

การใช้น้ำมันพืชและน้ำมันสังเคราะห์เป็นสารเติมแต่งขี้กบ

สำหรับยางธรรมชาติ

APPLICATION OF UNMODIFIED AND MODIFIED VEGETABLE OILS  
AS BROADADDITIVES FOR NATURAL RUBBER

พัทธเรศย์ กาศวงษ์พรณ์

PATTAREEYA KASAWANGPORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ที่ส่งไปขอรับปริญญา  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเคมี  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-SC-M-014-059

การใช้น้ำมันพืชและน้ำมันพืชดัดแปรเป็นสารเติมแต่งชีวภาพ  
สำหรับยางธรรมชาติ

APPLICATION OF UNMODIFIED AND MODIFIED VEGETABLE OILS  
AS BIOADDITIVES FOR NATURAL RUBBER

ภัทรียา เอื้อสว่างพร  
PATTAREEYA UASAWANGPORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2558  
KMITL-2015-SC-M-014-059

APPLICATION OF UNMODIFIED AND MODIFIED VEGETABLE OILS  
AS BIOADDITIVES FOR NATURAL RUBBER

PATTAREEYA UASAWANGPORN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015  
KMITL-2015-SC-M-014-059

COPYRIGHT 2015

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การใช้น้ำมันพืชและน้ำมันพืชดัดแปรเป็นสารเติมแต่งชีวภาพสำหรับยางธรรมชาติ” (APPLICATION OF UNMODIFIED AND MODIFIED VEGETABLE OILS AS BIOADDITIVES FOR NATURAL RUBBER)

ชื่อนักศึกษา นางสาวภัทริยา เอื้อสว่างพร

รหัสประจำตัว 56605040

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์)

ภาควิชา เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม (ถ้ามี) -

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง)	
ดร.นุชนาฏ ธีระนอง ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ 1 ตุลาคม พ.ศ.2558 เวลา 13.00-16.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง 308 อาคารปฏิบัติการใหม่ ชั้น 3

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุชนิ ธนะบริพัฒน์)  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
วันที่ 9 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้น้ำมันพืชและน้ำมันพืชดัดแปรเป็นสารเติมแต่งชีวภาพสำหรับ  
ยางธรรมชาติ

ชื่อนักศึกษา

ภัทธิยา เอื้อสว่างพร

รหัสประจำตัว

56605040

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)

ภาควิชา

เคมี

พ.ศ.

2558

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

### บทคัดย่อ

ประเทศไทยอุดมสมบูรณ์ด้วยน้ำมันพืชมากมายหลายชนิดที่มีศักยภาพในการใช้เป็นสารเติมแต่งชีวภาพสำหรับพอลิเมอร์ที่มีใช้ไม่หมดสิ้น งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้น้ำมันพืชเป็นสารเติมแต่งชีวภาพสำหรับอุตสาหกรรมยาง เช่น สารหล่อลื่นและสารช่วยกระบวนการผลิต เพื่อใช้แทนน้ำมันอะโรมาติกที่มีสารก่อมะเร็งพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาแนวเปรียบเทียบยางธรรมชาติ (STR-5L) ผสมซิลิกากับน้ำมันอะโรมาติก เปรียบเทียบกับน้ำมันพืช ตอนแรกเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำมันพืชชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำมันปาล์ม (PO), น้ำมันถั่วเหลือง (SBO), น้ำมันทานตะวัน (SFO), น้ำมันรำข้าว (RBO), น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) และน้ำมันส้ม (OO) ทำการผสมอย่างด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) โดยควบคุมอัตราส่วนสารตัวเติมต่อน้ำมันคงที่ที่ 50 : 5 phr จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลพลวัต และสัญญาณวิทยา โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยาง ได้แก่ ชนิดของน้ำมัน ลำดับการผสมซิลิกา การเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และชนิดของสารตัวเติมซิลิกาและเขม่าดำ จากการทดลองพบว่า น้ำมันพืชทุกชนิด ยกเว้น CNSL สามารถใช้เป็นน้ำมันช่วยกระบวนการผลิตได้โดยไม่ทำให้สมบัติของยางแตกต่างกันไปมาก พบว่า CNSL เกิดการหน่วงการเชื่อมโยงเทียบกับน้ำมันชนิดอื่น การเติม PEG ส่งผลให้ลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการไม่เติม PEG ตอนต่อไปเป็นการศึกษาผลของการปรับปรุงน้ำมันพืชที่มีต่อสมบัติของยาง ได้แก่ น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกซิไดซ์ (EPO) น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิออล (PPO) น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกซิไดซ์ (ESBO) และน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต (DCNSL) จากการทดลองพบว่า การปรับปรุงส่งผลเล็กน้อยต่อลักษณะการเชื่อมโยง แต่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยต่อสมบัติของยาง อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของยางที่ใช้น้ำมันชนิดต่างๆ ไม่ต่างกัน ยางที่ใช้น้ำมัน PPO และ ESBO แสดงค่ามอดูลัสสูญเสียสูงสุด การใช้น้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มดัดแปรในยางผสมเขม่าดำเป็นสารตัวเติมส่งผลแนวโน้มเดียวกันกับยางผสมซิลิกา การประมาณค่าสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ของยางที่ใช้น้ำมันปาล์มพบว่ามีค่าน้อยกว่าน้ำมันอะโรมาติก และเกณฑ์มาตรฐานยุโรป (REACH) อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่าน้ำมันพืชบางชนิด เช่น น้ำมันปาล์ม มีศักยภาพที่จะใช้ทดแทนน้ำมันอะโรมาติกในการผลิตเชิงพาณิชย์ในอุตสาหกรรมยาง

คำสำคัญ : น้ำมันพืช, น้ำมันพืชดัดแปร, ยางธรรมชาติ, สารเติมแต่งชีวภาพ

<b>Thesis Title</b>	Applications of Unmodified and Modified Vegetable Oils as Bioadditives for Natural Rubber
<b>Student Name</b>	Miss Pattareeya Uasawangporn
<b>Student ID</b>	56605040
<b>Degree</b>	Master of Science (Polymer Technology)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Year</b>	2015
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud

## ABSTRACT

Vegetable oils (VOs) in Thailand are naturally abundant with high potential to be used as renewable bioadditives for polymers. In this work, some VOs were studied as bioadditives, such as, lubricants and processing aids in rubber industry in order to replace conventional petroleum-based aromatic oil containing carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Comparative study between silica filled natural rubber (STR-5L) compounds with aromatic oil and VOs were carried out. First, feasibility tests of some VOs, i.e., palm oil (PO), soybean oil (SBO), sunflower oil (SFO), rice bran oil (RBO), cashew nut shell liquid (CNSL), and orange oil (OO) were studied. Rubber samples were compounded with a fixed filler/oil ratio (50/5 phr) by using an internal mixer. Rubber compounds were tested for their properties, e.g., cure characteristics, physical, mechanical, dynamic and morphological properties. Factors affecting rubber properties were studied including types of oils, order of silica mixing, polyethylene-glycol (PEG) loading and types of fillers (silica and carbon black). It was found that those oils except CNSL could be used as processing oils without any adverse effects on vulcanizate properties compared to the aromatic oil. CNSL showed delayed cure time as compared with other oils. Compounds with PEG showed good cure characteristics and mechanical properties. Next, effects of modified vegetable oils on rubber properties were studied, i.e., epoxidized palm oil (EPO), polyol palm oil (PPO), epoxidized soybean oil (ESBO), and decarboxylated cashew nut shell liquid (DCNSL). It was found that modification of oils changed cure behaviors slightly, but showed insignificant effects on rubber properties.  $T_g$  of rubber vulcanizates with different oils was unchanged. Rubbers with PPO and ESBO showed the highest loss modulus. Using PO and EPO in carbon black filled NR compounds had similar trends with silica filled NR compounds. Evaluation of PAH contents in PO was lower than those of aromatic oil and EU REACH standard. It can be concluded that some VOs, e.g. PO, showed high potentials to replace aromatic oil in rubber industries.

**Keywords :** Bioadditives, Natural rubber, Modified and Unmodified vegetable oils

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อธิพิล แจ่มชัด อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษาและเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มานี ชัยศุกกิจสินธ์ และ ผศ.ดร. ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหาเกี่ยวกับงานวิจัยและเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.นุชนาฏ ญ ระนอง ผู้เชี่ยวชาญด้านผลิตภัณฑ์เกษตร กรมวิชาการเกษตร ที่ได้ให้คำปรึกษา และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหาเกี่ยวกับงานวิจัยและเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานและเจ้าหน้าที่กลุ่มอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตรทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำแนะนำและคำปรึกษา เสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา คอยช่วยเหลือในการบดผสมยาง ด้านการทดสอบ และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณกองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร ที่ให้การอนุเคราะห์ในการทดสอบน้ำมันที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตรที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการเรียนปริญญาโทครั้งนี้  
สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่สาว น้องชายและบุคคลในครอบครัว ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกๆ ด้านและให้กำลังใจผู้วิจัยมาโดยตลอด

นางสาวภัทริยา เอื้อสว่างพร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>6</b>
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubbers, NR) .....	6
2.2 สารตัวเติม (Fillers) .....	7
2.2.1 เขม่าดำ (Carbon black) .....	7
2.2.2 ซิลิกา (Silica) .....	8
2.3 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) .....	10
2.3.1 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) .....	10
2.3.1.1 สารช่วยทำให้ยางนิ่ม โดยทางเคมี (Chemical plasticizer) .....	10
2.3.1.2 สารช่วยทำให้ยางนิ่มโดยทางกายภาพ (Physical plasticizer) .....	10
2.3.2 สารหล่อลื่น (Lubricants) .....	11
2.4 การตรวจสอบสมบัติของน้ำมัน .....	13
2.5 การเลือกน้ำมันกับสมบัติของน้ำมันที่มีผลต่อยาง .....	15
2.5.1 ปัจจัยโครงสร้างของน้ำมันที่มีผลต่อสมบัติของสารช่วยกระบวนการผลิต .....	15
2.5.2 ผลของน้ำมันต่อสมบัติของยาง .....	16
2.5.2.1 ผลของน้ำมันที่มีต่อยางที่ไม่เชื่อมโยง .....	16
2.5.2.2 ผลของน้ำมันที่มีต่อยางที่เชื่อมโยง .....	17
2.6 น้ำมันพืช (Vegetable Oils, VOs) .....	18
2.6.1 น้ำมันปาล์ม (Palm oil, PO) .....	19
2.6.1.1 น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxidized palm oil, EPO) และ น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxidized soybean oil, ESBO) .....	20
2.6.1.2 น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิโออล (Polyol palm oil, PPO) .....	20
2.6.2 น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil, SBO) .....	21
2.6.3 น้ำมันทานตะวัน (Sunflower oil, SFO) .....	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.4 น้ำมันรำข้าว (Rice bran oil, RBO).....	22
2.6.5 น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid) .....	23
2.6.5.1 น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตัดแปรดีคาร์บอกซิเลต (Decarboxylated cashew nut shell liquid, DCNSL).....	23
2.6.6 น้ำมันส้ม (Orange oil, OO).....	24
2.7 การผสมยาง (Rubber compounding).....	25
2.7.1 กระบวนการผลิต (Processing).....	26
2.7.2 การผสมยางกับสารเคมี (Mixing).....	27
2.7.3 ขั้นตอนการบดผสม (Mixing step).....	28
2.8 การทดสอบสมบัติของยาง.....	28
2.8.1 การทดสอบคุณภาพของยางดิบ .....	28
2.8.2 การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต .....	29
2.8.3 การทดสอบสมบัติของยางคงรูป.....	31
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	33
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b> .....	<b>36</b>
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ .....	36
3.2 วิธีการทดลอง .....	38
3.2.1 การวิเคราะห์น้ำมันธรรมชาติ .....	38
3.2.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยาง.....	38
3.2.2.1 ศึกษาผลของชนิดน้ำมันพืช.....	38
3.2.2.2 ศึกษาลำดับการผสมซิลิกาและการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)	38
3.2.2.3 ศึกษาผลของน้ำมันพืชตัดแปร.....	38
3.2.2.4 ศึกษาผลของสารตัวเติม .....	39
3.2.3 การศึกษาปริมาณค่าสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs).....	48
3.2.4 การวิเคราะห์ต้นทุน .....	48
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b> .....	<b>49</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลและสมบัติบางประการของน้ำมัน.....	50
4.1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมัน .....	50
4.1.2 การศึกษาสมบัติของน้ำมันพืช.....	54
4.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีต่อสมบัติของยาง.....	56
4.2.1 การศึกษาผลของชนิดน้ำมันพืช.....	56
4.2.1.1 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันพืชชนิดต่างๆ ....	56
4.2.1.2 สมบัติของการไหลและสมบัติทางกายภาพของยางที่ใช้ น้ำมันพืช ชนิดต่างๆ.....	59

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ น้ำมันพืชชนิดต่างๆ .....	61
4.2.1.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางที่ใช้ น้ำมันพืชชนิดต่างๆ .....	66
4.2.2 การศึกษาลำดับการผสมซิลิกาและการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG).....	68
4.2.2.1 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ที่มีลำดับการผสมซิลิกาและ การเติม PEG ที่ต่างกัน .....	69
4.2.2.2 สมบัติของการไหลและพลังงานขณะผสมของยางคอมพาวด์ที่มี ลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน .....	71
4.2.2.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่มีลำดับการผสม ซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน .....	73
4.2.3 การศึกษาผลของน้ำมันพืชตัดแปร .....	77
4.2.3.1 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันพืชตัดแปร .....	77
4.2.3.2 สมบัติของการไหลและสมบัติทางกายภาพของยางที่ใช้ น้ำมันพืช ตัดแปร .....	80
4.2.3.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ น้ำมันพืชตัดแปร .	82
4.2.3.4 สมบัติการกระดอน ความร้อนสะสมในยาง และการยุบตัวเนื่องจาก แรงอัดของยางที่ใช้ น้ำมันพืชตัดแปร .....	86
4.2.3.5 สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยางที่ใช้ น้ำมันพืชตัดแปร ..	89
4.2.3.6 สัณฐานวิทยาของยางที่ใช้ น้ำมันพืชตัดแปร .....	90
4.2.3.7 สมบัติเชิงกลพลวัตของยางที่ใช้ น้ำมันพืชตัดแปร .....	92
4.2.4 การศึกษาผลของน้ำมันพืชในสารตัวเติมที่ต่างกัน .....	96
4.2.4.1 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	97
4.2.4.2 สมบัติของการไหลและสมบัติทางกายภาพของยางที่ใช้สารตัวเติม ต่างกัน .....	99
4.2.4.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน	101
4.2.4.4 สมบัติการกระดอน ความร้อนสะสมในยาง และการยุบตัวเนื่องจาก แรงอัดของยางที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	104
4.2.4.5 สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยางที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน .	106
4.2.4.6 สัณฐานวิทยาของยางที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	107
4.2.4.7 การศึกษาระดับการกระจายของเขม่าดำในยางด้วยเครื่อง Dispergrader .....	109
4.2.5 สรุปการใช้ น้ำมันพืชทดแทนน้ำมันอะโรมาติก .....	110
4.3 การประมาณค่าสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs).....	111
4.4 ผลการวิเคราะห์ต้นทุน .....	112

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	114
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	114
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	115
เอกสารอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก .....	120
ภาคผนวก ก .....	121
ภาคผนวก ข .....	127
ภาคผนวก ค .....	133
ประวัติผู้เขียน .....	134

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ปริมาณการผลิต การส่งออก การใช้ยางธรรมชาติของประเทศไทย ปี 2551–2557.....	1
1.2 ปริมาณการใช้ยางธรรมชาติในประเทศแยกตามประเภทผลิตภัณฑ์.....	2
2.1 สมบัติบางประการของเขม่าดำชนิดต่างๆ.....	8
2.2 สมบัติบางประการของซิลิกาจากการสังเคราะห์ชนิดต่างๆ.....	9
2.3 สมบัติของน้ำมันที่ใช้กับยาง.....	15
2.4 ปริมาณของกรดไขมันของน้ำมันพืชแต่ละชนิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	18
2.5 สมบัติของน้ำมันพืชที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
3.1 สมบัติของ STR 5L ที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
3.2 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ.....	40
3.3 มาตรฐานของสมบัติที่ใช้ทดสอบยางคอมพาวด์และยางคงรูป.....	41
3.4 แสดงจำนวนรอบของการขัด.....	46
4.1 อักษรย่อที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
4.2 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันโดยใช้เทคนิค Fourier transform infrared spectrophotometry (FTIR).....	52
4.3 สมบัติของน้ำมันที่ใช้ในงานวิจัย.....	55
4.4 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันพืชชนิดต่างๆ.....	56
4.5 แสดงค่า $t_{s2}$ , $t_{c90}$ , CRI, $M_L$ และ $M_{HF}$ ของยางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันพืชชนิดต่างๆ.....	57
4.6 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่มีลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน.....	68
4.7 แสดงค่า $t_{s2}$ , $t_{c90}$ , CRI, $M_L$ และ $M_{HF}$ ของยางคอมพาวด์ที่มีลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน.....	70
4.8 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันพืชตัดแปรชนิดต่างๆ.....	77
4.9 แสดงค่า $t_{s2}$ , $t_{c90}$ , CRI, $M_L$ และ $M_{HF}$ ของยางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันพืชตัดแปรต่างๆ.....	78
4.10 แสดงค่า $\tan \delta_{max}$ และ $T_g$ ของยางคงรูปที่ใช้ น้ำมันช่วยกระบวนการผลิตชนิดต่างๆ.....	93
4.11 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน.....	97
4.12 แสดงค่า $t_{s2}$ , $t_{c90}$ , CRI, $M_L$ และ $M_{HF}$ ของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน.....	98
4.13 การเปรียบเทียบระหว่างสมบัติของยางที่ใช้ น้ำมันปาล์มกับน้ำมันอะโรมาติก โดยมีซิลิกาเป็นสารตัวเติม.....	110
4.14 การแสดงปริมาณของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ทั้ง 8 ชนิดที่ EU REACH กำหนด ในน้ำมันอะโรมาติกเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์ม.....	111
4.15 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตยางคอมพาวด์.....	112
4.16 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต.....	113

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ยางรถยนต์ รุ่น BluEarth AE-01 <sup>®</sup> ของ บริษัท โยโกฮามา	3
2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ซีส-1,4 พอลิไอโซพรีน	6
2.2 หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำ	7
2.3 หมู่ฟังก์ชันเคมีที่อยู่บนพื้นผิวและน้ำที่เกาะติดบนพื้นผิวของซิลิกา	9
2.4 การทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) กับซิลิกา	9
2.5 การทำปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบไซเลน (Si-69) กับซิลิกา	10
2.6 แสดงการแทรกตัวของพลาสติกไฮเซอรินในพอลิเมอร์	11
2.7 น้ำมันจากปิโตรเลียมที่ใช้ในยางแบ่งตามความมีขั้วและขนาดของโมเลกุล	13
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะโรมาติกในน้ำมันกับดัชนีหักเหของแสง	14
2.9 โครงสร้างของน้ำมันพีช	18
2.10 แสดงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างน้ำมันพีชกับซิลิกาและยางธรรมชาติ	19
2.11 ส่วนประกอบของผลปาล์ม	19
2.12 การเตรียมน้ำมันดัดแปรพอลิออล โดยการทำให้ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) ตามด้วยปฏิกิริยาการเปิดวงออกซิเรนด้วยไฮโดรเจนเพอรอกไซด์	21
2.13 ดอกทานตะวันและเมล็ดทานตะวัน	22
2.14 ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว	22
2.15 องค์ประกอบของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	23
2.16 กระบวนการตีคาร์บอกซิเลชัน	24
2.17 โครงสร้างของ Limonene	24
2.18 แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง	27
2.19 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve)	30
2.20 ตัวอย่างขนาดและรูปทรงชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง	31
2.21 ตัวอย่างกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) ของการดึงขึ้นยาง	32
3.1 เครื่องทดสอบความถ่วงจำเพาะ	42
3.2 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 412	43
3.3 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 624	44
3.4 เครื่องทดสอบความร้อนสะสมในยาง	45
3.5 เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด	46
3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)	48
3.7 เครื่องวัดระดับการกระจายของเขม่าดำในยาง (Dispergrader 1000NT)	48
4.1 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางแต่ละชนิดเมื่อน้ำมันต่างกัน	58
4.2 กราฟแสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางแต่ละชนิดเมื่อน้ำมันต่างกัน	59
4.3 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนิของยางแต่ละชนิดเมื่อน้ำมันต่างกัน	60
4.4 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อน้ำมันต่างกัน	60
4.5 กราฟแสดงค่าการแพร่ของน้ำมันของยางแต่ละชนิดเมื่อน้ำมันต่างกัน	61

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟแสดงค่าความแข็งกตของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน.....	62
4.7 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน.....	62
4.8 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน.....	63
4.9 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน.....	63
4.10 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน.....	64
4.11 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน.....	64
4.12 กราฟแสดงค่าร้อยละของการคงเหลือหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของความแข็งแรงดึง ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน.....	65
4.13 กราฟแสดงค่าร้อยละของการคงเหลือหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน.....	65
4.14 กราฟแสดงค่าร้อยละของการคงเหลือหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของความแข็งแรง- ฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน.....	66
4.15 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อใช้น้ำมันต่างกัน ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า.....	67
4.16 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการ เติม PEG ที่ต่างกัน.....	70
4.17 กราฟแสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการ เติม PEG ที่ต่างกัน.....	71
4.18 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนินี้ของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน.....	72
4.19 กราฟแสดงค่าทอร์กขณะผสมของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน.....	73
4.20 กราฟแสดงค่าความแข็งกตของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน.....	74
4.21 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน.....	74
4.22 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน.....	75
4.23 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน.....	75
4.24 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและ การเติม PEG ที่ต่างกัน.....	76
4.25 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน.....	76
4.26 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน.....	79

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 โครงสร้างของน้ำมันพืชไม่ตัดแปรและน้ำมันพืชตัดแปรของ (ก) น้ำมันปาล์มและ น้ำมันถั่วเหลือง (ข) น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ .....	79
4.28 กราฟแสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน .....	80
4.29 กราฟแสดงค่าความหนืดมุนนี้ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน .....	81
4.30 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน .....	82
4.31 กราฟแสดงค่าการแพร่ออกของน้ำมันของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน .....	82
4.32 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน .....	83
4.33 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน .....	84
4.34 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน .....	84
4.35 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน .....	85
4.36 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน ..	85
4.37 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน .....	86
4.38 กราฟแสดงความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางกับสมบัติเชิงกล บางประการของยาง .....	86
4.39 กราฟแสดงการกระดอนของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน .....	88
4.40 กราฟแสดงค่าความร้อนสะสมในยางของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน .....	88
4.41 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน	89
4.42 กราฟแสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางที่เติมน้ำมันพืชตัดแปร ก่อนและหลังการทดสอบ การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด .....	89
4.43 กราฟแสดงค่าปริมาตรการสีหรือของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน .....	90
4.44 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ของยางแต่ละชนิด เมื่อใช้น้ำมันต่างกัน ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า .....	91
4.45 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน .....	93
4.46 กราฟแสดงค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus, E') ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน .	94
4.47 กราฟแสดงค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, E'') ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน .	94
4.48 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปร .....	95
4.49 กราฟแสดงค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus, E') ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืช- ตัดแปร .....	95
4.50 กราฟแสดงค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, E'') ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืช- ตัดแปร .....	96
4.51 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์แต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	98
4.52 กราฟแสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	99
4.53 กราฟแสดงค่าความหนืดมุนนี้ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	100
4.54 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	100
4.55 กราฟแสดงค่าการแพร่ออกของน้ำมันของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	101

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.56 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	102
4.57 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	102
4.58 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	103
4.59 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	103
4.60 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	104
4.61 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	104
4.62 กราฟแสดงการกระดอนของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	105
4.63 กราฟแสดงค่าความร้อนสะสมในยางของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	105
4.64 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	106
4.65 กราฟแสดงค่าปริมาตรการสีกรหของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	107
4.66 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางแตกหักที่อุณหภูมิตำ่าของยางแต่ละชนิด เมื่อใช้สารตัวเติมต่างกันที่กำลังขยาย 5,000 เท่า .....	108
4.67 กราฟแสดงค่าระดับการกระจายของเขม่าดำในยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน .....	109

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยผลิตยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) มากเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยปี 2557 ผลิตได้ 4.32 ล้านตัน [1] มีปริมาณการผลิต การส่งออก และการใช้เพิ่มมากขึ้นทุกปี ดังแสดงในตารางที่ 1.1 การส่งออกในรูปของยางดิบมีประมาณ 3.77 ล้านตัน (ร้อยละ 87) คิดเป็นมูลค่าประมาณ 1.93 แสนล้านบาท ที่เหลืออีกประมาณ 0.54 ล้านตันใช้ภายในประเทศในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อใช้ในประเทศและการส่งออก คิดเป็นมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์ยางประมาณ 2.61 แสนล้านบาท การใช้ยางธรรมชาติในประเทศ ใช้เพื่อการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางหลายประเภท ดังแสดงในตารางที่ 1.2 ผลิตภัณฑ์หลักที่มีการผลิตมากคือ ยางยานพาหนะ ยางรถจักรยานยนต์ และยางล้อดอก คิดเป็นร้อยละ 66 ของผลิตภัณฑ์ยางทั้งหมดที่ผลิตได้

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการผลิต การส่งออก การใช้ยางธรรมชาติของประเทศไทย ปี 2551–2557 [1]

ปีพ.ศ.	การผลิต (ตัน)	การส่งออก (ตัน)	ใช้ในประเทศ (ตัน)	สต็อก (ตัน)
2551	3,089,751	2,675,283	397,595	251,721
2552	3,164,379	2,726,193	399,415	293,659
2553	3,252,135	2,866,447	458,637	227,252
2554	3,569,033	2,952,381	486,745	361,557
2555	3,778,010	3,121,332	505,052	516,675
2556	4,170,428	3,664,941	520,628	502,855
2557	4,323,975	3,770,649	541,003	516,756

ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ ขึ้นกับการออกสูตรยางและวิธีการผสมยางกับสารเคมี เนื่องจากการออกสูตรยาง มีการกำหนดชนิดและปริมาณสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ ที่จะผสมเข้ากับยาง เช่น สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidants) สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants) สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agents) สารเร่งการเชื่อมโยง (Accelerators) สารกระตุ้น (Activators) สารเพิ่มเนื้อแบบเสริมแรง (Reinforcing fillers) และสารเพิ่มความนิ่มหรือพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติต่างๆ ของยางคอมพาวด์ [2] โดยสารเคมีหนึ่งชนิด อาจเป็นสารเติมแต่งได้หลายหน้าที่ (Multifunctional additives) เช่น กรดสเตียริก (Stearic acid) สามารถทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นร่วมและสารช่วยกระบวนการผลิต สำหรับวิธีการผสมยางกับสารเคมี ต้องให้เกิดการกระจายตัวของเคมีในยางอย่างสม่ำเสมอ

ตารางที่ 1.2 ปริมาณการใช้ยางธรรมชาติในประเทศแยกตามประเภทผลิตภัณฑ์ [1]

หน่วย : เมตริกตัน

ประเภทผลิตภัณฑ์	ปีพ.ศ. 2554	ปีพ.ศ. 2555	ปีพ.ศ. 2556	ปีพ.ศ. 2557
ยางยานพาหนะ	292,963	317,654	320,567	329,051
ยางรถจักรยานยนต์	20,858	21,958	23,417	23,811
หล่อตอก	-	1,057	1,274	2,128
ยางรัดของ	10,954	10,032	14,185	15,353
อะไหล่รถยนต์	1,016	1,247	1,078	2,802
พื้นรองเท้า	1,403	1,018	1,079	1,146
รองเท้า	3,765	3,032	3,146	4,769
ท่อยาง	569	739	867	712
สายพาน	1,557	1,513	1,573	2,499
ยางยืด	66,054	67,078	66,603	79,168
ถุงมือยาง	67,413	66,381	69,645	58,865
ถุงยางอนามัย	9,353	5,285	5,469	6,464
ผลิตภัณฑ์ฟองน้ำ	260	262	233	234
กาว	1,961	2,274	1,510	2,985
เครื่องมือทางการแพทย์/วิทยาศาสตร์	650	684	841	952
อื่น	7,969	4,383	8,511	10,064
รวม	486,745	505,052	520,628	541,003

สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) เช่น เขม่าดำ (Carbon black) และซิลิกา (Silica) เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยเพิ่มเนื้อ ลดต้นทุน และเสริมความแข็งแรงให้ยาง โดยระหว่างการผสมสารเพิ่มเนื้อ ต้องใช้น้ำมันสำหรับยาง (Rubber oils) ซึ่งปัจจุบันใช้น้ำมันจากปิโตรเลียม เช่น น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) น้ำมันแนฟทาติก (Naphthenic oil) น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic oil) เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต น้ำมันเหล่านี้มีหน้าที่ช่วยปรับลดความหนืด (Viscosity) ของยางคอมพาวด์ในกระบวนการผสม ทำให้สามารถแปรรูปยางได้ง่าย สารเติมแต่งกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น และยังสามารถช่วยให้เติมสารเติมแต่งเข้าไปในยางในปริมาณที่มากขึ้นได้ด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ยางคงรูปมีสมบัติบางประการที่ดีขึ้น เช่น ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด นอกจากนี้ อีกวัตถุประสงค์หนึ่งของการใช้น้ำมันสำหรับยาง เพื่อให้ความแข็งแรงของยางคงรูปลดลง ลดความร้อนในขณะผสมด้วย

ปัจจุบันซิลิกาเป็นสารเติมแต่งเสริมแรงที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง เช่น อุตสาหกรรมยางล้อ สายพานยางและพื้นรองเท้า เป็นต้น เนื่องจากเป็นสารเติมแต่งที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมยางรถยนต์ เพราะนอกจากจะช่วยลดแรงต้านทานการหมุน (Rolling resistance) สมบัติการเกาะถนน และการต้านการสึกหรอที่ดี อีกทั้งซิลิกายังผลิตจากวัสดุธรรมชาติที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากซิลิกามีลักษณะเป็นผง น้ำหนักเบา ฟุ้งกระจายง่าย ทำให้การผสมกับยางทำได้ยาก นอกจากนั้นการใส่ซิลิกาเข้าไปทำให้ยางแข็งมากขึ้น อาจจะทำให้เกิดความร้อนและยางสุกก่อนกำหนดหรือยางตาย (Scorch) ได้ง่าย ดังนั้นต้องมีการเติมน้ำมันเป็นสารช่วยกระบวนการผลิตด้วยเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม น้ำมันที่ได้จากการกลั่นปิโตรเคมี โดยเฉพาะกลุ่ม

ของน้ำมันอะโรมาติกมีสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogens)

สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยวงเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป จัดเรียงเป็นเส้นตรง เป็นมุม หรือเป็นกลุ่ม มีเฉพาะอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอน ส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ จุดเดือดระหว่าง 150-325 °C และจุดหลอมเหลวระหว่าง 101-438 °C มีความเป็นพิษเฉียบพลันต่ำ ในสิ่งมีชีวิตจะพบความเป็นพิษเรื้อรังมีความสามารถในการก่อมะเร็ง เข้าสู่ร่างกายได้หลายวิธี ทั้งโดยการกินอาหารที่มีการปนเปื้อน PAHs สุดคมไอระเหยหรือเขม่าควันที่มี PAHs หรือโดยการสัมผัสทางผิวหนัง [3] ทำให้ส่งผลด้านสุขภาพต่อผู้ปฏิบัติงานในโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ยาง ตามกฎระเบียบควบคุมเคมีภัณฑ์ หรือ EU REACH ได้กำหนดห้ามวางจำหน่ายทั่วไปตามสาธารณะ ทั้งนี้สาร PAHs มักพบอยู่ในสินค้าอุปโภคบริโภค สินค้าทั่วไป รวมทั้งในชิ้นส่วนที่เป็นพลาสติกและยาง ซึ่งมีการใช้น้ำมันและเขม่าดำในการผลิต [4]

น้ำมันพืช (Vegetable oils) เป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์มีความหนืดสูง มีโครงสร้างหลักเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเชื่อมต่อกับกรดไขมัน ซึ่งมีชนิดและปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันแตกต่างกัน ทำให้น้ำมันพืชแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการปลูกพืชที่ให้น้ำมัน เช่น ปาล์ม ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ทานตะวัน มะพร้าว ข้าวโพด ข้าว เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ฯลฯ เป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกกันทั่วไปได้ทุกฤดูกาล หาง่าย ราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ส่วนใหญ่นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันพืชเพื่อการบริโภค แต่บ่อยครั้งที่เกษตรกรไทยประสบปัญหาผลผลิตทางการเกษตรล้นตลาด มีปริมาณเกินความต้องการ ดังนั้นจึงเป็นการน่าสนใจที่จะทำการศึกษาเพื่อใช้ประโยชน์ผลิตผล และ/หรือสิ่งที่เหลือจากอุตสาหกรรมเกษตร เพื่อช่วยเหลือและเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าเกษตร จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มราคาผลผลิตทางการเกษตร โดยที่ผ่านมามีการใช้น้ำมันพืชมาเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมผลิตสารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์) อุตสาหกรรมสารหล่อลื่น [5] รวมทั้งบริษัท โยโกฮาม่า (Yokohama) ได้ผลิตยางรถยนต์ รุ่น BluEarth AE-01® ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ การประหยัดน้ำมัน มีการเพิ่มสมรรถนะการยึดเกาะถนนเปียกด้วยประโยชน์จากส่วนผสมของน้ำมันส้ม (Orange oil) ทำให้น้ำมันยางยืดหยุ่นและยึดเกาะถนนได้ดีขึ้นอายุการใช้งานยาวนาน [6]



รูปที่ 1.1 ยางรถยนต์ รุ่น BluEarth AE-01® ของ บริษัท โยโกฮาม่า [6]

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำมันพืชและน้ำมันพืชดัดแปรเป็นสารเติมแต่งสำหรับยางธรรมชาติทดแทนน้ำมันอะโรมาติก โดยไม่ทำให้สมบัติต่างๆ ของยางเปลี่ยนไป และลดอันตรายจากการใช้น้ำมันจากปิโตรเลียม โดยศึกษาในแนวเปรียบเทียบ (Comparative study) ระหว่างยางที่ใช้น้ำมันพืชและน้ำมันพืชดัดแปรกับน้ำมันอะโรมาติก โดยใช้ยางธรรมชาติ (NR) เกรด STR 5L เป็นตัวแทน ศึกษาปัจจัยชนิดของน้ำมันพืชและน้ำมันพืชดัดแปร ลำดับการผสมซิลิกา การเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) และชนิดของสารตัวเติม โดยจะศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อสมบัติของยางคอมพาวด์และยางคงรูป เช่น ความหนืดมูนี่ (Mooney viscosity) ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) ศึกษาสมบัติกายภาพ (Physical properties) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic properties) และสัณฐานวิทยา (Morphology)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาแนวเปรียบเทียบของการใช้น้ำมันพืชและน้ำมันพืชดัดแปร เป็นสารช่วยกระบวนการผลิตเพื่อทดแทนน้ำมันอะโรมาติกในยางธรรมชาติ
- 2) เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของน้ำมันพืชและน้ำมันพืชดัดแปร ลำดับการผสมซิลิกา การเติม PEG และชนิดของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางคอมพาวด์และยางคงรูป

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยางคอมพาวด์และยางคงรูป

ปัจจัยที่ 1 ชนิดของน้ำมันพืช คือ น้ำมันปาล์ม (Palm oil, PO) น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil, SBO) น้ำมันทานตะวัน (Sunflower oil, SFO) น้ำมันรำข้าว (Rice bran oil, RBO) น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid, CNSL) และน้ำมันส้ม (Orange oil, OO)

ปัจจัยที่ 2 ลำดับการผสมซิลิกา ก่อนและหลังสารกระตุ้น การเติมและไม่เติม PEG

ปัจจัยที่ 3 ชนิดของน้ำมันพืชดัดแปร ได้แก่ น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized palm oils, EPO) น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิออล (Polyol palm oils, PPO) น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized soybean oils, ESBO) และน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต (Decarboxylated cashew nut shell liquid, DCNSL)

ปัจจัยที่ 4 ชนิดของสารตัวเติม ได้แก่ ซิลิกาและเขม่าดำ

- 2) ศึกษาสมบัติเปรียบเทียบสมบัติของยาง

2.1) ลักษณะการเชื่อมโยงของยาง : เวลาเริ่มการเชื่อมโยง (Scorch time) เวลาการเชื่อมโยง (Cure time) ดัชนีอัตราการเชื่อมโยงของยาง (Cure rate index, CRI) แรงบิดต่ำสุด (Minimum torque,  $M_L$ ) แรงบิดสูงสุด (Maximum torque,  $M_{HF}$ ) ระดับการเชื่อมโยงของยาง (State of cure,  $M_{HF}-M_L$ ) และร้อยละการบวมตัว (%Swelling)

2.2) สมบัติการไหลของยางในรูปความหนืดมูนี่ (Mooney viscosity)

2.3) พลังงานขณะผสม

2.4) สมบัติกายภาพและสมบัติเชิงกลของยาง : ความถ่วงจำเพาะของยาง (Specific gravity) การแพร่ออกของน้ำมัน (Bleeding) ความแข็งกด (Hardness) มอดุลัสของยาง (Rubber modulus, M100 และ M300) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation

at break) ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) การกระดอนของยาง (Rebound resilience) ความร้อนสะสมในยาง (Heat build-up) การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set) และความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance)

2.5) สมบัติเชิงกลพลวัตของยาง : โมดูลัสสสุญสะสม (Storage modulus) โมดูลัสสสุญเสีย (Loss modulus) ค่าแทนเดลต้า ( $\tan \delta$ ) และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ )

2.6) สัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และวัดระดับการกระจายของเขม่าดำในยางด้วยเครื่อง Dispergrader

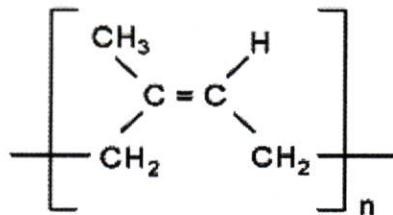
#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถใช้น้ำมันพืชเป็นสารช่วยกระบวนการผลิตได้ และไม่ทำให้สมบัติของยางลดลง
- 2) ลดการใช้น้ำมันปิโตรเลียม ส่งเสริมให้เกิดการใช้งานน้ำมันพืชและเกิดอุตสาหกรรมน้ำมันพืชในประเทศที่เป็นผลพลอยได้ หรือของเหลือทิ้งจากผลิตผลทางการเกษตร เพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรและช่วยในการพัฒนาประเทศ
- 3) ลดความเสี่ยงจากการได้รับสารก่อมะเร็งระหว่างปฏิบัติงานของแรงงานในอุตสาหกรรมยาง

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubbers, NR) [2]

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) มีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-Polyisoprene, PI) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรง ยางมีหน่วยซ้ำๆ กันคือไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ คือ ต้นยางพารา ที่มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ “ฮีเวีย-บราซิลเลียนซิส” (*Hevea Brasiliensis*) บางครั้งเรียกยางธรรมชาติว่า “ยางพารา”



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน)

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง (Elasticity) สามารถยืดตัวออกหรือเปลี่ยนขนาดได้หลายเท่าเมื่อทำการให้แรง และสามารถหดกลับคืนใกล้เคียงขนาดและรูปร่างเดิมอย่างรวดเร็วเมื่อปล่อยแรง มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น ยางธรรมชาติมีจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด จึงสามารถเกิดผลึก (Crystallization) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลง และกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือสมบัติดีเยี่ยมในด้านความแข็งแรงดึง (Tensile strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรง ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) และความต้านทานต่อสึกหรอ (Abrasion resistance) สูง อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติมีขีดจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สูงขึ้น กล่าวคือยางจะอ่อนนุ่มและเหนียวเหนอะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้ยางธรรมชาติจึงต้องผสมเข้ากับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น หลังการบดผสม ยางผสมสูตรหรือยางคอมพาวด์ (Rubber compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วุลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (Vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปมีความเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น เพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

## 2.2 สารตัวเติม (Fillers) [2]

สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) เป็นสารที่มีราคาถูก เทียบกับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ ซึ่งมีราคาแพง สามารถใช้ผสมในยางเพื่อเพิ่มปริมาณของยางคอมพาวด์หรือผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้สารตัวเติมบางชนิดยังสามารถเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับยาง โดยทำให้พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมมีความแข็งแรงสูงขึ้น สารตัวเติมสามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ

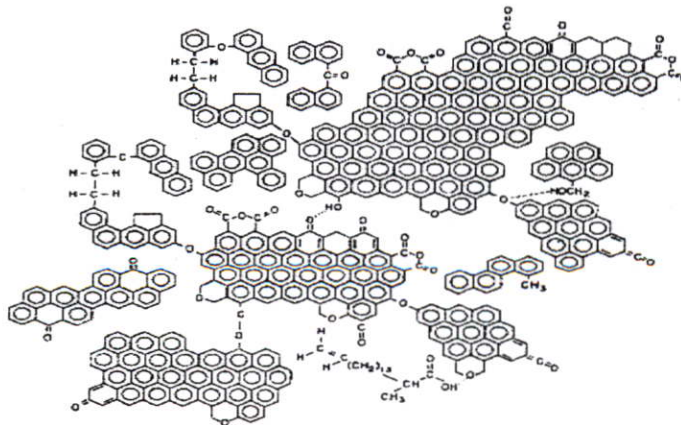
1. สารตัวเติมสีดำ (Black filler) คือ เขม่าดำ
2. สารตัวเติมสีไม่ดำ (Non-black filler) เช่น ซิลิกา ดินขาว และแคลเซียมคาร์บอเนต

### 2.2.1 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก สามารถใส่เขม่าดำในยางได้ในปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) และที่สำคัญที่สุดคือสามารถช่วยเสริมแรงให้กับยางอย่างมาก นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processibility) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น

#### ปัจจัยของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติการเสริมแรง

1. ขนาด (Size) หรือพื้นที่ผิว (Surface area) ขนาดอนุภาคของเขม่าดำจะแปรผกผันกับพื้นที่ผิว สารตัวเติมยังมีขนาดเล็ก ประสิทธิภาพการเสริมแรงยิ่งสูงขึ้น ทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้น ความทนทานต่อการสึกหรอสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเขม่าดำขนาดเล็ก การผสมเขม่าดำเข้ากับยางยังทำได้ยากขึ้น
2. โครงสร้าง (Structure) ผลของโครงสร้างของเขม่าดำที่มีต่อยาง ส่วนใหญ่จะมีผลทางด้านการแปรรูป เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง จะผสมและกระจายในยางได้ดี ทำให้ยางที่ผ่านการอัดรีด (Extrusion) มีผิวเรียบ แต่ผสมในยางได้ปริมาณน้อยกว่าเขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำ
3. เคมีของพื้นผิว (Surface chemistry) เขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 90-99 ที่เหลือเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 นอกจากนี้ยังมีกำมะถันปริมาณเล็กน้อยปนอยู่ด้วย สารเหล่านี้จะให้ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเขม่าดำต่างกัน ซึ่งมีผลต่ออัตราการเชื่อมโยง เขม่าดำที่มีความเป็นด่างจะเกิดการเชื่อมโยงเร็วกว่าเขม่าดำที่มีความเป็นกรด



รูปที่ 2.2 หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำ [7]

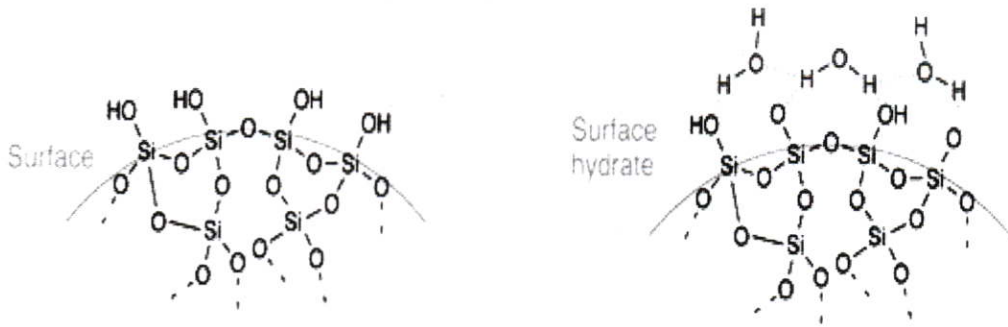
ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของเขม่าดำชนิดต่างๆ [2]

สมบัติ	Furnace	Thermal	Channel
Average particle size (nm)	10-100	100-500	1-3
Surface area, BET N <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> /g)	27-145	7-11	100-1125
Oil absorption (ml/g)	0.67-1.55	0.32-0.47	1.0-6.0
Volatile matter (%)	0.3-2.8	0.1-1.0	3.5-16.0
Ash (%)	0.1-1.0	0.2-0.5	0-0.1
Sulfur (%)	0.5-1.5	10 ppm	0-0.1
pH	5.0-9.5	7-9	3-6

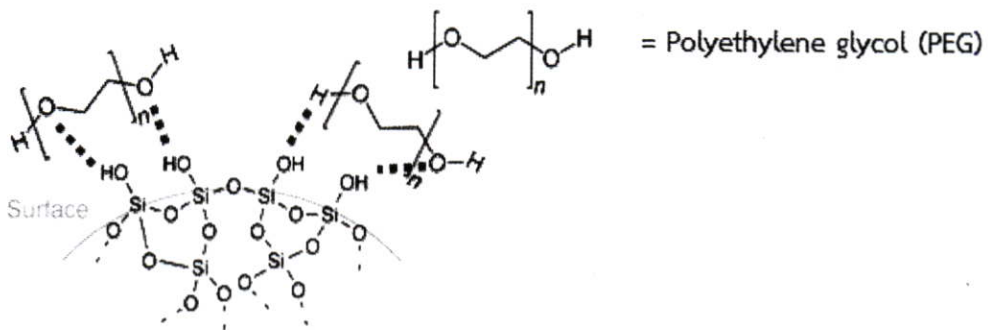
### 2.2.2 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำอื่นๆ โดยเฉพาะซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ซิลิกามีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ข้อดีของซิลิกาคือช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่น เพิ่มความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance) เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ลดความร้อนสะสมในยาง (Heat build-up) และเพิ่มการยึดเกาะ (Adhesion) กับองค์ประกอบอื่นในยาง เป็นต้น สมบัติของซิลิกาขึ้นกับหลายปัจจัยได้แก่ ขนาดอนุภาคและพื้นผิว ปริมาณน้ำในโครงสร้าง (Extent of hydration) สมบัติทางกายภาพ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง (pH) องค์ประกอบทางเคมี การดูดซับน้ำมัน (Oil absorption)

เนื่องจากซิลิกาประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจน จึงมีหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol group, -Si-OH) บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำที่สามารถเกาะติดบนพื้นผิว (รูปที่ 2.3) และยังมีผลต่อความเป็นกรดของซิลิกาอีกด้วย พื้นผิวของซิลิกามีแนวโน้มที่จะดูดซับสารเคมีต่างๆมาเกาะบนพื้นผิวได้ดี ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของยางในระหว่างกระบวนการผลิตและกระบวนการขึ้นรูป และระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลนั้นสามารถเกิดพันธะโคเวเลนต์ ดังนั้นซิลิกาจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่าแอกกรีเกตเกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ ซึ่งไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสม นอกจากนี้แอกกรีเกตของซิลิกายังชอบอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิที่เรียกว่าแอกโกโมเรต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมสารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับหมู่ไฮดรอกซิล เช่นสารประกอบในกลุ่มไกลคอล (เช่น DEG และ PEG) กลีเซอรอล หรือสารประกอบในกลุ่มเอมีน (รูปที่ 2.4) เพื่อลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกา ทำให้โครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกาถูกทำลายได้ง่ายขึ้นในระหว่างกระบวนการผสม ซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่าย [8]



รูปที่ 2.3 หมู่ฟังก์ชันเคมีที่อยู่บนพื้นผิวและน้ำที่เกาะติดบนพื้นผิวของซิลิกา [9]

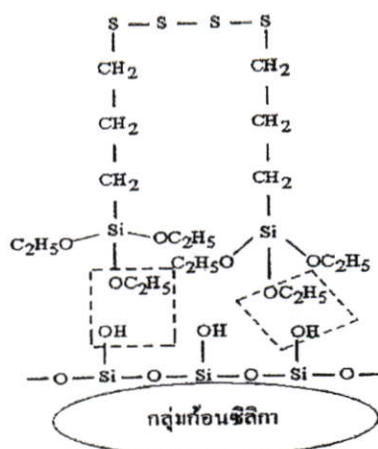


รูปที่ 2.4 การทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) กับซิลิกา

ตารางที่ 2.2 สมบัติบางประการของซิลิกาจากการสังเคราะห์ชนิดต่างๆ [2]

สมบัติ	Fumed	Precipitated	Gel
Primary particle size (microns)	0.007-0.04	0.01-0.30	-
Average particle size (microns)	0.8	8-10	4-8
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.2	2.2	2.2
Surface area, BET N <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> /g)	50-400	60-300	100-800
Oil absorption, ASTM D-281	150-250	160-200	150-250
Mohs hardness	6.57-7	6.5-7	6.5-7
% Moisture	<1.5	6.0	5.0
Silanol groups (no./nm <sup>2</sup> )	2.4	1.5-1.0	4-10

เนื่องจากความมีขั้วหรือความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของซิลิกาทำให้สารตัวเติมชนิดนี้สามารถเสริมแรงได้ดีในยางที่มีขั้ว เช่น ยางไนไตรล์ (NBR) หรือยางคลอโรพรีน (CR) มากกว่ายางที่ไม่มีขั้วเช่น ยางธรรมชาติ (NR) และยางเอสปีอาร์ (SBR) ดังนั้นในการใช้งานซิลิกานิยมใช้สารคู่ควบ (Coupling agents) เช่น สารประกอบไซเลน (Silane coupling agent) เคลือบผิวอนุภาคซิลิกา เพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคยางและซิลิกา (รูปที่ 2.5) ทำให้สมบัติของยางดีขึ้น



