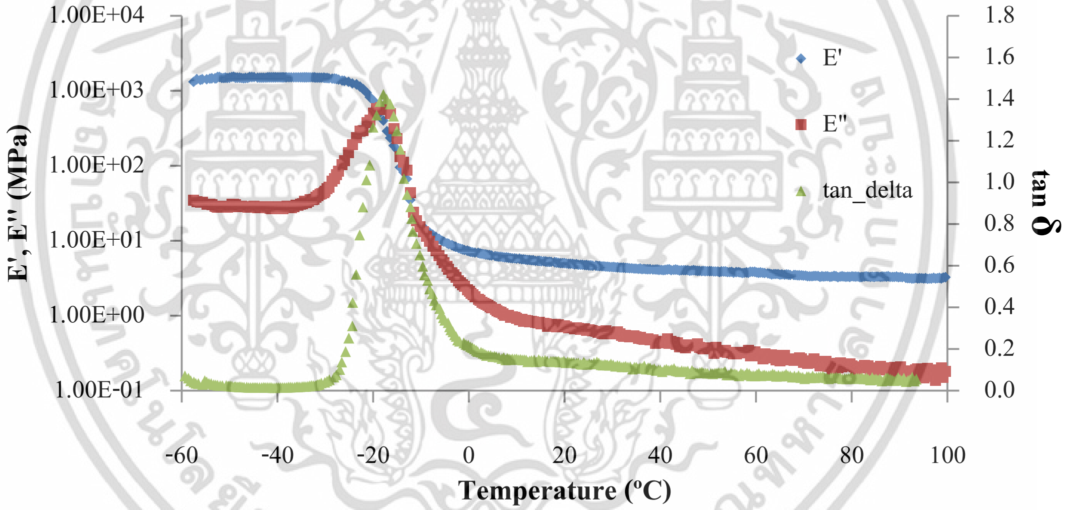


รูปที่ ง-4 BRHA(#4), P+S 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

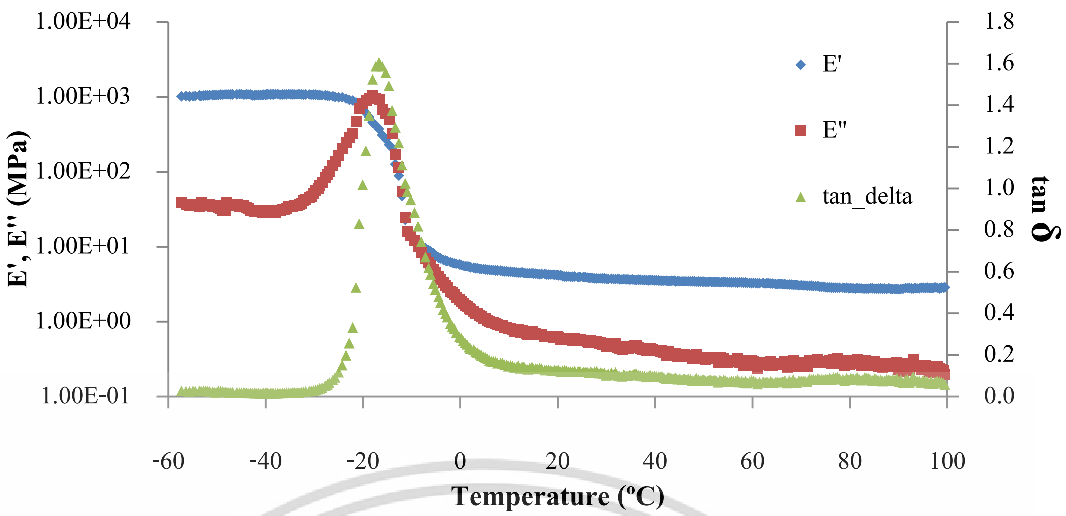


รูปที่ ง-5 Gum (No filler)