รูปที่ 2.5 การทำปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบไซเลน (Si-69) กับซิลิกา [8]

## 2.3 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารเคมีที่ผสมในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้ใช้เวลาและพลังงานในการผลิตน้อยลง นอกจากนี้ยังช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่งต่างๆ ในยาง เพิ่มความสม่ำเสมอหรือเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีอัตราเร็วในการผลิตสูงขึ้น

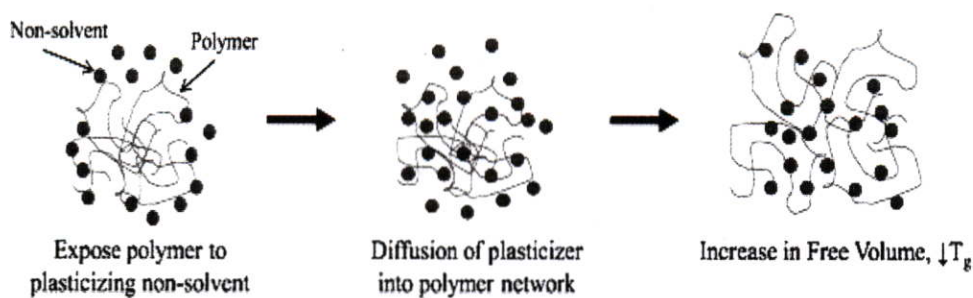
### 2.3.1 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) [10]

เป็นสารที่ใส่เข้าไปในยาง เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และเพิ่มความสามารถในการใช้งาน ซึ่งสารช่วยกระบวนการผลิตจะเพิ่มความแข็งของยางลดลง และช่วยให้แปรรูปได้ง่ายขึ้น

พลาสติไซเซอร์ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

**2.3.1.1 สารช่วยทำให้ยางนิ่ม โดยทางเคมี (Chemical plasticizer)** เป็นพลาสติไซเซอร์ที่เมื่อใส่เข้าไปในปริมาณเล็กน้อยประมาณ 1-3 phr จะทำให้ยางนิ่มและลดเวลาของการบดยาง (Mastication) ลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำหน้าที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาขาดของสายโซ่ (Chain scission) ของยางทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง เป็นผลให้ความหนืดของยางลดลง เกิดการผสมได้ง่ายขึ้น บางที่เรียกว่า เปปไทเซอร์ (Peptizer) มักใช้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่มีความหนืดสูง

**2.3.1.2 สารช่วยทำให้ยางนิ่มโดยทางกายภาพ (Physical plasticizer)** เป็นพลาสติไซเซอร์ที่เป็นสารโมเลกุลเล็กที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ช่วยเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free volume) ทำให้อายุขัยโมเลกุลของยางเคลื่อนไหวได้ง่าย อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ลดลง ยางจะมีความยืดหยุ่น นิ่มลง จึงแปรรูปได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 2.6 แสดงการแทรกตัวของพลาสติกไซเซอร์ในพอลิเมอร์ [11]

### หน้าที่ของพลาสติกไซเซอร์

1. ช่วยในการแปรรูปยาง คือ ช่วยใหยางคงรูปแล้วและยางที่ยังไม่คงรูปนิ่มลง ทำให้แปรรูปยางได้ง่ายขึ้น
2. เพื่อปรับปรุงสมบัติของยาง คือ มีความแข็งและค่ามอดูลัสลดลง ร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น
3. ลดต้นทุน คือ การเติมพลาสติกไซเซอร์เข้าไปจะช่วยให้สามารถใส่สารเติมแต่งได้มากขึ้น
4. เพื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ คือ ทำใหยางยังคงมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ
5. เพื่อลดพลังงานในการแปรรูปยาง เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์ทำใหยางนิ่มลง

### 2.3.2 สารหล่อลื่น (Lubricants) [12]

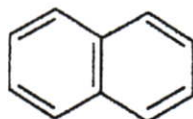
สารหล่อลื่นใช้ผสมกับยางมีหลายชนิดและทำหน้าที่ต่างกัน หน้าที่หลัก 3 ประการของสารหล่อลื่นคือ

1. วัสดุลดความเสียดทานระหว่างผนังของเครื่องมือเมื่อสัมผัสกับยาง
2. วัสดุที่แพร่ออกมาจากส่วนผสมของยางในขณะขั้นตอนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์และอยู่ระหว่างชั้นของยางกับพื้นผิวของโลหะที่ใช้เป็นเครื่องมือในการผลิตขึ้นรูป ฟิล์มบางๆ ของสารหล่อลื่นนี้จะช่วยไม่ให้ยางติดกับพื้นผิวของเครื่องจักรในขณะร้อน นั่นคือ การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ทำได้ง่ายขึ้น สารหล่อลื่นประเภทนี้ เรียกว่า สารหล่อลื่นภายนอก (External lubricants) สารหล่อลื่นประเภทนี้ผสมกับยางไม่ดี ส่วนมากมีหมู่มีซิวและเกิดเป็นฟิล์มบางระหว่างยางกับผิวเครื่องจักร การเลือกใช้สารหล่อลื่นนอกจากต้องคำนึงถึงชนิดของยางแล้ว ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิในขณะขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วย สารหล่อลื่นควรเป็นของไหลที่อุณหภูมิขณะขึ้นรูปผลิตภัณฑ์และมีตัวแปรการละลาย (Solubility parameter) แตกต่างจากพอลิเมอร์อย่างน้อย  $3 \text{ MPa}^{1/2}$
3. สารหล่อลื่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ ทำหน้าที่คล้ายอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ทำให้ส่วนผสมอื่นๆ เข้ากันได้และละลายได้ดีในยาง ช่วยใหยางไหลได้สะดวกขึ้น ทำหน้าที่ลดความหนืดต่างจากพลาสติกไซเซอร์ตรงที่มีผลต่อสมบัติของยางน้อยมาก เมื่อเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป สารหล่อลื่นประเภทนี้ เรียกว่า สารหล่อลื่นภายใน (Internal lubricants)

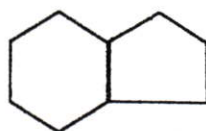
สารช่วยกระบวนการผลิตที่ดีต้องเข้ากันได้ดีกับยาง ไม่แพร่ออกที่พื้นผิวของผลิตภัณฑ์ การเลือกสารช่วยกระบวนการผลิตที่เหมาะสมสำหรับยางสามารถทำได้โดยพิจารณาตัวแปรการละลาย (Solubility parameter) ของสารช่วยกระบวนการผลิตและยางที่ใกล้เคียงกัน ตัวอย่างสารช่วยกระบวนการผลิตสำหรับยางได้แก่ กรดไขมัน (Fatty acid) น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum oils) สารประกอบเอสเทอร์ (Ester) น้ำมันสน (Pine) เป็นต้น

น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum oils) เป็นน้ำมันที่เข้ากับยางได้ดี ทำให้ความหนืดลดลง เป็นน้ำมันที่ไม่ระเหย ไม่ติดสีและสีไม่ตก น้ำมันชนิดนี้ เมื่อใช้ทำให้ยางมีสมบัติตรงกันข้ามกับการใช้สารเติมแต่ง คือ มีผลให้ความแข็งแรงลดลง ค่ามอดุลัสลดลง น้ำมันที่ใช้กับยางประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ แต่มีกำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจนปนอยู่เล็กน้อย โครงสร้างของคาร์บอนและไฮโดรเจนในน้ำมันแตกต่างกัน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) หมายถึงน้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติกไม่อิ่มตัว มีสีคล้ำ ความหนืดสูง



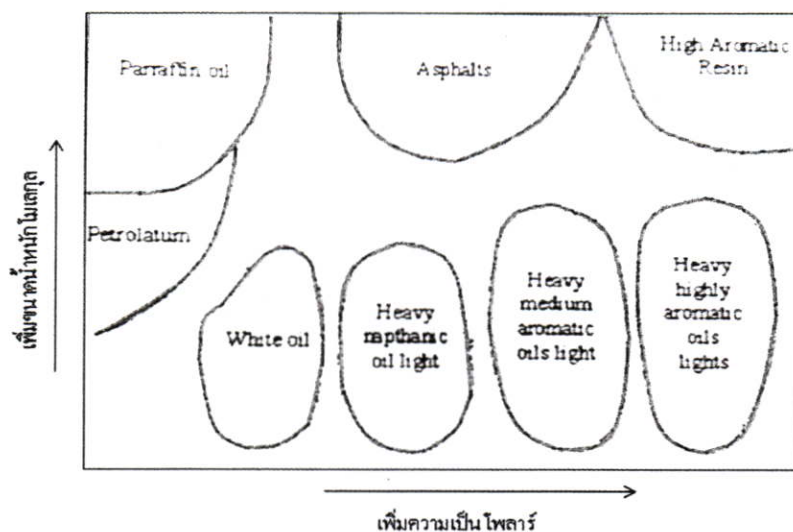
2. น้ำมันแนฟทาติก (Naphthenic oil) หมายถึงน้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนแนฟทาติกอิ่มตัว มีความหนืดปานกลาง



3. น้ำมันพาราฟิน (Paraffinic oil) หมายถึงน้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว อาจมีโซ่กิ่งบ้าง ความหนืดต่ำ



น้ำมันประเภทอะโรมาติกจะแสดงความมีขั้ว (Polar) มากกว่าน้ำมันประเภทพาราฟิน รูปที่ 2.7 แสดงถึงน้ำมันชนิดต่างๆ ที่แบ่งตามความมีขั้วและขนาดน้ำหนักโมเลกุล จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่าพวกพาราฟินแข็ง จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีขั้วน้อย ส่วน White oil จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีขั้วน้อยเช่นเดียวกันและในทางตรงข้ามพาราฟินเป็นอะโรมาติกเรซิน (Aromatic resin) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีขั้วมากเช่นกัน



รูปที่ 2.7 น้ำมันจากปิโตรเลียมที่ใช้ในยางแบ่งตามความมีขี้และขนาดของโมเลกุล [10]

## 2.4 การตรวจสอบสมบัติของน้ำมัน [10]

วิธีการตรวจสอบสมบัติของน้ำมันและส่วนประกอบทางเคมีอย่างคร่าวๆ สามารถทำได้ด้วยวิธีดังนี้

### การหาจุดอะนิลีน (Aniline point)

Aniline point หมายถึง อุณหภูมิที่น้ำมันกับอะนิลีนที่มีปริมาตรเท่ากัน รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ เนื่องจากอะโรมาติกนั้นเข้ากันได้ดีกับอะนิลีนมากกว่าน้ำมันแนฟทาติก ดังนั้นน้ำมันอะโรมาติกจึงมีจุดอะนิลีนต่ำกว่าน้ำมันพาราฟิน จุดอะนิลีนเป็นเครื่องชี้ถึงความเป็นอะโรมาติกโดยประมาณเท่านั้น เพราะจุดอะนิลีนไม่เพียงแต่ขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันยังขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลอีกด้วย การหาจุดอะนิลีนสามารถทดสอบได้ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 611

### ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของน้ำมันขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมัน แต่ถ้าน้ำหนักโมเลกุลเท่ากันแล้ว น้ำมันที่มีอะโรมาติกสูงกว่าจะมีความหนืดสูงกว่าด้วย

### ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

ความถ่วงจำเพาะเป็นเครื่องชี้สมบัติของน้ำมันได้อีกอย่างหนึ่งคือ เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของน้ำมันจะสูงตามขนาดโมเลกุลและความเป็นอะโรมาติกของน้ำมัน การหาความถ่วงจำเพาะสามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน ASTM D 1298

### Pour point

Pour point คือ อุณหภูมิของน้ำมันที่เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิต่ำกว่านี้แล้วน้ำมันจะไม่เหลวและเทไม่ได้ สมบัตินี้สำคัญต่อน้ำมันมากโดยเฉพาะในประเทศหนาว เนื่องจากน้ำมันจะขนถ่ายได้มากถ้าน้ำมันเหลว การมี Pour point สูงแสดงให้เห็นถึงน้ำมันเป็นอะโรมาติกที่มีขนาดโมเลกุลสูงและมีปริมาณไข (Wax) มาก ซึ่งไขนี้เองจะก่อให้เกิดโครงสร้างพินกันหนาแน่นเมื่อเย็น ทำให้น้ำมันไม่เหลว การหา Pour point สามารถทดสอบได้ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 97

### ดัชนีการหักเหของแสง (Refractive index)

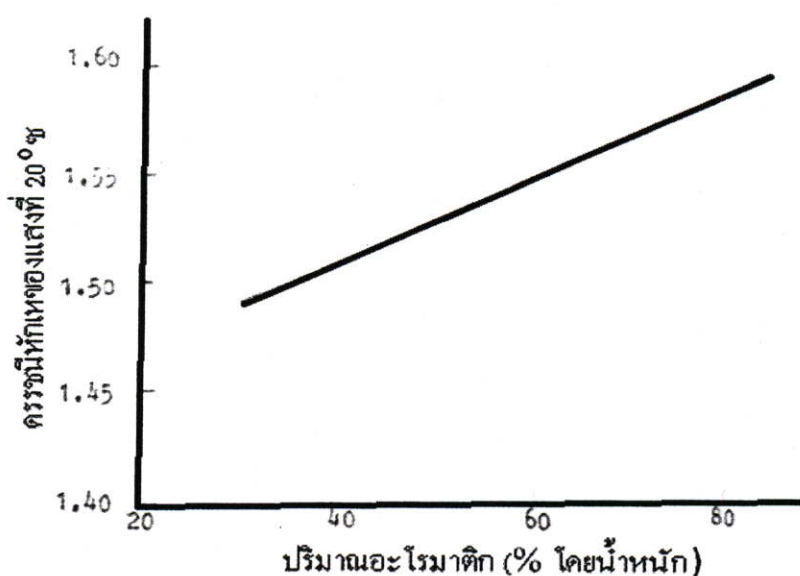
ขึ้นอยู่กับความเป็นอะโรมาติกของน้ำมัน ยิ่งมีความเป็นอะโรมาติกสูง ดัชนีการหักเหของแสงจะสูงไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.8 การหาดัชนีการหักเหของแสงสามารถทดสอบได้ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1218

### จุดวาบไฟ (Flash point)

เป็นอุณหภูมิที่เกิดประกายไฟเริ่มแรกที่เกิดขึ้นเมื่อมีการนำเอาไฟเคลื่อนที่ผ่านน้ำมันจะเกิดประกายไฟ การหาจุดวาบไฟเป็นการทดสอบที่สำคัญมาก การหาจุดวาบไฟสามารถทดสอบได้ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 92 อุณหภูมิที่ทำให้น้ำมันเกิดประกายไฟ เป็นการบ่งบอกถึงจุดเดือดที่ต่ำที่สุดของส่วนประกอบในน้ำมัน การทดสอบนี้นอกจากจะใช้กับน้ำมันแล้วยังใช้กับตัวทำละลาย น้ำมันเชื้อเพลิง น้ำมันหล่อลื่นและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

การตรวจสอบสมบัติของน้ำมัน ขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมี ถ้าหากรู้สูตรโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันได้แน่นอนแล้ว จะสามารถทำนายสมบัติได้ง่ายขึ้น สามารถบอกปริมาณอย่างคร่าวๆ ว่ามีอะโรมาติกมากหรือน้อย จะบอกได้ว่าน้ำมันเป็นอะโรมาติก แนฟทานิก หรืออะลิฟาติก น้ำมันหนึ่งๆมีส่วนประกอบต่างๆ กัน การจำแนกน้ำมันสามารถแบ่งตามปริมาณส่วนอะโรมาติกได้ดังนี้

- น้ำมันอะโรมาติก มีส่วนอะโรมาติก มากกว่าร้อยละ 60
- น้ำมันแนฟทานิก มีส่วนอะโรมาติก อยู่ร้อยละ 30-60
- น้ำมันพาราฟิน มีส่วนอะโรมาติก น้อยกว่าร้อยละ 30



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะโรมาติกในน้ำมันกับดัชนีหักเหของแสง [10]

ตารางที่ 2.3 สมบัติของน้ำมันที่ใช้กับยาง [10]

สมบัติ	พาราฟิน	แนฟทานิก	อะโรมาติก
ความหนืด (Centistokes) ที่ 40 °C	19.7	110.2	763.5
ที่ 100 °C	4.0	8.0	17.0
ความถ่วงจำเพาะที่ 15 °C	0.861	0.932	1.018
Viscosity-Gravity Constant (V.G.C.)	0.809	0.885	0.980
ดัชนีการหักเห	1.4751	1.5167	1.5804
ปริมาณร้อยละของคาร์บอนที่เป็น			
อะโรมาติก	3.5	21	45
แนฟทานิก	31	37	18
พาราฟิน	65.5	42	37
จุดอะนิลีน (°C)	96.0	75.0	38.2

## 2.5 การเลือกน้ำมันกับสมบัติของน้ำมันที่มีผลต่อยาง

การเลือกใช้น้ำมันให้เหมาะกับยางและงาน โดยเฉพาะในงานที่จำเป็นต้องใช้น้ำมันในปริมาณมากๆ นั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงผลต่อไปนี้

1. ความเข้ากันได้ระหว่างยางกับน้ำมัน
2. สมบัติของยางที่วัลคาไนซ์
3. สีของยางและความคงทนของสี
4. การขนถ่ายเคลื่อนย้ายและการใช้

ลักษณะทั้ง 4 อย่างนี้อาจจะมีลักษณะตรงข้ามกัน เช่น น้ำมันที่มีอะโรมาติกสูงจะเข้ากันได้ดีกับยาง แต่จะมีสีคล้ำเป็นต้น โดยทั่วไปยางที่มีความมีขี้ผึ้งมากจะต้องการน้ำมันที่มีอะโรมาติกมากขึ้นด้วยความหนืดของน้ำมันเป็นสิ่งที่กำหนดการใช้งานของน้ำมัน เช่น ถ้าน้ำมันมีความหนืดสูงแสดงถึงน้ำมันนั้นมีขนาดโมเลกุลสูง การระเหยของน้ำมันน้อยลง และการแพร่ออกของน้ำมันจะยากขึ้นด้วย

### 2.5.1 ปัจจัยโครงสร้างของน้ำมันที่มีผลต่อสมบัติของสารช่วยกระบวนการผลิต

1. โครงสร้างอะโรมาติก, กิ่งและความเกะกะของน้ำมัน จะมีผลต่อความหนืดของน้ำมัน ความเข้ากันได้ระหว่างยางกับน้ำมันที่ดี โครงสร้างกิ่งและความเกะกะสามารถเกิดการเกี่ยวพันกับสายโซ่ของยางได้ดี ทำให้น้ำมันเกิดการเคลื่อนที่ได้ยาก ดังนั้นอัตราการแพร่ออกของน้ำมัน จึงเกิดได้น้อย

2. ความยาวของสายโซ่ของน้ำมัน จะสามารถผลักสายโซ่ของยางให้อยู่ห่างจากกัน ดังนั้นจึงทำให้ปริมาตรอิสระ (Free volume) ของยางเพิ่มขึ้น ความแข็งของยางลดลง และความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

3. พันธะคู่หรือความอึดตัวของน้ำมัน จะสามารถเกิดอันตรกิริยาและเกิดพันธะเชื่อมโยงกับยางหรือระหว่างน้ำมันเอง ดังนั้นอาจส่งผลต่อความหนาแน่นเชื่อมโยงของยาง เวลาการเชื่อมโยง และสมบัติของยาง

4. ขนาดของน้ำหนักรวมของน้ำมัน จะมีผลต่อความหนืดของน้ำมันและการแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น โดยน้ำมันที่มีขนาดของน้ำหนักรวมเล็กน้อย จะเข้าไปแทรกตัวในพอลิเมอร์ได้ดี ทำให้ปริมาตรอิสระของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น แต่น้ำมันจะเกิดการเคลื่อนที่ออกจากพอลิเมอร์ได้ง่าย การแพร่ออกของน้ำมัน จึงเกิดได้มาก

5. หมู่ฟังก์ชันและความมีขั้วของน้ำมัน จะสามารถเกิดอันตรกิริยากับสารเติมแต่งหรือยางที่มีขั้วได้ดี ดังนั้นจะส่งผลต่อการกระจายของสารเติมแต่ง และความเข้ากันได้ของน้ำมันกับยาง

6. ความบริสุทธิ์ของน้ำมัน สารปนเปื้อนต่างๆ อาจส่งผลต่อความเป็นกรดของน้ำมันให้เพิ่มขึ้น ซึ่งจะใช้เวลาเชื่อมโยงลดลง

## 2.5.2 ผลของน้ำมันต่อสมบัติของยาง

### 2.5.2.1 ผลของน้ำมันที่มีต่อยางที่ไม่เชื่อมโยง

โดยทั่วไปน้ำมันใส่เข้าไปในยางเพื่อทำให้ยางนิ่มและช่วยในการแปรรูป ในการผสมสารเติมแต่งเข้าไปในยางจะทำให้ยางแข็งขึ้น ดังนั้นเครื่องบดผสมยางจะต้องมีกำลังสูงขึ้นด้วยการเพิ่มน้ำมันเข้าไปในยางจะช่วยลดความแข็งของยาง จนทำให้ผสมได้ง่ายขึ้นและลดกำลังเครื่องจักรที่ใช้ในการผสมลงและจะทำให้ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะผสมลงได้ด้วย

#### 1. ผลต่อค่าความหนืดมูนนี่

น้ำมันชนิดต่างๆ มีผลต่อการลดค่าความหนืดมูนนี่ของยางเอสบีอาร์ (SBR) ต่างกัน ถ้าใช้น้ำมันในปริมาณเท่ากัน น้ำมันอะโรมาติกจะทำให้ค่าความหนืดมูนนี่ของยาง SBR ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับน้ำมันแนฟทานิกหรือพาราฟิน

#### 2. ผลต่อการแปรรูป

การแปรรูปของยางมีความหมายครอบคลุมตั้งแต่การนำยางมาบดใส่สารเคมีจนถึงการเชื่อมโยงยาง ซึ่งจะรวมทั้งการผสมในเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ในเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) การรีดเป็นแผ่น (Calender) และการอัดรีด (Extrusion) การผสมน้ำมันในยางขณะผสมจะทำให้ความหนืดของยางลดลงจนถึงเกณฑ์ทำงานได้ ในกรณีที่ต้องใส่สารตัวเติม (Fillers) ปริมาณมากเข้าไปในยาง ยางจะแข็ง แข็ง ทำให้ต้องใช้พลังงานในการผสมมาก แต่ถ้าใส่น้ำมันเข้าไปช่วยลดความหนืดและความแข็งของยางลง พลังงานในการผสมจะลดลงและความร้อนในขณะผสมก็จะลดลงด้วย ทำให้การผสมสารตัวเติมทำได้ง่ายและลดเวลาในการผสมลงไป การผสมสารเติมแต่งในยางจำเป็นต้องให้สารเติมแต่งกระจายได้ทั่วถึงในยางและการกระจายของสารเติมแตะนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำมันที่ใช้ ลำดับของน้ำมัน ชนิดของสารเติมแต่งที่ใส่ลงในยางและส่วนประกอบของน้ำมัน ถ้าใช้น้ำมันมากเกินไป หรือ ถ้าใส่น้ำมันตั้งแต่เริ่มต้นก่อนใส่สารเติมแต่งจะทำให้ยางจะนิ่มเกินไป การกระจายตัวของสารเติมแต่งจะไม่ดี ดังนั้นในการผสมสารเติมแต่งที่เหมาะสม ควรจะใส่สารเติมแต่ง และน้ำมันสลับกันไปอย่าให้ยางแข็งหรือนิ่มเกินไป ถ้ากำหนดให้ปริมาณของน้ำมันที่ใช้ในยางคงที่แล้ว การกระจายของสารตัวเติมชนิดเขม่าดำ (Carbon black) ในยางจะขึ้นกับชนิดของน้ำมัน น้ำมันอะโรมาติกจะทำให้การกระจายของสารตัวเติมในยางดีที่สุด รองลงมาเป็นแนฟทานิกและพาราฟิน เนื่องจากน้ำมันอะโรมาติกสามารถแทรกเข้าไปในเขม่าดำได้ดี ทำให้เขม่าดำไม่รวมตัวกันทำให้การกระจายของเขม่าดำในยางเป็นไปได้ดี

หลังการผสมสารเคมีในยางแล้ว น้ำมันจะเป็นตัวช่วยให้การอัดรีดเป็นไป得更เร็วขึ้น และให้ยางที่มีผิวเรียบ ทำให้สามารถควบคุมการพองตัวของยางเมื่อออกจากแม่พิมพ์และทำให้ยางไหลเต็มแม่พิมพ์ได้ดีเมื่ออัดเข้าไปในแม่พิมพ์

### 2.5.2.2 ผลของน้ำมันที่มีต่ออย่างที่เชื่อมโยง

สมบัติของอย่างที่เชื่อมโยงมีผลขึ้นกับปริมาณของน้ำมันที่ใส่เข้าไปในยาง ความหนืดของน้ำมัน ส่วนประกอบของน้ำมันและความเสถียรของน้ำมัน

#### 1. ปริมาณของน้ำมัน

การใส่น้ำมันเข้าไปในยางจะทำให้ความแข็งของยางและมอดุลัสของยางลดลง ในกรณีที่ใส่น้ำมันเข้าไปมากๆ จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break, EB) ลดลง ในกรณีที่ใส่น้ำมันเข้าไปในยางปริมาณมากๆ จนถึง ขั้นที่เรียกว่าเป็นสารเพิ่มเนื้อ (Extender) จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาด ลดลงอย่างมาก โดยทั่วไปน้ำมันจะมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ดังนั้นยิ่งใส่น้ำมันมากจะทำให้ความถ่วงจำเพาะของยางลดลงได้ด้วย สมบัตินี้ช่วยให้สามารถควบคุมความถ่วงจำเพาะของยางได้ดี

#### 2. ความหนืดของน้ำมัน

ความหนืดของน้ำมันขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลของน้ำมัน ยิ่งน้ำมันมีน้ำหนักโมเลกุลสูงความหนืดสูงตามไปด้วย

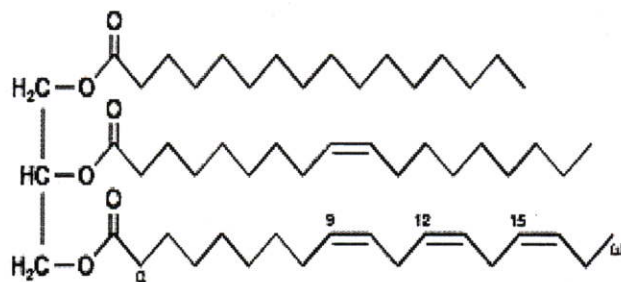
#### 3. ส่วนประกอบของน้ำมัน

นอกจากความหนืดของน้ำมันจะมีผลต่อความแข็งแรงดึงของยาง ส่วนประกอบของน้ำมันมีผลต่อความแข็งแรงดึงด้วย พบว่ายางเมื่อใช้เขม่าดำและน้ำมันผสมเข้าไป น้ำมันอะโรมาติกจะทำให้ยางมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าน้ำมันแนฟทานิก และทำนองเดียวกัน น้ำมันแนฟทานิกจะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าน้ำมันพาราฟิน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเขม่าดำกระจายได้ดีในยางที่ใช้ น้ำมันอะโรมาติก แต่ถ้าหากให้เวลาในการผสมนานขึ้นแล้วพบว่าน้ำมันพาราฟินจะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นได้เช่นกัน

ค่ามอดุลัส ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางไม่ค่อยมีผล อันเนื่องจากการใช้น้ำมันที่มีส่วนประกอบของน้ำมันที่แตกต่างกันนัก แต่กรณีของความแข็งแรงฉีกขาดจะพบว่ายิ่งน้ำมันมีความเป็นอะโรมาติกสูงจะทำให้ความแข็งแรงฉีกขาดสูง และความแข็งแรงต่อการขยายรอยแตกสูงด้วย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความสามารถในการกระจายของเขม่าดำในยางเช่นเดียวกับในกรณีของความยืดหยุ่นและความร้อนสะสม (Heat build-up) พบว่าน้ำมันที่มีความเป็นพาราฟินสูงจะให้ความยืดหยุ่นและความร้อนสะสมต่ำ

## 2.6 น้ำมันพืช (Vegetable oils, VO) [5]

น้ำมันพืช (Vegetable Oils) คือน้ำมันที่ผลิตได้จากพืชต่างๆ เช่น ถั่วลิสง ถั่วเหลือง เมล็ดทานตะวัน ดอกคำฝอย ปาล์มน้ำมัน มะพร้าว ละหุ่ง สบู่ดำ เมล็ดเรพ เป็นต้น โดยทั่วไปน้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ที่มีความหนืดสูง มีโครงสร้างหลักเป็นสารไฮโดรคาร์บอนเชื่อมต่อกับกรดไขมัน ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งมีองค์ประกอบชนิดต่างๆ กัน และมีปริมาณไขมันอยู่ในโครงสร้างถึงร้อยละ 94-96 ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้น้ำมันพืชแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน



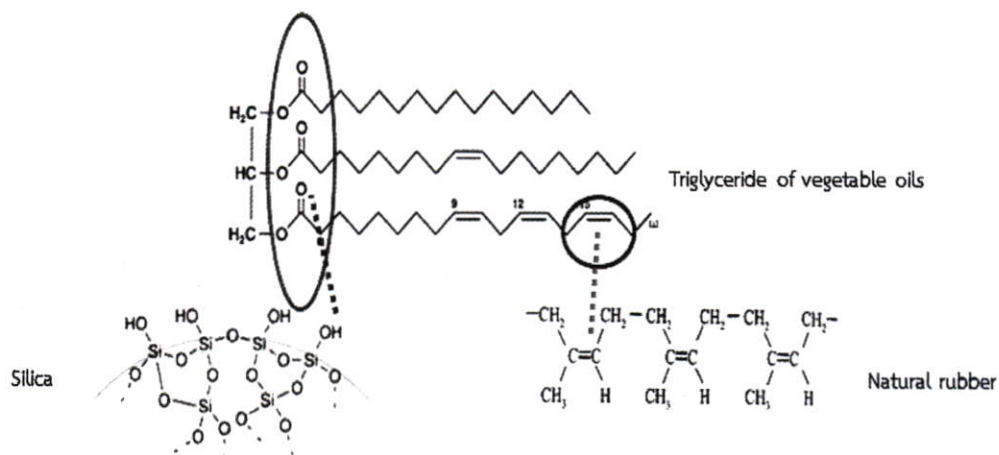
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของน้ำมันพืช

ตารางที่ 2.4 ปริมาณของกรดไขมันของน้ำมันพืชแต่ละชนิดที่ใช้ในงานวิจัย [13-15]

ชนิดของกรดไขมัน	จำนวน C : จำนวนพันธะคู่	ร้อยละปริมาณกรดไขมัน			
		น้ำมันปาล์ม	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันทานตะวัน	น้ำมันรำข้าว
กรดไมริสติก	14 : 0	1.1	0.1	0.2	0.2
กรดปาล์มมิติก	16 : 0	45.1	11.0	6.8	15.0
กรดสเตียริก	18 : 0	4.7	4.0	4.7	1.9
กรดโอเลอิก	18 : 1	38.8	23.4	18.6	42.5
กรดลิโนเลอิก	18 : 2	9.4	53.2	68.2	39.1
กรดลิโนเลนิก	18 : 3	0.3	7.8	0.5	1.1

ข้อดีของการนำน้ำมันพืชมาใช้ในการเป็นน้ำมันช่วยกระบวนการผลิต เนื่องจากน้ำมันมีโครงสร้างสองส่วนที่ช่วยทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติมเกิดได้ดี โดยทำหน้าที่คล้ายกับสารคู่ควบ ดังรูปที่ 2.10 ทำให้การกระจายตัวของสารตัวเติมในยางดีขึ้น ส่วนแรก โครงสร้างหลักที่เป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ที่มีขั้ว สามารถเกิดอันตรกิริยากับสารตัวเติมที่มีขั้วได้ดี ส่วนที่สอง สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมันที่ไม่มีขั้ว สามารถเกิดอันตรกิริยาหรือเกิดการเกี่ยวพันกับสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติที่ไม่มีขั้วได้ดี ซึ่งอาจส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับซิลิกาตกลง และทำให้กลุ่มก้อนซิลิกาแตกตัวได้ดีขึ้น ความยาวของสายโซ่ของน้ำมัน จะผลักรให้สารตัวเติมแตกตัวออกจากกัน

ผลึกให้สายโซ่โมเลกุลยาวอยู่ห่างกัน ปริมาตรอิสระจึงเพิ่มขึ้น เพิ่มความยืดหยุ่นให้กับยาง และพันธะคู่ยังสามารถเกิดอันตรกิริยาหรือพันธะเชื่อมโยงกับยาง จึงช่วยปรับปรุงสมบัติของยางได้ด้วย

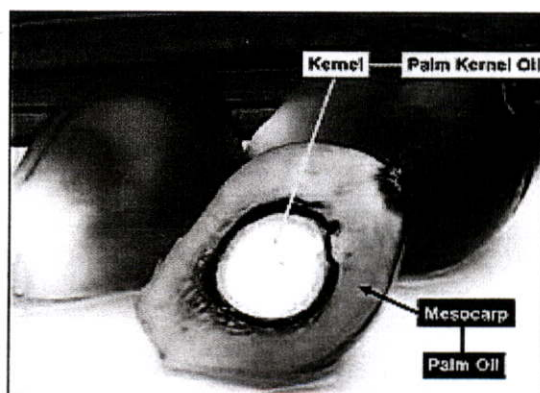


รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างน้ำมันพืชกับซิลิกาและยางธรรมชาติ

### 2.6.1 น้ำมันปาล์ม (Palm oil, PO) [13]

เป็นน้ำมันพืช (Vegetable oil) ที่ใช้วัตถุดิบคือผลของต้นปาล์ม ที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า อีเลอีส กินีเอ็นซิส (*Elaeis guineensis*) ผลปาล์มน้ำมัน (Palm) เป็นพืชน้ำมัน (Oil crop) ซึ่งมีน้ำมันร้อยละ 56 มีสีเหลืองส้มของแคโรทีน (Carotene) น้ำมันปาล์ม (Palm oil) ได้จากผลปาล์ม 2 ส่วนคือ

1. จากเปลือกหุ้มภายนอก (Mesocarp) น้ำมันที่ได้เรียกว่า น้ำมันจากเนื้อเมล็ดปาล์ม (Palm oil)
2. จากเนื้อในของเมล็ด (Palm kernel) น้ำมันที่ได้เรียกว่า น้ำมันจากเมล็ดปาล์ม Palm kernel oil ซึ่งมีน้ำมันร้อยละ 44-48



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของผลปาล์ม [13]

สำหรับกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ กรดปาล์มิติก (Palmitic acid) ที่เป็นกรดไขมันชนิดอิ่มตัวอยู่ประมาณร้อยละ 45 และมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวผสมอยู่ด้วย ได้แก่ กรดโอเลอิก (Oleic acid) และกรดลิโนเลอิก (Linoleic acid)

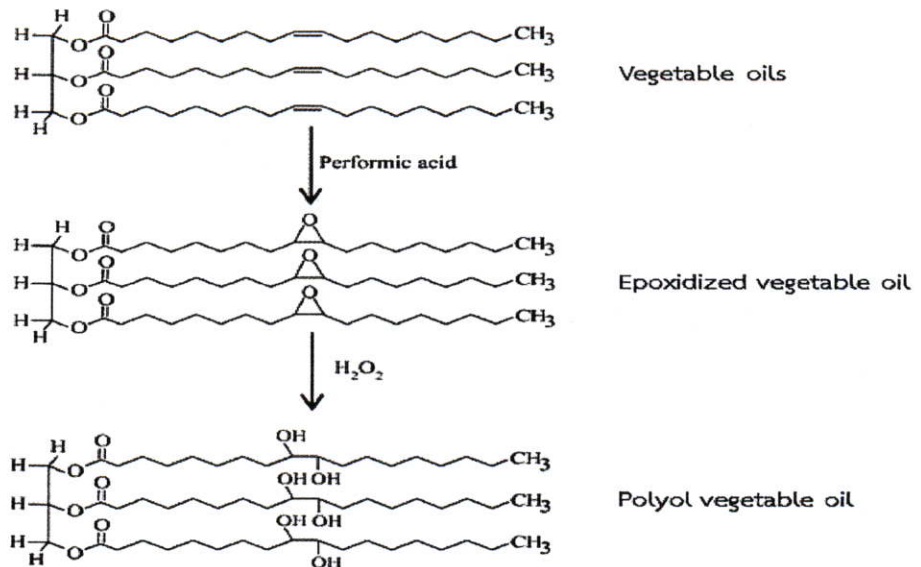
ผลผลิตปาล์มน้ำมันของไทยในช่วงปี 2552-2556 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ร้อยละ 12.3 ต่อปี โดยปี 2556 มีผลผลิต 12.4 ล้านตัน ความต้องการใช้น้ำมันปาล์มของไทย ปี 2552-2556 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งเพื่อการบริโภคและการผลิตไบโอดีเซล ร้อยละ 6.4 และร้อยละ 18.6 ต่อปี ตามลำดับ โดยปี 2556 มีความต้องการใช้น้ำมันปาล์มเพื่อการบริโภค 0.99 ล้านตัน และมีความต้องการใช้น้ำมันปาล์มเพื่อผลิตไบโอดีเซล 0.68 ล้านตัน ผลผลิตปาล์มน้ำมันของไทยทั้งหมดใช้ในการผลิตน้ำมันปาล์มทั้งหมด โดยน้ำมันปาล์มดิบใช้เพื่อการบริโภคภายในประเทศ ร้อยละ 85 ส่วนที่เหลือส่งออกร้อยละ 15 [16]

#### 2.6.1.1. น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxydized palm oil, EPO) และน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxydized soybean oil, ESBO)

สังเคราะห์โดยนำน้ำมันพืช มาทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) และกรดอะซิติก (Acetic acid) ความร้อนประมาณ 55 °C โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ปล่อยทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาอีพอกไซด์ขึ้นเป็นระยะเวลา 5-8 ชั่วโมง หยุดปฏิกิริยาโดยการหล่อเย็น ล้างน้ำมันพืชดัดแปรอีพอกไซด์ที่ได้ด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่ง pH = 7 แยกน้ำกลั่นออกจากน้ำมันพืชดัดแปรอีพอกไซด์แล้วดูความชื้นด้วยโซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส [17] น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์ เป็นสารที่นำมาใช้เป็น พลาสติกไฮเซออร์ของพลาสติกชนิดโพลีไวนิลคลอไรด์ เพื่อทำปะเก็นสำหรับผนังโลหะของขวดแก้วที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ [18]

#### 2.6.1.2 น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิออล (Polyol palm oil, PPO) [19]

สังเคราะห์โดยนำน้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์มาทำปฏิกิริยาการเปิดวงออกซิเรนด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิออล มีประโยชน์ใช้เป็นวัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติในการเตรียมเป็นสารไดออลและพอลิออล แทนการใช้สารไดออลและพอลิออลที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ในการผลิตพอลิยูรีเทนชีวภาพที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น



รูปที่ 2.12 การเตรียมน้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิออล โดยการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) ตามด้วยปฏิกิริยาการเปิดวงออกซิเรนด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ [19]

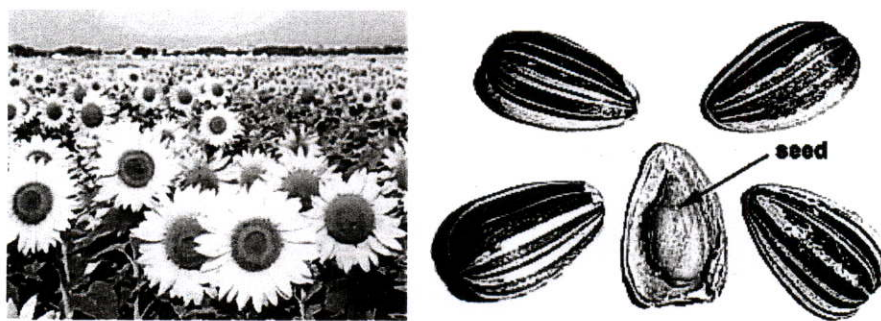
### 2.6.2 น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil, SBO) [20]

เป็นน้ำมันที่สกัดจากเมล็ดถั่วเหลือง (Soybean) ที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า ไกลซีน แมกซ์ แอล (*Glycine max L.*) ถั่วเหลือง เป็นพืชตระกูลถั่วที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของโลกและของประเทศไทย เมล็ดถั่วเหลืองประกอบด้วยโปรตีน (30-50 %) น้ำมัน (13-24 %) และยังมีคาร์โบไฮเดรต (12-24 %) ส่วนประกอบหลักของน้ำมันถั่วเหลืองประกอบด้วยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ได้แก่ กรดโอเลอิก (Oleic acid) และกรดไขมันซึ่งพันธะคู่มากกว่า 1 ตำแหน่ง (Polyunsaturated fatty acid) ได้แก่ กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid)

ผลผลิตถั่วเหลืองภายในประเทศของไทยปี 2552-2556 มีแนวโน้มลดลงร้อยละ 21.1 ต่อปี โดยปี 2556 มีผลผลิต 76,488 ตัน ความต้องการใช้ปี 2552-2556 ความต้องการใช้เมล็ดถั่วเหลืองภายในประเทศเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.3 ต่อปี โดยปี 2556 มีความต้องการใช้ปริมาณ 2.2 ล้านตัน การใช้ประโยชน์มีหลายวัตถุประสงค์ ได้แก่ สกัดน้ำมัน ทำพันธุ์ และแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร คิดเป็นร้อยละ 74.4 ร้อยละ 0.23 และร้อยละ 25.3 ของความต้องการใช้เมล็ดถั่วเหลืองภายในประเทศทั้งหมด [16]

### 2.6.3 น้ำมันทานตะวัน (Sunflower oil, SFO) [21]

ทานตะวันเป็นพืชให้น้ำมันที่มีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาเหนือ ประเทศที่เป็นผู้นำในการผลิตเมล็ดทานตะวัน คือประเทศรัสเซีย น้ำมันทานตะวันได้จากการบีบอัดเมล็ดทานตะวัน (Sunflower) ที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Helianthus annuus L.*



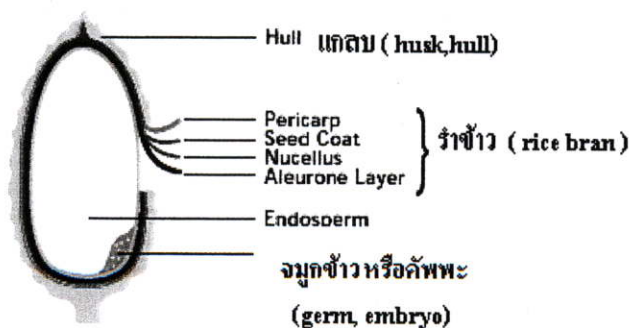
รูปที่ 2.13 ดอกทานตะวันและเมล็ดทานตะวัน [21]

เมล็ดทานตะวัน จะมีน้ำมันอยู่ประมาณร้อยละ 22 และโปรตีนประมาณร้อยละ 37 ประกอบด้วยกรดลิโนเลอิกร้อยละ 44-75 นอกจากนี้แล้วก็มีค่าความไม่อิ่มตัว (Degree of unsaturated) ของกรดไขมัน (วัดโดยใช้ค่า Iodine value) อยู่สูงใกล้เคียงกับของน้ำมันถั่วเหลือง คือของน้ำมันถั่วเหลืองมีค่าประมาณ 134 และของน้ำมันทานตะวัน มีค่าประมาณ 132 [22] ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และเป็นส่วนผสมในครีมวนดนม ครีมและโลชั่นบำรุงผิว นอกจากนี้ในรัสเซียยังใช้ในการผลิตสี น้ำมันชักเงา และเรซินสังเคราะห์ (Synthetic resin) และในสหรัฐอเมริกาใช้ผสมน้ำมันดีเซล (75:25) เพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องจักรทางการเกษตรอีกด้วย

#### 2.6.4 น้ำมันรำข้าว (Rice bran oil, RBO) [23]

กระบวนการแปรรูปข้าวเปลือกให้เป็นข้าวสาร มีผลพลอยได้คือ ข้าวหัก ปลายข้าว รำดิบ แกลบ น้ำมันรำข้าวได้จากการนำรำละเอียดไปสกัดเอาน้ำมันออกโดยวิธีทางเคมี ซึ่งมีน้ำมันร้อยละ 13.5 น้ำมันรำข้าวที่ได้ปัจจุบันนิยมนำมาบริโภคใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารเสริม เครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์สปา ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันรำข้าวเป็นแหล่งของกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acids) สูงและยังมีสารป้องกันการออกซิไดซ์ในปริมาณที่สูง จึงทำให้ในปัจจุบันอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันจากรำข้าวขยายตัวเพิ่มขึ้น

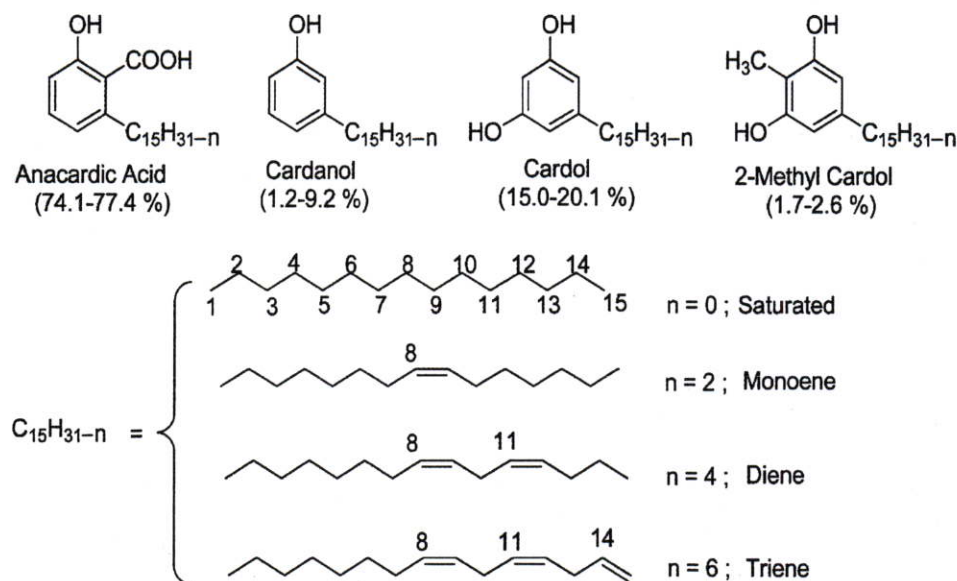
อุปสงค์และอุปทานข้าวของไทย ปี 2552-2556 ผลผลิตเพิ่มจาก 32.0 ล้านตันข้าวเปลือก เป็น 37.3 ล้านตันข้าวเปลือก คิดเป็นร้อยละ 4.8 ความต้องการใช้ลดลงในช่วง ปี 2552-2556 จาก 15.1 เป็น 14.1 ล้านตันข้าวเปลือก คิดเป็นร้อยละ -2.24 [16]



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว [24]

## 2.6.5 น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid, CNSL) [25]

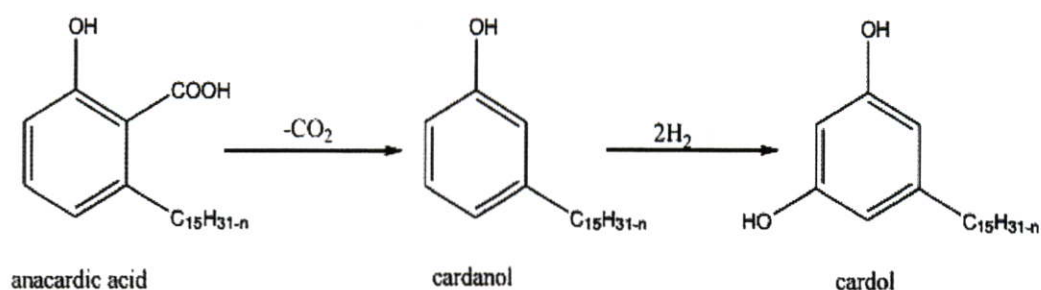
เปลือกเมล็ดใน นับเป็นส่วนที่สำคัญรองลงมาจากเมล็ดใน เปลือกหุ้มเมล็ด ประกอบด้วยของเหลวที่เรียกว่า น้ำมันเปลือกเมล็ดใน (Cashew nut shell liquid, CNSL) ประมาณร้อยละ 20 ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย น้ำมันเปลือกเมล็ดในนี้จะแยกออกมาครั้งแรกในระหว่างการคั่ว หรือทอดเมล็ดก่อน กะเทาะเปลือก น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์นี้ มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม เหนียวข้น ไม่ละลายน้ำ ละลายได้ในตัวทำละลายแทบทุกชนิด เมื่อทำปฏิกิริยากับเพอร์ริคคลอไรด์ได้สารละลายสีม่วง ในธรรมชาติน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ประกอบด้วยสารที่สำคัญ คือกรดอะนาคาติก (Anacardic acid) คาร์ดอล (Cardol) คาร์ดานอล (Cardanol) และ 2-เมทิลคาร์ดอล (2-Methylcardol) โดยกรดอะนาคาติก สามารถเปลี่ยนไปเป็นคาร์ดานอลโดยกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation)



รูปที่ 2.15 องค์ประกอบของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ [26]

### 2.6.5.1. น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตัดแปรดีคาร์บอกซิเลต (Decarboxylated cashew nut shell liquid, DCNSL) [27]

เป็นน้ำมันที่มีการเปลี่ยนกรดอะนาคาติกให้เป็นคาร์ดานอลด้วยกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ทำโดยให้ความร้อนกับ CNSL ที่อุณหภูมิ 130-140 °C ภายใต้อุณหภูมิความดันบรรยากาศ 300-400 มิลลิเมตรปรอท ด้วยเครื่องสกัดตัวทำละลายชนิดสุญญากาศของเหลวที่เหลือถูกนำไปกลั่นในภาวะภายใต้สุญญากาศอีกครั้งเพื่อให้ได้คาร์ดานอลที่บริสุทธิ์



รูปที่ 2.16 กระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน [27]

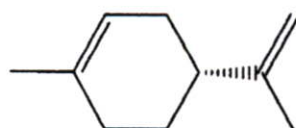
น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผลิตโดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย คุณภาพจะต่างจากน้ำมันที่ได้จากการเคี้ยวหรือทอด ซึ่งใช้ความร้อนทำให้กรดเปลี่ยนไปเป็น Cardanol ซึ่งเป็นสารประเภทฟีนอล มีประโยชน์ใช้เป็นสารช่วยการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยางได้ [28] น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีประโยชน์ใช้ทำเรซิน พลาสติกและเป็นส่วนผสมในการทำผ้าเบรค คลัชรถยนต์ ทำสายพานที่ใช้ในอุตสาหกรรม ใช้ทำสารสังเคราะห์ เพื่อเคลือบหรือนำไปผสมวัสดุอื่น ทาวัตถุต่างๆ ที่ต้องการให้มีความคงทนต่อน้ำหรือน้ำมัน เช่น ทาเรือ แห อวน เป็นต้น ใช้เป็นสีทาป้องกันรา ทำกาว และกระเบื้องยางปูพื้น น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่นำเข้าไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ นั้น ส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 90 ใช้ในอุตสาหกรรมในการทำผ้าเบรค คลัชรถยนต์ โดยนำไปทำปฏิกิริยากับสารอื่น เช่น อัลดีไฮด์ (Aldehyde) หรือเอมีน เป็นสารโมเลกุลใหญ่ (Polymer) ใช้เป็นส่วนประกอบในการทำผ้าเบรคเพราะสมบัติทนต่อความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน ทำให้ประสิทธิภาพในการห้ามล้อดีมากในขณะใช้งาน [27]

### 2.6.6 น้ำมันส้ม (Orange oil, OO) [29]

ส้ม (Orange) มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ คือ *Citrus Sinensis Osbeck* (syn. *C. aurantium* var. *sinensis* L., *C. aurantium* Lour.)

น้ำมันส้ม (Orange oil) ที่สกัดได้จากเปลือกส้มประกอบด้วยโมโนเทอร์พีน (Monoterpenes) ประมาณ 50% สามารถละลายในแอลกอฮอล์ 90% ได้ 1:2, 1:3 v/v

น้ำมันส้มที่ได้จากผิวจะได้ 0.5-2.5% แต่บางที่อาจมีมากถึง 3.5% ตามแหล่งที่ปลูก โดยองค์ประกอบร้อยละ 95 คือ Limonene ส่วนประกอบของอัลดีไฮด์ (Aldehydes) จะลดลงเล็กน้อยหลังจากมีการเจริญเติบโตของผลไม้เต็มที่ องค์ประกอบน้ำมันจะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ตามแหล่งที่ปลูก บางที่แหล่งที่ปลูกอาจมีองค์ประกอบเหมือนกันแต่อาจแตกต่างกันตามพื้นที่และประเทศ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ยาและเครื่องสำอาง เนื่องจากมีกลิ่นหอมและมีสรรพคุณช่วยป้องกันการอักเสบ ต้านทานแบคทีเรีย



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของ Limonene [30]

ตารางที่ 2.5 สมบัติของน้ำมันพืชที่ใช้ในงานวิจัย [30-31]

สมบัติ	น้ำมัน ปาล์ม (PO)	น้ำมัน ถั่วเหลือง (SBO)	น้ำมัน ทานตะวัน (SFO)	น้ำมัน รำข้าว (RBO)	น้ำมัน เปลือก เมล็ด มะม่วง หิมพานต์ (CNSL)	น้ำมันส้ม (OO)
Specific gravity	0.912	0.917- 0.921	0.915- 0.919	0.916- 0.921	0.911- 0.918	0.83 – 0.86
Iodine value (g/100g)	56-61	125-128	120-134	99-108	79-89	N/A
Saponification value (mg KOH/g)	194-202	188-195	188-193	212	N/A	N/A
Refractive index	1.455- 1.456	1.470- 1.478	1.474- 1.476	1.470- 1.473	1.462- 1.464	1.472 – 1.473
Smoke point (°C)	223	257	220	213	N/A	N/A

## 2.7 การผสมยาง (Rubber compounding) [2]

การผสมยางหรือการคอมพาวด์ยาง (Rubber compounding) คือขั้นตอนการผสมยางดิบ (ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์) ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยง (Vulcanization) กับสารเติม-แต่ง (Additives) ต่างๆ องค์ประกอบสำคัญของยางผสมสูตรหรือยางคอมพาวด์ (Rubber compound) ได้แก่

- ยาง (Elastomers) เป็นองค์ประกอบหลัก สามารถเลือกใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น ยางดิบ ยางมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatches) หรือยางคอมพาวด์สำเร็จ ยางผสมน้ำมัน (Rubber oil) ยางผสมเขม่าดำ (Rubber-carbon black) ยางรีเคลม (Reclaimed rubber) หรือยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer, TPEs)

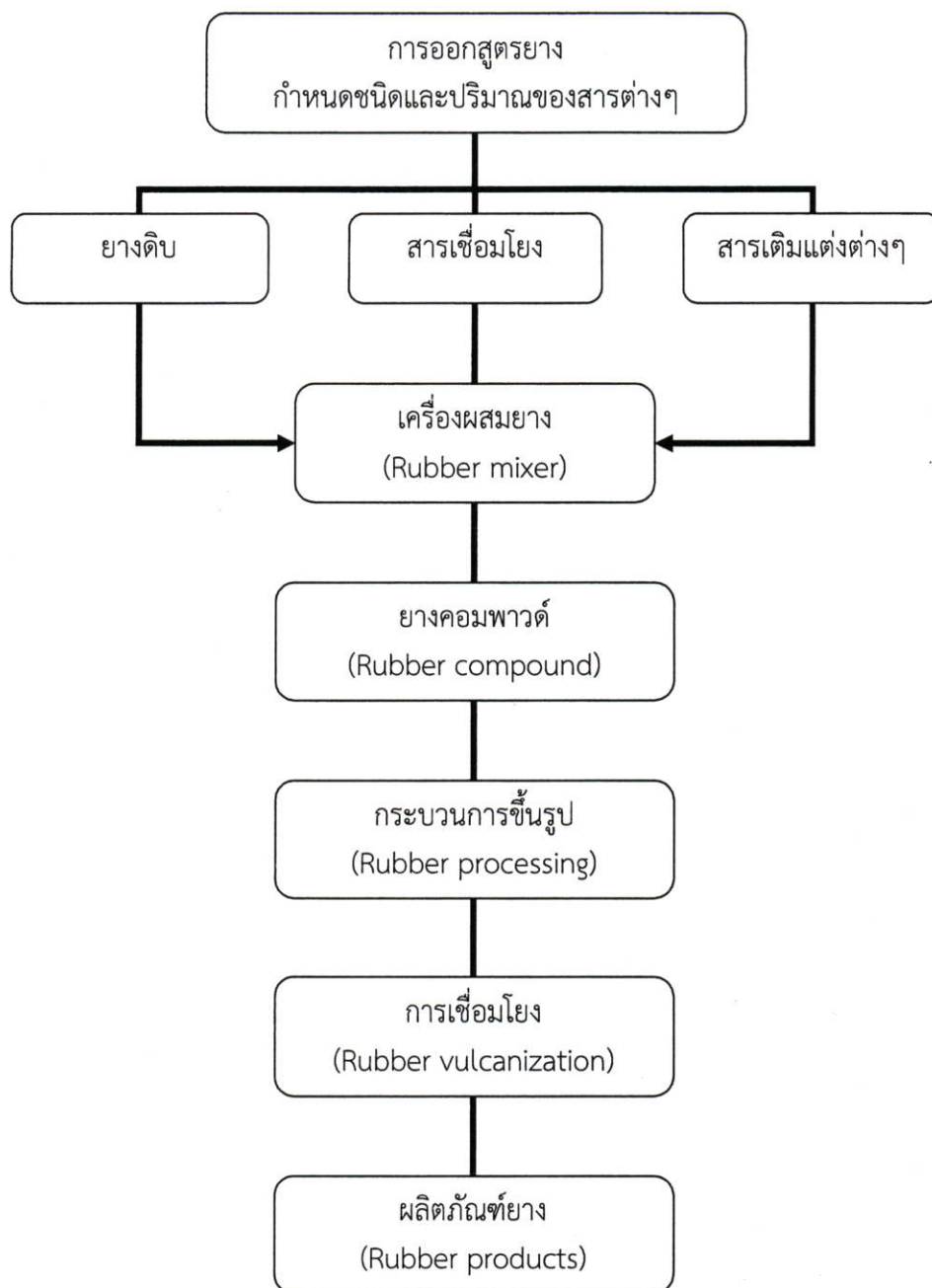
- สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) เช่น กำมะถัน (Sulfur, S) เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ออกไซด์ของโลหะ (Metal oxides) เป็นต้น ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็น โครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-D Network) โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง (ยกเว้นโครงสร้างของยางเทอร์โมพลาสติก (TPEs))

- สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) อาจเรียกสั้นๆว่า “สารเร่ง” ทำหน้าที่ช่วยสารเชื่อมโยงทำให้มีอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Rate of vulcanization) เร็วขึ้น ลดเวลาเชื่อมโยง (Cure time) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นและใช้สารเชื่อมโยงน้อยลง นอกจากนี้ยังทำให้สมบัติของยางที่ผ่านการเชื่อมโยงดีขึ้นด้วย

- สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators) อาจเรียกสั้นๆว่า “สารกระตุ้น” ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง โดยเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) ทำให้สารเร่งมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น มีอัตราเร็วของการเชื่อมโยงสูงขึ้น เวลาเชื่อมโยงลดลง
  - สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) เป็นสารราคาถูก ทำหน้าที่เพิ่มเนื้อหรือลดต้นทุนให้กับผลิตภัณฑ์ยาง สารตัวเติมบางชนิดนอกจากใช้ลดต้นทุนแล้วยังเพิ่มความแข็งแรงหรือเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับยาง เช่น เหมม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica) เป็นต้น
  - สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) คือสารเคมีที่ใส่เพื่อช่วยปรับปรุงความสามารถในการผสมหรือขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้ง่ายขึ้น
  - สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants หรือ Age-Resistors) ได้แก่ สารป้องกันออกซิเดชันหรือแอนต้ออกซิแดนซ์ (Antioxidants) สารป้องกันโอโซนหรือแอนต้อโอโซนแนนท์ (Antiozonants) รวมทั้งสารอื่นๆ ที่ช่วยลดการเสื่อมสภาพของยางจากสิ่งแวดล้อม เช่น ออกซิเจน โอโซน แสงแดด ความร้อน รังสียูวี (UV radiation) เป็นต้น
  - พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) หรือสารเพิ่มความนิ่ม (Softeners) คือสารที่ใส่เพื่อเพิ่มความนิ่มหรือความเหนียวหยุ่นของยาง
  - สารหล่อลื่น (Lubricants) ช่วยหล่อลื่นหรือลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุหรือหล่อลื่นระหว่างเครื่องผสมกับวัสดุ ช่วยกระบวนการผลิตทำให้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้ง่ายขึ้น
  - สารหน่วง (Retarders) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงช้าลง มีเวลานานเพียงพอในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง
  - สารให้สี (Colorants) เปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ยางให้มีสีสันสวยงามตามต้องการ
  - สารให้ฟอง (Blowing agents) ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุน มีโครงสร้างแบบเซลลูลาร์ (Cellular structure) เช่น ยางฟองน้ำ ยางโฟม
  - สารให้กลิ่น (Odorants) ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีกลิ่นหอมหรือระงับกลิ่นของยางที่ไม่พึงปรารถนา
  - สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) ช่วยเพิ่มสมบัติการยึดติด (Tackiness) ที่ผิวหน้ายางให้เหนียวและยึดติดกันกับวัสดุอื่นหรือยางด้วยกันเองได้ดีขึ้น
- จะเห็นได้ว่าการผลิตผลิตภัณฑ์ยางชนิดหนึ่ง ต้องใช้สารเติมแต่งหลายชนิดและมีจำนวนมาก ที่สำคัญคือจำเป็นต้องมีการผสมสารเชื่อมโยงและสารเติมแต่ง การผสมยางจึงเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญยิ่งต่อกระบวนการผลิตและมีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากการผสมยางไม่ดีหรือไม่มีประสิทธิภาพ อาจทำให้สารเติมแต่งไม่กระจายตัวหรือเกิดการเชื่อมโยงก่อนเวลา ทำให้ไม่ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ

### 2.7.1 กระบวนการผลิต (Processing)

ขั้นตอนในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางสามารถแสดงได้ดังแผนผังในรูปที่ 2.18 นี้ เริ่มต้นกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีการ “ออกสูตรยาง” (Rubber formulation) คือการกำหนดชนิดและปริมาณยางและสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ ที่จะผสมเข้ากันเป็นยางคอมพาวด์ ทั้งการผสมและสูตรยาง (Rubber formulas หรือ Recipes) รวมทั้งชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งเหล่านี้ จะมีผลโดยตรงกับสมบัติต่างๆ ของยาง



รูปที่ 2.18 แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง [2]

### 2.7.2 การผสมยางกับสารเคมี (Mixing)

เครื่องมือที่ใช้ผสมยางโดยทั่วไปมี 2 ระบบ คือเครื่องผสมระบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) เช่น เครื่องผสมแบบบานบุรี (Banbury mixer) เครื่องนวด (Kneader) เป็นต้น เครื่องผสมแต่ละชนิดมีหลายขนาดตั้งแต่ขนาดเล็ก ใช้ในห้องปฏิบัติการหรือมีขนาดใหญ่มากสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม เครื่องผสมแบบ Two-roll mill มีข้อดีคือ ราคาถูก ใช้งานง่าย นิยมใช้แพร่หลาย แต่ใช้เวลาผสมนานกว่าและต้องใช้แรงงานผู้ผสมมากกว่าเทียบกับเครื่องผสมแบบ Internal mixer ซึ่งมีราคาแพง แต่ให้แรงเฉือนมากกว่าเกิดการกระจายตัวในการผสมดีกว่าและใช้เวลาในการผสมน้อยกว่า นอกจากนี้ยังผสมยางแต่ละครั้ง (Batch) ในปริมาณมากกว่า

### 2.7.3 ขั้นตอนการบดผสม (Mixing step)

ในการบดผสมยางอย่างมีประสิทธิภาพและบดยางให้มีความสม่ำเสมอในคุณภาพนั้น ลำดับขั้นตอนการเติมสารเคมีต่างๆ ต้องเป็นไปตามขั้นตอนอย่างถูกต้อง หลักการโดยทั่วไปคือ หลังจากการบดยางให้นิ่มก็จะเติมสารที่บดให้กระจายในเนื้ออย่างไต่ยากก่อน เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (Stearic acid) ผงเขม่าดำ เพราะช่วงนี้อุณหภูมิในการบดยังต่ำ และยางมีความหนืดสูง แรงกระทำเชิงกลจึงมีมาก จากนั้นจึงเติมสารเติมแต่งที่ไม่เสริมแรง สารอื่นๆ สารที่แนะนำให้เติม ลำดับสุดท้าย คือ สารตัวเร่ง กำมะถัน และสารป้องกันยางตาย (Scorch) ยางที่ได้หลังจากที่ผสมสารเคมีต่างๆ เรียบร้อยแล้วจะเรียกว่า ยางคอมพาวด์ (Rubber compound)

## 2.8 การทดสอบสมบัติของยาง [2]

การทดสอบที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมยางแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ การทดสอบคุณภาพยางดิบ การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต และการทดสอบสมบัติของยางที่คงรูปแล้ว

### 2.8.1 การทดสอบคุณภาพของยางดิบ

จะทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางส่วนใหญ่ ถ้าเป็นยางธรรมชาติจะมีการทดสอบ สิ่งเจือปน ความชื้นและสารประกอบบางอย่าง เช่น ไนโตรเจน ผงเถ้า ความอ่อนตัวและดัชนีความอ่อนตัวของยาง (Plasticity and plasticity retention index) ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ส่วนยางสังเคราะห์มักทดสอบค่าความหนืดมูนนี่อย่างเดียว

เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1646 และ ISO 289 เป็นเครื่องมือทดสอบสมบัติการไหลหรือความหนืดของยางทุกชนิด ทั้งยางดิบและยางคอมพาวด์ (Rubber compound) หรือยางที่ผสมสารเติมแต่งแล้ว สามารถใช้ประโยชน์จากการทดสอบในหลายลักษณะคือ หาค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity, MV) ของยางดิบและยางคอมพาวด์เพื่อทดสอบมาตรฐานของยางหรือเพื่อควบคุมคุณภาพ

องค์ประกอบของเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ประกอบด้วย จานหมุนโลหะ (Rotor) หมุนอยู่ในตัวอย่างยางที่อยู่ภายในห้องทดสอบตัวอย่างปิด ที่ควบคุมอุณหภูมิและความดันตามกำหนด จานหมุนโลหะจะหมุนที่ความเร็วที่เท่ากับ  $2 \pm 0.02$  รอบต่อวินาที (rpm) ให้อัตราเร็วเฉือนเฉลี่ย (Average shear rate) ต่ำ (ประมาณ  $1-2 \text{ S}^{-1}$ ) อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ (Test chamber) จะควบคุมเท่ากับอุณหภูมิขึ้นรูปหรืออุณหภูมิเชื่อมโยงยาง เช่น 100, 120, 125 และ  $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นต้น ที่ผิวด้านในของห้องทดสอบจะมีลักษณะเป็นร่อง เพื่อเพิ่มแรงเสียดทานและป้องกันการเลื่อนไถลของยางกับผิวโลหะ ค่าความแข็งที่ยางมีต่อการหมุนจานโลหะที่มียางห่อหุ้มอยู่ จะทำให้เกิดแรงบิด (Torque) เครื่องจะมีระบบวัดแรงบิดนี้และเปลี่ยนให้เป็นหน่วยความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity, MV) ซึ่งเป็นค่าความหนืดที่ไม่มีหน่วย เป็นค่าความหนืดพิเศษที่กำหนดขึ้นสำหรับการวัดความหนืด โดยเครื่องวัดความหนืดนี้โดยเฉพาะและไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความหนืดของของเหลวแบบอื่นๆ กำหนดให้แรงบิด (Torque)  $8.30 \pm 0.02$  นิวตัน-เมตร (Nm) มีค่าเท่ากับค่าความหนืดมูนนี่  $100 \pm 0.5$  หน่วยมูนนี่

จานหมุน (Rotor) จะมีลักษณะผิวเป็นร่อง เพื่อเพิ่มผิวสัมผัสและแรงเสียดทาน เป็นการป้องกันการเลื่อนไถลระหว่างจานโลหะกับยางตัวอย่าง ในการทดสอบค่าความหนืดมูนนี่มีการใช้จานหมุนโลหะ 2 ขนาด คือ

จานหมุนขนาดใหญ่ (Large rotor, L) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $38.10 \pm 0.03$  มิลลิเมตร หนา  $5.54 \pm 0.03$  ใช้สำหรับการทดสอบยางทั่วไป

จานหมุนขนาดเล็ก (Small rotor, S) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $30.48 \pm 0.03$  มิลลิเมตร หนา  $5.54 \pm 0.03$  ใช้สำหรับการทดสอบยางที่มีความหนืดสูงมาก เมื่อวัดความหนืดด้วยจานหมุนขนาดใหญ่แล้วได้ค่ามูนนี่เกิน 200 หน่วย เนื่องจากจานหมุนขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับยางน้อยกว่า จานหมุนขนาดใหญ่ ทำให้ได้ค่าความหนืดมูนนี่น้อยกว่าจานหมุนขนาดใหญ่

ยางที่ทำการทดสอบความหนืดมูนนี่ สามารถเตรียมตัวอย่างยางได้โดยการรีดด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ให้เป็นเนื้อเดียวกันและเป็นแผ่นหนาประมาณ 1 เซนติเมตร หรือ  $3/8$  นิ้ว วางตัวอย่างทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที แล้วนำไปตัดเป็นชิ้นตัวอย่าง 2 แผ่น ขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน (ประมาณ 4.5-5.0 มิลลิเมตร) จากนั้นนำตัวอย่างวางประกบด้านบนและด้านล่างของจานหมุน (ควรเจาะรูที่แผ่นยางที่ประกบด้านล่างเพื่อใส่แกนของจานหมุน) อาจใช้แผ่นเซลโลเฟนหรือแผ่นพลาสติกบาง 0.25 มิลลิเมตร (0.001 นิ้ว) รองป้องกันตัวอย่างยางเหนียวติดผนังด้านในของห้องทดสอบ เมื่ออุณหภูมิของเครื่องเท่ากับอุณหภูมิที่ทดสอบ (เช่น  $100^{\circ}\text{C}$  สำหรับยางดิบ  $125^{\circ}\text{C}$  สำหรับยางคอมพาวด์เพื่อดูลักษณะการเชื่อมโยง ฯลฯ) ให้ทำการปิดห้องทดสอบ ยางภายในห้องนี้จะได้รับความร้อนช่วงแรกตามเวลาที่กำหนด (Preheat time) นิยมใช้เท่ากับ 1 นาที ก่อนเริ่มทำการเดินเครื่องให้จานโลหะหมุน ผลการทดสอบจะแสดงในรูปของกราฟระหว่างความหนืดมูนนี่กับเวลาที่ผ่านไป ค่าความหนืดมูนนี่อ่านเมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับระยะเวลาที่กำหนด นิยมอ่านค่าเมื่อเวลาผ่านไป 4 นาที

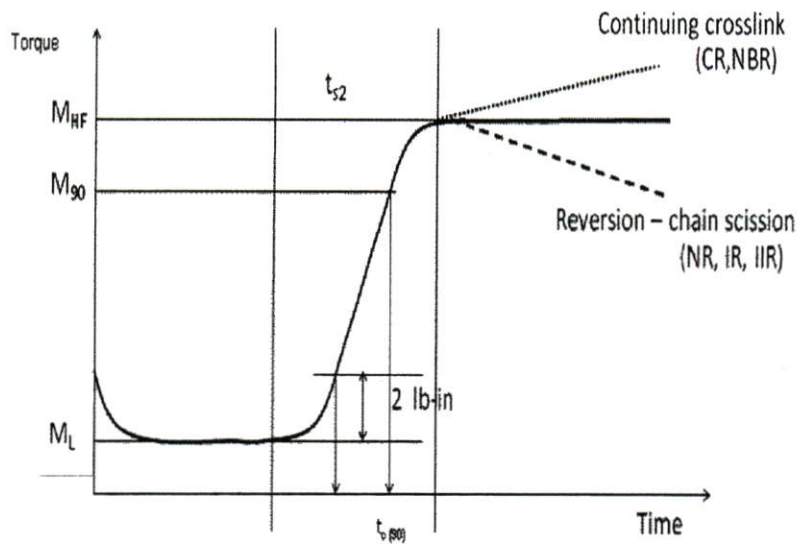
### 2.8.2 การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต

สมบัติที่จำเป็นอย่างยิ่งได้แก่ สมบัติการไหล ซึ่งแสดงในรูปค่าความหนืดมูนนี่ ในการศึกษาลักษณะการคงรูปของยางก็จะวัดโดยใช้เครื่อง Oscillating disc rheometer หรือ Moving die rheometer เป็นต้น

1. เครื่องวัดการไหลแบบจานส่าย (Oscillating disc rheometers, ODR) เป็นเครื่องที่สามารถวัดการเชื่อมโยงของยางได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยาง และห้องปฏิบัติการทดสอบยางทั่วไป เพื่อใช้ในการหาสภาวะการเชื่อมโยงที่เหมาะสม หาเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตยาง และใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง หลักการทำงาน คือการตรวจวัดความแข็งของยาง โดยการวัดการเปลี่ยนแรงหมุน (Torque) ของจานรูปโคเนคริ่งวงกลม (Biconical disc) หมุนส่ายอยู่ในตัวอย่างยางที่มีการควบคุมอุณหภูมิ

2. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer, MDR) เป็นเครื่องวัดการเชื่อมโยงชนิดใหม่ที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิรวดเร็ว เนื่องจากใช้ตัวอย่างเล็กและบางกว่า เป็นผลให้การเชื่อมโยงได้รวดเร็วกว่า ไม่มีข้อผิดพลาดของการทดสอบเนื่องจากแรงเสียดทานของจานหมุน ซึ่งให้ข้อมูลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำกว่า ให้ข้อมูลมากขึ้นดีกว่า เช่น ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $E''$ ) อัตราการเชื่อมโยง (Cure rate) และ Phase angle

การวัดการเชื่อมโยงยางสามารถวัดได้จากการเพิ่มแรงบิด (Torque) ที่ใช้เพิ่ม ทำให้การหมุนของจานที่หมุนคงที่ เนื่องจากทดสอบที่อุณหภูมิสูง จึงไม่มีผลของการเปลี่ยนแรงบิดอันเนื่องมาจากความหนืด ดังนั้นการเพิ่มแรงบิดของตัวอย่างยางที่เกิดการเชื่อมโยงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนจุดเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของยาง ผลการทดสอบสามารถแสดงในรูปกราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา ซึ่งเรียกว่า กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) [2]

ตามมาตรฐาน ASTM ได้นิยามค่าต่างๆในกราฟการเชื่อมโยงดังนี้

- $M_L$  = ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)
- $M_{HF}$  = ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)
- $M_{HR}$  = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟที่สูงสุดแล้วลดลง (Reversion)
- $M_H$  = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟในเวลาที่ยืดทดสอบ เมื่อกราฟเพิ่มขึ้น (Marching)
- $M_{HF} - M_L$  = ค่าระดับการเชื่อมโยงของยาง (State of cure)
- $t_{s2}$  = เวลาเริ่มเชื่อมโยง หรือ เวลาสกอร์ช (Scorch time) เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจนกระทั่งแรงบิด เพิ่มขึ้น 2 ปอนด์-นิ้ว (lb-in) เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด ( $M_L$ )
- $M_{90}$  = ค่าแรงบิดที่ 90 % ของการเชื่อมโยง คำนวณได้จาก

$$M_{90} = M_L + 0.9 (M_{HF} - M_L) \quad (2.1)$$

- $t_{c90}$  = เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อมโยง 90 % ( $M_{90}$ ) นิยามเท่ากับเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการเชื่อมโยงยาง (Optimum cure time)
- CRI = ดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (Cure rate index) คำนวณได้จากสมการ

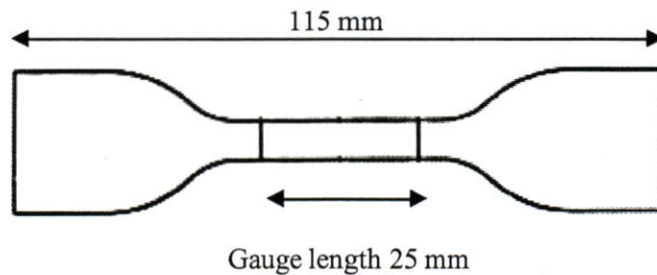
$$\text{Cure rate index (CRI)} = 100 / (t_{c90} - t_{s2}) \quad (2.2)$$

### 2.8.3 การทดสอบสมบัติของยางคงรูป

สมบัติพื้นฐานของยางคงรูปที่ต้องทดสอบ ได้แก่ ค่ามอดุลัส (Modulus) ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ความแข็งกด (Hardness) การหักงอ (Flex cracking) การล้าตัว (Fatigue) การต้านทานโอโซน (Ozone resistance) การกระดอน (Rebound resilience) ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) การยุบเนื่องจากแรงอัด (Compression set) และความร้อนสะสมในยาง (Heat build-up) เป็นต้น

#### การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบแรงดึงคือ การวัดความสามารถของยางที่จะทนทานต่อแรงดึงยืดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียหาย ค่ามอดุลัสแรงดึงจะเป็นค่าที่บอกถึงความแข็ง (Stiffness) ของยาง สามารถหาได้จากความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) การทดสอบแรงดึงทำได้การโดยการยืดชิ้นงานตัวอย่างที่มีรูปร่างคล้าย “ดัมเบลล์” (Dumb-bell) ดังรูป 2.20 โดยใช้ที่จับ (Grips) สองชุด ที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่ และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่โดยมีเซลล์วัดแรง (Load cells) เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการขาดที่บริเวณตรงกลางของตัวอย่าง ห่างจากบริเวณที่จับ การยืดออกของชิ้นงานสามารถวัดได้จากการวัดระยะห่างระหว่างสองเส้น (Gauge marks) บนชิ้นงานตัวอย่าง ที่ห่างกันเป็นระยะเท่ากับ “ความยาวเกจ” (Gauge length) ตามมาตรฐานใช้ความยาวเกจ 20 หรือ 25 มิลลิเมตร โดยการใช้เครื่อง “เอ็กซ์เทนโซมิเตอร์” (Extensometer) แบบสัมผัส (Contacting extensometer) หนีบกับชิ้นตัวอย่าง หรือแบบไม่สัมผัส (Non-contacting extensometer) อัตราเร็วการดึงที่ใช้สำหรับยาง (Elastomer) เท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างขนาดและรูปทรงชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง

จากแรงดึงที่ใช้และการยืดออกของตัวอย่าง สามารถนำมาคำนวณค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้ดังนี้

$$\text{ความเค้นดึง (Tensile stress), } \sigma = F / A \quad (2.3)$$

$$\text{ความเครียดดึง (Tensile strain), } \epsilon = (l - l_0) / l_0 = \Delta l / l_0 \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละความเครียดหรือร้อยละการยืดตัว (\% Strain or Elongation)} \\ = (\Delta l / l_0) \times 100 \quad (2.5) \end{aligned}$$

$$\text{มอดูลัส (Modulus), } E = \frac{\text{ความเค้นดึง} / \text{ความเครียดดึง}}{=} = \sigma / \epsilon \quad (2.6)$$

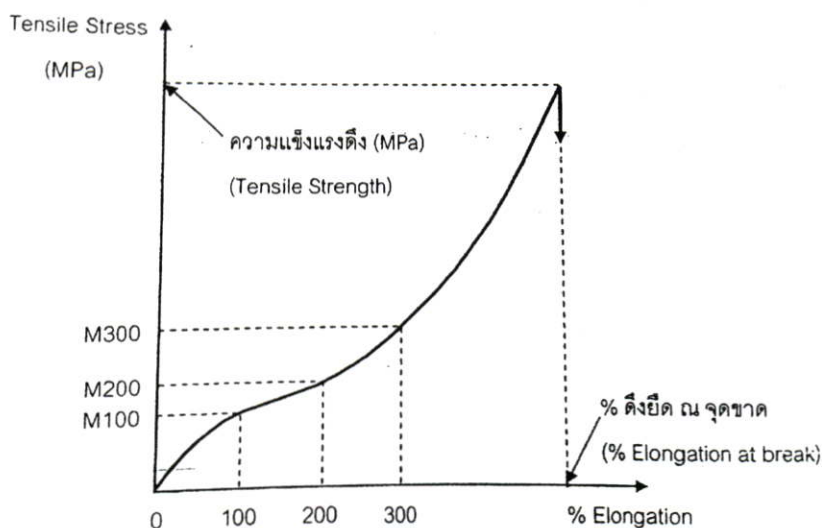
เมื่อ  $F$  = แรงที่ใช้ในการดึงยึดตัวอย่าง (หน่วยเป็นนิวตัน (N))

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร ( $\text{mm}^2$ ))

$l$  = ระยะห่างระหว่างขีดสองเส้นบนตัวอย่าง (Gauge marks) ขณะดึง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm))

$l_0$  = ระยะห่างระหว่างขีดสองเส้นบนตัวอย่างก่อนดึง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร(mm))

เนื่องจากยางมีความยืดหยุ่น สามารถดึงยึดได้หลายเท่าของขนาดเดิม โดยมากแล้วจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ “มอดูลัสของยาง” (Rubber modulus) เป็นค่าความเค้น (Stress) ที่เปอร์เซ็นต์ความเครียดหนึ่งๆ เช่น M100 คือ ความเค้นที่ 100% การยืด, M300 คือ ความเค้นที่ 300% การยืด แสดงดังรูป 2.21



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) ของการดึงขึ้นยาง ตัวอย่างประเภทยาง

- ค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) หมายถึง ค่าความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ที่จุดขาด เรียกว่า ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break) หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่ ( $\text{N}/\text{mm}^2$  หรือ MPa)

- ค่าร้อยละการดึงยึด (% Elongation at break) หมายถึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างเทียบกับความยาวเกจ ไม่มีหน่วย

- ค่ามอดูลัสของยาง คือ ค่าความเค้นดึง (Tensile stress) ที่ความเครียดหนึ่งๆ ของวัสดุจำพวกยางเช่นมอดูลัสที่ 100% (M100), 200% (M200) หรือ 300% (M300) หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิระวัฒน์ พันธนิธย์ [25] ศึกษาการใช้น้ำมันเปลือกหุ้มเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid oil, CNSL) เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต เปรียบเทียบกับน้ำมันพาราฟิน และน้ำมันผสมระหว่างน้ำมัน CNSL กับ น้ำมันพาราฟิน (1/1) ปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 phr ในยางผสมระหว่างยางอีพิตีเอ็ม และยางธรรมชาติอัตราส่วน 50 : 50 พบว่า เวลาในการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ CNSL สูงสุด น้ำมัน CNSL มีส่วนทำให้เวลาในการคงรูปดีขึ้น และส่งผลให้ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาดลดลง ส่วนกรณีการสภาพเนื่องจากความร้อนและรังสียูวี สารช่วยกระบวนการผลิต มีความสำคัญต่อสมบัติเชิงกลค่อนข้างน้อย เมื่อปริมาณสารช่วยกระบวนการผลิตมากขึ้น

วีรณัฐ สระแก้ว [29] ศึกษาการใช้น้ำมันหอมระเหย ได้แก่ น้ำมันมะนาว (Lemon oil) น้ำมันส้ม (Orange oil) และน้ำมันมะกรูด (Kaffir oil) เป็นสารเติมแต่ง (Additives) เปรียบเทียบกับน้ำมันจากปิโตรเลียม ได้แก่ น้ำมันอะโรมาติก น้ำมันแนฟทานิก น้ำมันพาราฟิน ปริมาณ 1, 3, 5, 10 และ 20 phr ในยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำ (N330) เป็นสารตัวเติมในปริมาณคงที่ที่ 50 phr พบว่า น้ำมันหอมระเหยทั้ง 3 ชนิด สามารถทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricants) โดยไม่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกล เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากขึ้น จะทำให้ค่าความหนืดมูนี้ การกระดอนและความหนาแน่นเชื่อมโยง มีแนวโน้มลดลง และร้อยละการยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับน้ำมันจากปิโตรเลียม

Kuriakose, A.P. และ Rajendran, G.[32] ศึกษาการใช้น้ำมันรำข้าว (Rice bran oil) เปรียบเทียบกับน้ำมันอะโรมาติกปริมาณ 3 phr ในสูตรยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำ (N330) เป็นสารตัวเติม และเปรียบเทียบกับน้ำมันแนฟทานิกปริมาณ 5 phr ในสูตรยางธรรมชาติที่ใช้ซิลิกา (Precipitated silica) เป็นสารตัวเติม โดยใช้สารตัวเติมในปริมาณคงที่ที่ 50 phr แบบระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน พบว่าน้ำมันรำข้าวสามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) สารกระตุ้นร่วม (Co-activators) และสารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidants) โดยไม่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยางและสมบัติเชิงกล จะเห็นได้จาก เวลาเริ่มเชื่อมโยง เวลาเชื่อมโยง อัตราการเชื่อมโยง ความแข็งกต ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ความต้านทาน ต่อการสึกหรอ การกระดอน ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างน้ำมันรำข้าวกับน้ำมันอ้างอิงทั้งในระบบเขม่าดำและซิลิกา เวลาการเชื่อมโยงไม่เปลี่ยนแปลงในสูตรที่ไม่มีการใส่กรดสเตียริกเป็นสารกระตุ้น เนื่องจากน้ำมันรำข้าวประกอบด้วยกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) จำนวนมาก และมีกรดสเตียริกธรรมชาติรวมอยู่ด้วย และสมบัติเชิงกลของยางคงรูปหลังการบ่มเร่ง เช่น ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวที่ไม่ใส่สารป้องกันออกซิเดชัน ตีกว่าสูตรน้ำมันอ้างอิงที่ใส่สารป้องกันออกซิเดชัน

Ismail, H. และ Anuar, H. [33] ศึกษาการใช้น้ำมันปาล์ม (Palm oil) (ชนิดกรดโอเลอิก ไม่น้อยกว่า 80%) ปริมาณ 0, 1, 3, 5 และ 7 phr ในสูตรยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำ (N330) เป็นสารตัวเติม ในปริมาณ 15, 30 และ 50 phr พบว่า เวลาเริ่มเชื่อมโยง และเวลาการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ค่าแรงบิดต่ำสุด ( $M_L$ ) และค่าแทนเดลต้า ( $\tan \delta$ ) ลดลง ตามปริมาณน้ำมันปาล์มที่เพิ่มขึ้น ยางคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำ 50 phr มีค่าแรงบิดสูงสุด ( $M_{HF}$ ) ค่าแรงบิดต่ำสุด ( $M_L$ ) และค่า  $\tan \delta$  สูง

ที่สุด ตามด้วย ยางคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำ 30 และ 15 phr ตามลำดับ การ Reversion ลดลง ความล้า (Fatigue life) เพิ่มขึ้น ตามปริมาณน้ำมันปาล์มที่เพิ่มขึ้น ยางคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำ 50 phr มีการ Reversion ความล้า (Fatigue life) ต่ำสุด

Jayewardhana, W.G.D. และคณะ [34] ศึกษาการใช้ไขมันถั่วเหลือง (Soybean oil) น้ำมันปาล์ม (Palm oil) และน้ำมันทานตะวัน (Sunflower oil) (เกรดสำหรับการบริโภค) เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) เปรียบเทียบกับน้ำมันอะโรมาติกปริมาณ 5 phr ในยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำ (N330) เป็นสารตัวเติมในปริมาณคงที่ที่ 50 phr พบว่า น้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด สามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต โดยไม่ส่งผลต่อลักษณะสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งกด ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด การสึกหรอของยางน้ำมันธรรมชาติให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง เวลาการเชื่อมโยงสูงกว่า และอัตราการเชื่อมโยงต่ำกว่าน้ำมันอะโรมาติก ซึ่งจะให้ระยะเวลาการขึ้นรูปที่ปลอดภัยกว่า น้ำมันปาล์มให้สมบัติความต้านทานความร้อนที่ดี

Chandrasekara, G. และคณะ [35] ศึกษาการใช้ไขมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxidized soybean oil, ESBO) น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxidized palm oil, EPO) และน้ำมันทานตะวันดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxidized sunflower oil, ESFO) เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) และสารกระตุ้น (Activators) แทนที่น้ำมันอะโรมาติกในยางธรรมชาติสูตรหน้ายางรถบรรทุก ในปริมาณ 5 phr โดยใช้เขม่าดำ (N330) เป็นสารตัวเติมในปริมาณคงที่ที่ 50 phr พบว่า เวลาเริ่มเชื่อมโยงของน้ำมันพืชดัดแปรอีพอกไซด์ทุกชนิดต่ำกว่าน้ำมันอะโรมาติก น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์ มีความหนาแน่นในการเชื่อมโยงสูงสุดเทียบกับน้ำมันพืชดัดแปรอีพอกไซด์ชนิดอื่น มีคุณสมบัติช่วยการกระจายตัวของสารตัวเติมและสมบัติความต้านทานความร้อนที่ดี น้ำมันทานตะวันดัดแปรอีพอกไซด์ สามารถทำหน้าที่เป็นสารเร่งร่วมกับซัลเฟนาไมด์ (Sulphenamide) ช่วยแก้ปัญหา Reversion น้ำมันพืชดัดแปรอีพอกไซด์ทั้ง 3 ชนิด เป็นทางเลือกของสารช่วยกระบวนการผลิตที่ดีกว่าน้ำมันอะโรมาติก ซึ่งมีรายงานว่า เป็นสารก่อมะเร็ง ลักษณะการเชื่อมโยงของยางและสมบัติเชิงกลของยางคงรูปที่ใช้ น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์ แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เป็นสารกระตุ้นในยางคอมพาวด์ได้

Arayaprane, W. และ Rempel, G.L. [36] ศึกษาและเปรียบเทียบผลของการเติมน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid oil) เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เปรียบเทียบกับน้ำมันพาราฟินปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 phr ในยางผสมระหว่างยางอีพิตีเอ็ม (EPDM) และยางธรรมชาติอัตราส่วน 50 : 50 พบว่า เวลาการเชื่อมโยงต่ำลง ตามปริมาณน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ความหนืดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น โมดูลัสลดลง ตามปริมาณของน้ำมันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอันตรกิริยาของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ระหว่างเฟสยางทั้ง 2 ชนิด มีสมบัติการทนต่อความร้อนและทนต่อสภาพอากาศได้ดี ส่วนน้ำมันพาราฟินแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาถึงการผสมเข้ากันที่ไม่ดี จึงทำให้มีการเปลี่ยนอย่างไม่มีนัยสำคัญ

กรรณิการ์ สหะโร และ อัมมวาท บือราเฮง [37] ศึกษาอิทธิพลของน้ำมันช่วยกระบวนการผลิต ได้แก่ น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxidized palm oil) น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxidized soybean oil) ปริมาณ 10 phr ในยางธรรมชาติ

ยางเอสปีอาร์ และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่อัตราส่วน 50 : 50 ที่ใช้เขม่าดำ (N330) เป็นสารตัวเติมในปริมาณคงที่ที่ 60 phr พบว่า ค่าแรงบิดสูงสุด ลักษณะการเชื่อมโยง ความแข็งแรง สมบัติทางด้านแรงดึง และการกระจายตัวของสารตัวเติมของยางที่ใช้ไขมันอะโรมาติกมีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ไขมันปาล์มดัดแปรอีพอกซีไดซ์ ส่วนไขมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกซีไดซ์ ให้ยางมีสมบัติดังกล่าวด้อยที่สุด จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพบว่า ยางที่ใช้ไขมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกซีไดซ์มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta$  ต่ำกว่ายางที่ใช้ไขมันอะโรมาติกและไขมันปาล์มดัดแปรอีพอกซีไดซ์

ปิยวิทย์ เหล่าบ้านค้อ และคณะ [38] ศึกษาและเปรียบเทียบผลของการเติมไขมันเมล็ดสบู่ดำ (*Jatropha curcas oil*) ต่อสมบัติต่างๆของยางผสมระหว่างยางเอสปีอาร์และยางธรรมชาติ ที่มีการเสริมแรงด้วยเขม่าดำในปริมาณคงที่ที่ 40 phr โดยในการทดลองได้ทำการนำยางเอสปีอาร์กับยางธรรมชาติมาผสมกัน โดยใช้อัตราส่วนที่แตกต่างกัน จากนั้นได้เติมสารช่วยกระบวนการผลิต (ไขมันเมล็ดสบู่ดำหรือน้ำมันพาราฟิน) ด้วยการแปรปริมาณสารช่วยในกระบวนการผลิต 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 phr พบว่า การเติมสารช่วยกระบวนการผลิตทั้ง 2 ชนิดลงไป ทำให้ความหนืดลดลง สมบัติเชิงกลลดลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มปริมาณสารช่วยกระบวนการผลิต เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด ความแข็งแรง น้ำมันเมล็ดสบู่ดำมีสมบัติความต้านทานความร้อนที่ดี เป็นต้น ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเติมยางธรรมชาติลงในของผสม NR/SBR ในปริมาณมากขึ้น ทำให้สมบัติความแข็งแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด มีค่าสูงขึ้น การเติมไขมันเมล็ดสบู่ดำนั้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของยางผสม

จากการทบทวนงานวิจัย สามารถสรุปได้ดังนี้

- น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ [25] น้ำมันส้ม [29] น้ำมันรำข้าว [32] น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม น้ำมันทานตะวัน [34] สามารถทำหน้าที่เป็น Processing aids โดยไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยาง

- น้ำมันปาล์ม สามารถทำหน้าที่เป็น Antioxidants ให้สมบัติความต้านทานความร้อนที่ดี [34-35]

- น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม น้ำมันทานตะวัน ให้ความเร็วเชื่อมโยง เวลาเชื่อมโยงสูงกว่าและอัตราการเชื่อมโยงต่ำกว่าน้ำมันอะโรมาติก [34] แต่เมื่อทำให้เป็นน้ำมันดัดแปรอีพอกซีไดซ์จะทำให้เวลาเชื่อมโยงต่ำลง [35] และน้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกซีไดซ์ให้สมบัติต่างๆดีกว่าน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกซีไดซ์ [37]

- เมื่อปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความหนืดมูนนี่ ทอร์กต่ำสุด โมดูลัสลดลง และร้อยละการยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น [29, 33, 36 และ 38]

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ ศึกษาน้ำมันพืชเป็นสารช่วยกระบวนการผลิต สารกระตุ้น ในยางธรรมชาติโดยใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจในศึกษาน้ำมันพืชและน้ำมันพืชดัดแปรเป็นสารเติมแต่งในยางธรรมชาติ โดยใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม เพื่อรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและยางล้อในอนาคต

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

##### สารเคมี

- ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ยางแท่ง STR 5L : บริษัทไทยรับเบอร์ลาเทคซ์กรุ๊ป

ตารางที่ 3.1 สมบัติของ STR 5L ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
ปริมาณสิ่งสกปรก (% โดยน้ำหนัก)	0.006
ปริมาณเถ้า (% โดยน้ำหนัก)	0.17
ปริมาณไนโตรเจน (% โดยน้ำหนัก)	0.36
ปริมาณสิ่งระเหย (% โดยน้ำหนัก)	0.29
ความอ่อนตัวเริ่มแรก ( $P_0$ ) (min)	38.0
ดัชนีความอ่อนตัว (PRI) (min)	89.5
ความหนืด [ML 1+4(100°C)]	66.4
สี (Lovibond Scale)	2.5

**หมายเหตุ** ข้อมูลจากการทดสอบห้องปฏิบัติการยางแท่ง สถาบันวิจัยยาง

- ซิลิกา (Silica) ชนิดตกตะกอน Precipitated Hisil<sup>®</sup> Si 255 : บริษัท OSC Siam Silica
- เขม่าดำ (Carbon black) เกรด HAF N330 บริษัท Thai Carbon Black
- พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol) เกรด PEG 4000 : บริษัท Dongnam Chemical
- สารคู่ควบ ไทโรเอทอกซีไซลิลโพรพิลเททระซัลไฟด์ (Triethoxysilylpropyl benzothiazole disulphide) เกรด Si-69<sup>®</sup> : บริษัท Evonik Lanxing (Rizhao) Chemical Industrial
- น้ำมันช่วยกระบวนการผลิต
  - น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil, AO) เกรด A-20 : บริษัท ปีโตรเคมีคอล จำกัด
  - น้ำมันปาล์ม โอลีน (Palm oil, PO) : บริษัท ไทยเอกทอกซิเลต จำกัด
  - น้ำมันถั่วเหลือง ทรายงุ่น (Soybean oil, SBO) : บริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด
  - น้ำมันทานตะวัน ทรายงุ่น (Sunflower oil, SFO) : บริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด
  - น้ำมันรำข้าว ทรายคิง (Rice Bran oil, RBO) : บริษัท น้ำมันบริโภคไทย จำกัด
  - น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid oil, CNSL) : บริษัท มาบุญครองศิริชัย 25 อินดัสเทรียล โปรดักส์ จำกัด

- น้ำมันส้ม (Orange oil, OO) เกรด Orange Oil B : บริษัท อุตสาหกรรมเครื่องหอม ไทย-จีน จำกัด
  - น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxidized palm oils, EPO) เกรด EPO 28 : บริษัท Polygreen
  - น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิโออล (Polyol palm oils, PPO) เกรด F6039: บริษัท Polygreen
  - น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxidized soybean oils, ESBO) เกรด ESBO : บริษัท Chang Chun Petrochemical
7. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เกรด White seal : บริษัท Thai-Lysaght
  8. กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรด Rubber : บริษัท PT. SUMI ASIH
  9. สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Wingstay-L<sup>®</sup>) เกรด Commercial : บริษัท OMNOVA Solutions
  10. สารเร่งไซโคลเฮกซิลเบนโซโรอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-Cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide, CBS) เกรด CBS granule : บริษัท Monflex
  11. สารเร่งเตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide, TMTD) เกรด Perkacit TMTD : บริษัท Flexsys Distribution GmbH
  12. กำมะถัน (Sulfur) เกรด Midas sp325 : บริษัท Miwon Chemicals

## อุปกรณ์

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)
  - สำหรับการศึกษาดอนที่ 1 และ 3-4 : เครื่องนวดยาง (Kneader) : บริษัท Kneader Machinery
  - สำหรับการศึกษาดอนที่ 2 : เครื่อง Brabender plasticorder รุ่น MX500-D75L90 : บริษัท Chareontut
2. เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น JAN-1978 : บริษัท Kansai Roll
3. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) รุ่น Mooney check : บริษัท Gibitre Instruments
4. เครื่องวัดการเชื่อมโยงของยาง (Mechanical disc rheometer) รุ่น TDD-1297 : บริษัท TECHPRO
5. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) : โรงงานชัยเจริญการช่าง
6. เครื่องชั่งดิจิตอล (Analytical balance) ทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น AE200 : บริษัท Mettler  
ทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น PM 30000 K : บริษัท Mettler
7. เครื่องทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) รุ่น H-300 S : บริษัท SG Resolution
8. เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้กำลังลม (Compress air sample cutter) รุ่น MODEL 716
9. เครื่องวัดความหนา (Micrometer) รุ่น 27 : บริษัท Peacock
10. เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine)
  - สำหรับทดสอบความแข็งแรงดึง รุ่น 5565 : บริษัท Instron
  - สำหรับทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด รุ่น LS 500 : บริษัท Llyod Instrument

11. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบชอร์เอ (Hardness tester, shore A) Type : BS 09 รุ่น DTE 7696 : บริษัท Bareiss Prüfgerä te bau GmbH, Germany
12. เครื่องอบบ่มเร่งยาง (Geers rubber aging oven) รุ่น AG 103 : บริษัท Ueshima
13. เครื่องทดสอบการกระดอน (Rebound resilience tripsometer) แบบ Dunlop : บริษัท Wallace
14. เครื่องมือทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion แบบ Akron) รุ่น C9004 : บริษัท Wallace
15. เครื่องมือทดสอบความอ่อนนุ่ม (Goodrich flexometer) รุ่น 52201 : บริษัท TECHPRO
16. เครื่องอบความร้อน (Hot air oven) รุ่น F 400 : บริษัท WTB Binder
17. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น LEO 1455VP : บริษัท LEO จำกัด
18. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DMTA (Dynamic mechanical thermal analyzer) รุ่น DMTA-V : บริษัท Rheometric Scientific จำกัด
19. เครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FT-IR) รุ่น Frontier : ยี่ห้อ Perkin Elmer
20. เครื่องวัดลักษณะการกระจายตัวของเขม่าดำ (Dispergrader  $\alpha$  view) รุ่น Alpha-technologies : บริษัท A Dynisco Company

## 3.2 วิธีการทดลอง

### 3.2.1 การวิเคราะห์น้ำมันธรรมชาติ

ศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันพืชโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) นอกจากนี้ ยังศึกษาสมบัติต่างๆของน้ำมัน ได้แก่ ค่าของกรด (Acid value) ค่าไอโอดีน (Iodine value) และค่าสaponification เพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบกับน้ำมันอะโรมาติกและอธิบายอิทธิพลของโครงสร้างของน้ำมันพืชที่จะส่งผลต่อสมบัติของยางคอมพาวด์

### 3.2.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยาง

3.2.2.1 ศึกษาผลของชนิดของน้ำมันพืชที่มีต่อสมบัติของยาง ได้แก่ น้ำมันปาล์ม (Palm oil, PO) น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil, SBO) น้ำมันทานตะวัน (Sunflower oil, SFO) น้ำมันรำข้าว (Rice bran oil, RBO) น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid, CNSL) และน้ำมันส้ม (Orange oil, OO) โดยเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่เติมน้ำมันช่วยกระบวนการผลิตและน้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil)

3.2.2.2 ศึกษาผลของลำดับการผสมซิลิกาและการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ในสูตรที่ใช้ น้ำมันปาล์มที่มีต่อสมบัติของยาง ได้แก่ การผสมซิลิกา ก่อน-หลังสารกระตุ้น และการเติม-ไม่เติม PEG

3.2.2.3 ศึกษาผลของน้ำมันพืชดัดแปรเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชไม่ดัดแปร ได้แก่ น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized palm oils, EPO) น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิออล

(Polyol palm oils, PPO) น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxidized soybean oils, ESBO) และน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต (Decarboxylated cashew nut shell liquid, DCNSL)

3.2.2.4 ศึกษาผลของสารตัวเติมเขม่าดำเปรียบเทียบกับซิลิกาในสูตรที่ไม่เติมน้ำมันช่วยกระบวนการผลิต น้ำมันปาล์ม (PO) และน้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์ (EPO)

#### การบดผสมยางและสารเคมี

1. ชั่งยางและสารเคมีตามสูตรที่กำหนด ตามตารางที่ 3.2
2. ทำการผสมสารเคมีต่างๆ ให้เข้ากัน เริ่มจากการนำยางมาบดย่อยที่อุณหภูมิ 50 °C โดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (ชนิด Kneader ในหัวข้อที่ 3.2.2.1 และ 3.2.2.3-3.2.2.4 หรือชนิด Brabender ในหัวข้อที่ 3.2.2.2) เป็นเวลา 3 นาที
3. เติมซิลิกา (Silica) (ก่อนใช้เตรียมผสมสารคู่ควบ Si-69<sup>®</sup> และ PEG 4000 ลงในซิลิกาเข้าให้เข้ากัน) กับน้ำมันช่วยกระบวนการผลิต (Processing oils) สลับกันครั้งละ 1/3 จำนวน 3 ครั้ง ใช้เวลาในการผสม 6 นาที (หรือ 7 นาที ในหัวข้อที่ 3.2.2.2)
4. เติมซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) และกรดสเตียริก (Stearic acid) ผสมเป็นเวลา 1 นาที (หรือ 2 นาที ในหัวข้อที่ 3.2.2.2)
5. เติมสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Wingstay-L<sup>®</sup>) และสารตัวเร่ง (CBS และ TMTD) ผสมเป็นเวลา 2 นาที
6. เติมสารเคมีตัวสุดท้าย คือ กำมะถัน (Sulfur) (ระวังไม่ให้อุณหภูมิขณะผสมกำมะถันเกิน 90 °C เพื่อป้องกันยางสุกก่อนกำหนด) ใช้เวลาในการผสมอีก 2 นาที รวมเวลาที่ใช้ในการบดผสมในเครื่องผสมระบบปิด 14 นาที (หรือใช้เวลาในการผสม 3 นาที รวมเวลาที่ใช้ในการบดผสมในเครื่องผสมระบบปิด 20 นาทีในหัวข้อที่ 3.2.2.2)
7. นำยางผสมให้เข้ากันอีกครั้งด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 2 นาที กรีดแผ่นยางคอมพาวด์ออก โดยแผ่นยางที่ได้ควรหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

(\*หมายเหตุ หัวข้อที่ 3.2.2.2 สูตรที่เติมซิลิกาหลังสารกระตุ้น เมื่อบดย่อยยางเป็นเวลา 3 นาที แล้วทำตามขั้นตอนบดผสมใน ข้อ 4 ก่อน ข้อ 3 )

ตารางที่ 3.2 สูตรอย่างที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr)			
	ศึกษาชนิดของน้ำมันพืช และน้ำมันพืชตัดแปร	ศึกษาการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และการบำบัดการผสมซิลิกา	ศึกษาชนิดของสารตัวเติม	ศึกษาชนิดของสารตัวเติม
Natural rubber (STR 5L)	100	100	100	100
Silica (255)	50	50	50	-
Carbon black (N330)	-	-	-	50
PEG 4000	3	-	3	-
Si-69 <sup>®</sup>	4.5	4.5	4.5	-
Processing oil*	0, 5	5	0, 5	0, 5
Zinc oxide	5	5	3	5
Stearic acid	2	2	1	2
Winstay-L <sup>®</sup>	1.5	1.5	1.5	1.5
CBS	0.8	0.8	0.8	0.8
TMTD	0.2	0.2	0.2	0.2
Sulfur	2	2	2	2

หมายเหตุ : \* แปรตามปัจจัยที่ทำการศึกษา

### การทดสอบยางคอมพาวด์และยางคงรูป

รายการทดสอบและมาตรฐานการทดสอบที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ 3.3

**ตารางที่ 3.3** มาตรฐานของสมบัติที่ใช้ทดสอบยางคอมพาวด์และยางคงรูป [8]

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ
ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)	ASTM D1646
การเชื่อมโยงของยาง (Cure characteristic)	ASTM D5289
ร้อยละการบวมตัว (%Swelling)	ASTM D471
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	-
การแพร่ออกของน้ำมัน (Bleeding)	ดัดแปลงจาก ISO 177
ความแข็งกด (Hardness)	ASTM D2240
มอดุลัสของยาง (Rubber modulus, M100 และ M300)	ASTM D412
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D412
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)	ASTM D412
ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)	ASTM D624
สมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน (Aging properties)	ASTM D573
การกระดอนของยาง (Rebound resilience)	ASTM D1054
ความร้อนสะสมในยาง (Heat build-up)	ASTM D623
การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set)	ASTM D395 (Method B)
ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance)	BS 903 part A9
ลักษณะทางสัญญาณวิทยากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)	-
สมบัติเชิงกลพลวัต ด้วย DMTA	-
ระดับการกระจายตัวของเขม่าดำ (Dispergrader 1000NT)	-

#### การทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์

##### การทดสอบความหนืดมูนนี่

วัดค่าความหนืดมูนนี่ตามมาตรฐาน ASTM D1646 โดยใช้โรเตอร์ใหญ่ ที่อุณหภูมิ 100°C อุณหภูมิขึ้นตัวอย่าง 1 นาที เดินเครื่องทดสอบและอ่านค่าความหนืดที่เวลา 4 นาที รายงานผลในรูปแบบของ ML1+4 (100°C)

##### การทดสอบสมบัติในการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5289 โดยใช้เครื่อง Moving die rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 150 °C สั้นที่มุม ± 3 องศา แล้วหาค่าต่างๆ ดังนี้คือค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque,  $M_L$ ) ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque,  $M_{HF}$ ) เวลาเริ่มเชื่อมโยง ( $t_{s2}$ ) เวลาการเชื่อมโยง ( $t_{c90}$ ) ดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) และระดับการเชื่อมโยง (State of cure,  $M_{HF}-M_L$ ) ของยางคอมพาวด์แต่ละสูตร

### การเชื่อมโยงยาง

ตัดยางคอมพาวด์มาขึ้นรูป โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) อัดขึ้นงานให้อยู่ในรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 2,200 psi เป็นเวลาเท่ากับ 1.2 เท่าของ  $t_{c90}$  ของยางคอมพาวด์แต่ละสูตร (หรือ 2 เท่าของ  $t_{c90}$  ในกรณีขึ้นงานหนา มากกว่า 10 มิลลิเมตร) เก็บยางคงรูปไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำไปตัดชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติของยางคงรูปต่อไป

### การทดสอบสมบัติของยางคงรูป

#### การทดสอบร้อยละการบวมตัว (%Swelling)

ทดสอบร้อยละการบวมตัวในตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM D471 โดยนำแผ่นยางที่ได้จากการอัดเข้ามาตัดเป็นชิ้นทดสอบกว้าง×ยาว เท่ากับ 1×1 ตารางเซนติเมตร หนาประมาณ 2 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้นของแต่ละสูตร ซึ่งน้ำหนักก่อนแช่ จากนั้นนำตัวอย่างยางแช่ในตัวทำละลาย โทลูอีน ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ในภาชนะที่มีฝาปิด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างยางที่บวมมาชั่งด้วยกระดาษหิซุ แล้วชั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังแช่ คำนวณร้อยละการบวมตัวดังสมการ

$$\text{Swelling ( \% )} = [( W_s - W_o ) / W_o ] \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ  $W_o$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนการแช่ในโทลูอีน (กรัม)  
 $W_s$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังการแช่ในโทลูอีน (กรัม)

#### การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

การเตรียมชิ้นทดสอบ ทำการตัดชิ้นงานยางคงรูปให้ได้ชิ้นงานที่มีน้ำหนักไม่เกิน 5 กรัม ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความถ่วงจำเพาะดังรูปที่ 3.1 โดยชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบในอากาศและในน้ำ เครื่องจะคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะให้อัตโนมัติ โดยใช้หลักการแทนที่น้ำ คำนวณความถ่วงจำเพาะดังสมการ

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = W / ( W - W_1 ) \quad (3.2)$$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ชั่งในอากาศ (กรัม)  
 $W_1$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ชั่งในน้ำ (กรัม)



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบความถ่วงจำเพาะ

### การทดสอบการแพร่ออกของน้ำมัน (Bleeding) [39]

ทดสอบการแพร่ออกของน้ำมัน ดัดแปลงจากมาตรฐาน ISO 177 ทำการทดสอบโดยนำแผ่นยางที่ได้จากการอัดเข้ามาตัดเป็นชิ้นทดสอบขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 5 x 5 ตารางเซนติเมตร หนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (เครื่องชั่งความละเอียดอย่างน้อย 0.001 กรัม) นำกระดาษซับน้ำมัน ที่มีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 6 x 6 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 ชั้น ซึ่งได้ชั่งน้ำหนักกระดาษซับน้ำมันไว้แล้ว ประกบชิ้นตัวอย่าง จากนั้นนำไปวางระหว่างแผ่นกระจกผิวหน้าเรียบ 2 แผ่น ใช้แผ่นน้ำหนักจำนวน 5 กิโลกรัมกดทับบนแผ่นกระจกด้านบน นำทั้งหมดเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ คำนวณการแพร่ออกของน้ำมัน ดังสมการ

$$\text{Bleeding (กรัม)} = W_o - W_s \quad (3.3)$$

เมื่อ  $W_o$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนอบ (กรัม)

$W_s$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังอบ (กรัม)

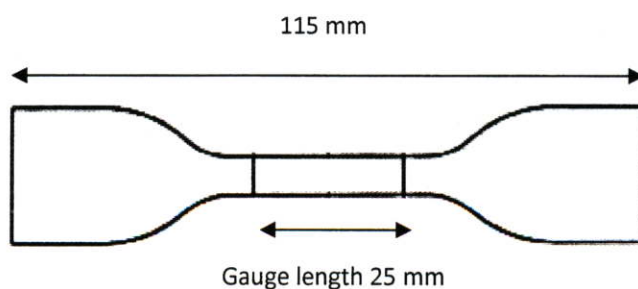
การแพร่ออกของน้ำมัน หมายถึงค่าที่คำนวณจากความแตกต่างของชิ้นทดสอบมากกว่า 0.45 กรัม

### การทดสอบความแข็งกด (Hardness)

ทดสอบความแข็งของยางตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยนำชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งแรงดึงจำนวน 3 ชิ้น วางซ้อนกัน (ความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร) บนแท่นทดสอบความแข็งกดด้วยเครื่องวัดความแข็งกดแบบชอร์เอ (Shore A) จากนั้นเปลี่ยนชิ้นตัวอย่าง ทำการวัดความแข็งที่จุดต่างๆ อ่านค่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที จำนวน 5 ครั้ง นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

### การทดสอบสมบัติด้านการดึง (Tensile properties)

ทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 ชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell แบบ Die C) ใช้อัตราเร็วในการดึงชิ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที วัดแรงดึงและระยะยืด แล้วนำไปคำนวณสมบัติต่างๆดังนี้คือ มอดุลัสที่ระยะยืด 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ (M100 และ M300) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) โดยทำการทดสอบจำนวน 5 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร เพื่อหาค่าเฉลี่ย รายงานในหน่วย MPa



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 412

### การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)

ทดสอบความแข็งแรงฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D624 ขึ้นทดสอบแบบมุม (Die C) ใช้อัตราเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที วัดแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ขึ้นทดสอบขาดออกจากกัน โดยทำการทดสอบจำนวน 5 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร เพื่อหาค่าเฉลี่ย รายงานในหน่วย kN/m



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 624

### การทดสอบสมบัติหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน (Aging properties)

ทดสอบสมบัติหลังการบ่มแรงตามมาตรฐาน ASTM D573 นำขึ้นทดสอบสมบัติด้านแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาด แต่ละสมบัติแบ่งขึ้นทดสอบออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 นำไปทดสอบสมบัติของยางก่อนการบ่มแรง ชุดที่ 2 นำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ปล่องขึ้นทดสอบให้เย็นในอุณหภูมิห้อง ทำการทดสอบสมบัติหลังการบ่มแรง โดยทำการทดสอบจำนวน 5 ชิ้นงานต่อ 1 สูตรเพื่อหาค่าเฉลี่ย แล้วนำไปคำนวณเป็นร้อยละการคงเหลือของสมบัติต่างๆดังนี้คือ ร้อยละการคงเหลือของสมบัติความแข็งแรงดึง (Retention of tensile strength) ร้อยละการคงเหลือของสมบัติการยืด ณ จุดขาด (Retention of elongation at break) ร้อยละการคงเหลือของสมบัติความแข็งแรงฉีกขาด (Retention of tear strength)

$$\% P = [A / O] \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ P	คือ	ร้อยละการคงเหลือของสมบัติของยาง
O	คือ	สมบัติของยางก่อนการบ่มแรง
A	คือ	สมบัติของยางหลังการบ่มแรง

### การทดสอบการกระดอนของยาง (Rebound resilience)

ทดสอบการกระดอนของยาง (Rebound resilience) ตามมาตรฐาน ASTM D 1054 โดยนำตัวอย่างมาใส่ในที่จัดยางในเครื่อง ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที หลังจากนั้นเลื่อนลูกตุ้ม (Pendulum) ทำการกระแทกยางจากตำแหน่งเริ่มต้น เป็นจำนวนทั้งสิ้น 6 ครั้ง การกระแทกทั้ง 6 ครั้งนี้ จะต้องทำในระยะเวลา 1 นาที การทำเช่นนี้ ถือว่าเป็นการเตรียมตัวอย่างยางก่อนการทดสอบจริง แล้วจึงให้เริ่มต้นทำการทดสอบจริงโดยปล่อยลูกตุ้มตำแหน่งเริ่มต้นลงมากระทบยาง และอ่านค่าองศาที่กระดอนออกมา ให้ทดลองเช่นนี้ 3 ครั้ง ให้ถือเอาค่าคงที่ ที่ได้จากการกระแทกติดต่อกันทั้งสามนั้น มาใช้ในการคำนวณ การทดลองนี้ให้ทำซ้ำกับตัวอย่างยางที่เหมือนกันอีกตัวอย่างหนึ่ง ผลที่ได้ทั้งสองตัวอย่างนำมาเฉลี่ยเพื่อคำนวณหาค่าการกระดอนของยางดังสมการ

$$\% \text{ Rebound resilience} = [(1 - \cos A) / (1 - \cos B)] \times 100 \quad (3.5)$$

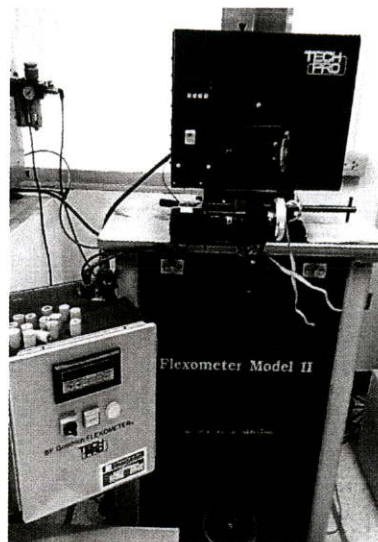
- เมื่อ A คือ มุมเริ่มต้นก่อนการตกกระทบของลูกตุ้ม ในที่นี้  $A = 45^\circ$   
 B คือ มุมที่ลูกตุ้มกระเด็นไปได้สูงสุด

#### การทดสอบความร้อนสะสมในยาง (Heat build-up)

ทดสอบความร้อนสะสมในยาง ตามมาตรฐาน ASTM D623 ด้วยเครื่อง Goodrich flexometer ดังรูปที่ 3.4 โดยขึ้นทดสอบจะถูกปรับให้มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่  $100^\circ\text{C}$  จากนั้นจะถูกกดและคลายภายใต้สภาวะอุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เวลา 25 นาที เมื่อครบกำหนดนำขึ้นทดสอบมาวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง คำนวณความร้อนสะสมในยางได้ดังสมการ

$$\text{Heat build-up} = t_f - t_o \quad (3.6)$$

- เมื่อ  $t_o$  คือ อุณหภูมิเมื่อเริ่มทดสอบ ( $^\circ\text{C}$ )  
 $t_f$  คือ อุณหภูมิหลังการทดสอบ ( $^\circ\text{C}$ )



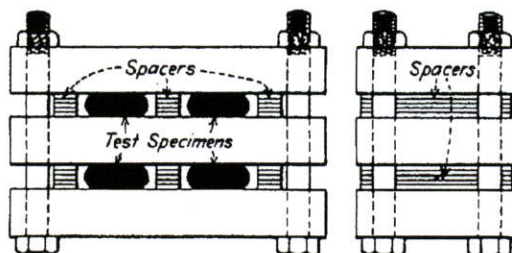
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบความร้อนสะสมในยาง

#### การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set)

ทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM D395 (Method B) ทดสอบด้วยเครื่อง Compression set tester โดยวัดความหนาของชิ้นทดสอบ แล้วนำมาวางระหว่างแผ่นเหล็กทั้งสองของอุปกรณ์สำหรับทดสอบการอัด (Compression device) ที่มีแท่งเหล็กกั้น (Spacer bars) ในแต่ละข้างเป็นตัวกำหนดระยะในการอัดยาง แสดงดังรูปที่ 3.5 ทำการอัดขึ้นทดสอบให้ความหนาเท่ากับแท่งเหล็กกั้น ซึ่งความหนาจะลดลงจากความหนาเดิมร้อยละ 25 จากนั้นนำอุปกรณ์สำหรับทดสอบการอัดที่มีชิ้นทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำขึ้นทดสอบมาวัดความหนา คำนวณค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดดังสมการ

$$\text{Compression set (\%)} = [(t_o - t_i) / (t_o - t_n)] \times 100 \quad (3.7)$$

- เมื่อ  $t_o$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบเริ่มต้น (มิลลิเมตร)  
 $t_i$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังอบ (มิลลิเมตร)  
 $t_n$  คือ ความหนาของแท่งเหล็กกัน (มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด

#### การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance)

ทดสอบตามมาตรฐาน BS 903 part A9 ด้วยเครื่อง (Wallace test equipment) ก่อนการทดสอบหาความต้านทานการสึกหรอ ต้องทำการหาความหนาแน่น และน้ำหนักของชิ้นงาน เพื่อใช้คำนวณหาปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานหลังทำการทดสอบ การทดสอบทำโดยนำชิ้นงานมาใส่ที่แกนหมุน ขัดกับหินขัด ซึ่งมีลักษณะคล้ายกระดาษทรายจนครบ 500 รอบ ซึ่งน้ำหนักยาง เพื่อคำนวณหาปริมาตรของยางที่หายไป จากนั้นเดินเครื่องทดสอบให้มีจำนวนรอบตาม Running-in และเดินเครื่องทดสอบให้มีจำนวนรอบตามที่ต้องทดสอบจริง 5 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย รายงานปริมาตรยางที่หายไปจากการหมุน 1,000 รอบ

ตารางที่ 3.4 แสดงจำนวนรอบของการขัด

ปริมาตรที่หายไป จากการหมุน 500 รอบแรก	การหมุนเพิ่มเติมหลังจาก 500 รอบแรก	
	Running-in	ระยะหมุนที่ต้องทดสอบจริง
สูงกว่า 0.05 แต่ไม่เกิน 0.10	4000	4000
สูงกว่า 0.10 แต่ไม่เกิน 0.20	2000	2000
สูงกว่า 0.20 แต่ไม่เกิน 0.40	750	750
สูงกว่า 0.4	125	125

### การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA)

การเตรียมชิ้นงานจะนำตัวอย่างมาตัดเป็นรูปแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าแล้วนำไปเข้าเครื่อง DMTA โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้

ขนาดของชิ้นงานโดยประมาณ	6 x 25 x 2.5	mm
รูปแบบในการทดสอบ	Tension	
ขนาดของกรอบยึดชิ้นงาน (Frame)	Medium frame	
ความถี่	1.0	Hz
อุณหภูมิ	-100 ถึง 80	°C
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	3	°C /min

โดยค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus ; E') ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus ; E'') และค่าแทนเดลต้า ( $\tan \delta$ ) สามารถหาได้ดังสมการ

$$E' = E^* \times \cos \delta \quad (3.8)$$

$$E'' = E^* \times \sin \delta \quad (3.9)$$

$$\tan \delta = E'' / E' \quad (3.10)$$

เมื่อ E' = มอดุลัสสะสม (Storage modulus)

E'' = มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus)

E\* = มอดุลัสเชิงซ้อน (Complex modulus)

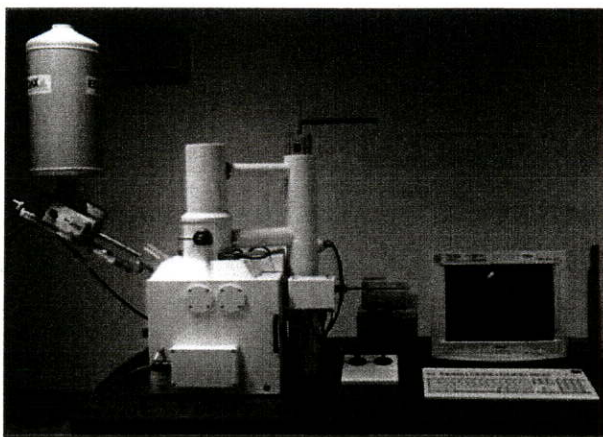
$\tan \delta$  = ความสามารถในการกระจายพลังงานต่อความสามารถในการสะสมพลังงานและอ่านค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) จากจุดสูงสุดของพีค  $\tan \delta$

$\tan \delta$  ที่ 0°C = เป็นตัวแทนของค่าการยึดเกาะถนนบนพื้นเปียก (Wet grip)

$\tan \delta$  ที่ 60°C = เป็นตัวแทนของค่าความต้านทานการหมุน (Rolling resistance)

### การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphological properties)

ทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) การนำชิ้นตัวอย่างมาชุบด้วยทองคำในไนโตรเจนเหลว หักชิ้นตัวอย่างเพื่อให้ได้ผิวทดสอบใหม่ หลังจากนั้นนำวางไปอบไล่ความชื้น นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปทำการเคลือบด้วยทองคำ โดยวางตัวอย่างในเครื่องสำหรับเคลือบทองด้วยสุญญากาศปล่อยก๊าซอาร์กอน (Arkon, Ar) เข้ามาและปรับกระแสไฟฟ้า ก๊าซอาร์กอนจะเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนวิ่งไปชนแผ่นทองและลงมาเคลือบที่ชิ้นตัวอย่าง นำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบทองแล้วมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่ผสมน้ำมันชนิดต่างๆ



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

#### การศึกษาระดับการกระจายของเขม่าดำในยาง

เครื่อง Dispergrader 1000NT ใช้ศึกษาลักษณะขนาดของเขม่าดำ มีการแสดงผลทั้งแบบ Visual และแบบ Digital จะมีการวิเคราะห์พื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยตัดชิ้นงาน ให้มีขนาดเท่ากับช่องที่ใส่ตัวอย่าง และทำความสะอาดผิวหน้าตัวอย่างด้วยอะซิโตน เพื่อให้ไม่มีสิ่งสกปรกมาเกาะผิวยาง จากนั้นนำตัวอย่างไปส่องดูการกระจายตัว



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดระดับการกระจายของเขม่าดำในยาง (Dispergrader 1000NT)

#### 3.2.3 การศึกษาปริมาณค่าสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs)

นำน้ำมันพืชที่ให้ผลการทดสอบที่เหมาะสมที่สุด (จากข้อ 4.2) มาประมาณค่าสาร PAHs เปรียบเทียบกับน้ำมันอะโรมาติก

#### 3.2.4 การวิเคราะห์ต้นทุน

นำสูตรยางที่ใช้ น้ำมันพืชที่ให้ผลการทดสอบที่เหมาะสมที่สุด (จากข้อ 4.2) มาวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตเปรียบเทียบกับน้ำมันอะโรมาติก

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ช่วงแรกได้ทำการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันพืชโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติต่างๆ ของน้ำมัน ได้แก่ ค่าของกรด (Acid value) ค่าไอโอดีน (Iodine value) และค่าสaponification จากนั้นทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่อาจมีผลต่อสมบัติของยางคอมพาวด์และยางคงรูป เมื่อนำน้ำมันพืชเป็นสารเติมแต่ง เช่น ชนิดของน้ำมันพืชและน้ำมันพืชตัดแปร ลำดับการผสมซิลิกา การเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) และชนิดของสารตัวเติม

ในการศึกษาชนิดของน้ำมันพืชทำการเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) ที่ได้จากปิโตรเลียมที่ใช้เป็นสารช่วยกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน ได้แก่ น้ำมันปาล์ม (Palm oil, PO) น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil, SBO) น้ำมันทานตะวัน (Sunflower oil, SFO) น้ำมันรำข้าว (Rice bran oil, RBO) น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid, CNSL) และน้ำมันส้ม (Orange oil, OO) ศึกษาถึงหน้าที่การเป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) ได้แก่ พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) สารหล่อลื่น (Lubricant) ในการช่วยแปรรูปให้การผสมสารเคมีเข้ากับยางได้ง่ายขึ้น สารเพิ่มความนิ่ม (Softener) คือ ใส่เพื่อทำให้ยางนิ่มลง โดยควบคุมอัตราส่วนสารตัวเติมต่อน้ำมันคงที่ที่ 50 : 5 phr ในยางธรรมชาติ (STR 5L) ตามสูตรหน้ายางล้อรถที่ควบคุมอัตราส่วนของสารตัวเติมต่อน้ำมันที่ 10 : 1 (โดยน้ำหนัก) ซึ่งให้ค่าความแข็งกดที่ 60-70 Shore A ทั้งนี้ขึ้นกับสมบัติของยางที่ต้องการใช้งาน [40] ศึกษาชนิดของน้ำมันพืชตัดแปร ได้แก่ น้ำมันปาล์มตัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxydized palm oils, EPO) น้ำมันปาล์มตัดแปรพอลิโอล (Polyol palm oils, PPO) น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxydized soybean oils, ESBO) และน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตัดแปรดีคาร์บอกซิเลต (Decarboxylated cashew nut shell liquid, DCNSL) ศึกษาลำดับการผสมซิลิกา ก่อนและหลังสารกระตุ้น การเติมและไม่เติม PEG และชนิดของสารตัวเติม ได้แก่ ซิลิกา (Silica) และเขม่าดำ (Carbon black) โดยศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อสมบัติของยางทั้งก่อนและหลังการคงรูป ได้แก่ ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) ศึกษาสมบัติกายภาพ (Physical properties) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic properties) และสัณฐานวิทยา (Morphology)

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อที่ใช้ในงานวิจัย

อักษรย่อ	ความหมาย
NO	ไม่เติมน้ำมันช่วยกระบวนการผลิต (Non-oil)
AO	น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil)
PO	น้ำมันปาล์ม (Palm oil)
EPO	น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxidized palm oil)
PPO	น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิโออล (Polyol palm oil)
SBO	น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil)
ESBO	น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxidized soybean oil)
SFO	น้ำมันทานตะวัน (Sunflower oil)
RBO	น้ำมันรำข้าว (Rice bran oil)
CNSL	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid)
DCNSL	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต (Decarboxylated cashew nut shell liquid)
OO	น้ำมันส้ม (Orange oil)
Si	ซิลิกา (Silica)
Si <sub>A</sub>	เติมซิลิกาหลังสารกระตุ้น (Silica after activator)
Si <sub>B</sub>	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น (Silica before activator)
CB	เขม่าดำ (Carbon black)
PEG	เติม PEG (Polyethylene glycol)
WPEG	ไม่เติม PEG (Without polyethylene glycol)

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลและสมบัติบางประการของน้ำมัน

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมัน

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันโดยใช้เทคนิค Fourier transform infrared spectrophotometry (FTIR) สรุปดังตารางที่ 4.2 และภาคผนวก ก (รูปที่ ก.1-ก.11) พบว่าสเปกตรัมของน้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil, AO) กับน้ำมันพืชแตกต่างกันชัดเจน แต่น้ำมันปาล์ม (Palm oil, PO) น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil, SBO) น้ำมันทานตะวัน (Sunflower oil, SFO) น้ำมันรำข้าว (Rice bran oil, RBO) พบว่ามีลักษณะสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกันเนื่องจากมีองค์ประกอบพื้นฐานของสารเหมือนกัน ลักษณะเฉพาะของสเปกตรัม FTIR ของน้ำมันอะโรมาติกคือ แถบการดูดกลืนของสารประกอบอะโรมาติกที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1,601\text{ cm}^{-1}$  จากการสั่นแบบยืดของพันธะ C=C (C=C cyclic stretching) และในย่าน  $910\text{-}650\text{ cm}^{-1}$  จากการสั่นแบบงอนอกระนาบของพันธะ C-H ซึ่งสัมพันธ์กับแบบการแทนที่บนวงแหวนเบนซีน (C=C-H out of plane bending) ส่วนของน้ำมันปาล์ม (PO) น้ำมันถั่วเหลือง (SBO) น้ำมันทานตะวัน (SFO) และน้ำมันรำข้าว (RBO) พบว่ามี CH Aliphatic ของสารประกอบอะลิฟาติก (Aliphatic) ที่ความถี่  $2,925\text{ cm}^{-1}$ , การสั่นแบบยืดของพันธะ CH<sub>2</sub> และ CH<sub>3</sub> (CH<sub>2</sub>-methylene stretching and CH<sub>3</sub>-methyl stretching) ที่ความถี่  $1,458\text{ cm}^{-1}$  และ  $1,376\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ และแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $3,473\text{ cm}^{-1}$ ,  $1,745\text{ cm}^{-1}$  และ  $1,160\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H, C=O

และ C-O ตามลำดับ ในโครงสร้างของกรดไขมัน [37] ส่วนของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid, CNSL) และน้ำมันส้ม (Orange oil, OO) มีสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกับทั้งน้ำมันอะโรมาติก คือ เลขคลื่นที่ตำแหน่ง  $1,601\text{ cm}^{-1}$  และ  $910-650\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสัมพันธ์กับวงแหวนเบนซีน และเลขคลื่นที่ตำแหน่ง  $2,922\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างอะลิฟาติก นอกจากนี้ น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) ยังพบเลขคลื่นในตำแหน่ง  $3,473\text{ cm}^{-1}$  และ  $1,160\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างของกรดไขมัน ส่วนลักษณะสเปกตรัมของน้ำมันส้ม (OO) มี CH vinyl bending ที่ความถี่  $3,070\text{ cm}^{-1}$

ในกรณีของน้ำมันพืชดัดแปรชนิดอีพอกไซด์จากน้ำมันปาล์ม (Epoxidized palm oil, EPO) และจากน้ำมันถั่วเหลือง (Epoxidized soybean oil, ESBO) ปรากฏเลขคลื่นในตำแหน่ง  $823\text{ cm}^{-1}$  เมื่อเทียบกับน้ำมันพืชไม่ดัดแปรชนิดนั้นๆ ซึ่งเกิดจากการสั่นของหมู่อีพอกไซด์ [41] และเห็นได้ว่าน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์ (ESBO) มีแถบการดูดกลืนที่เลขคลื่นนี้อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณออกซิเจนในวงออกซิเรน (Oxirane oxygen) มากกว่า เนื่องจากในน้ำมันถั่วเหลืองเริ่มต้นมีความไม่อิ่มตัวสูงกว่าน้ำมันปาล์มมาก (น้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองมีส่วนไม่อิ่มตัว 48.5% และ 84.5% ตามลำดับ) ดังนั้นเมื่อทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันจึงมีผลทำให้ได้วงแหวนอีพอกไซด์แทนที่พันธะคู่ได้มากกว่า ส่วนน้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิออล (Polyol palm oil, PPO) พบเลขคลื่นในตำแหน่ง  $3,473\text{ cm}^{-1}$  จากการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H มีลักษณะกว้างขึ้น เมื่อเทียบกับน้ำมันปาล์มที่ไม่ดัดแปร และส่วนน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต (Decarboxylated cashew nut shell liquid, DCNSL) พบว่าเลขคลื่นในตำแหน่ง  $1,646\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ C=O หายไป เมื่อเทียบกับน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไม่ดัดแปร

ตารางที่ 4.2 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันโดยใช้เทคนิค Fourier transform infrared spectrophotometry (FTIR)

ตำแหน่งเลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	น้ำมันอะโรมาติก (AO)	น้ำมันปาล์ม (PO)	น้ำมันถั่วเหลือง (SBO)	น้ำมันทานตะวัน (SFO)	น้ำมันรำข้าว (RBO)	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNLS)	น้ำมันส้ม (OO)	น้ำมันปาล์มตัดแปรอีพอกซีไดซ์ (EPO)	น้ำมันปาล์มตัดแปรพอลิออล (PPO)	น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรอีพอกซีไดซ์ (ESBO)	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตัดแปรดีคาร์บอกซิเลต (DCNSL)
3,473		O-H stretching	O-H stretching	O-H stretching	O-H stretching	O-H stretching	O-H stretching	O-H stretching	O-H stretching	O-H stretching	O-H stretching
3,083	-	-	-	-	-	-	CH vinyl bending	-	-	-	CH vinyl bending
2,925	CH Aliphatic	CH Aliphatic	CH Aliphatic	CH Aliphatic	CH Aliphatic	CH Aliphatic	CH Aliphatic	CH Aliphatic	CH Aliphatic	CH Aliphatic	CH Aliphatic
1,745-1,645	C=O stretching	C=O stretching	C=O stretching	C=O stretching	C=O stretching	C=O stretching	-	C=O stretching	C=O stretching	C=O stretching	-
1,601	C=C cyclic stretching	-	-	-	-	C=C cyclic stretching	C=C cyclic stretching	-	-	-	C=C cyclic stretching
1,458	CH <sub>2</sub> -methylene stretching	CH <sub>2</sub> -methylene stretching	CH <sub>2</sub> -methylene stretching	CH <sub>2</sub> -methylene stretching	CH <sub>2</sub> -methylene stretching	CH <sub>2</sub> -methylene stretching	-	CH <sub>2</sub> -methylene stretching	CH <sub>2</sub> -methylene stretching	CH <sub>2</sub> -methylene stretching	CH <sub>2</sub> -methylene stretching

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometry (FTIR)

ตำแหน่งเลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	น้ำมันอะโรมาติก (AO)	น้ำมันปาล์ม (PO)	น้ำมันถั่วเหลือง (SBO)	น้ำมันทานตะวัน (SFO)	น้ำมันรำข้าว (RBO)	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNLS)	น้ำมันส้ม (OO)	น้ำมันปาล์มตัดแปรอีพอกซีไคซ์ (EPO)	น้ำมันปาล์มตัดแปรพอลิออล (PPO)	น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรอีพอกซีไคซ์ (ESBO)	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตัดแปรคาร์บอกซิเลต (DCNSL)
1,376	-	CH <sub>3</sub> -methyl stretching	CH <sub>3</sub> -methyl stretching	CH <sub>3</sub> -methyl stretching	CH <sub>3</sub> -methyl stretching	-	CH <sub>3</sub> -methyl stretching	CH <sub>3</sub> -methyl stretching	CH <sub>3</sub> -methyl stretching	CH <sub>3</sub> -methyl stretching	-
1,161	-	C-O stretching	C-O stretching	C-O stretching	C-O stretching	C-O stretching	-	C-O stretching	C-O stretching	C-O stretching	C-O stretching
823	-	-	-	-	-	-	-	C-O-C stretching	-	C-O-C stretching	-
910-650	C=C-H out of plane bending	-	-	-	-	C=C-H out of plane bending	C=C-H out of plane bending	-	-	-	C=C-H out of plane bending

#### 4.1.2 การศึกษาสมบัติของน้ำมันพืช

ค่าดัชนีการหักเหของแสง (Refractive index) ขึ้นอยู่กับความเป็นอะโรมาติกของน้ำมัน ถ้าน้ำมันมีความเป็นอะโรมาติกสูง มีดัชนีการหักเหของแสงสูง [10] จากการพิจารณาค่าดัชนีหักเหของแสงของน้ำมันพืชในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 2.5 น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน น้ำมันรำข้าว น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และน้ำมันสั้ม มีค่าดัชนีการหักเหของแสง 1.455-1.456, 1.470-1.478, 1.474-1.476, 1.470-1.473, 1.462-1.464 และ 1.472-1.473 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าดัชนีของแสงของน้ำมันอะโรมาติก น้ำมันแนฟทานิก และน้ำมันพาราฟินในตารางที่ 2.3 เห็นได้ว่าค่าดัชนีหักเหของแสงของน้ำมันพืชมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันพาราฟิน และมีค่าน้อยกว่าน้ำมันแนฟทานิกและน้ำมันอะโรมาติกเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน น้ำมันรำข้าว น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และน้ำมันสั้ม มีความเป็นอะโรมาติกน้อยกว่าน้ำมันแนฟทานิก และน้ำมันอะโรมาติกเล็กน้อย

ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของน้ำมันมีความสัมพันธ์กับขนาดโมเลกุล [10] จากการพิจารณาค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันแสดงดังตารางที่ 2.3 น้ำมันพาราฟิน มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.861 น้ำมันแนฟทานิก 0.932 น้ำมันอะโรมาติก 1.018 ซึ่งผลของค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันพืช จากตารางที่ 2.5 พบว่าน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน น้ำมันรำข้าว น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และน้ำมันสั้ม มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.912, 0.917-0.921, 0.915-0.919, 0.916-0.921, 0.911-0.918 และ 0.83-0.85 ตามลำดับ ซึ่งค่าส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับน้ำมันแนฟทานิก แต่ในกรณีน้ำมันสั้มมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันพาราฟิน แสดงให้เห็นว่าน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน น้ำมันรำข้าว และน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีขนาดโมเลกุลใกล้เคียงกับน้ำมันแนฟทานิก ส่วนน้ำมันสั้ม มีขนาดโมเลกุลใกล้เคียงกับน้ำมันพาราฟิน

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value) ของน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน น้ำมันรำข้าว น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และน้ำมันสั้ม ดังตารางที่ 4.3 พบว่าน้ำมันถั่วเหลือง มีความเป็นกรดน้อยที่สุด ส่วนน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีความเป็นกรดมากที่สุด และเมื่อพิจารณาค่าไอโอดีน (Iodine value) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความไม่อิ่มตัวของน้ำมันหรือปริมาณพันธะคู่ พบว่าน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน น้ำมันรำข้าวและน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีค่าไอโอดีน 17, 126, 126, 94 และ 181 g/100 g ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีพันธะคู่มากที่สุด รองมาคือ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน น้ำมันรำข้าว และน้ำมันปาล์ม ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 สมบัติของน้ำมันที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	น้ำมันปาล์ม (PO)	น้ำมัน ถั่วเหลือง (SBO)	น้ำมัน ทานตะวัน (SFO)	น้ำมัน รำข้าว (RBO)	น้ำมัน เปลือกเมล็ด มะม่วง ทิมพานต์ (CNLS)	น้ำมันส้ม (OO)	น้ำมันปาล์ม ตัดแปร อีพอกซิไดซ์ (EPO)	น้ำมันปาล์ม ตัดแปร พอลิออล (PPO)	น้ำมัน ถั่วเหลือง ตัดแปร อีพอกซิไดซ์ (ESBO)	น้ำมัน เปลือกเมล็ด มะม่วง ทิมพานต์ ตัดแปร บอกรีคาร์- บอกซิเลต (DCNSL)
จุดหลอมเหลว (Melting point, °C)	35	6	8	15	21	Non-Detected	28	40	20	10
ค่าของกรด (Acid value, mg KOH/g)	1.2	0.2	0.7	0.4	114.9	0.9	2.3	2.6	0.7	27.3
ค่าไอโอดีน (Iodine value, Wjjs)	17	126	126	94	181	Non-Detected	11	12	2	242
ค่าสบอนนิฟิเคชัน (Saponification, mg KOH/g)	245	195	193	194	160	Non-Detected	255	276	186	17

หมายเหตุ ข้อมูลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ กองวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์การเกษตรและแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตร กรมวิชาการเกษตร

## 4.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีต่อสมบัติของยาง

### 4.2.1 การศึกษาผลของชนิดน้ำมันพืช

โดยทั่วไปในการผสมสารตัวเติม (Filler) ที่เป็นของแข็งเข้าไปในยางทำให้ยางแข็งขึ้น ดังนั้นเครื่องบดผสมยางต้องมีกำลังเครื่องจักรสูงขึ้นด้วย การเพิ่มน้ำมันช่วยกระบวนการผลิตใส่เข้าไปในยาง เพื่อให้ยางนิ่มและช่วยในการแปรรูป ช่วยลดความแข็งของยาง จนทำให้ผสมได้ง่ายขึ้นและลดกำลังเครื่องจักรที่ใช้ในการผสมลง ซึ่งในการวิจัยนี้ทำการศึกษานิตของน้ำมันพืช (Vegetable oils, VO) ที่ใช้ในคอมพาวด์ยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับน้ำมันจากปิโตรเลียม คือ น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil, AO) และยางคอมพาวด์สูตรที่ไม่เติมน้ำมัน (Non-oil, NO) น้ำมันพืชที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ น้ำมันปาล์ม (Palm oil, PO) น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil, SBO) น้ำมันทานตะวัน (Sunflower oil, SFO) น้ำมันรำข้าว (Rice bran oil, RBO) น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid, CNSL) และน้ำมันส้ม (Orange oil, OO) โดยใช้อัตราส่วนของน้ำมันต่อสารตัวเติมคงที่คือปริมาณน้ำมัน 5 phr ปริมาณสารตัวเติมซิลิกา 50 phr สามารถอธิบายความหมายของสูตรต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันพืชชนิดต่างๆ

สูตร	ความหมาย		
NOSi <sub>g</sub> PEG	ไม่เติมน้ำมันช่วยกระบวนการผลิต	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น	เติม PEG
AOSi <sub>g</sub> PEG	น้ำมันอะโรมาติก	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น	เติม PEG
POSi <sub>g</sub> PEG	น้ำมันปาล์ม	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น	เติม PEG
SBOsi <sub>g</sub> PEG	น้ำมันถั่วเหลือง	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น	เติม PEG
SFOsi <sub>g</sub> PEG	น้ำมันทานตะวัน	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น	เติม PEG
RBOsi <sub>g</sub> PEG	น้ำมันรำข้าว	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น	เติม PEG
CNSLSi <sub>g</sub> PEG	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น	เติม PEG
OOSi <sub>g</sub> PEG	น้ำมันส้ม	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น	เติม PEG

#### 4.2.1.1 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันพืชชนิดต่างๆ

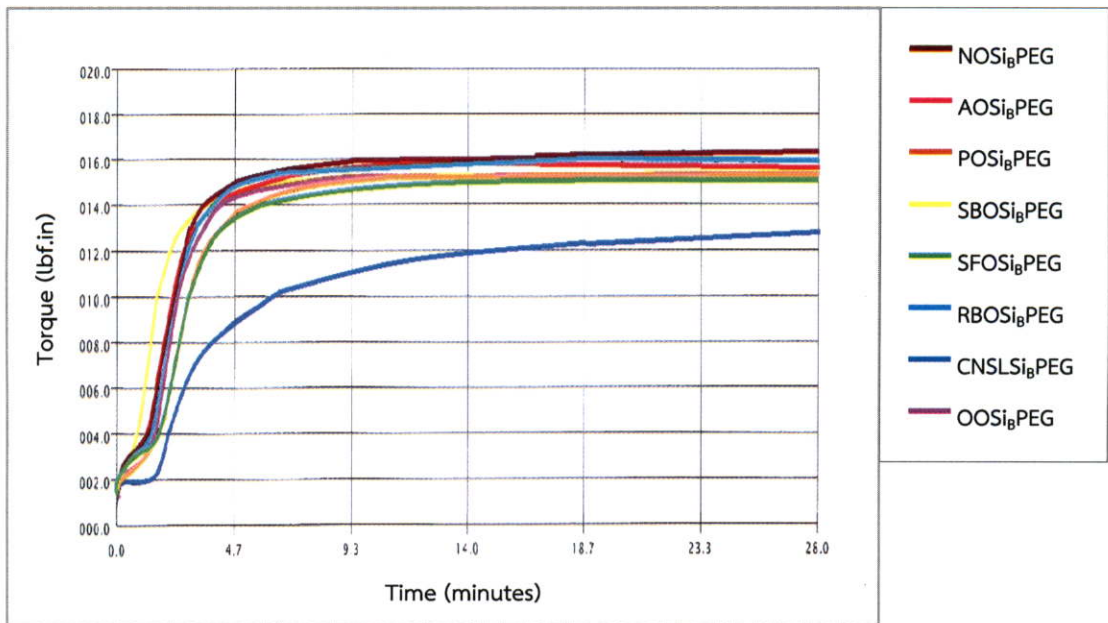
ในการบดผสมยางกับสารเคมีเพื่อเตรียมเป็นยางคอมพาวด์ สิ่งที่จะต้องพิจารณาคือ ระยะเวลาที่ยางเกิดการเชื่อมโยงสมบูรณ์และเปรียบเทียบกับยางคอมพาวด์ที่ไม่เติมน้ำมัน (NO) และเติมน้ำมันอะโรมาติก (AO) ซึ่งเป็นสารช่วยกระบวนการผลิตในปัจจุบัน ซึ่งจะทำการหาเวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time,  $t_{s2}$ ) และเวลาการเชื่อมโยง (Cure time,  $t_{c90}$ ) ด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้งานหมุน (Moving die rheometer, MDR) จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อใช้น้ำมันพืชชนิดต่างกัน เวลาเริ่มเชื่อมโยง และเวลาการเชื่อมโยง มีค่าใกล้เคียงกับยางคอมพาวด์ที่ไม่เติมน้ำมันอะโรมาติก ยกเว้นสูตรที่ใช้น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) ให้เวลาเชื่อมโยงมากที่สุด ซึ่งสามารถใช้ผลของการวิเคราะห์น้ำมันดังตารางที่ 4.3 มาเป็นเหตุผลสนับสนุน เนื่องจากค่าความเป็นกรด (Acid value) ของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีความเป็นกรดสูงกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ มีองค์ประกอบเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก จึงทำหน้าที่หน่วงหรือขัดขวางสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยงซึ่งเป็นเบส ทำให้เวลาเชื่อมโยงมีค่ามากกว่ายางคอมพาวด์ที่ใส่น้ำมันทุกชนิด ส่วนดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) และระดับการเชื่อมโยงของยาง (State of cure,  $M_{HF}-M_L$ ) มี

ค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อยและแปรผกผันกับค่าไอโอดีน (Iodine value) ซึ่งปริมาณพันธะคู่ของน้ำมันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดอัตราเร็วในการเชื่อมโยงซัลฟอน ระดับการเชื่อมโยงของยางลดลงเล็กน้อย เนื่องจากสารเชื่อมโยงบางส่วนสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของน้ำมันได้ ดังนั้นปริมาณของสารเชื่อมโยงที่เข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของยางจึงลดลง [42] และเมื่อพิจารณาสูตรยางที่ไม่เติมน้ำมัน พบว่ามีเวลาเชื่อมโยงมากกว่า และดัชนีอัตราการเชื่อมโยงที่ต่ำกว่าสูตรยางที่เติมน้ำมันช่วยกระบวนการผลิตเนื่องจากน้ำมันช่วยกระบวนการผลิตอาจไปล้อมรอบอยู่บนพื้นผิวของซิลิกา ทำให้อันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลลดลง จึงลดการดูดสารกระตุ้นและสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ทำให้ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสูตรยางที่เติมน้ำมันเกิดได้สมบูรณ์ขึ้น ส่วนค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque,  $M_L$ ) ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque,  $M_{HF}$ ) ของสูตรยางที่ไม่เติมน้ำมันมีค่าสูงกว่าสูตรยางที่เติมน้ำมันช่วยกระบวนการผลิตเล็กน้อย เนื่องจากน้ำมันช่วยกระบวนการผลิตช่วยทำให้กลุ่มก้อนแอ็กโกลเมอเรตของซิลิกาแตกเป็นแอ็กกรีเกตมอเตอร์ได้ง่ายขึ้น กระจายตัวในยางได้ดี และน้ำมันยังสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของสายโซ่ของยาง ทำให้ปริมาตรอิสระของยางเพิ่มขึ้น สายโซ่ของยางสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น [10] จึงทำให้ค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุดต่ำลง