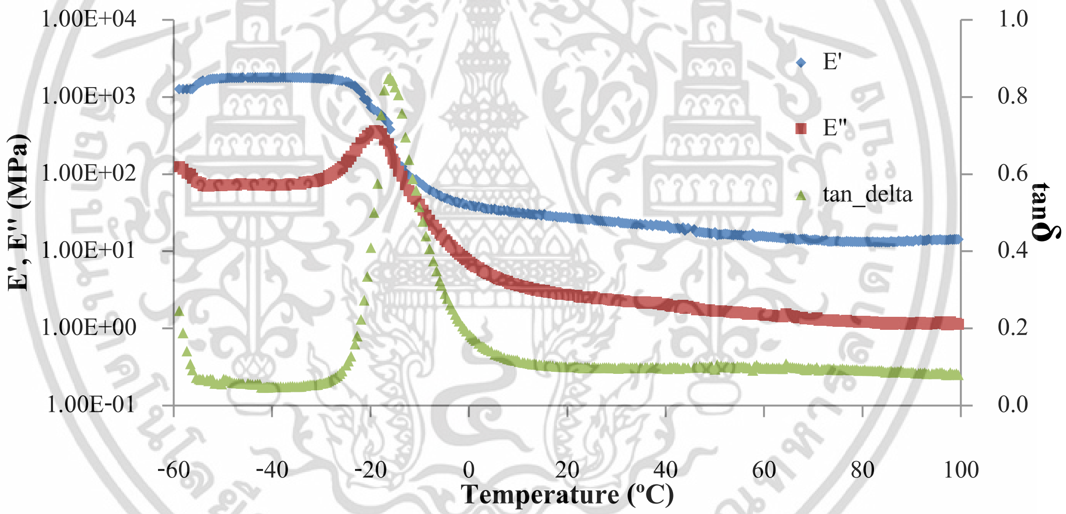


รูปที่ ง-6 BRHA-G, P+S 60 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

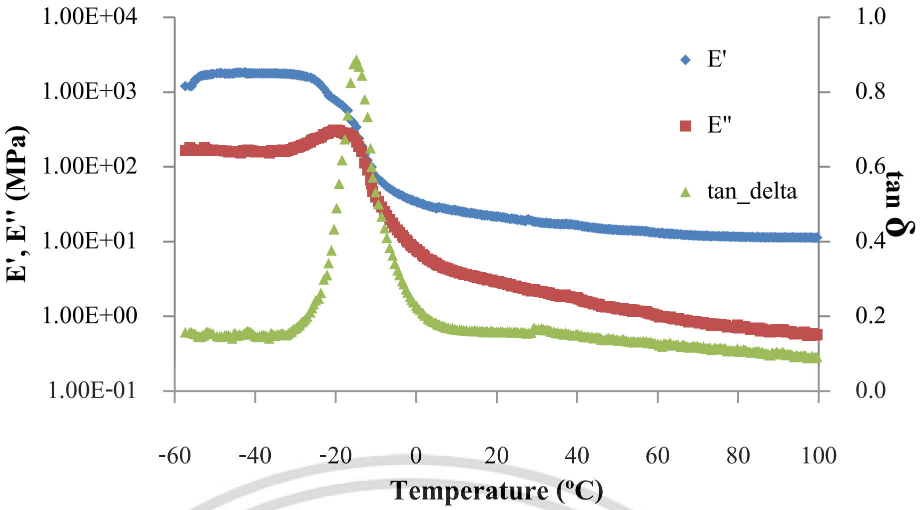


รูปที่ ง-7 CC 60 phr



รูปที่ ง-8 Si, P+S 60 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-9 CB 60 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณราคาต้นทุนวัตถุดิบ

ตารางที่ จ-1ราคาวัตถุดิบต่อน้ำหนักยางผสมสูตร 1 kg

สารเคมี	ราคาต่อหน่วย* (บาท/kg)	Gum		BRHA-G, P+S		CC		Si, P+S		CB	
		ปริมาณที่ใช้ (g)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (g)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (g)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (g)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (g)	เป็นเงิน (บาท)
NBR	85	761.61	64.74	509.94	43.35	522.74	44.43	509.94	43.35	522.74	44.43
TMQ	90	7.62	0.69	5.10	0.46	5.23	0.47	5.10	0.46	5.23	0.47
Parlenox W	68	152.32	10.36	101.99	6.94	104.55	7.11	101.99	6.94	104.55	7.11
BRHA-G	0.4	-	-	305.97	0.12	-	-	-	-	-	-
calcium carbonate	5.6	-	-	-	-	313.64	1.76	-	-	-	-
PrecipitatedSilica	25	-	-	-	-	-	-	305.97	7.65	-	-
Carbon black	50	-	-	-	-	-	-	-	-	313.64	15.68
Si-69	105.00	-	-	9.18	0.96	-	-	9.18	0.96	-	-

<u>หมายเหตุ</u>:* คำนวณจากราคา โดยประมาณ ณ เดือน ธันวาคม 2557 และราคานี้ไม่รวมต้นทุนของเครื่องจักรการผลิต ค่าแรง ค่าไฟฟ้า และค่าเสื่อมของ เครื่องจักร

ตารางที่ จ-1(ต่อ)

สารเคมี	ราคาต่อหน่วย* (บาท/kg)	Gum		BRHA-G, P+S		CC		Si, P+S		CB	
		ปริมาณที่ใช้ (g)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (g)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (g)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (g)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (g)	เป็นเงิน (บาท)
PEG	67.00	-	-	15.30	1.02	-	-	15.30	1.02	-	-
Zinc Oxide	35.00	38.08	1.33	25.50	0.89	26.14	0.91	25.50	0.89	26.14	0.91
Sulfur	16.00	7.62	0.12	5.10	0.08	5.23	0.08	5.10	0.08	5.23	0.08
CBS	150.00	7.62	1.14	5.10	0.76	5.23	0.78	5.10	0.76	5.23	0.78
MTBS	170.00	7.62	1.29	5.10	0.87	5.23	0.89	5.10	0.87	5.23	0.89
TMTD	126.00	2.28	0.29	1.53	0.19	1.57	0.20	1.53	0.19	1.57	0.20
ราคาวัตถุดิบต่อ 1 กิโลกรัม (บาท)		รวมเป็นเงิน	80.49	รวมเป็นเงิน	56.01	รวมเป็นเงิน	57.00	รวมเป็นเงิน	63.53	รวมเป็นเงิน	70.93