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์สูตรที่เติมน้ำมันพีซีชนิดต่างๆ กับน้ำมันอะโรมาติก พบว่าเวลาเริ่มเชื่อมโยง เวลาการเชื่อมโยง ดัชนีอัตราการเชื่อมโยง ค่าแรงบิดต่ำสุด ค่าแรงบิดสูงสุด และค่าการเชื่อมโยงของยางมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นสูตรที่เติมน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) ที่มีเวลาการเชื่อมโยงและดัชนีอัตราการเชื่อมโยงที่ช้ากว่า ซึ่งเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนามาก ต้องการเวลาการเชื่อมโยงที่นาน แสดงดังตารางที่ 4.5

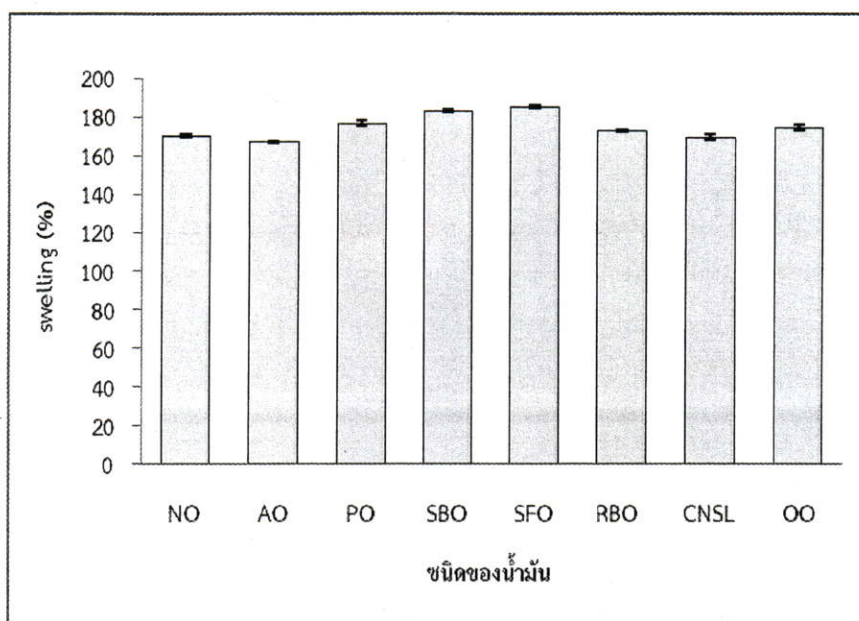
ตารางที่ 4.5 แสดงค่า  $t_{s2}$ ,  $t_{c90}$ , CRI,  $M_L$  และ  $M_{HF}$  ของยางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันพีซีชนิดต่างๆ

สูตรยางคอม- พาวด์	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	CRI ( $\text{min}^{-1}$ )	$M_L$ (dNm)	$M_{HF}$ (dNm)	$M_{HF}-M_L$ (dNm)
NOSi <sub>B</sub> PEG	1.23	8.50	13.76	4.08	18.78	14.70
AOSi <sub>B</sub> PEG	1.60	4.58	33.56	2.93	15.83	12.90
POSi <sub>B</sub> PEG	1.58	3.83	44.44	2.47	15.31	12.84
SBOSi <sub>B</sub> PEG	1.95	5.69	26.74	3.19	15.36	12.17
SFOSi <sub>B</sub> PEG	1.87	5.59	26.88	2.81	15.15	12.34
RBOSi <sub>B</sub> PEG	1.41	3.93	39.68	2.84	15.22	12.38
CNSLSi <sub>B</sub> PEG	1.98	14.69	7.87	1.80	12.91	11.11
OOSi <sub>B</sub> PEG	1.46	4.06	38.46	2.85	15.86	13.01



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน

จากการทดลองได้นำยางคงรูปที่เติมน้ำมันต่างชนิดกัน มาเปรียบเทียบกับค่าร้อยละการบวมตัว (%Swelling) โดยแช่ในตัวทำละลาย ซึ่งร้อยละการบวมตัวนั้นจะแปรผกผันกับความหนาแน่นเชื่อมโยง กล่าวคือ ถ้ายางคงรูปบวมตัวมากแสดงว่ามีความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อย (Crosslink density,  $\rho_c$ ) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละการบวมตัวกับชนิดของน้ำมันจากรูปที่ 4.2 พบว่ายางคงรูปที่ใส่น้ำมันพืชมีร้อยละการบวมตัวใกล้เคียงกับยางคงรูปที่ใส่น้ำมันอะโรมาติก ทั้งนี้ให้ผลสอดคล้องกับผลระดับการเชื่อมโยงของยาง (State of cure,  $M_{HF}-M_L$ ) ซึ่งเป็นค่าที่สัมพันธ์กับความหนาแน่นเชื่อมโยง โดยยางที่เติมน้ำมันพืชทุกชนิดมีระดับการเชื่อมโยงของยางใกล้เคียงกับยางที่เติมน้ำมันอะโรมาติก หรือกล่าวได้ว่ายางที่เติมน้ำมันพืชทุกชนิดมีความหนาแน่นเชื่อมโยงใกล้เคียงกับยางที่เติมน้ำมันอะโรมาติก จึงทำให้มีร้อยละการบวมตัวใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน

#### 4.2.1.2 สมบัติของการไหลและสมบัติทางกายภาพของยางที่ใช้ น้ำมันพืชชนิดต่างๆ

ผลของชนิดของน้ำมันพืช ได้แก่ น้ำมันปาล์ม (PO) น้ำมันถั่วเหลือง (SBO) น้ำมันทานตะวัน (SFO) น้ำมันรำข้าว (RBO) น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) และน้ำมันส้ม (OO) ต่อสมบัติของการไหลและทางกายภาพของยางได้แก่ ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) และการแพร่ออกของน้ำมัน (Bleeding) เปรียบเทียบกับยางที่ไม่เติมน้ำมัน (NO) และเติมน้ำมันอะโรมาติก (AO) แสดงดังรูปที่ 4.3-4.5

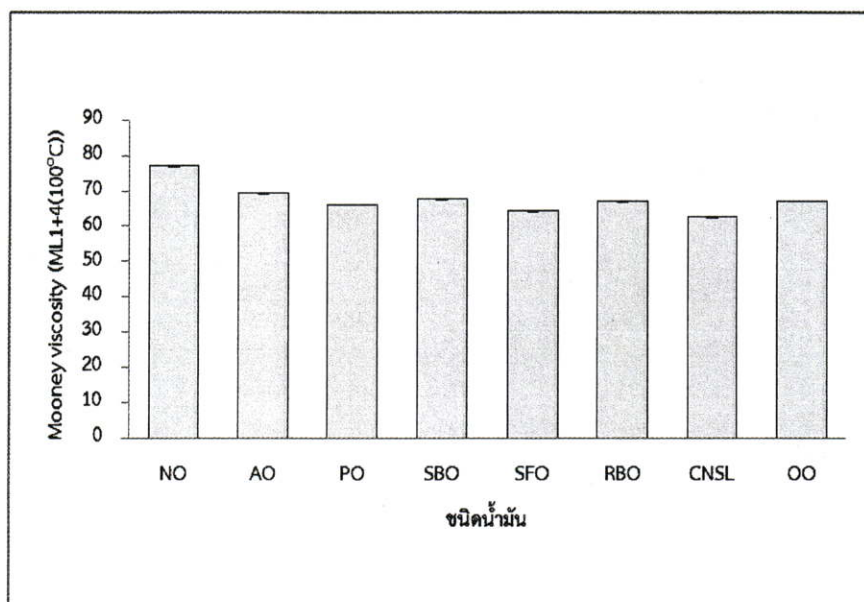
จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของน้ำมันพืชกับค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางคอมพาวด์ พบว่าค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวด์ที่เติมน้ำมันพืชส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับยางคอมพาวด์ที่เติมน้ำมันอะโรมาติก เนื่องจากน้ำมันพืชช่วยทำให้ยางธรรมชาติมีความหนืดลดลงหรือยางนิ่มขึ้น เช่นเดียวกับน้ำมันอะโรมาติก ส่วนยางคอมพาวด์ที่ไม่เติมน้ำมัน พบว่าค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวด์มีค่าสูง แสดงให้เห็นว่าน้ำมันพืชสามารถทำหน้าที่ช่วยลดความหนืดของยาง โดยสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ผ่านกันง่ายขึ้น ทำให้ความหนืดของยางคอมพาวด์ลดลง ดังนั้นยางคอมพาวด์สูตรไม่เติมน้ำมันจึงมีความหนืดสูงกว่า

จากการศึกษาความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของยางเมื่อเติมน้ำมันพืชที่ต่างชนิดกัน พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันอะโรมาติกมีค่า 1.018 น้ำมันพืชส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง 0.911-0.921 และน้ำมันส้มมีค่า 0.83-0.85 ดังตารางที่ 2.3 และ 2.5 ดังนั้นในการเติมน้ำมันที่เท่ากันที่ปริมาณ 5 phr จึงไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าความถ่วงจำเพาะของยางที่เติมน้ำมันพืชกับน้ำมันอะโรมาติก

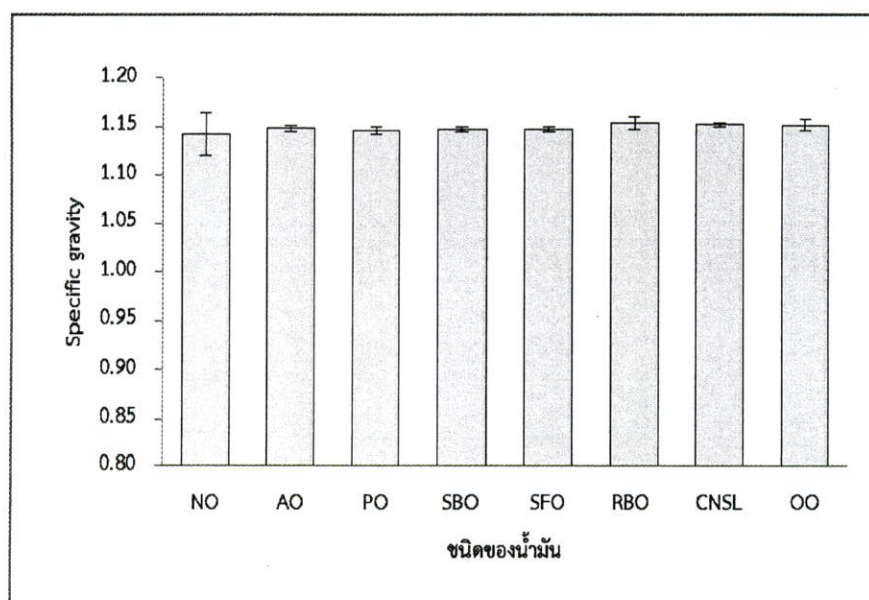
จากการศึกษาการแพร่ออกของน้ำมัน (Bleeding) เมื่อเติมน้ำมันพืชที่ต่างชนิดกัน พบว่ายางทุกชนิดไม่พบการแพร่ออกของน้ำมัน ซึ่งตามนิยามหมายถึงความแตกต่างของน้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนและหลังการทดสอบที่มากกว่า 0.45 กรัม [39] และค่าการแพร่ออกของน้ำมันของยางที่เติมน้ำมันพืชทุกชนิด มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันอะโรมาติก ซึ่งสอดคล้องกับค่าความ

ถ่วงจำเพาะของน้ำมัน ที่สัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของโมเลกุล ถ้าค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันมีค่าสูง จะมีขนาดโมเลกุลใหญ่ การระเหยของน้ำมันน้อยลง และการแพร่ผ่านของน้ำมันจะยากขึ้นด้วย ส่วนน้ำมันส้มมีการแพร่ออกของน้ำมัน มีค่ามากกว่าน้ำมันชนิดอื่นเล็กน้อย เนื่องจากมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่า ขนาดของโมเลกุลที่เล็กกว่า จึงสามารถแพร่ออกได้มากกว่านั่นเอง

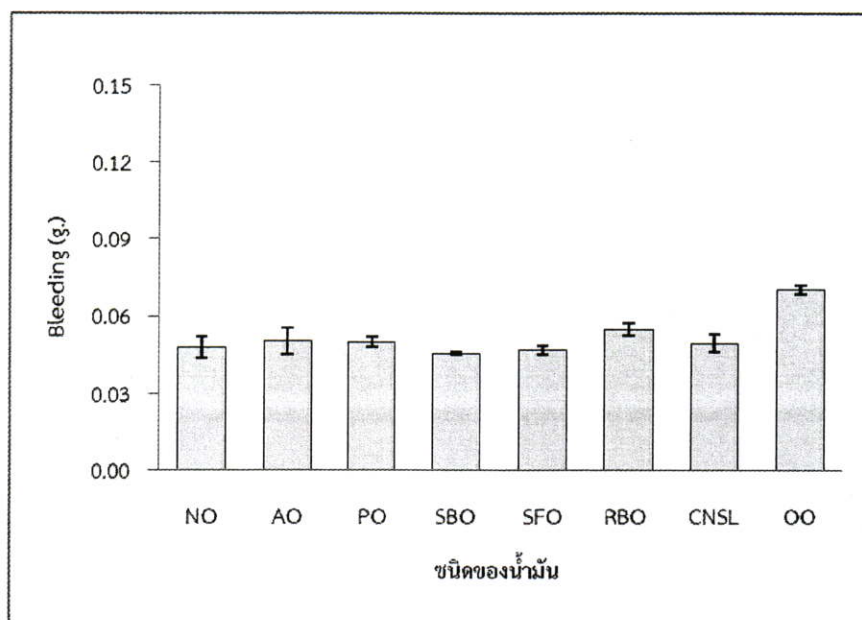
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับน้ำมันอะโรมาติก พบว่าค่าความหนืดมูนิ ค่าความถ่วงจำเพาะ และการแพร่ออกของน้ำมันของยางที่เติมน้ำมันพีช ให้ค่าที่ใกล้เคียงยางที่เติมน้ำมันอะโรมาติก ยกเว้นการแพร่ออกของน้ำมันของยางที่เติมน้ำมันส้มที่ให้ค่าสูงสุด โดยผลของการเติมน้ำมันช่วยกระบวนการผลิต มีส่วนช่วยทำให้ความหนืดของยางคอมพาวด์ลดลง



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนิของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน



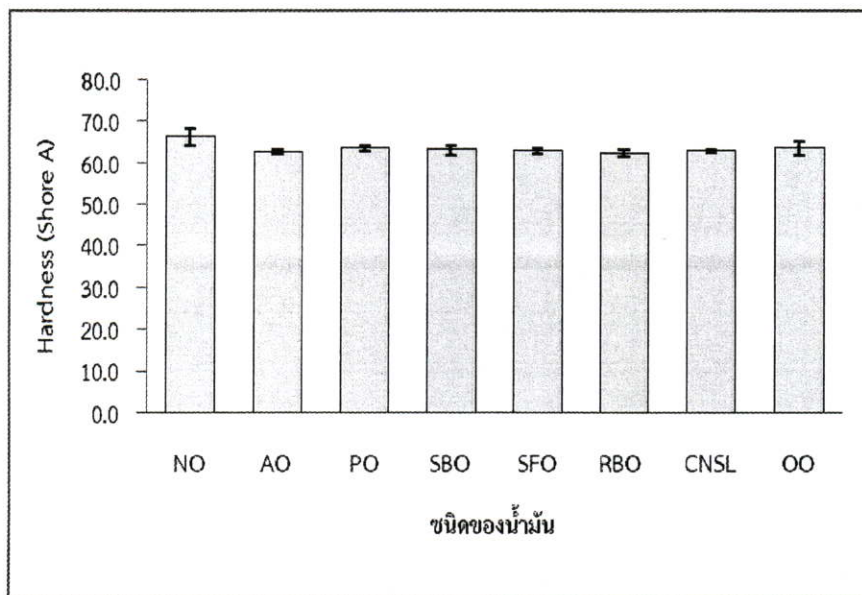
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าการแพร่ออกของน้ำมันของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน

#### 4.2.1.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ น้ำมันพืชชนิดต่างๆ

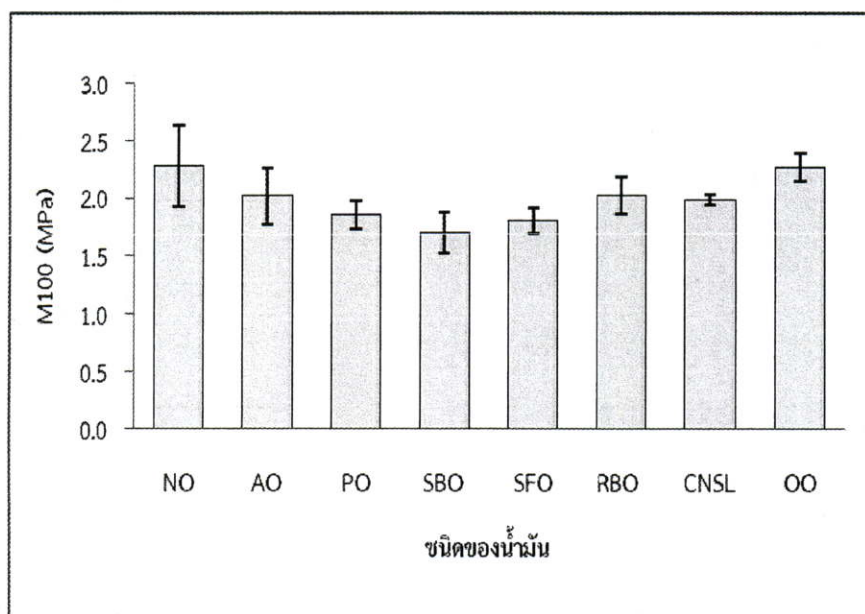
ความแข็งกด (Hardness) ค่ามอดุลัสที่ 100% (M100) ค่ามอดุลัสที่ 300% (M300) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ของยางคงรูปที่เติมน้ำมันช่วยกระบวนการผลิตชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.6-4.11 พบว่าความแข็งกด ค่ามอดุลัสที่ 100% ค่ามอดุลัสที่ 300% ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด ของยางที่เติมน้ำมันอะโรมาติกและยางที่เติมน้ำมันพืช มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน มอก.367 เรื่องยางรถยนต์ [43] และให้ค่าใกล้เคียงกัน สามารถพิจารณาได้จากผลของความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางที่เติมน้ำมันพืชจะมีค่าใกล้เคียงกับยางที่เติมน้ำมันอะโรมาติก ทำให้เมื่อได้รับแรงดึง ยางคงรูปสามารถต้านทานการขาดออกของสายโซ่ได้ใกล้เคียงกัน โดยน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันทานตะวันจะมีความหนาแน่นเชื่อมโยงต่ำกว่าน้ำมันชนิดอื่นเล็กน้อย จึงให้ค่ามอดุลัสที่ 100% และ 300% ของน้ำมันทั้ง 2 ชนิดมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ส่วนของยางที่ไม่เติมน้ำมัน มีค่าความแข็งกด ค่ามอดุลัสที่สูงกว่าและความแข็งแรงฉีกขาดที่ต่ำกว่ายางที่เติมน้ำมันช่วยกระบวนการผลิต เนื่องจากน้ำมันมีส่วนช่วยให้ซิลิกากระจายตัวในยางได้ดีขึ้น โดยน้ำมันเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้มีปริมาตรอิสระมากขึ้น จึงทำให้ซิลิกาสามารถเข้าไปกระจายตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางได้ดี อีกทั้งน้ำมันเข้าไปล้อมรอบบนพื้นผิวของซิลิกา ทำให้อันตรกิริยาที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างผิวซิลิกาตกลง เมื่อเกิดแรงเฉือนในระหว่างกระบวนการผสม กลุ่มก้อนแอ็กโกเมอเรต (Agglomerate) ของซิลิกาแตกออกและกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น [8] ส่วนค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของยางที่เติมน้ำมันพืชให้ค่าที่ใกล้เคียงกับยางที่ไม่เติมน้ำมัน ซึ่งสอดคล้องกับผลของความหนาแน่นเชื่อมโยง นอกจากนี้ปริมาณน้ำมันที่ใส่คือ 5 phr ซึ่งอาจน้อยไปทำให้เห็นความแตกต่างไม่ชัดเจน

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับน้ำมันอะโรมาติก พบว่าค่าความแข็งกด ค่ามอดุลัสที่ 100% ค่ามอดุลัสที่ 300% ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความ

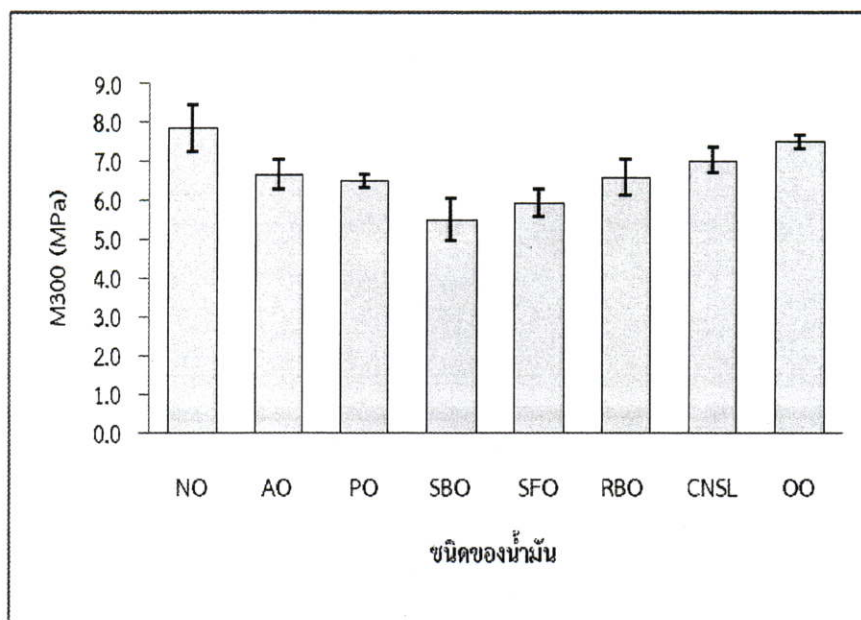
แข็งแรงฉีกขาดของยางที่เติมน้ำมันพืชให้ค่าที่ใกล้เคียงยางที่เติมน้ำมันอะโรมาติก และการเติมน้ำมันช่วยกระบวนการผลิตมีส่วนช่วยทำให้ค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงขึ้น และความแข็งกดลดลง



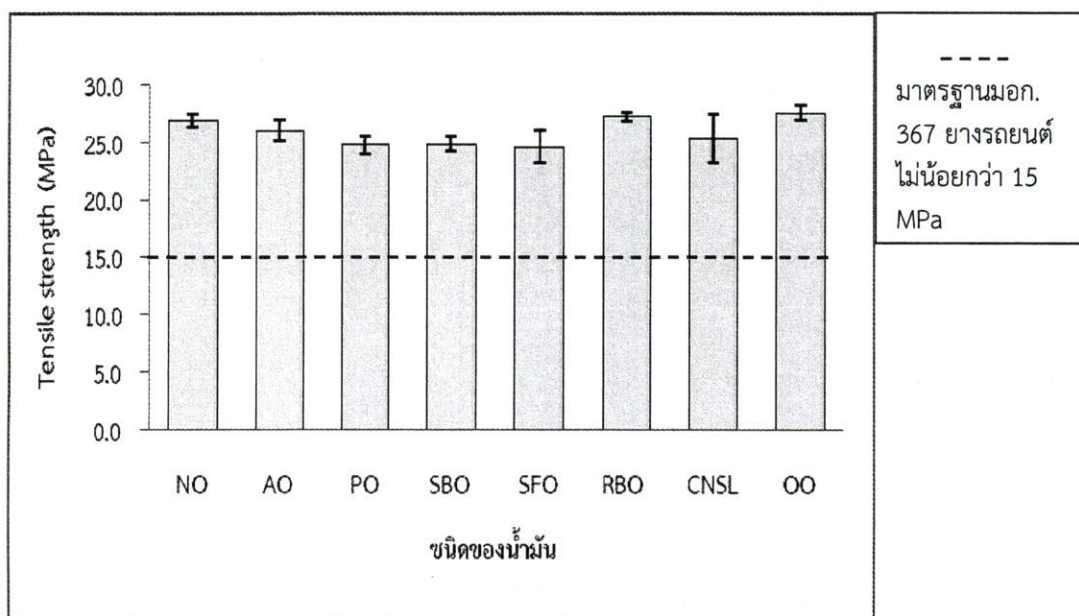
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความแข็งกดยางของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน



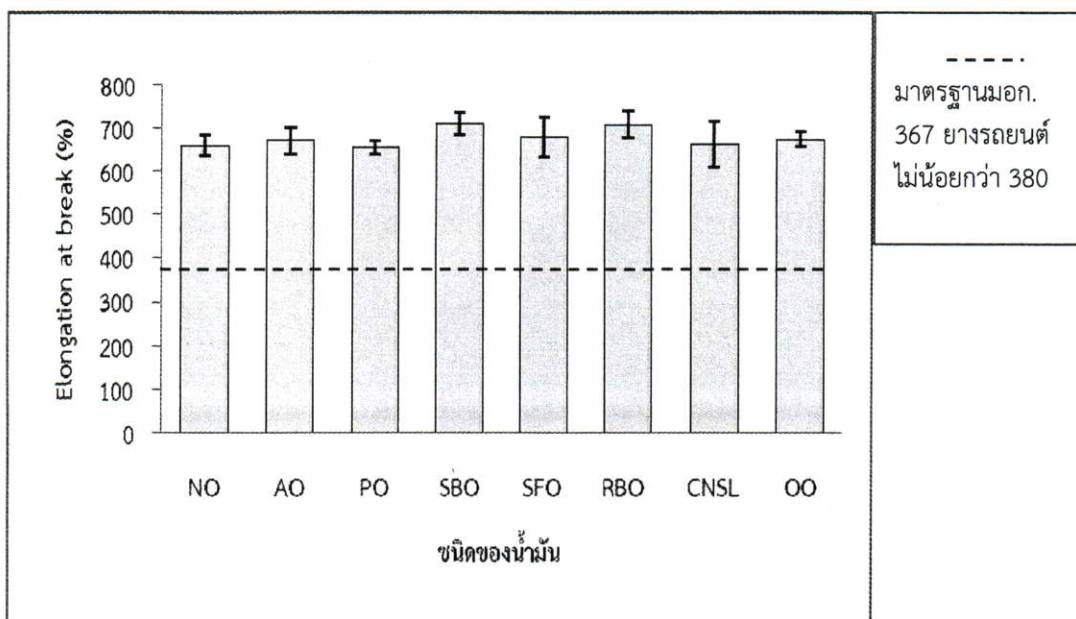
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน



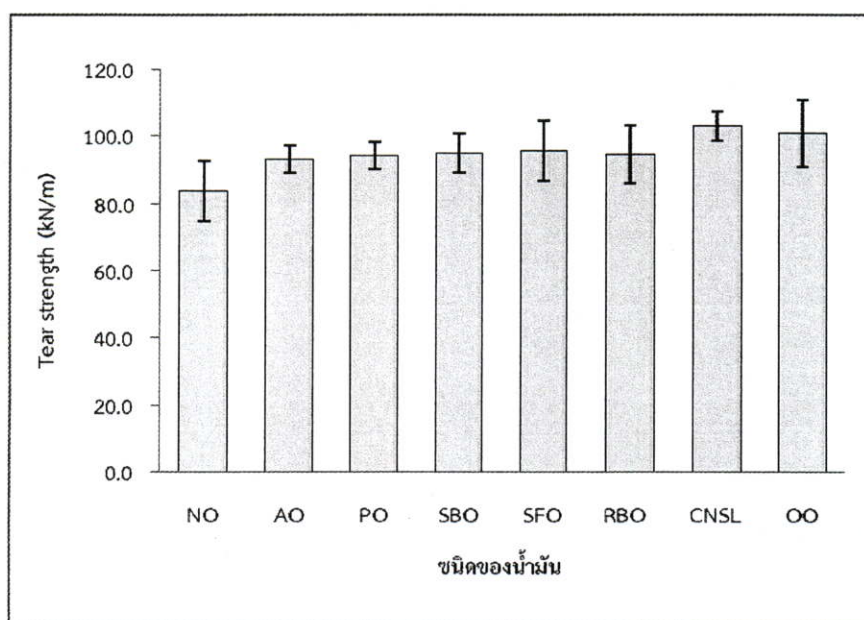
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน



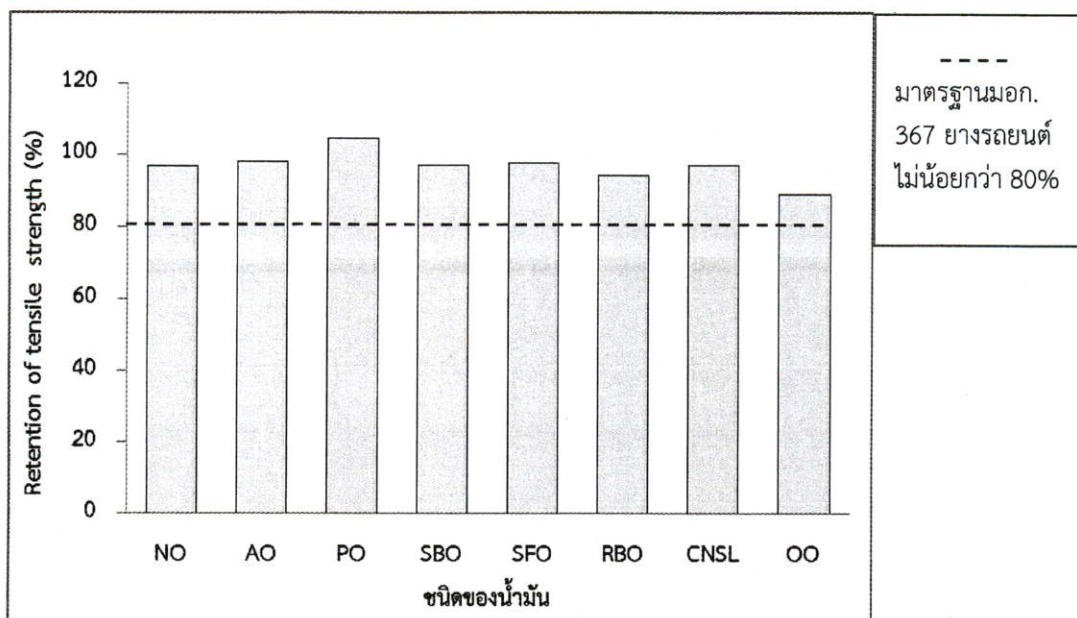
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน



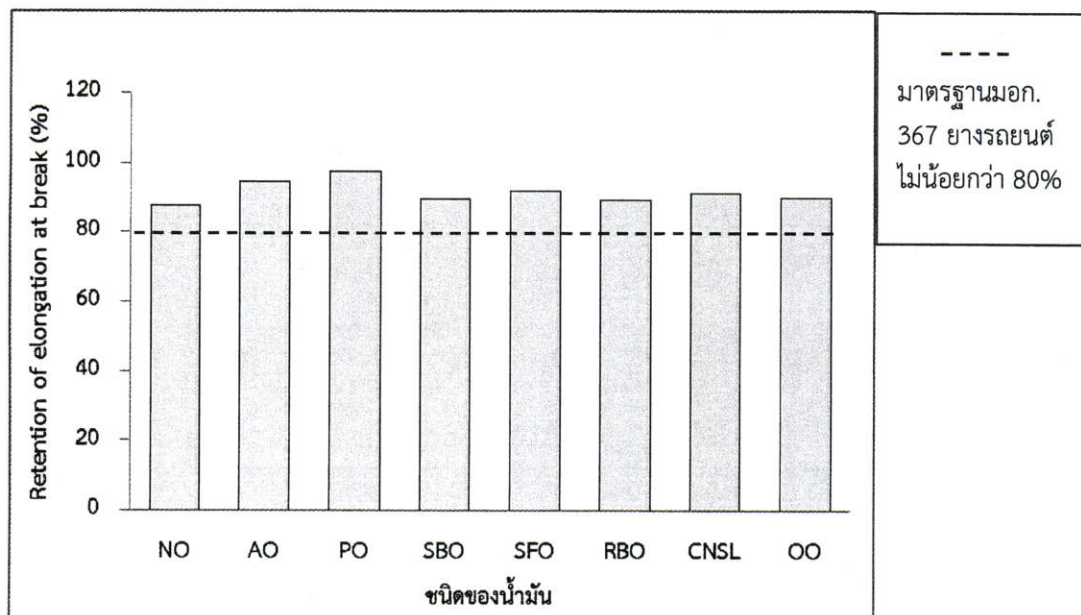
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน

การทดสอบสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาดที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อคิดเป็นร้อยละของการคงเหลือ แสดงดังรูปที่ 4.12-4.14 พบว่ายางที่เติมน้ำมันพืชให้ค่าที่ใกล้เคียงยางที่เติมน้ำมันอะโรมาติกและยางคงรูปทุกสูตรยังให้ค่าที่สูงกว่ามาตรฐาน มอก.367 เรื่องยางรถยนต์ สามารถพิจารณาได้จากผลของความหนาแน่นเชื่อมโยงและระดับการเชื่อมโยง (State of cure,  $M_{HF}-M_L$ ) ของยางที่เติมน้ำมันพืชมีค่าใกล้เคียงกับยางที่เติมน้ำมันอะโรมาติก ดังนั้นพันธะคู่ของยางซึ่งง่ายต่อปฏิกิริยา

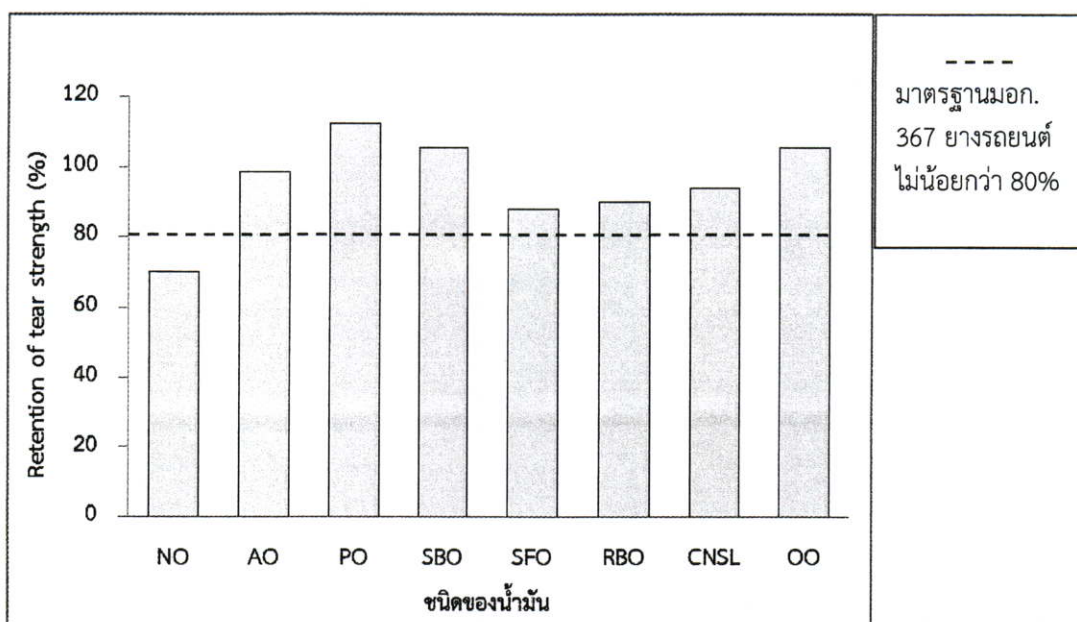
เสื่อมสภาพด้วยความร้อนของยางที่เติมน้ำมันมีปริมาณใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ร้อยละการคงเหลือของสมบัติหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าร้อยละของการคงเหลือหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนของความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อน้ำมันต่างกัน



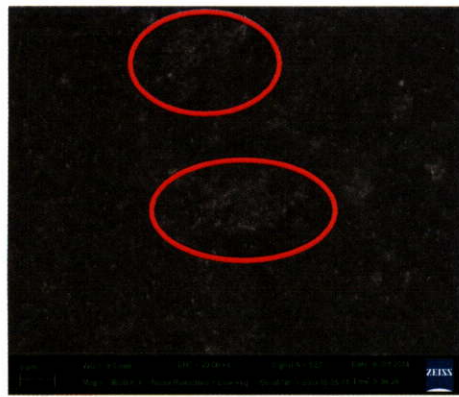
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าร้อยละของการคงเหลือหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนของร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อน้ำมันต่างกัน



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าร้อยละของการคงเหลือหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของความแข็งแรง  
ฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน

#### 4.2.1.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางที่ใช้ไขมันพืชชนิดต่างๆ

การวิจัยนี้ทำการศึกษาสัณฐานวิทยา เพื่อศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวของซิลิกาในยางที่เติมไขมันช่วยกระบวนการผลิตชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของยางที่ไม่เติมน้ำมัน (NO) มีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของซิลิกาหรือแอ็กโกเมอเรตขนาดใหญ่กว่า 2 ไมครอนหลายกลุ่ม เมื่อมีการเติมน้ำมันอะโรมาติก (AO) น้ำมันปาล์ม (PO) น้ำมันถั่วเหลือง (SBO) น้ำมันทานตะวัน (SFO) น้ำมันรำข้าว (RBO) น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) และน้ำมันส้ม (OO) ลงในยางธรรมชาติเพื่อช่วยกระบวนการผลิต พบว่าการกระจายตัวของซิลิกาสม่ำเสมอมากขึ้น บริเวณพื้นผิวของยางคอมพาวด์เกิดกลุ่มก้อนแอ็กโกเมอเรตที่มีขนาดเล็กกว่ายางที่ไม่เติมน้ำมัน และน้ำมันพืชยังให้การกระจายตัวของซิลิกาใกล้เคียงกับน้ำมันอะโรมาติกด้วย เนื่องจากไขมันช่วยทำให้ปริมาตรอิสระของยางเพิ่มขึ้นและลดอันตรกิริยาบนพื้นผิวของซิลิกา ดังเหตุผลที่กล่าวข้างต้น ดังนั้นไขมันจึงทำให้ซิลิกาเกิดการแตกตัวและกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติ

NOSi<sub>B</sub>PEGAOSi<sub>B</sub>PEGPOSi<sub>B</sub>PEGSBOSi<sub>B</sub>PEGSFOSi<sub>B</sub>PEGRBOSi<sub>B</sub>PEGCNSLSi<sub>B</sub>PEGOOSi<sub>B</sub>PEG

รูปที่ 4.15 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อใช้น้ำมันต่างกัน ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า (วงกลมสีแดง แสดงกลุ่มก้อนแอ็กโอมอเรตของซิลิกา)

จากผลการเปรียบเทียบสมบัติการเชื่อมโยง สมบัติการไหล สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางที่เติมน้ำมันพืชชนิดต่างๆกับยางที่เติมน้ำมันอะโรมาติกพบว่า ยางที่เติมน้ำมันปาล์ม (PO) น้ำมันถั่วเหลือง (SBO) น้ำมันทานตะวัน (SFO) น้ำมันรำข้าว (RBO) น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) และน้ำมันส้ม (OO) ให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง เวลาการเชื่อมโยง การแพร่ออกของน้ำมัน ความหนืด ความแข็งกต ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด ที่ใกล้เคียงกับยางที่ใช้ไขมันอะโรมาติก ยกเว้นน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่มีเวลาการเชื่อมโยงอย่างสูงกว่าน้ำมันชนิดอื่น เนื่องจากความเป็นกรดของน้ำมันสูง แต่ถึงอย่างไรยังให้สมบัติเชิงกลที่ดี ปัจจัยในการเลือกใช้ไขมันช่วยกระบวนการผลิต นอกจากต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ระหว่างยางกับน้ำมัน สมบัติของยางคงรูป สีของยางและความคงทนของสี การขนถ่ายเคลื่อนย้ายและการใช้ แล้วต้องคำนึงความหาได้ง่ายของวัตถุดิบ ราคาต้นทุนด้วย ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ไขมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งมีปริมาณมาก หาได้ง่ายในประเทศไทยและเป็นวัตถุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อใช้ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

#### 4.2.2 การศึกษาลำดับการผสมซิลิกาและการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)

โดยทั่วไปลำดับการผสมสารเติมแต่งเข้าไปในยางส่งผลต่อสมบัติของยาง และเนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) อยู่ในปริมาณมาก พื้นผิวของซิลิกาจึงมีความเป็นขี้และมี ความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีต่างๆ สูง ดังนั้นจำเป็นต้องเติมสารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับหมู่ไฮดรอกซิล เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) เพื่อลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกา ทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่าย ซึ่งน้ำมันพืชเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้เชื่อมต่อกับกรดไขมันและประกอบด้วยกรดสเตียริกตามธรรมชาติ อาจทำหน้าที่ช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลได้เช่นเดียวกับ PEG และเป็นสารกระตุ้นร่วมหรือสารหล่อลื่นได้ นอกจากนี้สารกระตุ้นปฏิกิริยาหรือซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) เป็นสารอันตรายตาม EU REACH ดังนั้นงานวิจัยจึงทำการลดปริมาณ ZnO ทั้งนี้ในอัตราปริมาณของ ZnO ที่นิยมใช้คือ 5 phr เนื่องจากการศึกษาและพบว่า การเติม ZnO มากกว่า 4 phr แทบจะไม่มีผลหรืออาจมีผลเพียงเล็กน้อยต่อประสิทธิภาพ การกระตุ้นปฏิกิริยา ซึ่งการลดปริมาณการใช้ ZnO ลงนั้น ส่งผลดีในด้านการลดต้นทุนและลดปัญหาด้านมลพิษอีกด้วย [8] ซึ่งในการวิจัยนี้จึงทำการศึกษาลำดับของการผสมซิลิกา ได้แก่ เติมซิลิกาก่อน-หลังสารกระตุ้นและ การเติมและไม่เติม PEG น้ำมันพืชที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ น้ำมันปาล์ม (PO) โดยควบคุมอัตราส่วนของน้ำมันต่อสารตัวเติมคงที่คือ ปริมาณน้ำมัน 5 phr ปริมาณสารตัวเติมซิลิกา 50 phr สามารถอธิบายความหมายของสูตรต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่มีลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน

สูตร	ความหมาย		
POSi <sub>A</sub> PEG	น้ำมันปาล์ม	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น : กรดสเตียริก (5:2)	เติม PEG
POSi <sub>B</sub> PEG	น้ำมันปาล์ม	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น : กรดสเตียริก (5:2)	เติม PEG
POSi <sub>A</sub> WPEG	น้ำมันปาล์ม	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น : กรดสเตียริก (3:1)	ไม่เติม PEG
POSi <sub>B</sub> WPEG	น้ำมันปาล์ม	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น : กรดสเตียริก (3:1)	ไม่เติม PEG

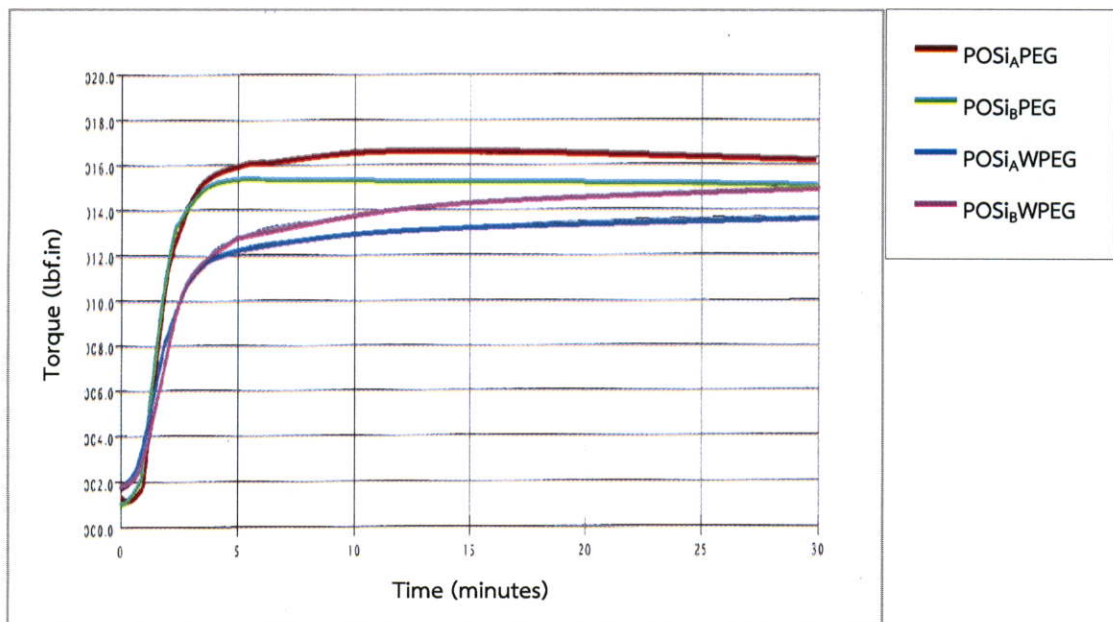
#### 4.2.2.1 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ที่มีลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน

จากผลการทดสอบ พบว่าลำดับการเติมซิลิกาที่ต่างกัน ในกรณียางคอมพาวด์ที่เติม PEG ให้ค่าเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time,  $t_{s2}$ ) และเวลาการเชื่อมโยง (Cure time,  $t_{c90}$ ) และดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) รวมทั้งค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque,  $M_L$ ) ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque,  $M_{HF}$ ) และค่าการเชื่อมโยงของยาง (State of cure,  $M_{HF}-M_L$ ) ไม่แตกต่างกันระหว่างการเติมซิลิกาก่อน (Silica before,  $Si_B$ ) หรือหลังสารกระตุ้น (Silica after,  $Si_A$ ) แต่กรณีของยางที่ไม่เติม PEG (Without PEG, WPEG) การเติมซิลิกาลำดับแรกก่อนสารกระตุ้น (POSi<sub>B</sub>WPEG) ส่งผลต่อเวลาเชื่อมโยงที่นานกว่า เนื่องจากซิลิกาอาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมสูง (Filler-filler interaction) เพราะบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) เป็นจำนวนมาก เมื่อซิลิกามาอยู่รวมกันสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนผ่านหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเองของอนุภาคซิลิกา ซึ่งการกีดกันของสารตัวเติมเช่นนี้ทำให้มียางบางส่วนถูกกั้นเอาไว้ภายในโครงสร้างของซิลิกา ยางดังกล่าวเสมือนถูกป้องกันไม่ให้เข้าสู่ปฏิกิริยาการคงรูปได้ง่ายและการที่สารตัวเร่งและสารกระตุ้นปฏิกิริยาประเภทที่เป็นเบส บางส่วนถูกดูดซับบนพื้นผิวของซิลิกา จึงใช้เวลาการเชื่อมโยงนานขึ้น [44] เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยจากการเติม PEG พบว่าเวลาเริ่มเชื่อมโยง เวลาการเชื่อมโยง ดัชนีอัตราการเชื่อมโยง ในสูตรที่เติม PEG เร็วกว่าและค่าแรงบิดสูงสุดสูงกว่าสูตร WPEG เนื่องจาก PEG โดยโครงสร้างของ PEG มีลักษณะที่เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ยาว และมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วในทุกๆ หน่วยซ้ำซึ่งสามารถล้อมรอบและช่วยลดการดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารกระตุ้นปฏิกิริยาคงรูป โดยเฉพาะสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสี (Zn complex) บนพื้นผิวของซิลิกาได้ดีกว่าน้ำมันพืช ซึ่งมีโครงสร้างเป็นกรดไขมันที่มีสายโซ่สั้นกว่า PEG จึงส่งผลทำให้ปฏิกิริยาคงรูปเกิดได้เร็ว [8] ส่วนค่าแรงบิดต่ำสุดต่ำกว่าสูตร WPEG เล็กน้อย เนื่องจาก PEG ทำหน้าที่ช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกา จึงทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวได้ดีขึ้น ค่าแรงบิดต่ำสุดซึ่งวัดในขณะที่ยางคอมพาวด์ยังไม่เกิดการเชื่อมโยงจึงลดลง อีกทั้งสูตรที่มีการเติม PEG มีปริมาณของกรดสเตียริกที่เติมลงไปมากกว่าสูตรที่ไม่เติม PEG ซึ่งกรดสเตียริกเป็นกรดไขมันที่นอกจากทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นร่วมแล้ว ยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิตอีกด้วย โดยจะช่วยหล่อลื่นและแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ดังนั้นจึงทำให้ค่าแรงบิดต่ำสุดต่ำกว่า

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ที่มีลำดับการผสมซิลิกาที่แตกต่างกัน และการเติม-ไม่เติม PEG ว่า ปัจจัยของลำดับการผสมซิลิกาไม่ส่งผลในกรณีของระบบที่เติม PEG แต่กรณีที่ไม่เติม PEG การใส่ซิลิกาก่อนสารกระตุ้น (POSi<sub>B</sub>WPEG) ส่งผลให้ลักษณะการเชื่อมโยงที่นานกว่า ส่วนปัจจัยของ PEG ให้ลักษณะการเชื่อมโยงเร็วกว่า ค่าแรงบิดต่ำสุดต่ำกว่า ค่าแรงบิดสูงสุดและค่าการเชื่อมโยงสูงกว่ายางที่ไม่เติม PEG แสดงดังตารางที่ 4.7

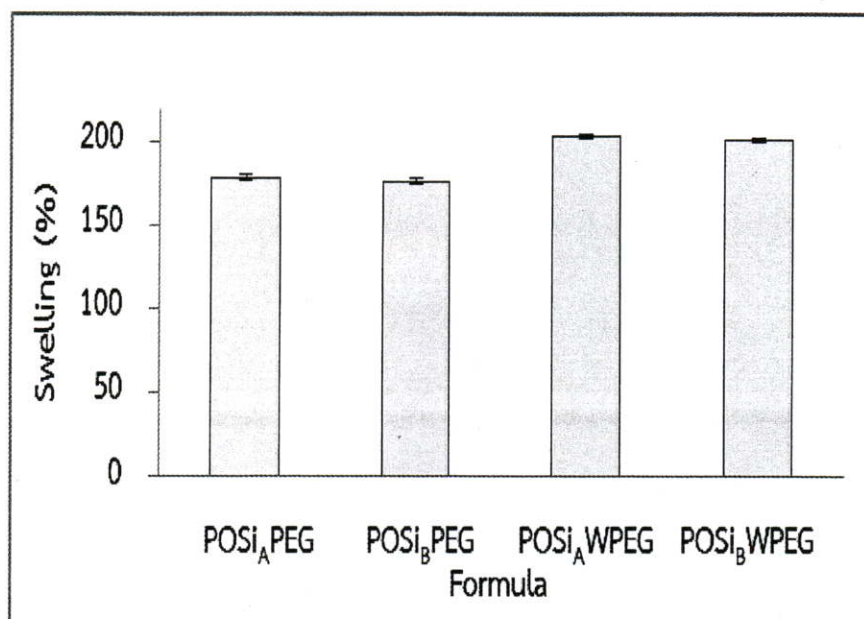
ตารางที่ 4.7 แสดงค่า  $t_{s2}$ ,  $t_{c90}$ , CRI,  $M_L$  และ  $M_{HF}$  ของยางคอมพาวด์ที่มีลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน

สูตรยางคอมพาวด์	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	CRI ( $\text{min}^{-1}$ )	$M_L$ (dNm)	$M_{HF}$ (dNm)	$M_{HF}-M_L$ (dNm)
POSi <sub>A</sub> PEG	1.16	3.43	44.05	1.16	16.58	15.42
POSi <sub>B</sub> PEG	1.02	2.74	58.14	1.26	15.46	14.20
POSi <sub>A</sub> WPEG	1.31	6.79	18.25	3.06	13.69	10.63
POSi <sub>B</sub> WPEG	1.36	10.00	11.57	2.41	15.02	12.61



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน

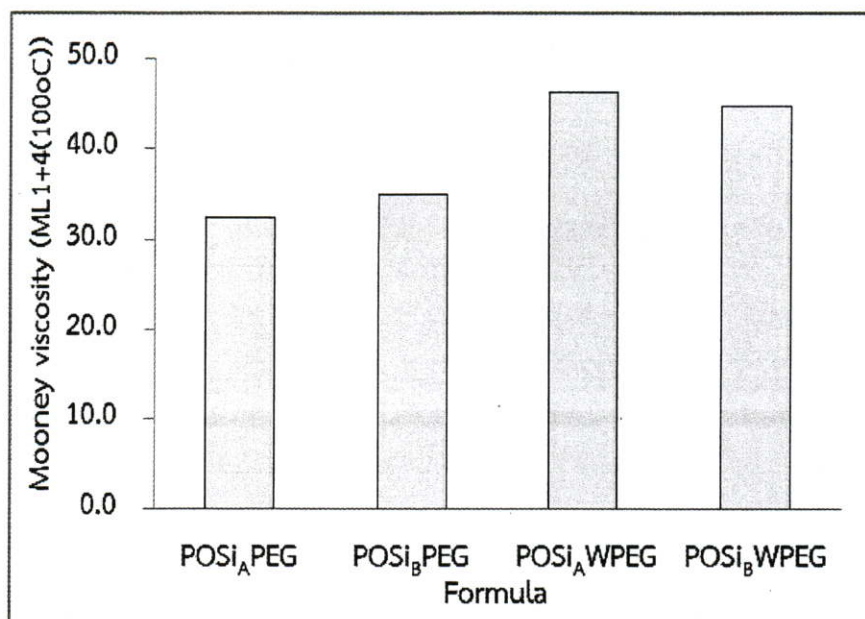
จากรูปที่ 4.17 แสดงค่าร้อยละการบวมตัว (% Swelling) กับยางคอมพาวด์ที่มีลำดับของการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน พบว่าปัจจัยของลำดับการผสมซิลิกาก่อนหรือหลังสารกระตุ้นไม่ส่งผลต่อร้อยละการบวมตัว ทั้งในยางที่มีการเติม PEG และไม่เติม PEG ส่วนปัจจัยของการเติม PEG พบว่ายางคอมพาวด์ที่เติม PEG มีร้อยละการบวมตัวที่น้อยกว่าหรือมีความหนาแน่นเชื่อมโยงที่มากกว่ายางที่ไม่เติม PEG ซึ่งเป็นผลเนื่องจาก PEG ทำหน้าที่ช่วยการแตกตัวและกระจายตัวของซิลิกา ลดการดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารกระตุ้นปฏิกิริยาควบรูป ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการควบรูปหรือการเชื่อมโยงที่มากกว่า ความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางจึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน

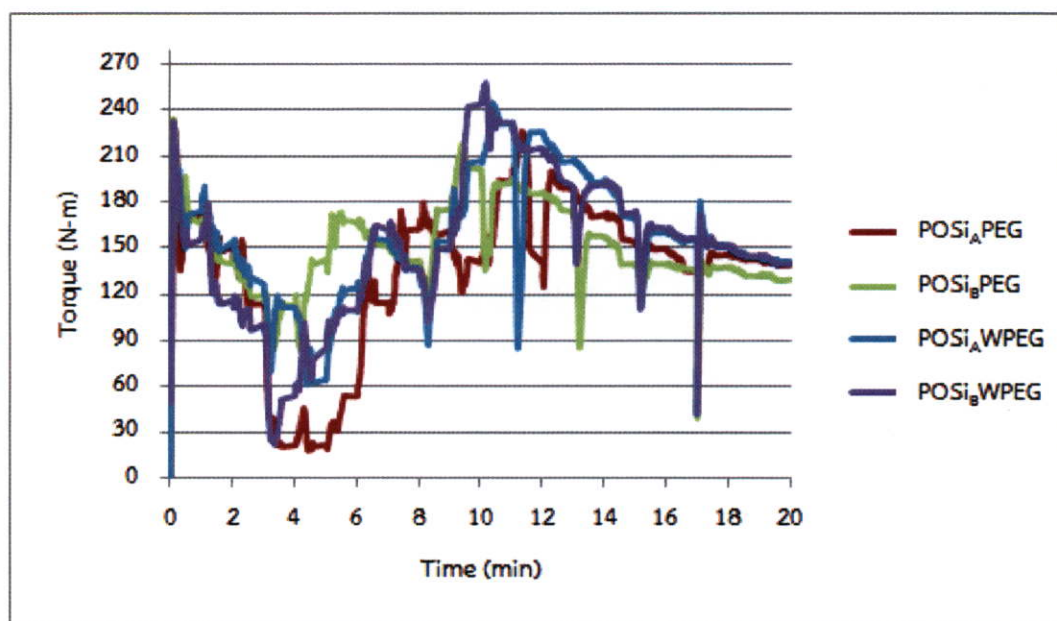
#### 4.2.2.2 สมบัติของการไหลและพลังงานขณะผสมของยางคอมพาวด์ที่มีลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน

ผลของลำดับการผสมซิลิกาก่อนและหลังสารกระตุ้น และการเติม PEG ต่อค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) แสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่าปัจจัยของลำดับการผสมซิลิกาก่อนหรือหลังสารกระตุ้น ( $Si_B/Si_A$ ) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในกรณีของยางที่เติม PEG และไม่เติม PEG (WPEG) ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงบิดต่ำสุด ( $M_L$ ) ส่วนปัจจัยของการเติม PEG พบว่ายางที่เติม PEG มีค่าความหนืดมูนนี่ที่ต่ำกว่าสูตร WPEG เนื่องจาก PEG ช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกา ทำให้โครงสร้างหุติยภูมิของซิลิกาถูกทำลายได้ง่ายขึ้นในระหว่างกระบวนการผสมซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการเติม PEG จึงทำให้ความหนืดของยางลดลง [8]



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน

ส่วนของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์ก (Torque) กับเวลา แสดงดังรูปที่ 4.19 ซึ่งค่าทอร์กนั้นแสดงถึงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผสมยางกับสารเคมี พบว่าปัจจัยของลำดับการผสมซิลิกาเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน ในกรณีของยางที่เติม PEG โดยยางที่ผสมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น (POSi<sub>B</sub>PEG) ให้ค่าทอร์กขณะผสมที่ต่ำและผสมได้ง่ายกว่า ไม่เกิดการลื่นของโรเตอร์ เนื่องจากช่วงแรกของการผสมมีแรงเฉือนสูง ทำให้ซิลิกาสามารถถูกผสมเข้าไปในยางได้ง่าย ลดพลังงานในการผสมลงไป แต่กรณีที่ผสมซิลิกาลงสารกระตุ้น (POSi<sub>A</sub>PEG) กรดสเตียริกสามารถทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นจะช่วยลดความหนืด ทำให้ยางนิ่มลง แรงเฉือนลดลง เมื่อผสมซิลิกาลงไปอาจทำให้เกิดการลื่นของโรเตอร์ โดยสังเกตได้จากค่าทอร์กลดต่ำลงอย่างมากและคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (ช่วงนาที่ที่ 3–10) อาจทำให้ซิลิกาเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี แต่ในกรณียางที่ไม่เติม PEG (WPEG) ไม่ส่งผลที่แตกต่างกัน อาจเป็นผลเนื่องจากสูตร WPEG มีการลดปริมาณของกรดสเตียริก ยังคงมีแรงเฉือนเพียงพอให้เกิดการกระจายตัว ส่วนปัจจัยของการเติม PEG พบว่ายางที่เติม PEG ให้ค่าทอร์กขณะผสมลดต่ำลง เนื่องจาก PEG ช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซิลิกา ทำให้กลุ่มก้อนแอ็กโอมอเรตของซิลิกาแตกออกและกระจายตัวได้ดีขึ้น ค่าทอร์กจึงลดลง ใช้พลังงานขณะผสมน้อย

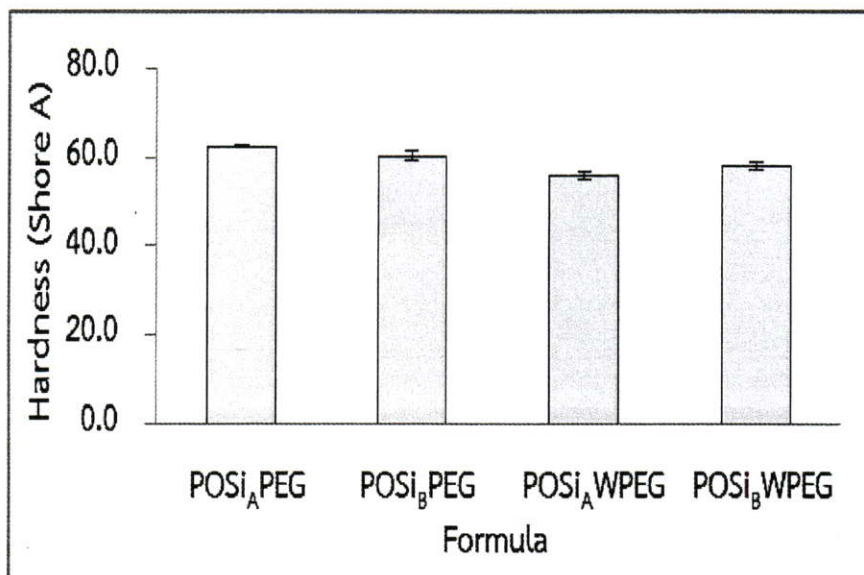


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าทอร์กขณะผสมของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน

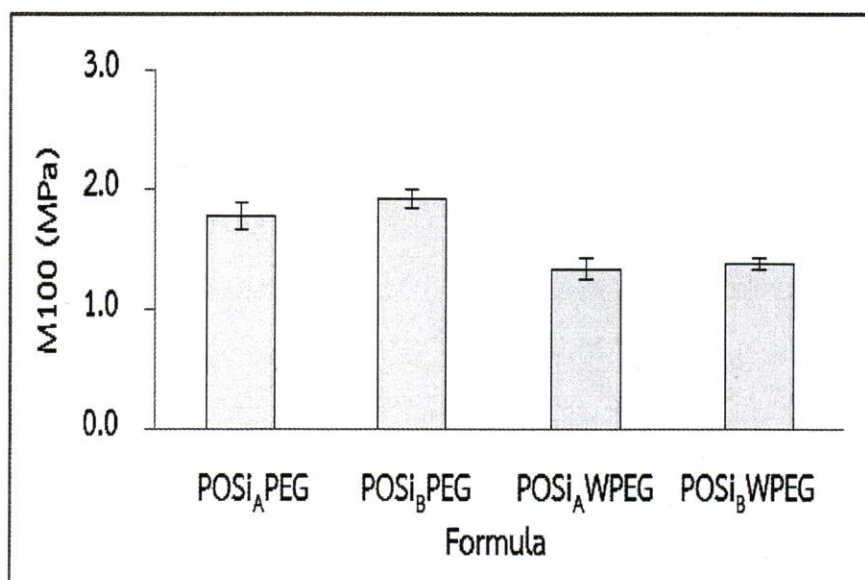
#### 4.2.2.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่มีลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน

ความแข็งกด (Hardness) ค่ามอดุลัสที่ 100% (M100) ค่ามอดุลัสที่ 300% (M300) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ของยางคงรูปเมื่อลำดับของการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.20-4.25 พบว่าปัจจัยของลำดับของการผสมซิลิกาให้ค่าความแข็งกด ค่ามอดุลัสที่ 100% ค่ามอดุลัสที่ 300% ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาดใกล้เคียงกัน ในกรณีของยางที่ไม่เติม PEG (WPEG) แต่ในกรณีของยางที่เติม PEG ลำดับของการผสมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น (POSi<sub>B</sub>PEG) ให้ค่าความแข็งกดและความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกัน แต่ให้ค่ามอดุลัสและความแข็งแรงฉีกขาดที่สูงกว่าการผสมซิลิกาหลังสารกระตุ้น (POSi<sub>A</sub>PEG) เนื่องจากการผสมซิลิกาลงไปช่วงแรกของการผสมจะเกิดแรงเฉือนที่สูง ทำให้กลุ่มก้อนหรือแอ็กโอมอเรตที่มีขนาดใหญ่ของซิลิกาแตกตัวจึงทำได้ง่าย ซิลิกากระจายตัวได้ดี [8] จึงส่งผลให้ค่ามอดุลัสและความแข็งแรงฉีกขาดของยางที่ผสมซิลิกาก่อนสารกระตุ้นมีค่าสูงกว่า ส่วนปัจจัยของยางที่เติม PEG พบว่า ยางที่เติม PEG มีค่าความแข็งกด ค่ามอดุลัสที่ 100% ค่ามอดุลัสที่ 300% ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาดสูงกว่ายางที่ไม่เติม PEG ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับร้อยละการบวมตัวที่แปรผกผันกับความหนาแน่นเชื่อมโยง ในยางที่เติม PEG มีร้อยละการบวมตัวต่ำกว่าหรือความหนาแน่นเชื่อมโยงที่สูงกว่ายางที่ไม่เติม PEG

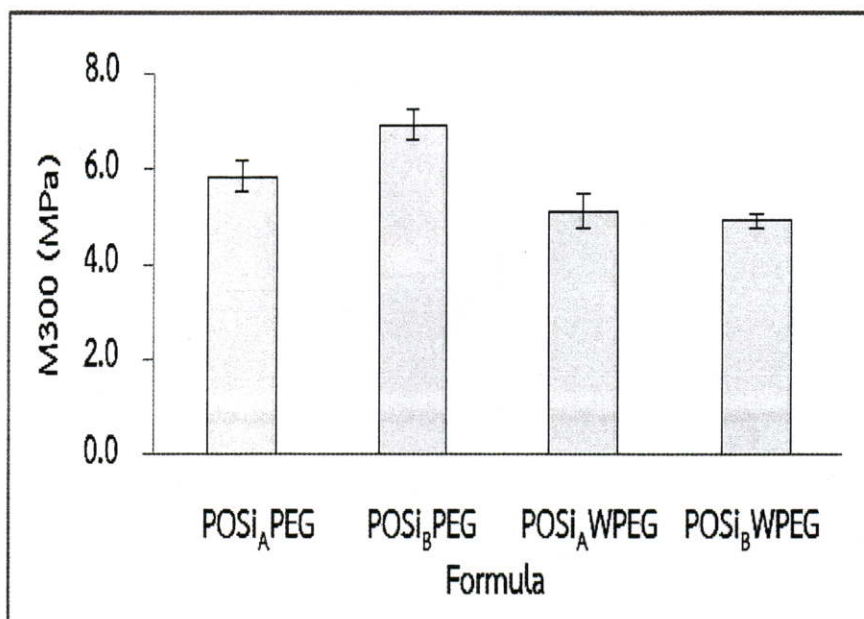
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของยางที่มีลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน พบว่าปัจจัยของลำดับการผสมซิลิกาไม่ส่งผลต่อสมบัติกายภาพและเชิงกลในสูตรที่ไม่เติม PEG (WPEG) แต่ในกรณีสูตรที่เติม PEG การเติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น (POSi<sub>B</sub>PEG) ให้ค่ามอดุลัสของยาง ค่าความแข็งแรงฉีกขาดที่สูงที่สุด ส่วนปัจจัยของการเติม PEG ให้ผลสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางที่ไม่เติม PEG



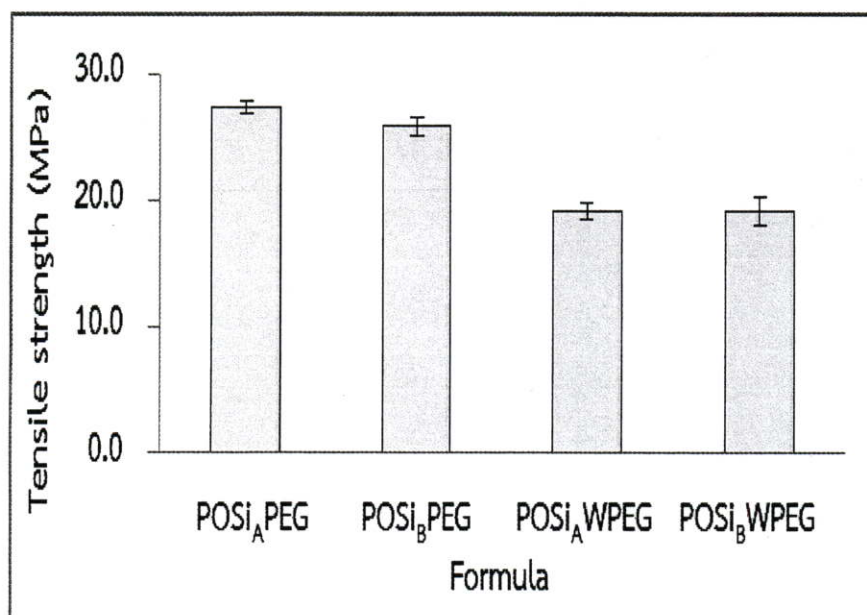
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน



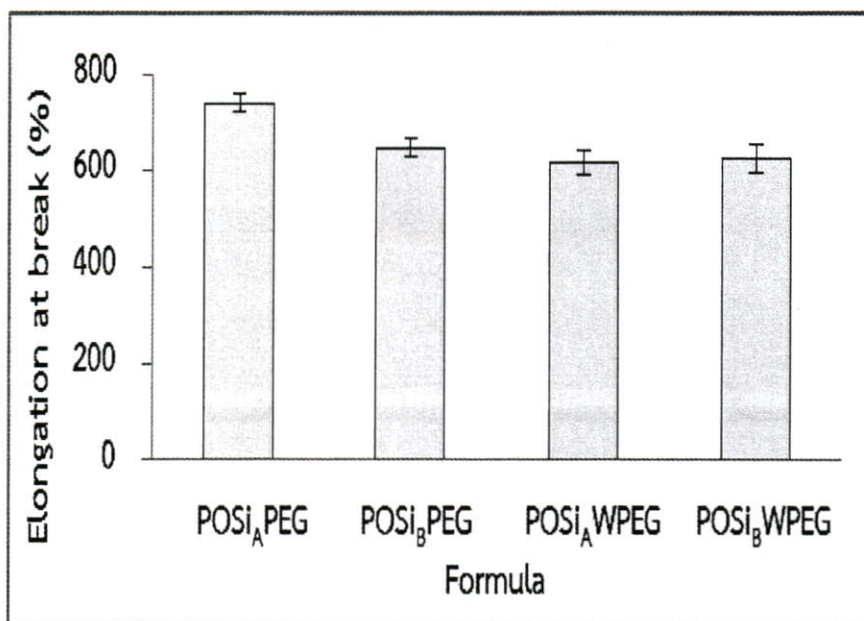
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน



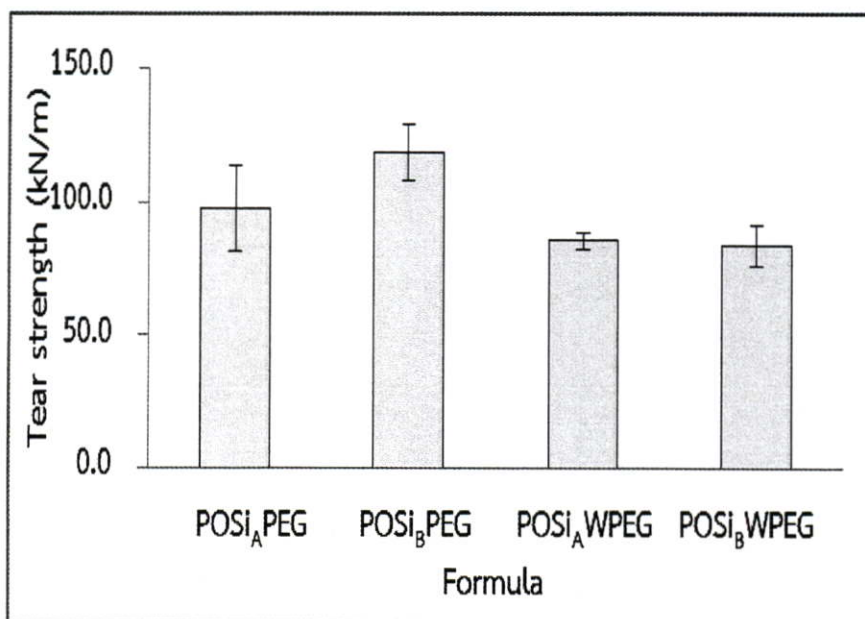
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดชนิดเมื่อลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน

จากผลการเปรียบเทียบสมบัติการเชื่อมโยง สมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลของยางที่มีลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG ที่ต่างกัน พบว่าน้ำมันพืชไม่สามารถทำหน้าที่ทดแทน PEG ยางที่เติม PEG ให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง เวลาการเชื่อมโยงยาง ความหนืด ความแข็งกด ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาดที่ดีกว่าสูตรที่ไม่เติม PEG (WPEG) และในสูตรยางที่เติม PEG การเติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น (POSi<sub>B</sub>PEG) ให้ค่าทอร์กต่ำสุดหรือใช้พลังงานขณะผสม

น้อย การผสมง่ายไม่เกิดการลื่นของโรเตอร์ ดังนั้นในงานวิจัยจำเป็นต้องมีการเติม PEG เนื่องจากให้ลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลที่ดี และลำดับการเติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น ( $Si_0$ ) เพื่อให้ทำให้เกิดกระบวนการผสมที่ง่าย ใช้พลังงานการผสมน้อย ต้นทุนการผสมจึงต่ำ ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ

#### 4.2.3 การศึกษาผลของน้ำมันพืชดัดแปร

โดยทั่วไปในการเลือกใช้น้ำมันช่วยกระบวนการผลิตสำหรับยางธรรมชาติที่ไม่มีขีดต้องการน้ำมันที่มีความเข้มข้นน้อย แต่การใช้สารตัวเติมซิลิกาในการเสริมแรงนั้น อาจเกิดปัญหาในการกระจายตัวของซิลิกาซึ่งมีขีดสูง ดังนั้นจึงทำการศึกษาน้ำมันที่มีการดัดแปรสภาพแล้ว เพื่อช่วยในการกระจายตัวของซิลิกา อีกทั้งการเพิ่มสภาพขี้ให้กับน้ำมันทำให้อันตรกิริยาระหว่างส่วนปลายของสายโซ่ยาง (Chain end) กับซิลิกาดีขึ้น นอกจากช่วยในเรื่องการกระจายตัวของซิลิกาแล้ว อาจมีส่วนช่วยให้ค่ามอดูลัสสูญเสีย ค่าความร้อนสะสมในยางลดลง เป็นผลทำให้ลดแรงต้านการหมุนของล้อ (Rolling resistance) ลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงของรถยนต์

งานวิจัยนี้เลือกใช้อย่างธรรมชาติ (STR 5L) บดผสมกับสารเคมีต่างๆ การศึกษาผลของน้ำมันพืชดัดแปร (Modified vegetable oils) ได้เลือกใช้น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxydized palm oil, EPO) น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิออล (Polyol palm oil, PPO) น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxydized soybean oil, ESBO) และน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต (Decarboxylated cashew nut shell liquid, DCNSL) เปรียบเทียบกับน้ำมันพืชที่ไม่ดัดแปร (Unmodified vegetable oils) ชนิดนั้นๆ โดยควบคุมอัตราส่วนของน้ำมันต่อสารตัวเติมคงที่คือ ปริมาณน้ำมัน 5 phr ปริมาณสารตัวเติมซิลิกา 50 phr สามารถอธิบายความหมายของสูตรต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันพืชดัดแปรชนิดต่างๆ

สูตร	ความหมาย	
POS <sub>i</sub> PEG	น้ำมันปาล์ม	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น เติม PEG
EPOS <sub>i</sub> PEG	น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น เติม PEG
PPOS <sub>i</sub> PEG	น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิออล	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น เติม PEG
SBOS <sub>i</sub> PEG	น้ำมันถั่วเหลือง	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น เติม PEG
ESBOS <sub>i</sub> PEG	น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น เติม PEG
CNSLS <sub>i</sub> PEG	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น เติม PEG
DCNSLS <sub>i</sub> PEG	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น เติม PEG

##### 4.2.3.1 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันพืชดัดแปร

จากผลการทดสอบดังแสดงตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.26 พบว่าเมื่อใช้น้ำมันพืชดัดแปร (Modified vegetable oils) ในยางธรรมชาติ ให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time,  $t_{s2}$ ) ใกล้เคียงกับน้ำมันพืชไม่ดัดแปร (Unmodified vegetable oils) เวลาการเชื่อมโยง (Cure time,  $t_{c90}$ ) ของยางคอมพาวด์ที่เติมน้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์ (EPO) น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิออล (PPO) และน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์ (ESBO) มีค่าสูงขึ้น ดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (Cure

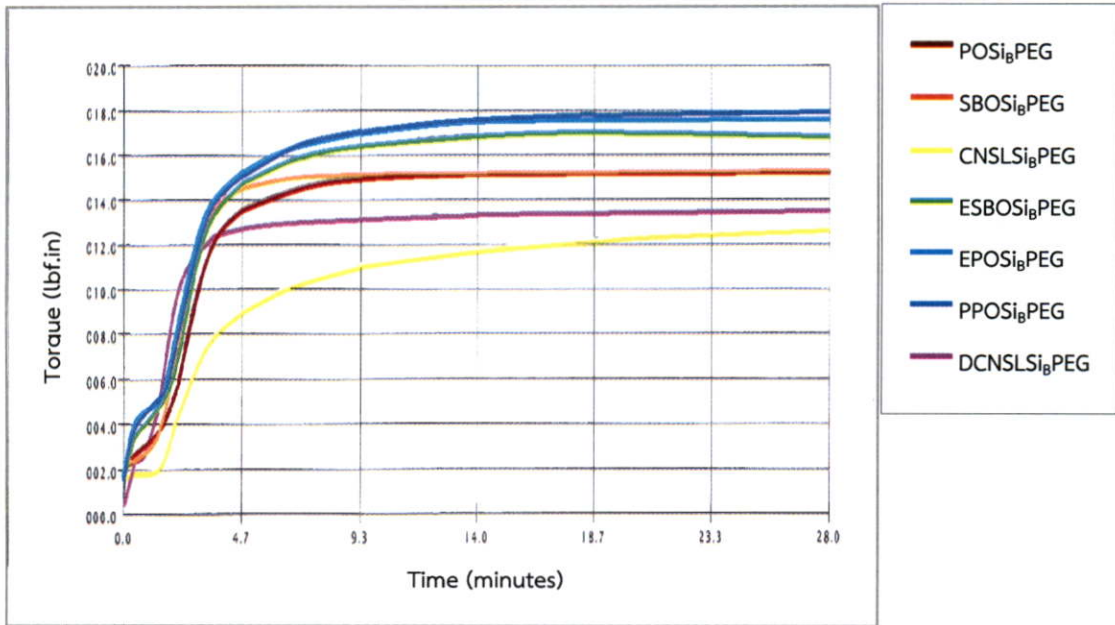
rate index, CRI) ต่ำลง ซึ่งสัมพันธ์กับค่าของกรด (Acid value) ในผลของการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2 น้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรที่มีค่าของกรดเพิ่มขึ้น เป็นผลจากมีปริมาณออกซิเจนจาก หมู่อิพอกไซด์และหมู่อิโตรอกซิลอยู่ในโครงสร้างของสายโซ่อะลิฟาติกของกรดไขมัน ดังรูปที่ 4.27 ทำให้มีสภาพขี้สูง ซึ่งมีผลลดความว่องไวของสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่มีความเป็นเบส จึงห่วงปฏิกิริยา การคงรูปของยางลง [37] สำหรับน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต (DCNSL) มีค่าเวลาการเชื่อมโยงลดลง ดัชนีอัตราการเชื่อมโยงสูงขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน หมู่อิโตรอกซิลิกของกรดอะนาคาร์ดิก (Anacardic acid) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีปริมาณ มากที่สุดในน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะหลุดออกไปได้เป็นคาร์ดานอล (Cardanol) หรือสาร ในกลุ่มฟีนอล ค่าของกรดลดลง จึงทำให้เวลาเชื่อมโยงเร็วขึ้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ สเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ในหัวข้อ 4.1.1 ตำแหน่งเลขคลื่นที่  $1,646\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ ยืดของพันธะ C=O หายไป

ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque,  $M_L$ ) และค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque,  $M_{HF}$ ) ของยางคอมพาวด์ที่เติมน้ำมันพืชดัดแปรทุกชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยน้ำมัน ปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรที่มีสภาพขี้สูงมากขึ้นในโครงสร้างของสายโซ่อะลิฟาติก ซึ่งเป็นส่วนที่ เกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติที่ไม่มีขี้ ดังนั้นจึงทำให้อันตรกิริยาดังกล่าวลดลง การกระจายตัวของ ซิลิกาในยางไม่ดี ดังนั้นค่าแรงบิดจึงสูงขึ้น ส่วนยางคอมพาวด์ที่เติมน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต อาจเกิดจากการที่หมู่อิโตรอกซิลิกของกรดอะนาคาร์ดิก (Anacardic acid) หลุดออกไป ทำให้โอกาสที่น้ำมันจะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่อิโซลันอลของซิลิกาตกลง กลุ่มก้อน แอ็กโอมอเรตของซิลิกาจึงแตกออกเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กเกิดได้ยาก ทำให้การกระจายตัวในยางไม่ดี ค่าแรงบิดจึงสูงขึ้น ส่วนระดับการเชื่อมโยง (State of cure,  $M_{HF}-M_L$ ) ของยางคอมพาวด์ที่เติมน้ำมัน พืชดัดแปรทุกชนิดมีค่าใกล้เคียงกับยางคอมพาวด์ที่เติมน้ำมันพืชไม่ดัดแปรชนิดนั้นๆ

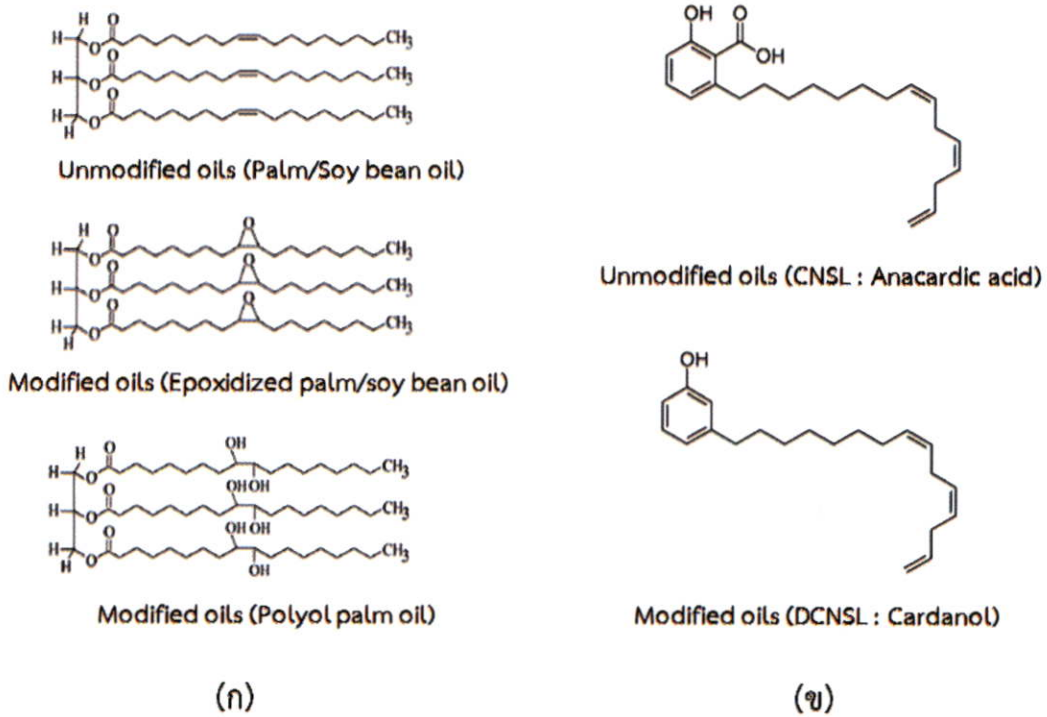
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ที่เติมน้ำมันพืชไม่ดัด-แปรกับน้ำมันพืชดัดแปร พบว่าเวลาเริ่มเชื่อมโยงและระดับการเชื่อมโยงมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อน้ำมัน พืชมีโครงสร้างที่มีขี้หรือค่าของกรดเพิ่มขึ้น มีผลลดความว่องไวของสารตัวเร่งและห่วงปฏิกิริยาการ คงรูป ทำให้เวลาเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น อัตราการเชื่อมโยงช้าลง ค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดสูงสุด มีค่า เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการใช้น้ำมันพืชดัดแปรทำให้การกระจายตัวของซิลิกาในยางธรรมชาติลดลง

ตารางที่ 4.9 แสดงค่า  $t_{s2}$ ,  $t_{c90}$ , CRI,  $M_L$  และ  $M_{HF}$  ของยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันพืชดัดแปรต่างๆ

สูตรยางคอม- พาวด์	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	CRI ( $\text{min}^{-1}$ )	$M_L$ (dNm)	$M_{HF}$ (dNm)	$M_{HF}-M_L$ (dNm)
POSi <sub>B</sub> PEG	1.58	3.83	44.44	2.47	15.31	12.84
EPOSi <sub>B</sub> PEG	1.98	7.29	19.12	4.84	17.96	13.12
PPOSi <sub>B</sub> PEG	1.77	7.98	16.36	4.32	18.04	13.72
SBOSi <sub>B</sub> PEG	1.95	5.69	26.74	3.19	15.36	12.17
ESBOSi <sub>B</sub> PEG	1.56	6.71	19.43	3.96	17.07	13.11
CNSLSi <sub>B</sub> PEG	1.98	14.69	7.87	1.80	12.91	11.11
DCNSLSi <sub>B</sub> PEG	1.34	3.76	41.32	2.67	13.56	10.89



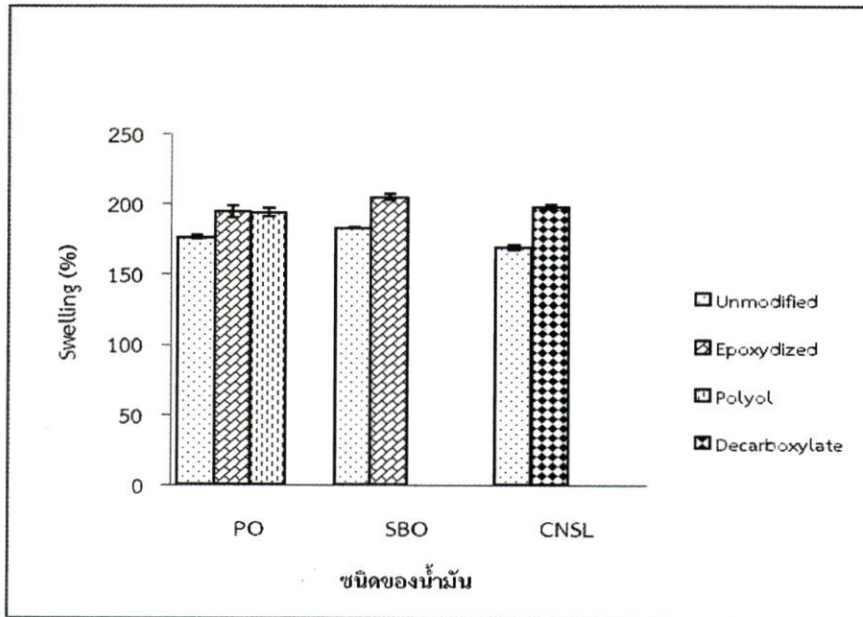
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน



รูปที่ 4.27 โครงสร้างของน้ำมันพืชไม่ตัดแปรและน้ำมันพืชตัดแปรของ (ก) น้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลือง (ข) น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ [19 และ 45]

เมื่อพิจารณากราฟแสดงค่าร้อยละการบวมตัว (%Swelling) กับน้ำมันพืชตัดแปร จากรูปที่ 4.28 พบว่าเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรในยางธรรมชาติ ร้อยละการบวมตัวของยางมีค่ามากขึ้นเล็กน้อยหรือความหนาแน่นเชื่อมโยงลดลง ในกรณีของน้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรมีค่าไอโอดีน (Iodine value) ซึ่งแสดงถึงปริมาณพันธะคู่มีค่าน้อยลง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ความ

หนาแน่นเชื่อมโยงของยางน่าจะเพิ่มขึ้น แต่อาจจะเป็นผลจากน้ำมันพืชดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxydized oil) และพอลิโออล (Polyol oil) ต่างก็มีส่วนที่มีขั้วในโครงสร้างของกรดไขมันเพิ่มขึ้น ได้แก่ หมู่อีพอกไซด์และหมู่อีทรอกซิลตามลำดับ ทำให้ความสามารถเข้ากันกับยางธรรมชาติซึ่งไม่มีขั้วลดลง ซิลิกาจะกระจายตัวในยางไม่ดี เกิดการเชื่อมโยงยางลดลง ดังนั้นร้อยละการบวมตัวจึงเพิ่มขึ้น ส่วนน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต มีความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางลดลง อาจเกิดจากการที่หมู่อีทรอกซิลิกของกรดอะนาคาร์ดิก (Anacardic acid) หลุดออกไป ทำให้โอกาสที่น้ำมันจะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่อีทรอกซิลิกของซิลิกาตกลง กลุ่มก้อนแอ็กโกเมอร์เรตของซิลิกาแตกออกเป็นกลุ่มก้อนแอ็กกรีเกตได้ยาก การกระจายตัวในยางไม่ดี การเกิดเชื่อมโยงยางน้อยลง



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชดัดแปรต่างกัน

#### 4.2.3.2 สมบัติของการไหลและสมบัติทางกายภาพของยางที่ใช้น้ำมันพืชดัดแปร

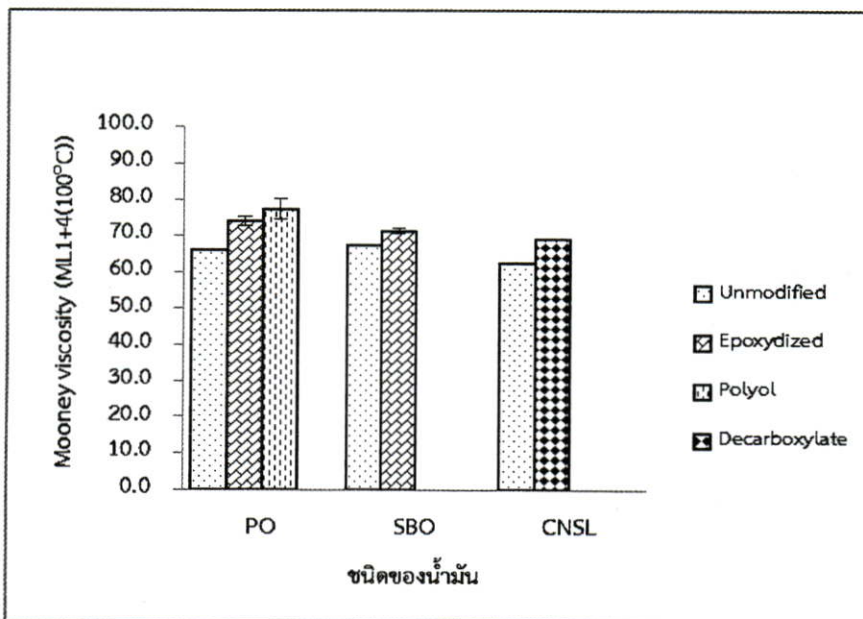
ผลของน้ำมันพืชดัดแปร ได้แก่ น้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxydized palm oil) และพอลิโออล (Polyol palm oil) น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์ (Epoxydized soybean oil) และน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต (Decarboxylated cashew nut shell liquid, DCNSL) ต่อสมบัติทางกายภาพของยางได้แก่ ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) และการแพร่ออกของน้ำมัน (Bleeding) เปรียบเทียบกับน้ำมันพืชที่ไม่ดัดแปรอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 4.29-4.31

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำมันพืชดัดแปรกับค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางคอมพาวด์ พบว่ายางคอมพาวด์ที่เติมน้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกไซด์ และพอลิโออล น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกไซด์และน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต มีค่าความหนืดมูนนี่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงบิดต่ำสุด ( $M_L$ ) จากเหตุผลของโครงสร้างที่มีขั้วของน้ำมันปาล์มและถั่วเหลืองดัดแปรมีมากขึ้น ทำให้เข้ากันกับยางธรรมชาติลดลง และโครงสร้างที่มีขั้วของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการลดอันตรกิริยาบนพื้นผิวซิลิกาตกลง การกระจายตัวของซิลิกาในยางลดลง ดังเหตุผลที่ไว้ข้างต้น

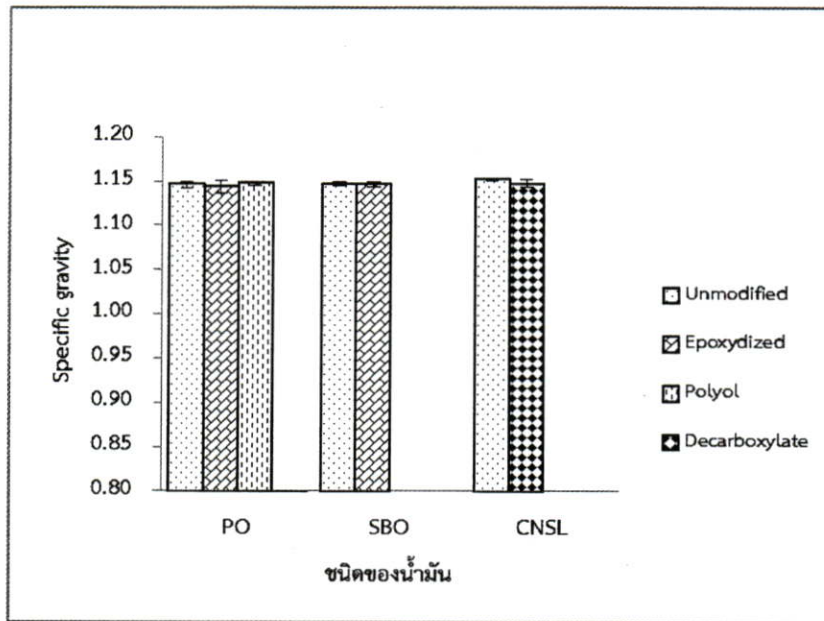
จากการศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของยางเมื่อเติมน้ำมันพืชตัดแปรรูป พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากน้ำมันพืชตัดแปรรูป อีพอกไซด์ พอลิโออล และดีคาร์บอกซิเลต เป็นการเพิ่มหรือลดลงหมู่ฟังก์ชันขนาดเล็ก ซึ่งมีผลต่อขนาดโมเลกุลของน้ำมันเพียงเล็กน้อย ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันจึงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อเติมน้ำมันพืชตัดแปรรูปปริมาณเพียง 5 phr จึงไม่ส่งผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะของยาง

จากการศึกษาค่าการแพร่ออกของน้ำมัน (Bleeding) ของยาง เมื่อเติมน้ำมันพืชตัดแปรรูป พบว่ายางทุกชนิดไม่เกิดการแพร่ออกของน้ำมัน และค่าการแพร่ออกของน้ำมันของยางที่เติมน้ำมันพืชตัดแปรรูปทุกชนิดมีค่าใกล้เคียงกับยางที่เติมน้ำมันพืชที่ไม่ตัดแปรรูป โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรรูปมีโครงสร้างที่มีขั้วมากขึ้น ความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติมีน้อยลง จึงทำให้แพร่ออกมาที่ผิวมากขึ้นเล็กน้อย

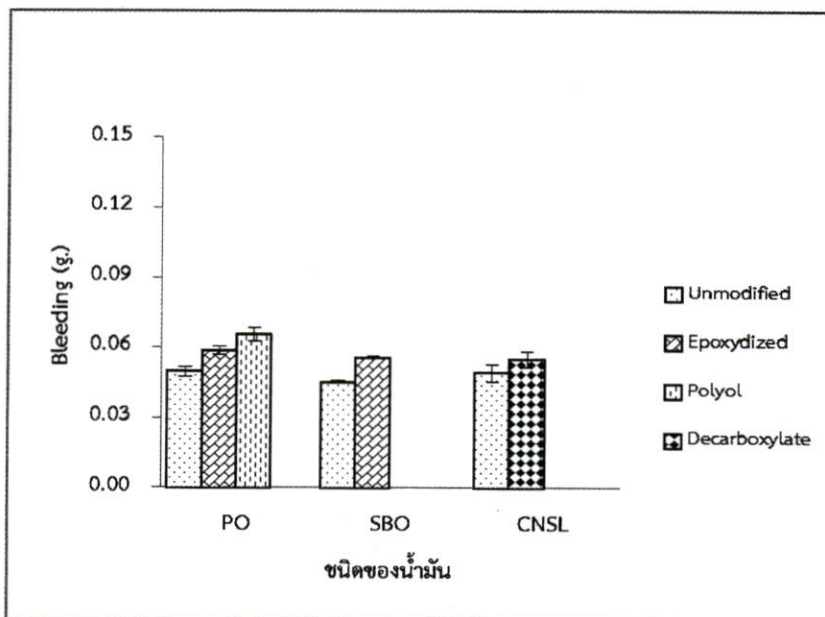
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับน้ำมันพืชไม่ตัดแปรรูป พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะและการแพร่ออกของน้ำมันของยางที่เติมน้ำมันพืชตัดแปรรูปมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ค่าความหนืดมูนิของยางที่เติมน้ำมันพืชตัดแปรรูป ให้ค่าที่มากกว่าน้ำมันพืชไม่ตัดแปรรูปนั้นๆ เนื่องจากการโครงสร้างที่มีขั้วของน้ำมัน ส่งผลต่อการเข้ากันกับยางหรือการแตกออกของกลุ่มก้อนแอ็กโกโมเรตของซิลิกา จึงทำให้การกระจายตัวของซิลิกาในยางนั้นไม่ดี



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนิของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรรูปต่างกัน



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชดัดแปรต่างกัน



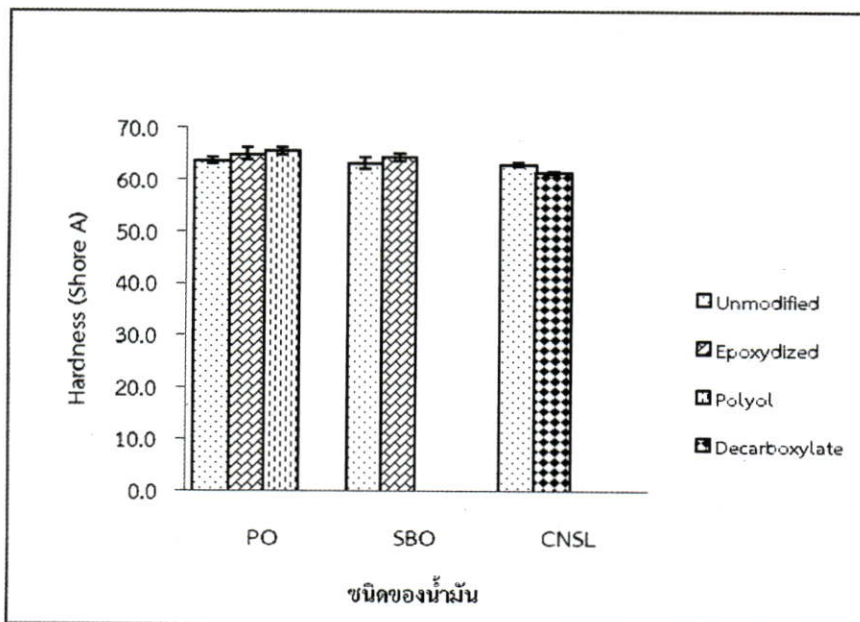
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่าการแพร่ของน้ำมันของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชดัดแปรต่างกัน