<u>หมายเหตุ</u>: * คำนวณจากราคา โดยประมาณ ณ เดือน ธันวาคม 2557 และราคานี้ไม่รวมต้นทุนของเครื่องจักรการผลิต ค่าแรง ค่าไฟฟ้า และค่าเสื่อมของ เครื่องจักร

ตารางที่ จ-2ราคาวัตถุดิบต่อน้ำหนักยางผสมสูตร 1 m^3

สารเคมี	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ราคาต่อหน่วย* (บาท/kg)	Gum		BRHA-G, P+S		CC		Si, P+S		CB	
			ปริมาณที่ใช้ (kg)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (kg)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (kg)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (kg)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (kg)	เป็นเงิน (บาท)
NBR	0.99	85	801.15	68,098.16	615.32	52,302.29	680.08	57,806.59	639.16	54,328.31	632.30	53,745.37
TMQ	1.05	90	8.01	721.04	6.15	553.79	6.80	612.07	6.39	575.24	6.32	569.07
Parlenox W	1.15	68	160.23	10,895.71	123.06	8,368.37	136.02	9,249.06	127.83	8,692.53	126.46	8,599.26
BRHA-G	1.80	0.4	-	-	369.19	147.68	-	-	-	-	-	-
calcium carbonate	2.70	5.6	-	-	-	-	408.05	2,285.06	-	-	-	-
PrecipitatedSilica	2.20	25	-	-	-	-	-	-	383.49	9,587.35	-	-
Carbon black	1.80	50	-	-	-	-	-	-	-	-	379.38	18,968.95
Si-69	1.10	105.00	-	-	11.08	1,162.96	-	-	11.50	1,208.01	-	-
Zinc Oxide	5.60	35.00	40.06	1,402.02	30.77	1,076.81	34.00	1,190.14	31.96	1,118.52	31.61	1,106.52
Stearic acid	0.85	35.00	16.02	560.81	12.31	430.72	13.60	476.05	12.78	447.41	12.65	442.61

หมายเหตุ: * คำนวณจากราคา โดยประมาณ ณ เดือน ธันวาคม 2557 และราคานี้ไม่รวมต้นทุนของเครื่องจักรการผลิต ค่าแรง ค่าไฟฟ้า และค่าเสื่อมของ เครื่องจักร

ตารางที่ จ-2(ต่อ)

สารเคมี	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ราคาต่อหน่วย* (บาท/kg)	Gum		BRHA-G, P+S		CC		Si, P+S		CB	
			ปริมาณที่ใช้ (kg)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (kg)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (kg)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (kg)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (kg)	เป็นเงิน (บาท)
Sulfur	2.10	16.00	8.01	128.18	6.15	98.45	6.80	108.81	6.39	102.27	6.32	101.17
CBS	1.34	150.00	8.01	1,201.73	6.15	922.98	6.80	1,020.12	6.39	958.73	6.32	948.45
MTBS	1.27	170.00	8.01	1,361.96	6.15	1,046.05	6.80	1,156.13	6.39	1,086.57	6.32	1,074.91
TMTD	1.43	126.00	2.40	302.84	1.85	232.59	2.04	257.07	1.92	241.60	1.90	239.01
ราคาวัตถุดิบต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร(บาท)			รวมเป็นเงิน	84,672.45	รวมเป็นเงิน	67,579.48	รวมเป็นเงิน	74,161.10	รวมเป็นเงิน	79,631.24	รวมเป็นเงิน	85,795.32

หมายเหตุ:* คำนวณจากราคา โดยประมาณ ณ เดือน ธันวาคม 2557 และราคานี้ไม่รวมต้นทุนของเครื่องจักรการผลิต ค่าแรง ค่าไฟฟ้า และค่าเสื่อมของ เครื่องจักร

ภาคผนวก ฉ

ขนาดตะแกรงร่อน

ตารางที่ ฉ-1 ขนาดช่องเปิดของตะแกรงร่อน

Mesh number	ขนาดช่องเปิด (Opening)		
	mm	μm	in
60	0.25	250	0.0098
65	0.21	210	0.0083
80	0.177	177	0.007
100	0.149	149	0.0059
115	0.125	125	0.0049
150	0.105	105	0.0041
170	0.088	88	0.0035
200	0.074	74	0.0029
250	0.063	63	0.0025
270	0.053	53	0.0021
325	0.044	44	0.0017
400	0.037	37	0.0015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ–สกุล นาย เดชาธร ฉันทรักษ์

วัน เดือน ปีเกิด 3 มกราคม 2532

ที่อยู่ 67/254 หมู่ 3 ตำบล หลักหก อำเภอ เมืองปทุมธานี

จังหวัด ปทุมธานี 12000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2554 วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัย

พ.ศ. 2557 การศึกษาเถ้าแกลบดำเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์

Study of Black Rice Husk Ash (BRHA) as filler in Nitrile rubber

นำเสนอผลงานในงานการประชุมทางวิชาการ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่6

ระหว่างวันที่20-21 มีนาคม 2557 ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้