#### 4.2.3.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ไขมันพืชดัดแปร

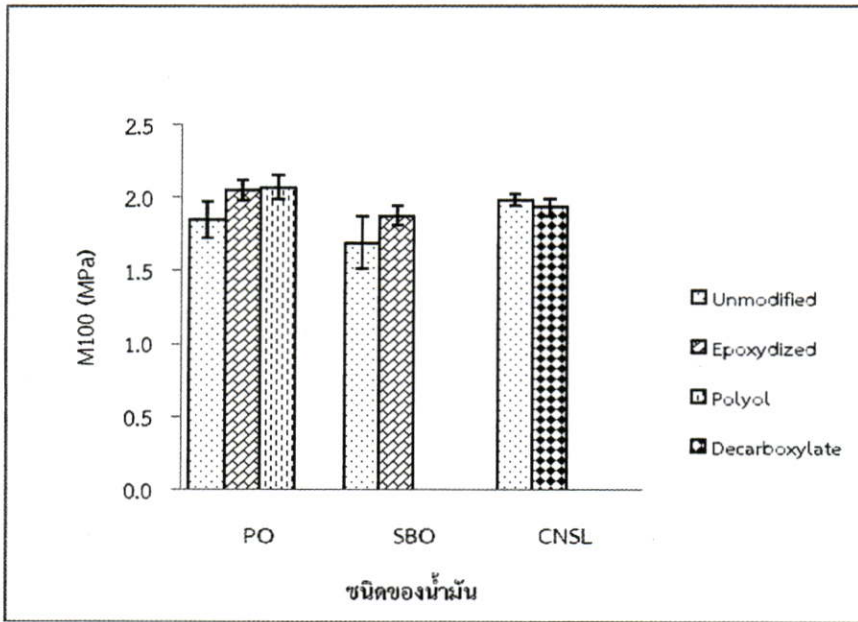
ความแข็งกด (Hardness) ค่ามอดุลัสที่ 100% (M100) ค่ามอดุลัสที่ 300% (M300) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ของยางคงรูปที่มีการผสมน้ำมันพืชดัดแปร แสดงดังรูปที่ 4.32-4.37 พบว่าความแข็งกด ค่ามอดุลัสที่ 100% ค่ามอดุลัสที่ 300% ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาด และของยางที่เติมน้ำมันพืชดัดแปรมีค่าใกล้เคียงกับยางที่เติมน้ำมันพืชไม่ดัดแปร (Unmodified oils) ส่วนค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางที่เติมน้ำมันพืชดัดแปรมีค่าลดลงเล็กน้อย

เมื่อเทียบกับยางที่เติมน้ำมันพืชไม่ตัดแปรร เมื่อพิจารณาผลของร้อยละการบวมตัว (%Swelling) ซึ่งแปรผกผันกับความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density,  $\rho_c$ ) เห็นว่ายางที่เติมน้ำมันพืชตัดแปรรมีค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงต่ำกว่ายางที่เติมน้ำมันพืชไม่ตัดแปรร ทำให้เมื่อได้รับแรงดึงยางคงรูปสามารถต้านทานการขาดออกของสายโซ่ได้น้อยลง แต่ทั้งนี้ยังให้สมบัติแรงดึงใกล้เคียงกับยางที่เติมน้ำมันพืชไม่ตัดแปรร อาจเป็นผลเนื่องจากสมบัติเชิงกลบางประการที่เกิดจากการแตกหัก (Fracture properties) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดจุดหนึ่ง ในการทำให้เกิดการเชื่อมโยงในวัฏภาคของยางเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3D-Network) ส่งผลให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติเหล่านี้จึงมีค่าสูงสุดจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่ง (Optimum point) จากนั้นค่าที่ได้จะลดลงเนื่องจากความหนาแน่นการเชื่อมโยงสูงมากขึ้น สายโซ่เคลื่อนที่อย่างจำกัดไม่สามารถเคลื่อนไหวเพื่อกระจายพลังงานที่ได้รับ เป็นผลทำให้ความแข็งแรงของวัสดุต่ำลงและแตกหักได้ง่ายขึ้น [2] ตามทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 4.38 และเนื่องจากการเพิ่มโครงสร้างที่มีขั้วของน้ำมันปาล์มและถั่วเหลืองตัดแปรรมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการเข้ากันกับยางนั้นลดลง ทำให้การกระจายตัวของสารตัวเติมลดลง ส่วนน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตัดแปรรมีโครงสร้างที่มีขั้วลดลง ทำให้กลุ่มก้อนแอ็กโอมอเรตของซิลิกาเกิดการแตกออกได้ยาก

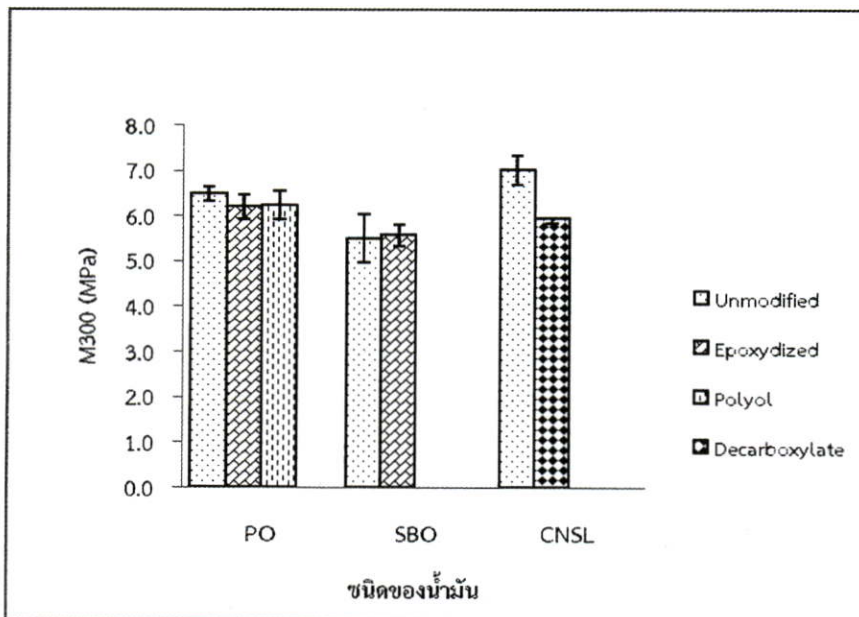
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของยางที่เติมน้ำมันพืชตัดแปรร พบว่าค่าความแข็งกด ค่ามอดูลัสที่ 100% ค่ามอดูลัสที่ 300% ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของยางที่เติมน้ำมันพืชตัดแปรรให้ค่าที่ใกล้เคียงกับยางที่เติมน้ำมันพืชไม่ตัดแปรร ส่วนค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางที่เติมน้ำมันพืชตัดแปรรมีค่าต่ำกว่ายางที่เติมน้ำมันพืชไม่ตัดแปรรเล็กน้อย



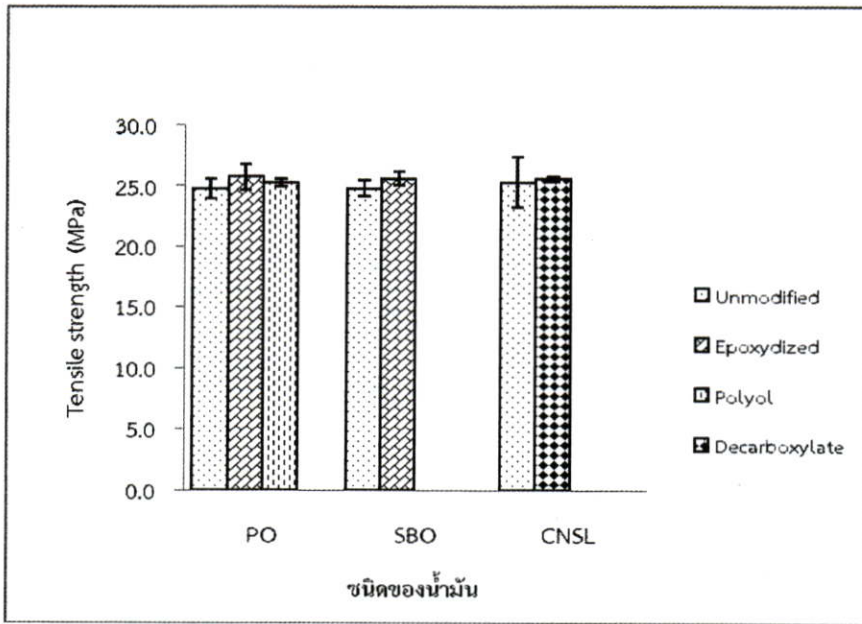
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรรต่างกัน



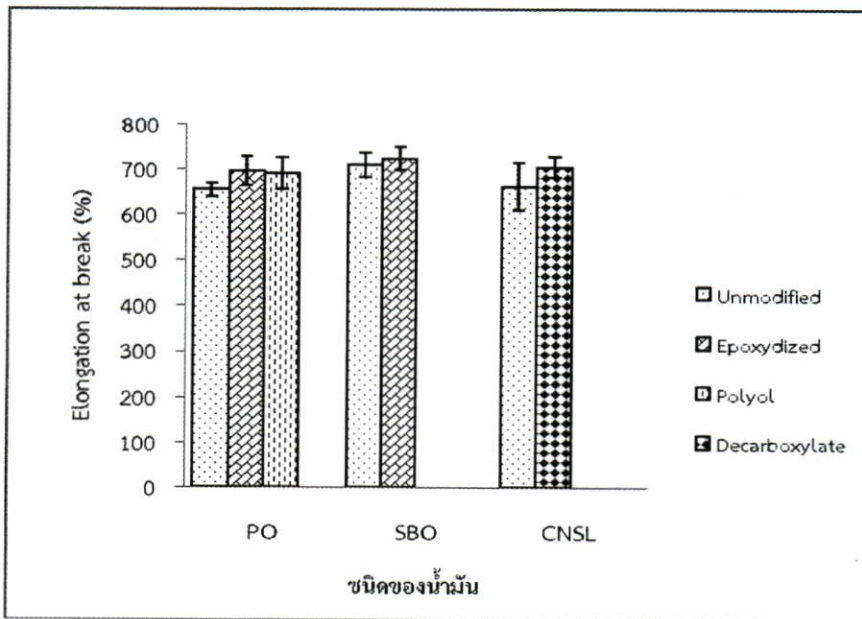
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน



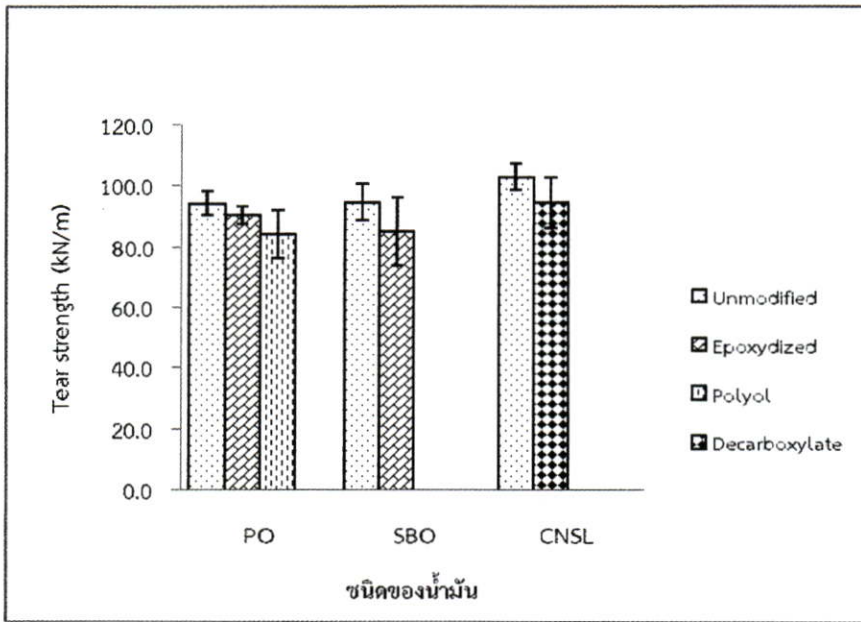
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน



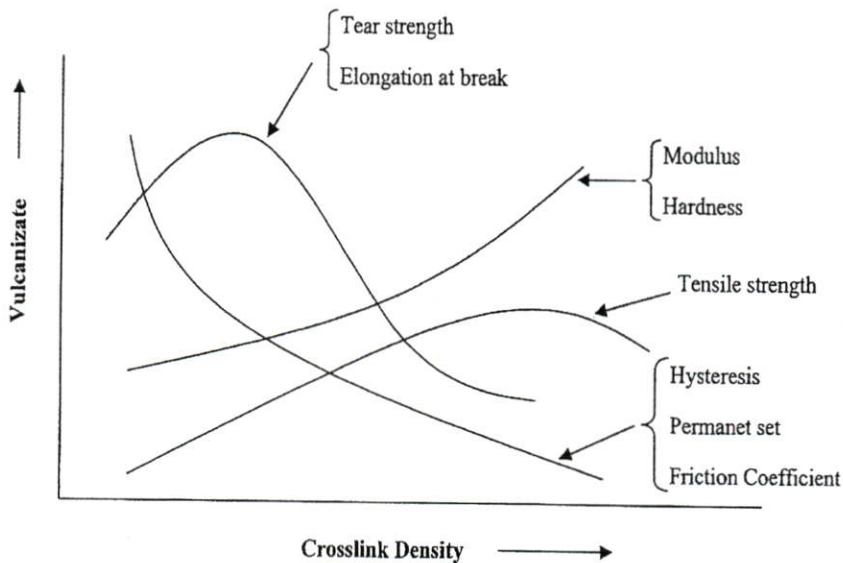
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อนำน้ำมันพืชดัดแปรต่างกัน



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของยางแต่ละชนิดเมื่อนำน้ำมันพืชดัดแปรต่างกัน



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกัน



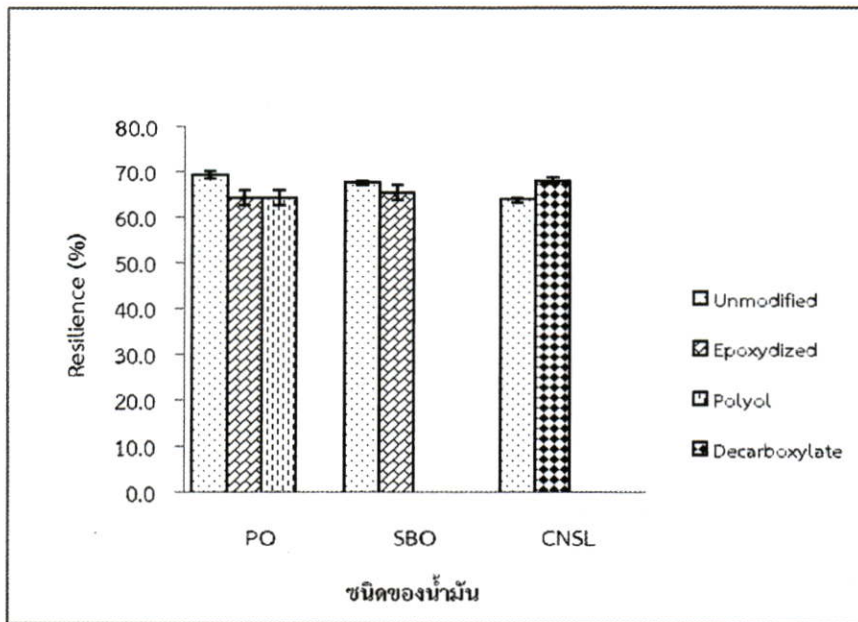
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางกับสมบัติเชิงกลบางประการของยาง [2]

#### 4.2.3.4 สมบัติการกระดอน ความร้อนสะสมในยาง และการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางที่ใช้น้ำมันพืชตัดแปร

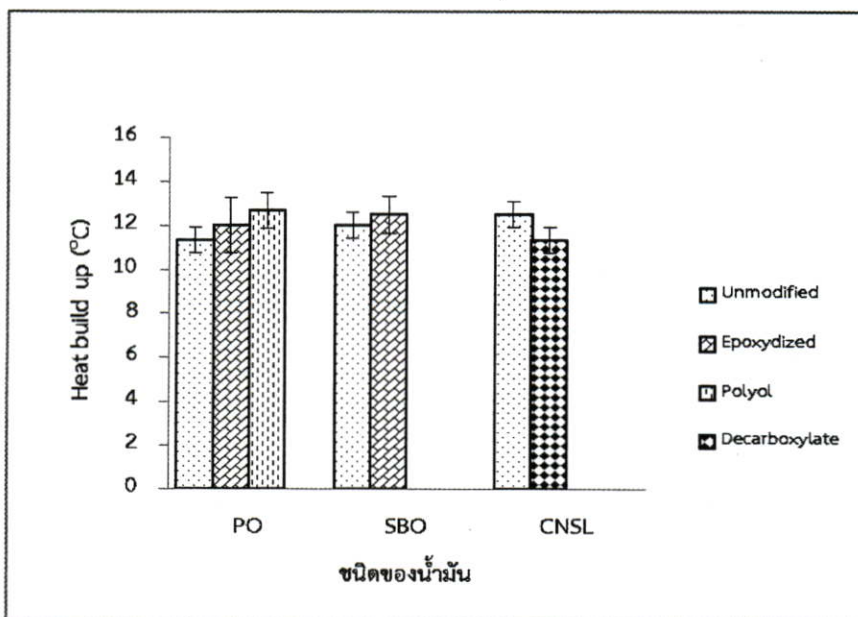
การกระดอน (Rebound resilience) ความร้อนสะสมในยาง (Heat build-up) และการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set) เป็นสมบัติที่แสดงความเป็นอีลาสติกของยางที่แสดงพฤติกรรมคืนตัวกลับในทันทีเมื่อปล่อยแรงกระทำกับวัตถุนั้นๆ โดยมีความสัมพันธ์กับอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมเป็นสำคัญ กล่าวคือ เมื่อยางและสารตัวเติมเปลี่ยนรูปไปจะสามารถคืนตัวกลับมาพร้อมๆ กันได้ เพื่อทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน (Energy loss) น้อยสุด และ

สามารถส่งพลังงานกลับคืน (Energy return) ให้มากที่สุดได้ [46] โดยพลังงานที่ให้กับยางจะถูกใช้ในการทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวย่างง่ายขึ้นขณะเปลี่ยนขนาดเมื่อได้รับแรง เมื่อเคลื่อนที่ผ่านกันอาจมีการเปลี่ยนตำแหน่งแบบไม่ย้อนกลับ (Irreversible chain slippage) ทำให้สูญเสียพลังงานที่ได้รับบางส่วนหรือสูญเสียในรูปของความร้อน ทำให้เหลือพลังงานส่งกลับคืนน้อยลง

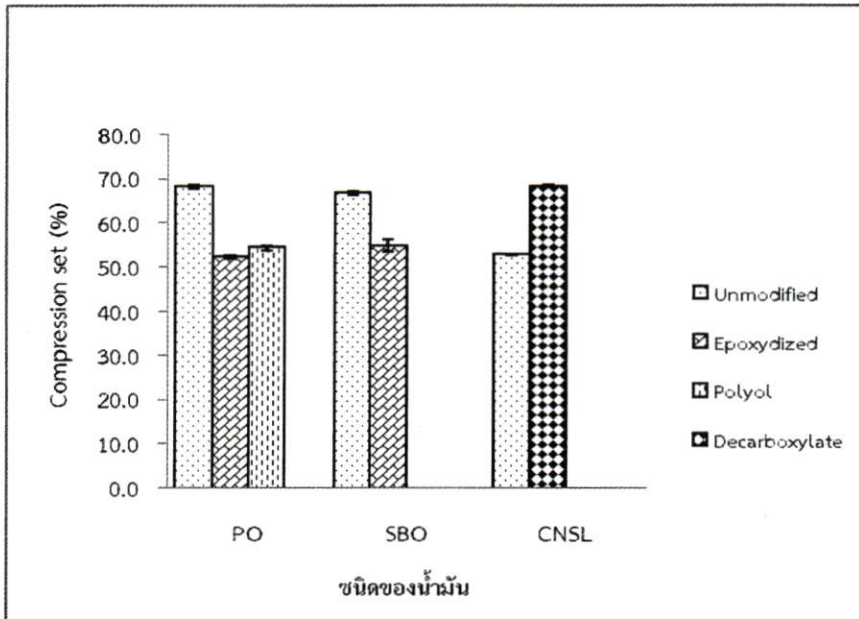
ผลการทดสอบในรูปที่ 4.39-4.41 พบว่าค่าการกระดอนและความร้อนสะสมในยางของยางที่เติมน้ำมันพืชดัดแปร (Modified oils) มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันพืชที่ไม่ดัดแปร (Unmodified oils) ชนิดนั้นๆ ส่วนค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางที่เติมน้ำมันปาล์มและถั่วเหลืองดัดแปร อีพอกซิไดซ์ (Epoxidized) และพอลิโออล (Polyol) มีค่าต่ำกว่ายางที่เติมน้ำมันปาล์มและถั่วเหลืองไม่ดัดแปร แต่ยางที่เติมน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต (Decarboxylated) มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่สูงกว่ายางที่เติมน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไม่ดัดแปรเล็กน้อย เมื่อใช้น้ำมันพืชดัดแปรแล้วมีผลให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อยลง ในทางทฤษฎีอธิบายผลของสมบัติความเป็นอีลาสติกของยางได้ว่าเมื่อยางได้รับแรงตกกระทบ ยางสูญเสียพลังงานในการทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวย่างง่ายขึ้น จึงทำให้สูญเสียพลังงานที่ได้รับบางส่วนหรือสูญเสียในรูปของความร้อนมาก ทำให้เหลือพลังงานส่งกลับคืนน้อย ซึ่งส่งผลให้ค่ายุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่สูงแต่ผลของยางที่เติมน้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดไม่เป็นไปตามทฤษฎี อาจเป็นผลเนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่ในสายโซ่โมเลกุลอยู่มากและอาจเกิดการขีดขวางของหมู่อีพอกซิไดซ์ หรือหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกซิไดซ์และน้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิโออลตามลำดับ ซึ่งมีการเกิดพันธะเชื่อมโยงของยางน้อย และเหลือพันธะคู่ของยางมากกว่าน้ำมันพืชไม่ดัดแปร เป็นไปได้ว่าเมื่อยางได้รับความร้อนเป็นเวลานานในการทดสอบการยุบตัวจากแรงอัดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทั้งการเสื่อมสภาพของยางและการแตกของพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิก ซึ่งเกิดผ่านอนุมูลอิสระ จึงมีโอกาสเกิดการสร้างพันธะเชื่อมโยงใหม่เพิ่มขึ้น [47] ดังผลร้อยละบวมตัวของยางก่อนและหลังการทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ในรูปที่ 4.42 ยางที่เติมน้ำมันปาล์มและถั่วเหลืองดัดแปรมีร้อยละการบวมตัวลดลงมากกว่า (หรือความหนาแน่นเชื่อมโยงมากขึ้นในสัดส่วนที่มากกว่า) ยางที่เติมน้ำมันพืชทั้ง 2 ชนิดที่ไม่ดัดแปร จึงทำให้ยางที่เติมน้ำมันพืชดัดแปร เกิดการคืนตัวได้ดีขึ้น ส่วนของยางที่เติมน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต อาจเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลที่น้อยกว่า เนื่องจากคาร์ดานอลเป็นสารฟีนอลที่สามารถทำหน้าที่เป็นสารป้องกันยางเสื่อมสภาพได้ [48] สามารถยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือการเสื่อมสภาพของยาง เมื่อคาร์ดานอลรวมตัวกับอนุมูลอิสระ ทำให้ได้สารที่มีความเสถียร การเสื่อมสภาพของยางจึงหยุดลง [45] การสร้างพันธะเชื่อมโยงใหม่จึงเกิดได้น้อยกว่าน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไม่ดัดแปร



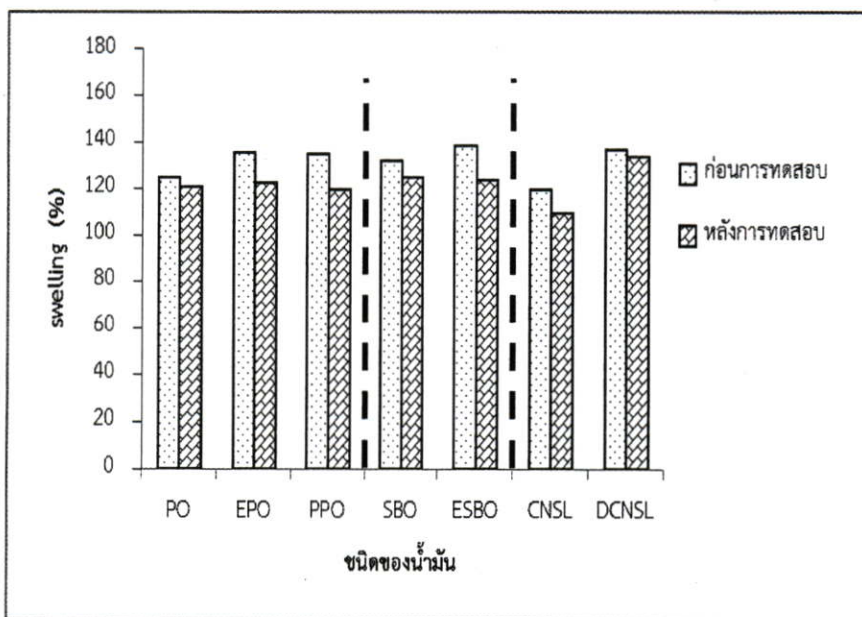
รูปที่ 4.39 กราฟแสดงค่าการกระดอนของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชดัดแปรต่างกัน



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงค่าความร้อนสะสมในยางของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชดัดแปรต่างกัน



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางแต่ละชนิดเมื่อนำน้ำมันพืชดัดแปรต่างกัน

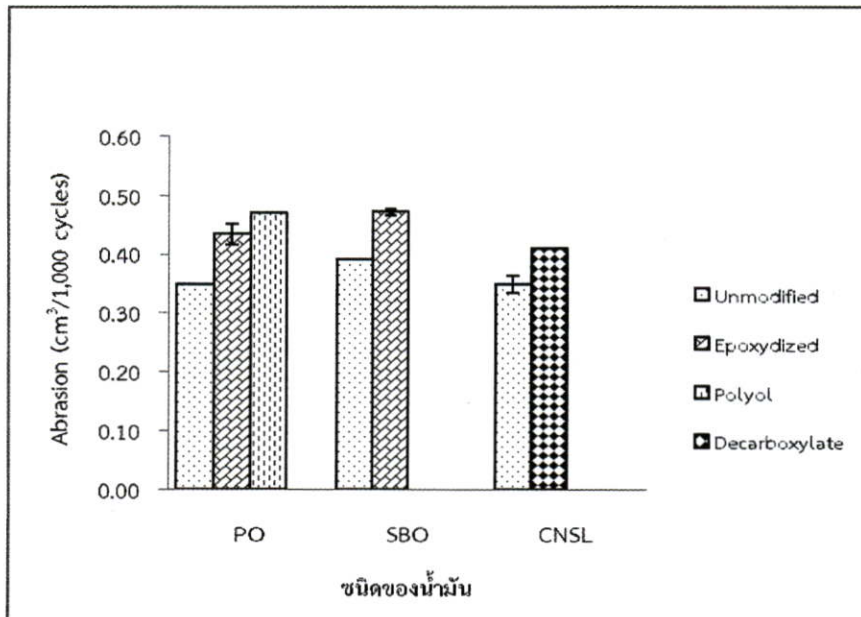


รูปที่ 4.42 กราฟแสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางที่เติมน้ำมันพืชดัดแปร ก่อนและหลังการทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด

#### 4.2.3.5 สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยางที่ใช้ไขมันพืชดัดแปร

พบว่าปริมาณของการสึกหรอของยางที่เติมน้ำมันพืชดัดแปรมีค่าสูงขึ้น หรือมีความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) ลดลง ซึ่งแปรผกผันกับความหนาแน่นเชื่อมโยงที่มีค่าน้อยลง เนื่องจากสภาพผิวของน้ำมันปาล์มและถั่วเหลืองดัดแปรที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความเข้ากันได้ของไขมันพืชดัดแปรกับยางธรรมชาติไม่มีค่าน้อยลง การกระจายตัวของสารตัวเติมไม่ดี ส่วนของไขมันเมลิทิมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของซิลิกาได้ลดลง การแตกตัว

ของแอ็กโอมอเรตขนาดใหญ่เป็นอนุภาคขนาดเล็กเกิดขึ้นได้ยาก ปริมาณของการสึกหรอของยางจึงสูงขึ้น

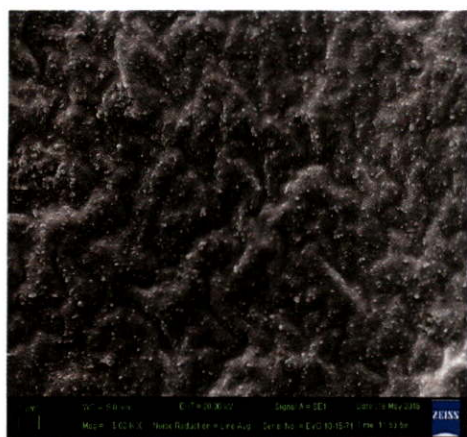


รูปที่ 4.43 กราฟแสดงค่าปริมาณการสึกหรอของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชดัดแปรต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของยางที่เติมน้ำมันพืชดัดแปร พบว่าการกระดอนของยาง ความร้อนสะสมในยางใกล้เคียงกับยางที่เติมน้ำมันพืชไม่ดัดแปร ส่วนการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดลดลง ปริมาณการสึกหรอมีค่ามากขึ้น เมื่อเทียบกับยางที่เติมน้ำมันพืชไม่ดัดแปร แต่น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรมีการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดเพิ่มขึ้นและให้ค่าสูงที่สุด

#### 4.2.3.6 สัณฐานวิทยาของยางที่ใช้น้ำมันพืชดัดแปร

ในการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของซิลิกาในยางที่เติมน้ำมันพืชดัดแปรต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.44 พบว่าสัณฐานวิทยาของยางที่เติมน้ำมันพืชดัดแปรมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของซิลิกาหรือแอ็กโอมอเรต ขนาดใหญ่กว่า 2 ไมครอน กระจายอยู่หลายกลุ่ม เนื่องจากผลจากน้ำมันพืชดัดแปรอีพอกซีไดซ์และพอลิออล มีส่วนที่มีซิวโนโครงสร้างมากขึ้น ทำให้ความเข้ากันกับยางธรรมชาติไม่ดี การกระจายตัวของซิลิกาในยางจึงลดลง ส่วนน้ำมันเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรดีคาร์บอกซิเลต ทำให้เกิดอันตรกิริยากับซิลิกา ลดลง ซิลิกาเกิดการแตกตัวได้ยาก ทำให้การกระจายตัวของซิลิกาในยางลดลง

POSi<sub>B</sub>PEGEPOSi<sub>B</sub>PEGPPOSi<sub>B</sub>PEGSBOSi<sub>B</sub>PEGESBOSi<sub>B</sub>PEGCNSLSi<sub>B</sub>PEGDCNSLSi<sub>B</sub>PEG

รูปที่ 4.44 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางแตกหักที่อุณหภูมิต่ำของยางแต่ละชนิด เมื่อใช้น้ำมันพืชตัดแปรต่างกันที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (วงกลมสีแดง แสดงกลุ่มก้อน แอ็กโอมอเรตของซิลิกา)

#### 4.2.3.7 สมบัติเชิงกลพลวัตของยางที่ใช้ไขมันพืชดัดแปร

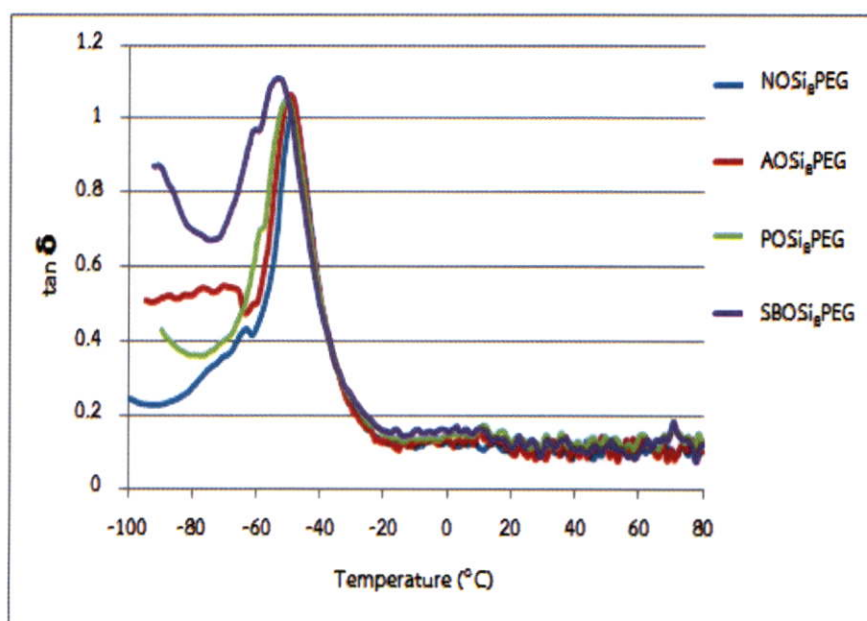
เพื่อศึกษาค่าแทนเดลต้า ( $\tan \delta$ ) โดยค่าอุณหภูมิ ณ จุดที่  $\tan \delta$  มีค่าสูงสุด หรือ  $\tan \delta_{\max}$  มีค่าเท่ากับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ของวัสดุ ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus,  $E'$ ) และมอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $E''$ ) ของยางที่ใช้ไขมันพืชดัดแปรเป็นน้ำมันช่วยกระบวนการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.45-4.50

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่า  $\tan \delta$  ตามอุณหภูมิของยางเมื่อใช้น้ำมันต่างชนิดได้แก่ น้ำมันอะโรมาติก (AO) น้ำมันปาล์ม (PO) และน้ำมันถั่วเหลือง (SBO) เปรียบเทียบกับสูตรยางที่ไม่เติมน้ำมัน (NO) พบว่ายางทุกชนิดมีค่า  $\tan \delta$  ที่จุดสูงสุด หรือ  $\tan \delta_{\max}$  ใกล้เคียงกัน โดยยางที่ไม่เติมน้ำมันมีค่า  $\tan \delta_{\max}$  ต่ำที่สุด ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับความสามารถของยางที่กระจายพลังงานต่อการสะสมพลังงาน เมื่อถูกกระทำให้ผิดรูปอย่างต่อเนื่อง ถ้าสายโซ่โมเลกุลยางเกิดการกระจายพลังงานได้ยากขึ้นจะมีผลให้ค่า  $\tan \delta_{\max}$  มีค่าลดลง [49] ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการกระจายพลังงานของยาง เช่น ความหนาแน่นเชื่อมโยง ปริมาณสารตัวเติม อันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม เป็นต้น ซึ่งน้ำมันช่วยกระบวนการผลิตสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของสายโซ่ของยาง ทำให้ปริมาตรอิสระของยางเพิ่มขึ้น [10] เกิดการกระจายตัวของซิลิกาในยางได้ดี แต่เมื่อไม่ใส่น้ำมันทำให้กระจายตัวของซิลิกาในยางเกิดได้ไม่ดี อันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมลดลง จึงทำให้เกิดการกระจายพลังงานได้ยาก จึงส่งผลให้ค่ามอดุลัสสะสม ( $E'$ ) และค่ามอดุลัสสูญเสีย ( $E''$ ) ของยางที่ไม่เติมน้ำมันมีค่าต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยของน้ำมันพืชดัดแปรต่อ  $\tan \delta_{\max}$  พบว่ายางใช้น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิออล (PPO) มีค่าต่ำกว่าน้ำมันปาล์มไม่ดัดแปร (PO) และยางที่ใช้ น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกซีไดซ์ (ESBO) มีค่าต่ำกว่าน้ำมันถั่วเหลืองไม่ดัดแปร (SBO) เช่นเดียวกัน เป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างที่มีขั้วของน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ทำให้กระจายตัวของซิลิกาในยางเกิดได้ไม่ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลทางสัณฐานวิทยาในหัวข้อ 4.2.3.6 จึงเกิดการกระจายพลังงานยากขึ้น

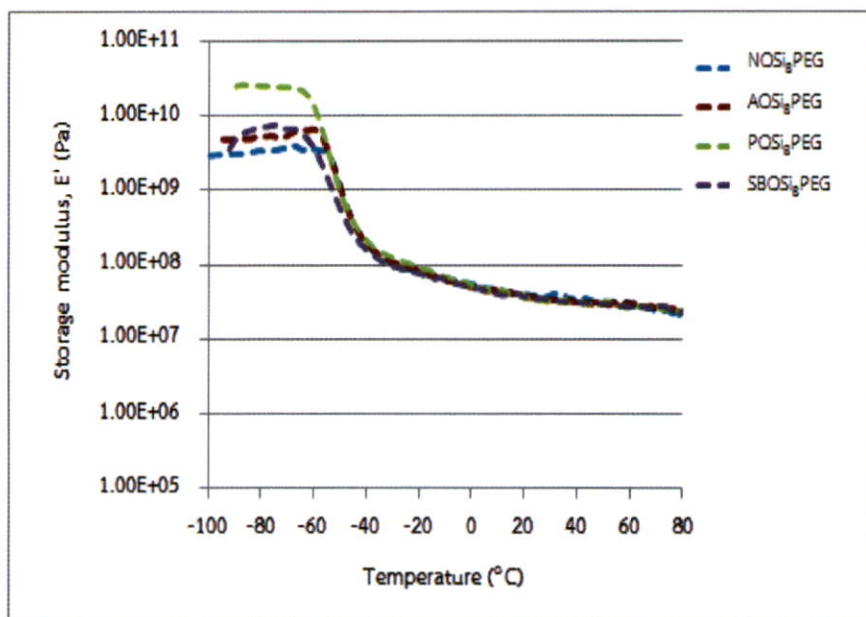
เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $\tan \delta_{\max}$  ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) พบว่ายางทุกชนิดให้ค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า  $\tan \delta$  ที่อุณหภูมิ 0 และ 60 °C ซึ่งแสดงถึงการยึดเกาะถนนบนพื้นเปียก (Wet grip) และความต้านทานการหมุน (Rolling resistance) ตามลำดับ เห็นได้ว่าปัจจัยของชนิดของน้ำมันให้ค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.45 ส่วนปัจจัยของน้ำมันพืชดัดแปร ยางที่ใช้ไขมันปาล์มดัดแปรพอลิออลและน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกซีไดซ์ มีค่า  $\tan \delta$  อุณหภูมิ 0 และ 60 °C สูงกว่ายางที่ใช้ไขมันที่ไม่ดัดแปรของน้ำมันชนิดนั้นๆ แสดงดังรูปที่ 4.48 และให้ผลสอดคล้องกับค่ามอดุลัสสะสม ( $E'$ ) และมอดุลัสสูญเสีย ( $E''$ ) ที่อุณหภูมิ 0 และ 60 °C มีค่าสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.49-4.50 ซึ่งหมายความว่า ยางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิออลและน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกซีไดซ์ มีผลทำให้ยางมีพลังงานสูญเสีย (Loss energy) มาก ซึ่งหากใช้ในสูตรยางล้อมีผลให้ยางมีแรงต้านทานการหมุน (Rolling resistance) มากด้วย ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของกรรณิการ์ [37]

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า  $\tan \delta_{\max}$  และ  $T_g$  ของยางคกรูปที่ใช้ไขมันช่วยกระบวนการผลิตชนิดต่างๆ

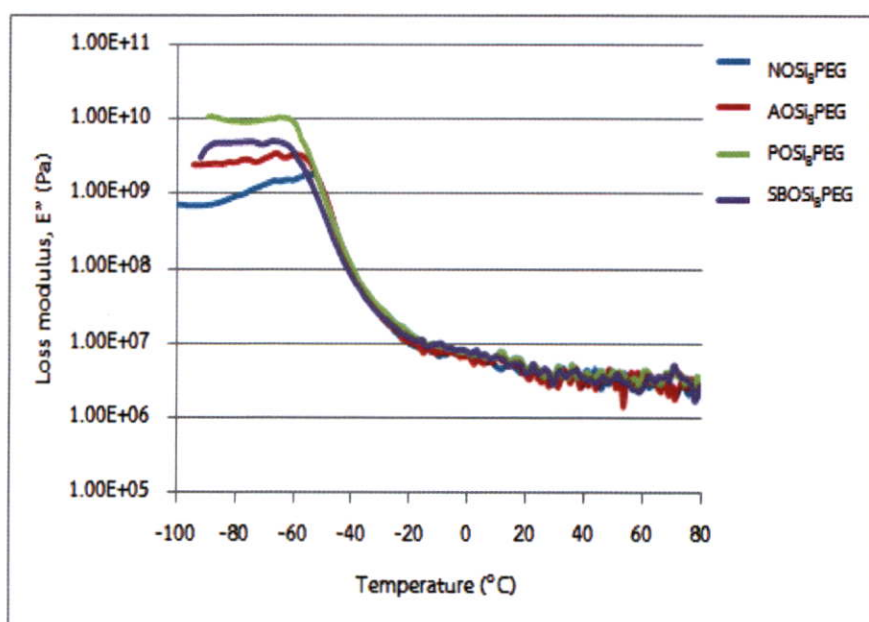
สูตร	$\tan \delta_{\max}$	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
NOSi <sub>g</sub> PEG	1.021	-48.9
AOSi <sub>g</sub> PEG	1.066	-49.8
POSi <sub>g</sub> PEG	1.054	-50.4
SBOSi <sub>g</sub> PEG	1.113	-53.8
EPOSi <sub>g</sub> PEG	1.089	-51.9
PPOSi <sub>g</sub> PEG	1.009	-52.4
ESBOSi <sub>g</sub> PEG	0.844	-51.8



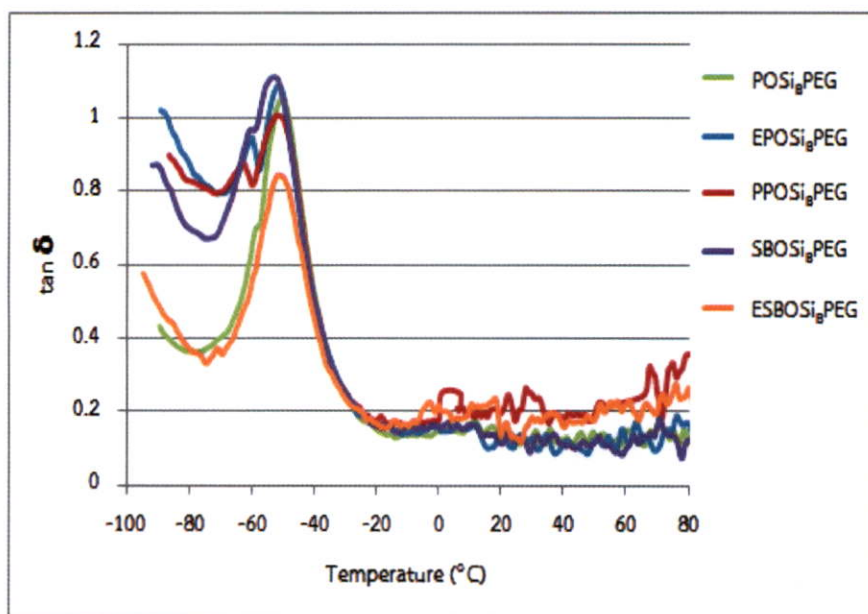
รูปที่ 4.45 กราฟแสดงค่า  $\tan \delta$  ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน



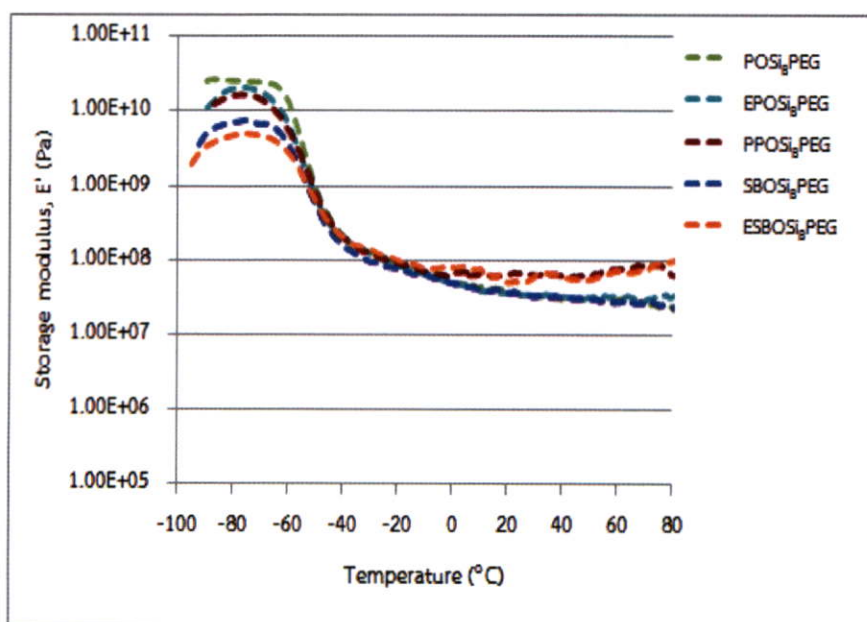
รูปที่ 4.46 กราฟแสดงค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus,  $E'$ ) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน



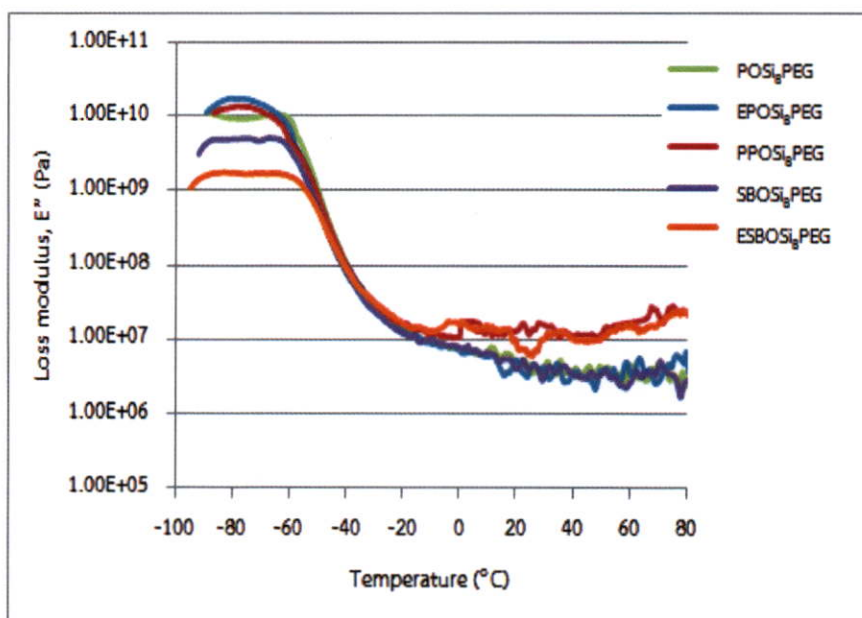
รูปที่ 4.47 กราฟแสดงค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $E''$ ) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันต่างกัน



รูปที่ 4.48 กราฟแสดงค่า  $\tan \delta$  ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพีซีดัดแปร



รูปที่ 4.49 กราฟแสดงค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus,  $E'$ ) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพีซีดัดแปร



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $E''$ ) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้น้ำมันพืชดัดแปร

จากผลการเปรียบเทียบสมบัติการเชื่อมโยง สมบัติการไหล สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงพลวัตและสัญญาณวิทยาของยางที่เติมน้ำมันพืชดัดแปรต่างๆ กับยางที่เติมน้ำมันพืชไม่ดัดแปร พบว่าลักษณะการเชื่อมโยงใช้เวลานานขึ้น ค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนที่มีขี้ในโครงสร้างของสายโซ่อะลิฟาติกของน้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น ทำให้มีความเข้ากันกับยางได้น้อยลง และโครงสร้างที่มีขี้ที่ลดลงของน้ำมันเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปร ทำให้อันตรกิริยาระหว่างน้ำมันกับซิลิกาลดลง การแตกตัวของซิลิกาไม่ตี การกระจายตัวของซิลิกาในยางจึงลดลง ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงฉีกขาด และความต้านทานต่อการสึกหรอมีค่าลดลง แต่ไม่ส่งผลต่อสมบัติด้านแรงดึง การกระดอนของยาง ความร้อนสะสมในยาง ส่วนค่าแทนเดลต่ำสูงสุด และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วใกล้เคียงกัน แต่ยางที่ใช้น้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิ-ออลและน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรอีพอกซีไดซ์ให้ค่ามอดุลัสสูญเสียที่อุณหภูมิ 0 และ 60 °C มีค่าสูงสุด จากผลการทดสอบพบว่าโครงสร้างที่มีขี้ของน้ำมัน ส่งผลกระทบของความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับน้ำมัน การแตกออกของกลุ่มก้อนแอ็กโอมอเรตของซิลิกาและการกระจายตัวของซิลิกาซึ่งเป็นสารเสริมแรงที่มีขี้สูง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้น้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มดัดแปรอีพอกซีไดซ์ ที่ให้ผลทดสอบสมบัติต่างๆ ที่ดีที่สุด เพื่อใช้ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

#### 4.2.4 การศึกษาผลของน้ำมันพืชในสารตัวเติมที่ต่างกัน

อุตสาหกรรมยางล้อในปัจจุบัน มีแนวโน้มในการพัฒนายางประหยัดน้ำมันมากขึ้น โดยในสูตรเนื้อยางสำหรับผลิตดอกยาง (tread) มีการผสมยางเอสปีอาร์เกรดที่มีปลายเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของซิลิกาได้ดี เพื่อลดการเคลื่อนที่ปลายสายโซ่ของยาง ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียพลังงานของยาง จึงเกิดการเสีรูบขณะสัมผัสกับผิวถนนน้อยลง สามารถลดแรงต้านทานการหมุนของล้อ ทำใหยางประหยัดพลังงาน แต่การใช้ซิลิกามีข้อจำกัดหลายประการ เช่น หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวซิลิกามีแนวโน้มที่ดูดซับสารเคมีต่างๆ ได้ จึงต้องใส่สารลด

ประสิทธิภาพด้วยเสมอ ซิลิกาอาจเกิดการเกาะกลุ่มเป็นก้อนระหว่างการเก็บ ทำให้การกระจายตัวในยางไม่ดี และมีราคาแพง ยางประหยัดน้ำมันมีราคาสูงกว่ายางปกติทั่วไป ดังนั้นในอุตสาหกรรมยังคงนิยมใช้ผงเขม่าดำ (Carbon black, CB) เป็นสารตัวเติมเสริมแรง ที่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้ยางล้อ และมีราคาถูก

งานวิจัยนี้เลือกใช้ยางธรรมชาติ (STR 5L) บดผสมกับสารตัวเติมซิลิกาและเขม่าดำ เพื่อศึกษาความสามารถเป็นน้ำมันช่วยกระบวนการผลิตของน้ำมันพืช โดยศึกษาในยางสูตรที่ไม่เติมน้ำมัน เติมน้ำมันปาล์ม และน้ำมันปาล์มตัดแปรอีพอกซีไดซ์ โดยควบคุมอัตราส่วนของน้ำมันต่อสารตัวเติมคงที่คือปริมาณน้ำมัน 5 phr ปริมาณสารตัวเติม 50 phr สามารถอธิบายความหมายของสูตรต่างๆ ได้ ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน

สูตร	ความหมาย		
NOSi <sub>0</sub> PEG	ไม่เติมน้ำมันช่วยกระบวนการผลิต	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น	เติม PEG
POSi <sub>0</sub> PEG	น้ำมันปาล์ม	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น	เติม PEG
EPOSi <sub>0</sub> PEG	น้ำมันปาล์มตัดแปรอีพอกซีไดซ์	เติมซิลิกาก่อนสารกระตุ้น	เติม PEG
NOCB	ไม่เติมน้ำมันช่วยกระบวนการผลิต	เขม่าดำ	-
POCB	น้ำมันปาล์ม	เขม่าดำ	-
EPOCB	น้ำมันปาล์มตัดแปรอีพอกซีไดซ์	เขม่าดำ	-

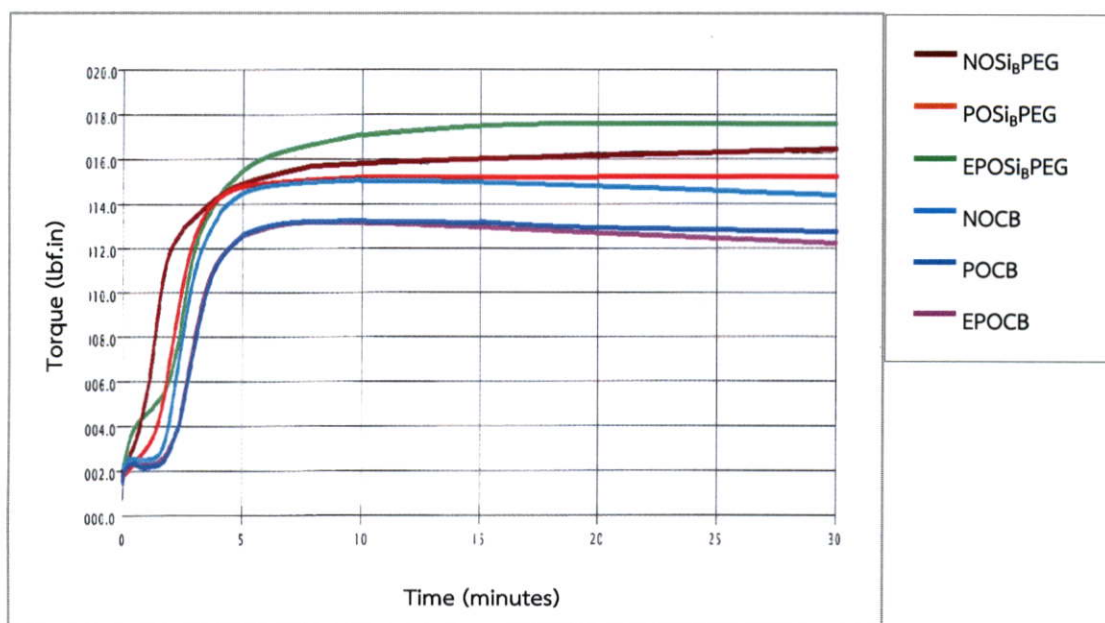
#### 4.2.4.1 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน

ผลการทดสอบในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.51 พบว่า เมื่อใช้เขม่าดำ (CB) เป็นสารตัวเติม ยางคอมพาวด์ที่ไม่เติมน้ำมัน (NOCB) น้ำมันปาล์ม (POCB) และน้ำมันปาล์มตัดแปรอีพอกซีไดซ์ (EPOCB) ให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time,  $t_{s2}$ ) และเวลาการเชื่อมโยง (Cure time,  $t_{c90}$ ) และดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque,  $M_L$ ) ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque,  $M_{HF}$ ) และระดับการเชื่อมโยง (State of cure,  $M_{HF}-M_L$ ) มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำกว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม เนื่องจากเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวที่มีสภาพขี้ดดำ การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคและการดูดซับสารเคมีต่างๆ เกิดขึ้นน้อย เกิดการกระจายตัวในยางธรรมชาติที่ไม่ขี้ดดำ และเมื่อเปรียบเทียบผลของลักษณะการเชื่อมโยงของยางที่ไม่เติมน้ำมันกับยางที่เติมน้ำมันปาล์มทั้งสองชนิดเห็นว่าไม่มีความแตกต่างกัน นั้นแสดงให้เห็นว่าการเติมน้ำมันไม่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม เขม่าดำมีสมบัติการนำความร้อนที่ดี อีกทั้งค่าความหนาแน่นของเขม่าดำยังต่ำกว่าซิลิกา (1.80 และ 2.20 g·cm<sup>-3</sup> ตามลำดับ) เมื่อเติมในปริมาณที่เท่ากันที่ 50 phr ปริมาตรของเขม่าดำมากกว่าซิลิกา จึงเกิดการเชื่อมโยงได้เร็วกว่า ส่วนในยางคอมพาวด์ที่ใช้ซิลิกา (Si) เป็นสารตัวเติม น้ำมันปาล์มตัดแปรอีพอกซีไดซ์ (EPOSi<sub>0</sub>PEG) จะให้เวลาการเชื่อมโยงของยางสูงขึ้น และดัชนีอัตราการเชื่อมโยงต่ำลง ค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับยางคอมพาวด์ที่เติมน้ำมันปาล์มไม่ตัดแปร (POSi<sub>0</sub>PEG) เนื่องจากผลจากสภาพขี้ดของน้ำมัน ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง และแรงบิดดังเหตุผลที่อธิบายไว้ในข้อ 4.2.3.1

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์สูตรที่เติมเขม่าดำและซิลิกา พบว่าสภาพผิวของน้ำมันไม่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม แต่ส่งผลในกรณีของยางคอมพาวด์ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

ตารางที่ 4.12 แสดงค่า  $t_{s2}$ ,  $t_{c90}$ , CRI,  $M_L$  และ  $M_{HF}$  ของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน

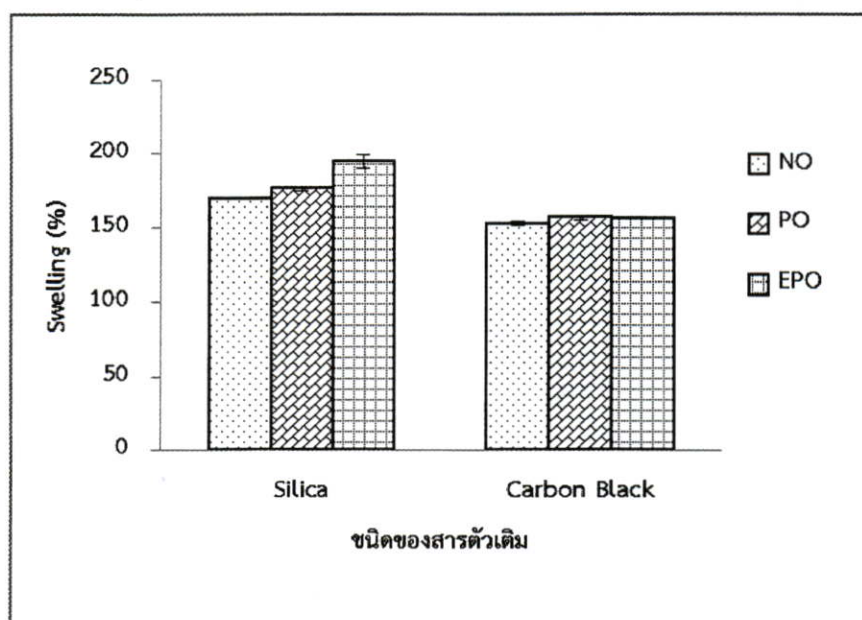
สูตรยางคอมพาวด์	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	CRI ( $\text{min}^{-1}$ )	$M_L$ (dNm)	$M_{HF}$ (dNm)	$M_{HF}-M_L$ (dNm)
NOSi <sub>B</sub> PEG	1.23	8.50	13.76	4.08	18.78	14.70
POSi <sub>B</sub> PEG	1.58	3.83	44.44	2.47	15.31	12.84
EOSi <sub>B</sub> PEG	1.98	7.29	19.12	4.84	17.96	13.12
NOCB	1.94	4.06	47.48	2.32	14.22	11.90
POCB	2.07	4.28	45.17	2.30	14.15	11.85
EPOCB	2.29	4.46	46.19	2.19	13.13	10.94



รูปที่ 4.51 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์แต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน

เมื่อพิจารณากราฟแสดงค่าร้อยละการบวมตัว (%Swelling) กับยางที่ใช้ น้ำมันพีชในสารตัวเติมเขม่าดำและซิลิกา จากรูปที่ 4.52 พบว่ายางที่ไม่เติมน้ำมัน น้ำมันปาล์ม และน้ำมันปาล์มดัดแปรออกซิไดซ์ เมื่อใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม มีร้อยละการบวมตัวของยางใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นเชื่อมโยงที่มากกว่า เนื่องจากเขม่าดำมีสภาพผิวต่ำ สามารถกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติที่ไม่มีผิว ทำให้การเกิดเชื่อมโยงได้ดีกว่า ร้อยละการบวมตัวจึงน้อยกว่า อีกทั้งความถ่วงจำเพาะของเขม่าดำต่ำกว่าซิลิกา เมื่อเติมในปริมาณที่เท่ากันปริมาตรของเขม่าดำมากกว่า ดังนั้นสมบัติส่วนใหญ่ของยางคอมพาวด์ที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงให้ค่าที่ดีกว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรง ส่วนยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม น้ำมันปาล์มดัดแปรออกซิไดซ์มีค่าร้อยละการบวมตัวมากกว่าน้ำมันปาล์ม

ที่ไม่ตัดแปรร เนื่องจากเมื่อสภาพขั้วของน้ำมันมากขึ้น ทำให้ความเข้ากันได้ของสารตัวเติมและยางลดลง การกระจายตัวของซิลิกาในยางไม่ดี ค่าร้อยละการบวมตัวจึงเพิ่มขึ้น หรือมีการเชื่อมโยงน้อยลงเมื่อเทียบกับน้ำมันปาล์มไม่ตัดแปรร



รูปที่ 4.52 กราฟแสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน

#### 4.2.4.2 สมบัติของการไหลและสมบัติทางกายภาพของยางที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน

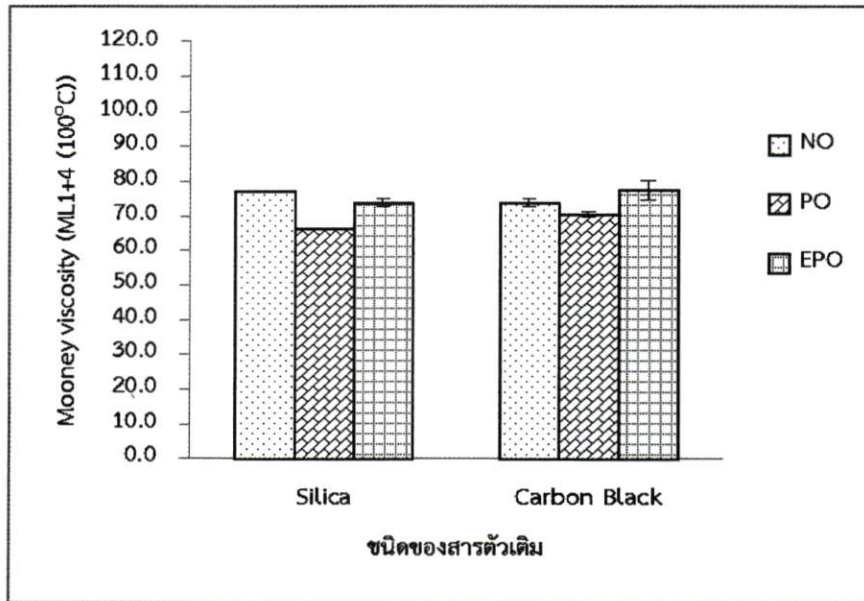
ผลของยางที่ใช้ไขมันพืชในสารตัวเติมเขม่าดำและซิลิกาต่อสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) และการแพร่ออกของน้ำมัน (Bleeding) แสดงดังรูปที่ 4.53-4.55

จากการศึกษาค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวด์ที่ไม่เติมน้ำมัน (NO) น้ำมันปาล์ม (PO) และน้ำมันปาล์มตัดแปรรอิพอกซิไดซ์ (EPO) เมื่อใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม พบว่าสภาพโครงสร้างที่มีขั้วของน้ำมันส่งผลต่อค่าความหนืดมูนนี่เล็กน้อย โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับยางคอมพาวด์ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม คือยางคอมพาวด์ที่เติมน้ำมันปาล์มความหนืดมูนนี่ที่ต่ำกว่ายางคอมพาวด์ที่ไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันปาล์มตัดแปรรอิพอกซิไดซ์ เนื่องจากน้ำมันปาล์มตัดแปรรมีสภาพโครงสร้างที่มีขั้วมากขึ้น ทำให้ความเข้ากันได้ของน้ำมันกับยางลดลง การกระจายตัวของสารตัวเติมในยางลดลง ดังนั้นค่าความหนืดมูนนี่จึงสูงกว่าน้ำมันปาล์มไม่ตัดแปรร

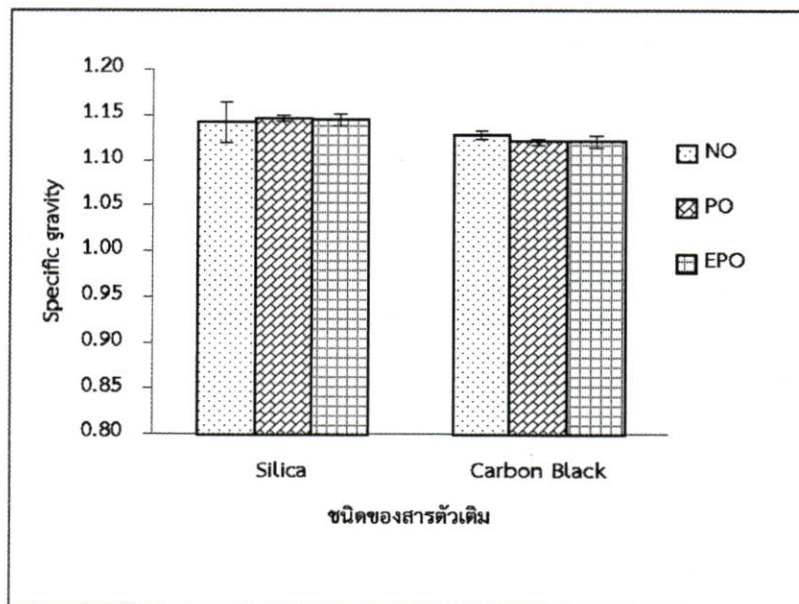
จากการศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะของยางที่ไม่เติมน้ำมัน น้ำมันปาล์ม และน้ำมันปาล์มตัดแปรรอิพอกซิไดซ์ เมื่อใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม พบว่าสภาพโครงสร้างที่มีขั้วของน้ำมันไม่ส่งผลต่อความถ่วงจำเพาะของยางที่ใช้เขม่าดำและซิลิกาเหมือนกัน เนื่องจากการตัดแปรรน้ำมันเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันขนาดเล็ก ซึ่งมีผลต่อขนาดโมเลกุลของน้ำมันเพียงเล็กน้อย เมื่อเติมน้ำมันปริมาณเพียง 5 phr จึงไม่ส่งผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะของยาง

จากการศึกษาค่าการแพร่ออกของน้ำมันเมื่อสารตัวเติมต่างชนิดกัน พบว่ายางทุกชนิดไม่เกิดการแพร่ออกของน้ำมันและโครงสร้างที่มีขั้วของน้ำมันไม่ส่งผลต่อการแพร่ออกของน้ำมันของยางที่ใช้เขม่าดำแต่ส่งผลในยางที่ใช้ซิลิกาเล็กน้อย

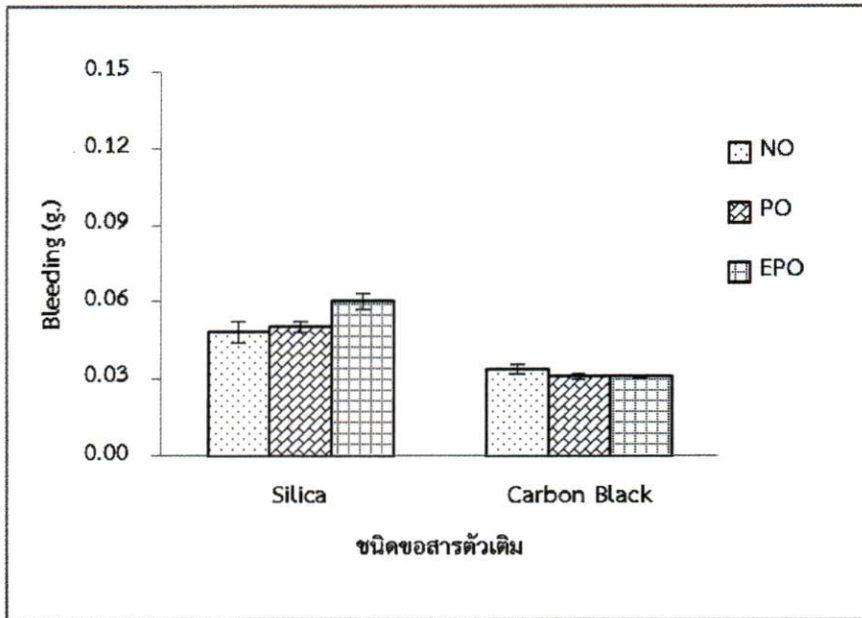
เมื่อเปรียบเทียบผลของยางที่ใช้ น้ำมันพืชในเขม่าดำและซิลิกาเป็นสารตัวเติม พบว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มดัดแปรออกซิไดซ์ในสารตัวเติมเขม่าดำ ค่าความหนืดมูนนี่ ค่าความถ่วงจำเพาะและการแพร่ของน้ำมัน เป็นไปในแนวโน้มเดียวกับยางคอมพาวด์ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม



รูปที่ 4.53 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน



รูปที่ 4.54 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน

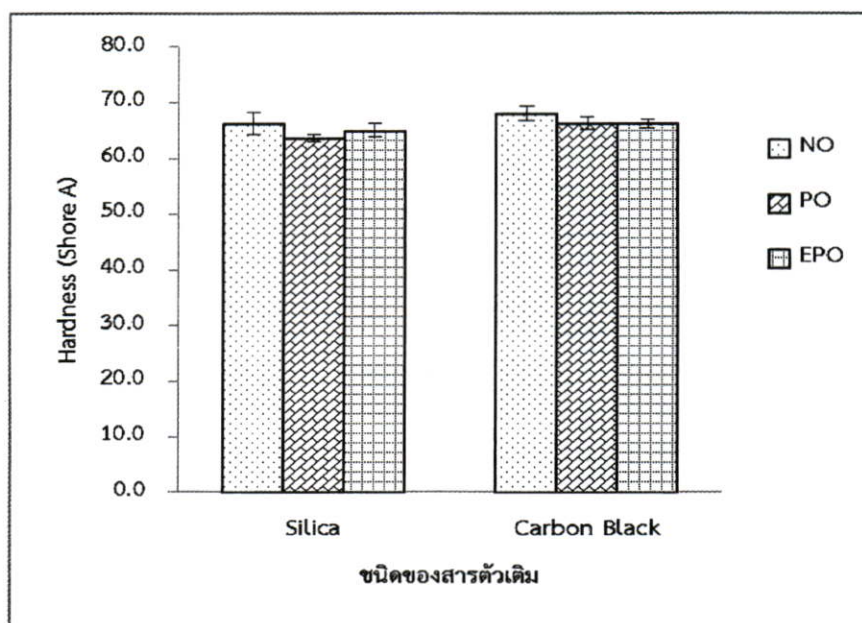


รูปที่ 4.55 กราฟแสดงค่าการแพร่ของน้ำมันของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน

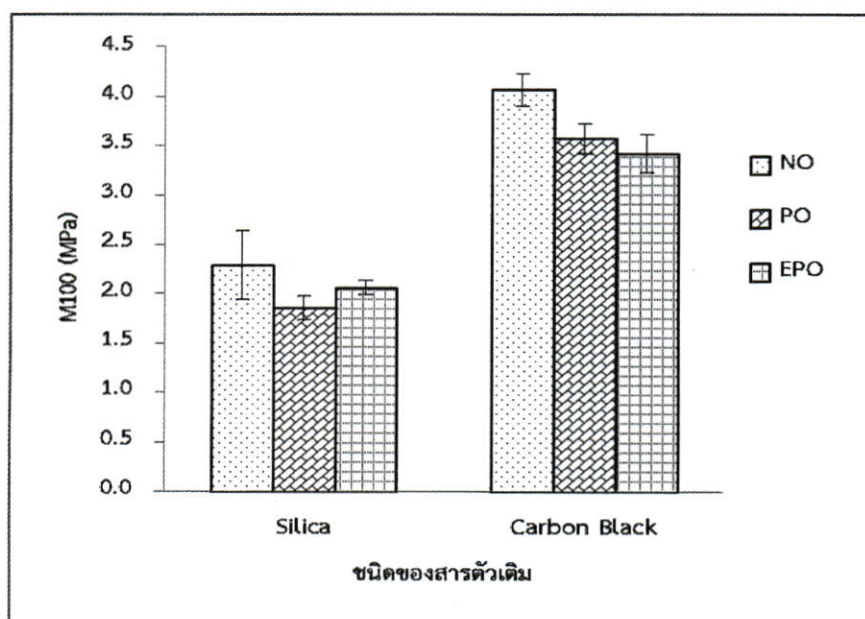
#### 4.2.4.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน

การทดสอบความแข็งกด (Hardness) ค่ามอดุลัสที่ 100% (M100) ค่ามอดุลัสที่ 300% (M300) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ของยางที่ไม่เติมน้ำมัน เติมน้ำมันปาล์ม และน้ำมันปาล์มตัดแปรรูปออกซิไดซ์ที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม แสดงดังรูปที่ 4.56-4.61 พบว่าให้ผลของการทดสอบความแข็งกด สมบัติแรงดึงมีแนวโน้มเหมือนยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม คือ โครงสร้างที่มีขั้วของน้ำมันไม่ส่งผลต่อความแข็งกดและสมบัติแรงดึง และยางที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมให้ค่าความแข็งกด ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดใกล้เคียงกับยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม แต่ให้ค่ามอดุลัสของยางสูงกว่าและร้อยละการยืด ณ จุดขาดต่ำกว่ายางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละการบวมตัวหรือความหนาแน่นเชื่อมโยงที่มากกว่า เนื่องจากเขม่าดำมีโครงสร้างมาก ทำให้มีปริมาณยางมากแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างโครงสร้างของเขม่าดำ หรือเกิดยางออกคลู็ดปริมาณมาก ทำให้เกิดการยึดเกาะที่ตีระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ความยืดหยุ่นของยางจึงลดลง [50-52]

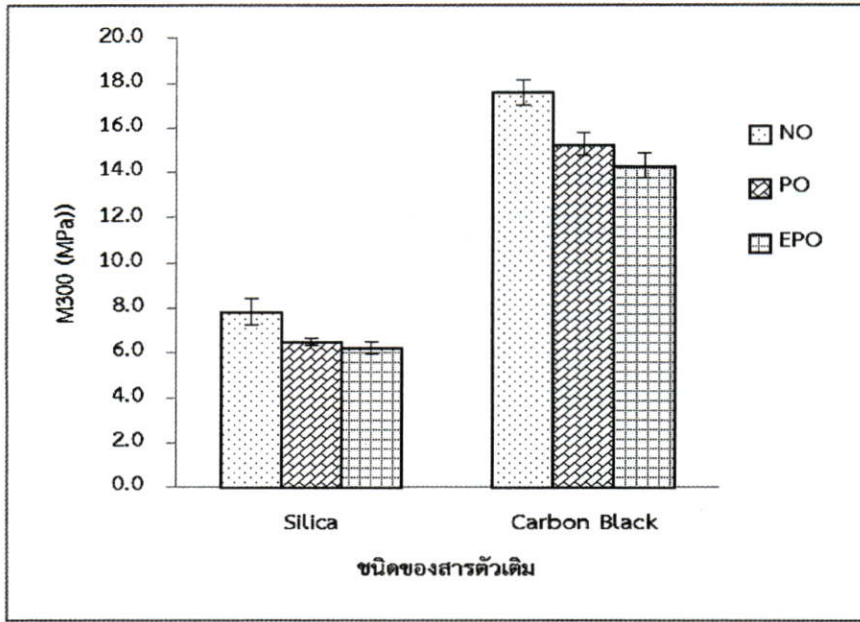
เมื่อเปรียบเทียบผลของยางที่ใช้ไขมันพืชในเขม่าดำและซิลิกาเป็นสารตัวเติม พบว่ายางที่ใช้ไขมันปาล์มและน้ำมันปาล์มตัดแปรรูปออกซิไดซ์ในสารตัวเติมเขม่าดำ ให้สมบัติกายภาพและสมบัติเชิงกลเป็นไปในแนวโน้มเดียวกับยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม โดยโครงสร้างที่มีขั้วของน้ำมันไม่ส่งผลต่อสมบัติดังกล่าว



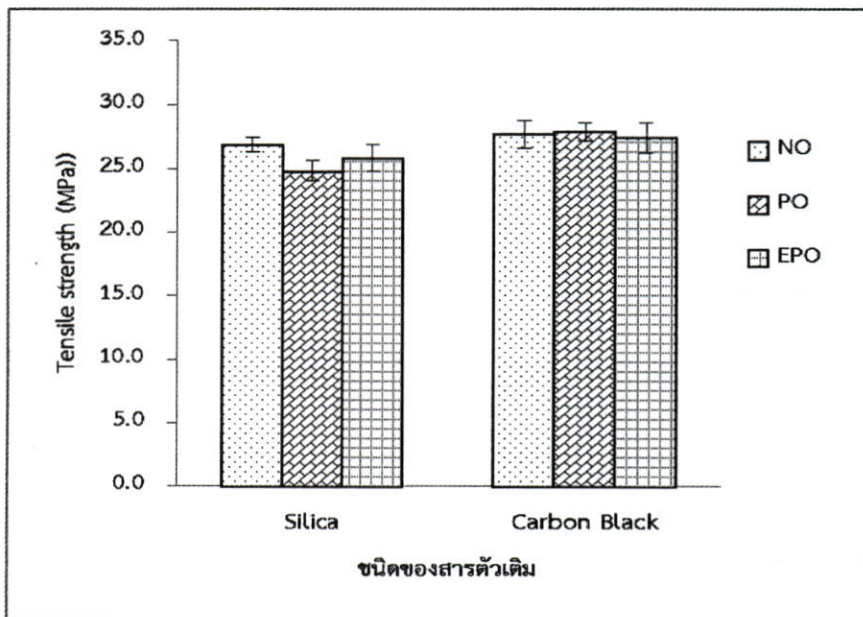
รูปที่ 4.56 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน



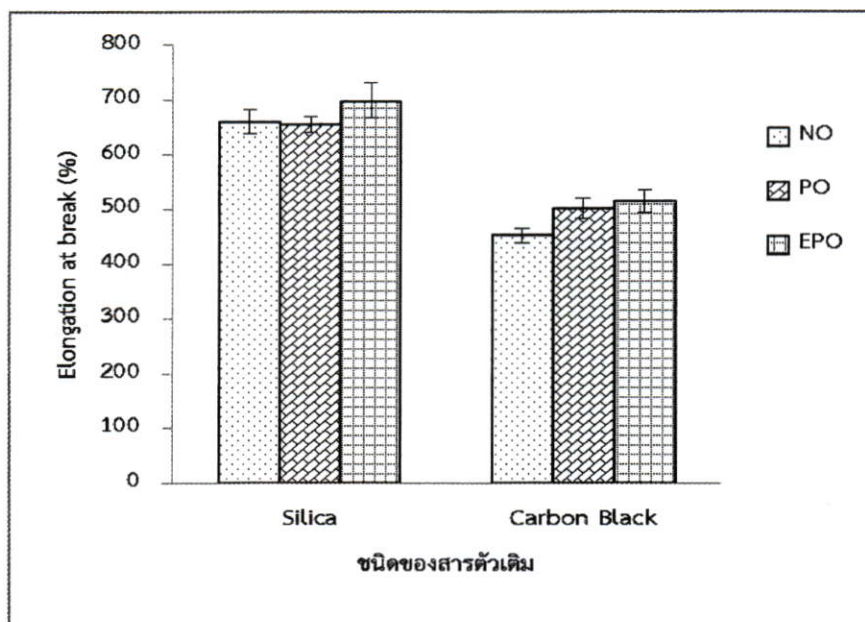
รูปที่ 4.57 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน



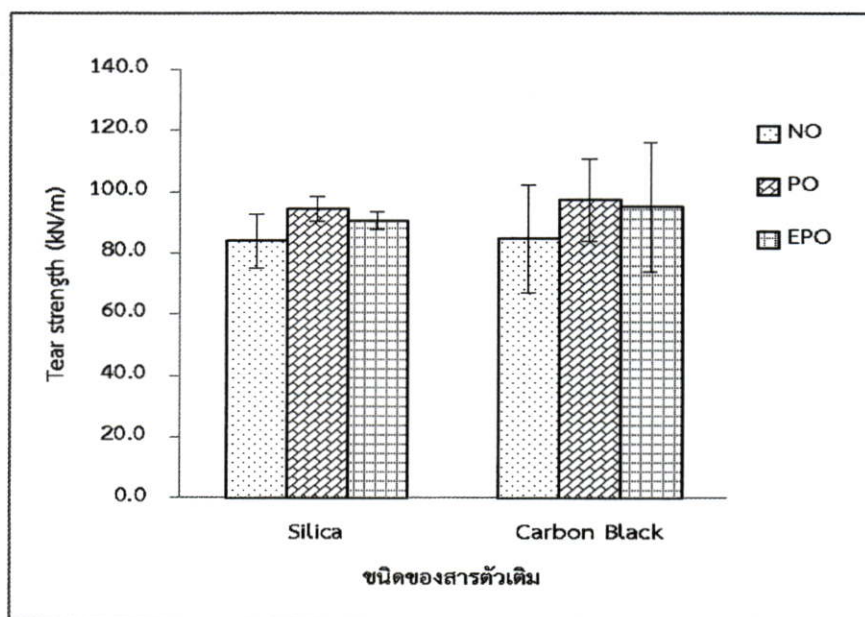
รูปที่ 4.58 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน



รูปที่ 4.59 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน



รูปที่ 4.60 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน

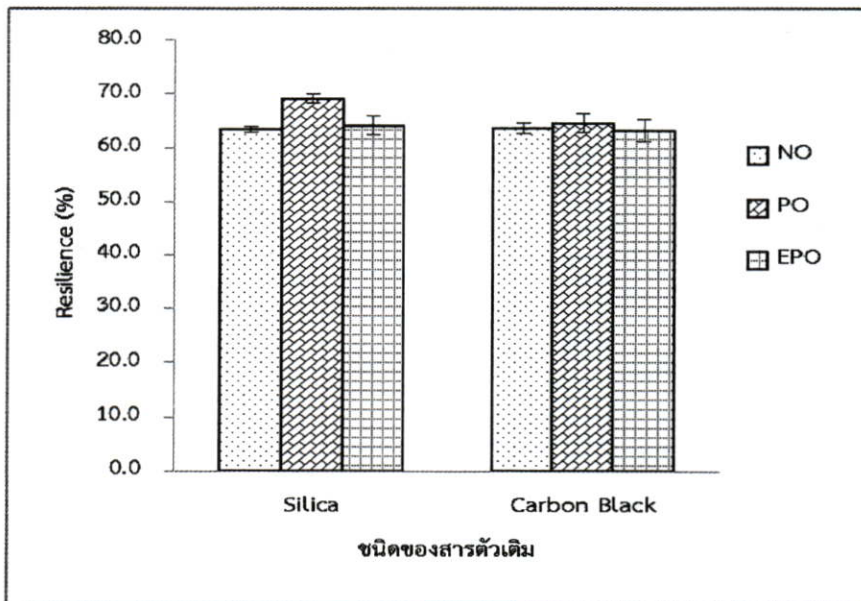


รูปที่ 4.61 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน

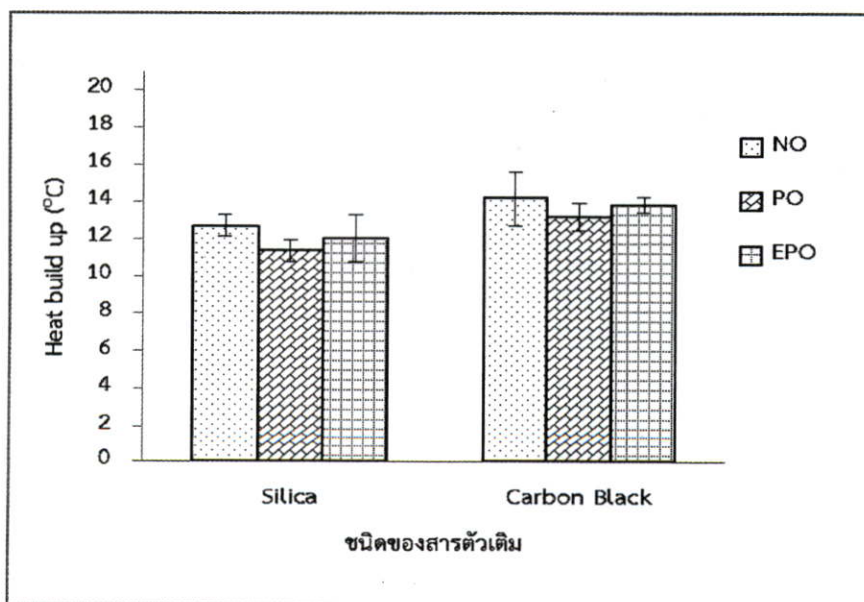
#### 4.2.4.4 สมบัติการกระดอน ความร้อนสะสมในยาง และการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน

ผลการทดสอบในรูปที่ 4.62-4.64 พบว่ายางที่ไม่เติมน้ำมัน เติมน้ำมันปาล์ม และน้ำมันปาล์มดัดแปรพอลิออกซิโดลที่ใช้เข้ามาดำเป็นสารตัวเติมให้ค่ากระดอน (Rebound resilience) ความร้อนสะสมในยาง (Heat build-up) และการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set) มีแนวโน้มเหมือนยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ซึ่งยางที่ใช้ น้ำมันปาล์มไม่ดัดแปรให้ค่ากระดอนและการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดสูงที่สุดและความร้อนสะสมในยางที่ต่ำสุด และยางที่ใช้

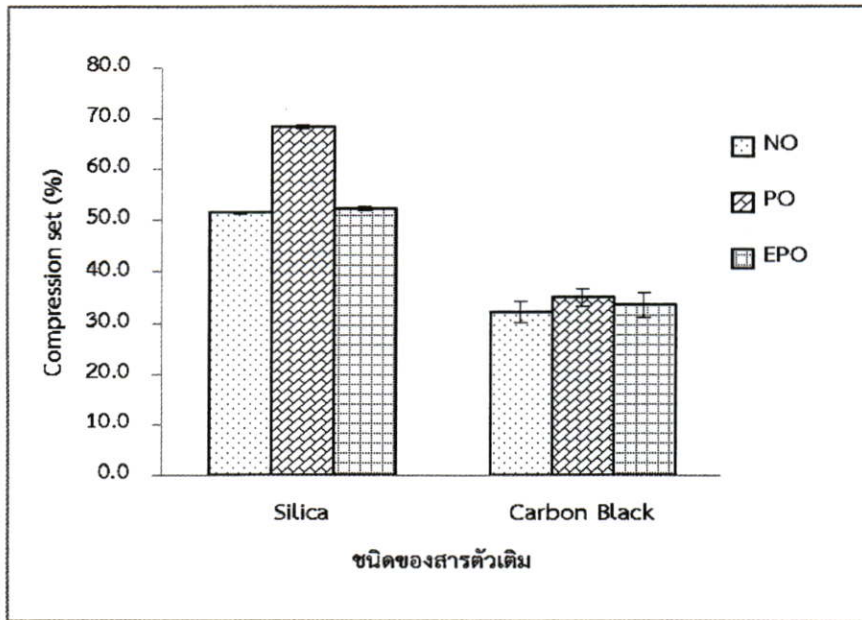
เขม่าดำเป็นสารตัวเติมจะมีค่าการกระดอนใกล้เคียงกับยางที่เติมซิลิกา ส่วนการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางที่เติมเขม่าดำมีค่ามากกว่ายางที่เติมซิลิกา เมื่อยางได้รับแรงตกกระทบ ยางสูญเสียพลังงานในการทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อย หรือสูญเสียในรูปของความร้อนน้อย สามารถส่งพลังงานกลับคืนได้มาก แต่ผลของความร้อนสะสมในยางของยางที่ใช้เขม่าดำมากกว่ายางที่ใช้ซิลิกาที่เล็กน้อย เนื่องจากเขม่าดำมีสมบัติการนำความร้อนที่ดีและความถ่วงจำเพาะของเขม่าดำที่ต่ำกว่าซิลิกา เมื่อใช้ในปริมาณที่เท่ากัน 50 phr จึงมีปริมาตรที่มากกว่า ดังนั้นสัดส่วนปริมาณของเนื้อยางในสูตรยางที่ใช้เขม่าดำน้อยกว่าสูตรที่ใช้ซิลิกา จึงทำให้สมบัติที่แสดงความเป็นอีลาสติกของยางลดลง



รูปที่ 4.62 กราฟแสดงค่าการกระดอนของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน



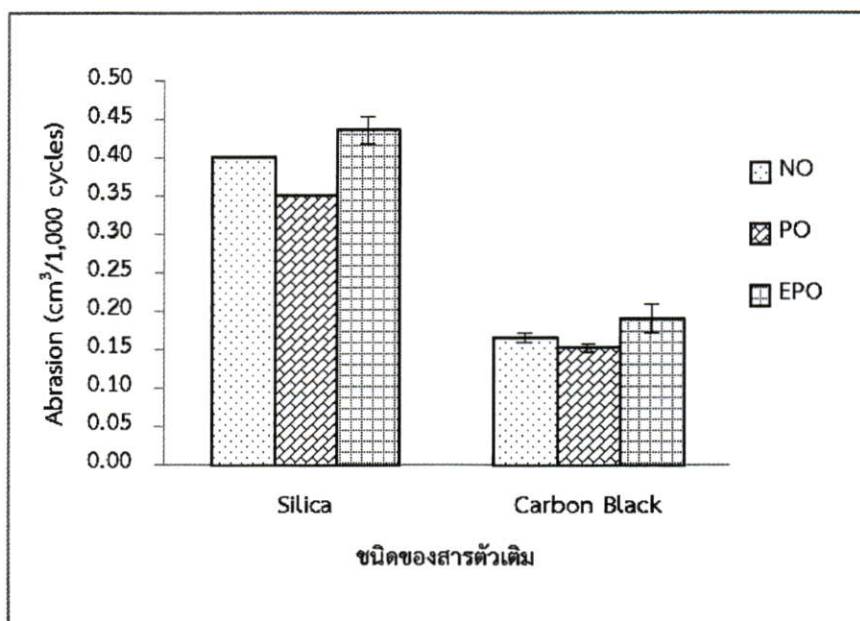
รูปที่ 4.63 กราฟแสดงค่าความร้อนสะสมในยางของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน



รูปที่ 4.64 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน

#### 4.2.4.5 สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยางที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน

ผลการทดสอบในรูปที่ 4.65 พบว่าน้ำมันส่งผลต่อค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) ของยางที่ใช้เขม่าดำและซิลิกาเหมือนกัน คือยางที่เติมน้ำมันปาล์มไม่ตัดแปรมีปริมาณของการสึกหรอ (Abrasion) ที่ต่ำหรือความต้านทานต่อการสึกหรอที่สูงกว่ายางที่ไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันปาล์มตัดแปรอีพอกซีไดซ์ เนื่องจากน้ำมันปาล์มมีโครงสร้างที่มีขั้วต่ำ สามารถเข้ากับยางธรรมชาติได้ดี ทำให้ปริมาณอิสระของยางเพิ่มขึ้น อีกทั้งช่วยลดอันตรกิริยาของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของสารตัวเติม การแตกของสารตัวเติมจากแอ็กโกเมอร์เตเป็นแอ็กกรีเกตจึงเกิดได้ง่าย อันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมดีขึ้น ปริมาณของการสึกหรอของยางจึงลดลง ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางจึงสูงขึ้น และปริมาณของการสึกหรอของยางที่ใช้เขม่าดำมีค่าต่ำกว่าซิลิกา เนื่องจากเขม่าดำสามารถกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติ

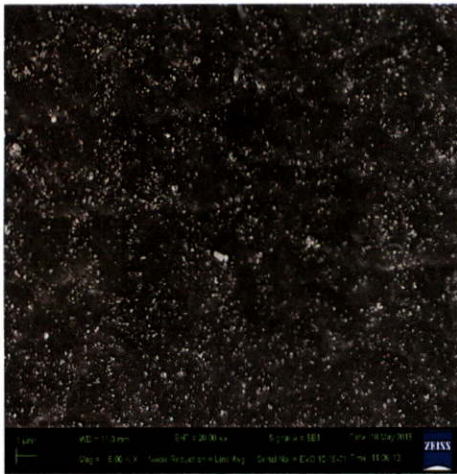
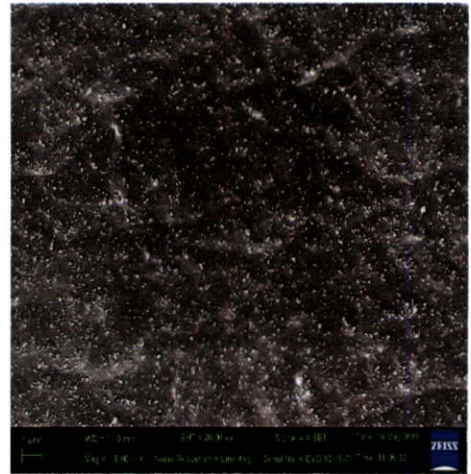


รูปที่ 4.65 กราฟแสดงค่าปริมาตรการสึกหรอของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน

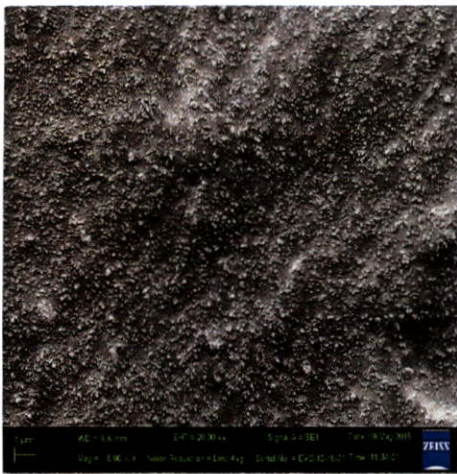
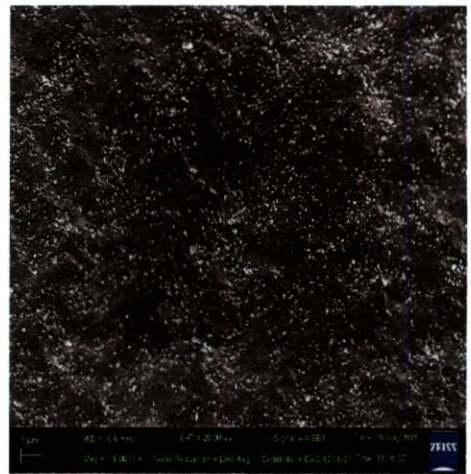
เมื่อเปรียบเทียบผลของยางที่ใช้ไขมันพืชในเขม่าดำและซิลิกาเป็นสารตัวเติม พบว่ายางที่ใช้ไขมันปาล์มและไขมันปาล์มตัดแปรอีพอกซิไดซ์ ให้ค่าการกระดอน ความร้อนสะสมในยาง การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดและความต้านทานต่อการสึกหรอเป็นไปในแนวโน้มเดียวกับยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

#### 4.2.4.6 สัณฐานวิทยาของยางที่ใช้สารตัวเติมต่างกัน

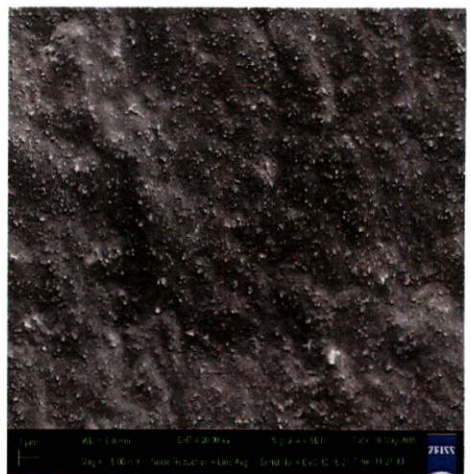
การวิจัยนี้ทำการศึกษาสัณฐานวิทยา เพื่อศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวของซิลิกาและเขม่าดำในยางที่เติมไขมันปาล์ม (PO) และไขมันปาล์มตัดแปรอีพอกซิไดซ์ (EPO) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.66 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม มีการกระจายตัวใกล้เคียงกัน เนื่องจากเขม่าดำมีสภาพขั้วต่ำ สามารถกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติที่ไม่มีขั้ว ส่วนกรณีของยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ยางที่เติมไขมันปาล์มไม่ตัดแปรให้การกระจายตัวที่ดีกว่ายางที่เติมไขมันปาล์มตัดแปรอีพอกซิไดซ์ เนื่องจากมีสภาพขั้วที่ต่ำกว่า จึงช่วยลดอันตรกิริยาของซิลิกาเกิดได้ดี เกิดการแตกออกของซิลิกาจากแอ็กโอมอเรตเป็นแอ็กกรีเกต จึงกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น

NOSi<sub>6</sub>PEG

NOCB

POSi<sub>6</sub>PEG

POCB

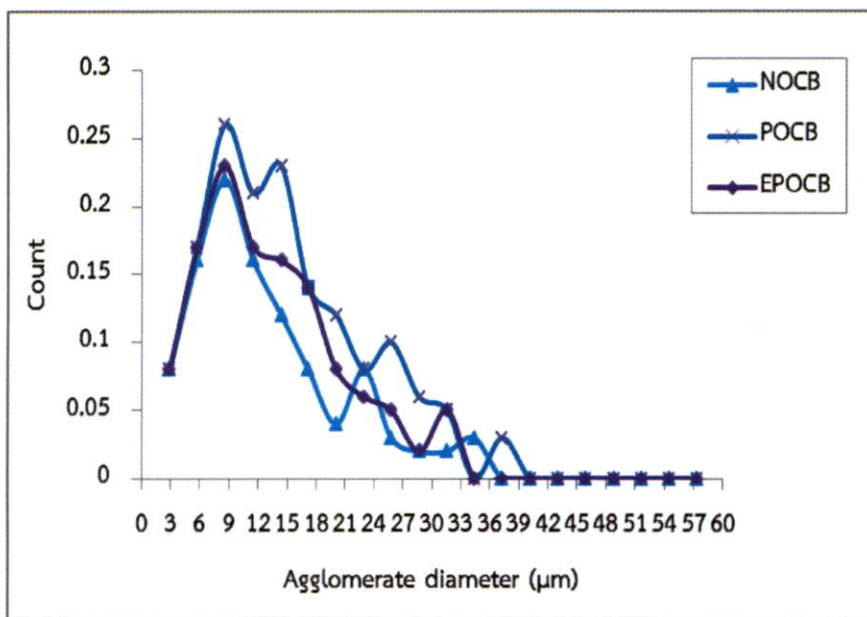
EPOSi<sub>6</sub>PEG

EPOCB

รูปที่ 4.66 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางแตกหักที่อุณหภูมิต่ำของยางแต่ละชนิด เมื่อใช้สารตัวเติมต่างกันที่กำลัขยาย 5,000 เท่า (วงกลมสีแดง แสดงกลุ่มก้อนแอ็กโก-มอเรตของซิลิกา)

#### 4.2.4.7 การศึกษาระดับการกระจายของเขม่าดำในยางด้วยเครื่อง Dispergrader

จากผลการทดสอบของยางที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม พบว่ายางที่เติมน้ำมันปาล์มและเติมน้ำมันปาล์มตัดแปรรูปออกซิไดซ์มีขนาดของกลุ่มก้อนเขม่าดำขนาด 6 9 12 และ 14 ไมครอนเป็นส่วนมาก ซึ่งส่งผลต่อการกระจายของเขม่าดำคล้ายกัน แต่ยางที่เติมน้ำมันปาล์ม มีปริมาณกลุ่มก้อนเขม่าดำที่มีขนาดเล็กในปริมาณที่มากกว่าน้ำมันปาล์มตัดแปรรูปออกซิไดซ์เล็กน้อย เนื่องจากน้ำมันปาล์มมีโครงสร้างที่มีขั้วต่ำกว่าน้ำมันปาล์มตัดแปรรูปออกซิไดซ์ จึงสามารถเข้ากับเขม่าดำที่มีขั้วต่ำได้ดี ทำให้เขม่าดำกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติที่ไม่มีขั้ว ในส่วนของยางที่ไม่เติมน้ำมัน พบขนาดของเขม่าดำขนาดเล็กจำนวนน้อยที่สุด และอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่ายางที่เติมน้ำมัน แสดงให้เห็นว่าน้ำมันมีผลต่อการกระจายตัวของเขม่าดำ



รูปที่ 4.67 กราฟแสดงค่าระดับการกระจายของเขม่าดำในยางแต่ละชนิดเมื่อใช้สารตัวเติมต่างกัน

จากผลการเปรียบเทียบสมบัติการเชื่อมโยง สมบัติการไหล สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ค่าการกระดอน ความร้อนสะสมในยาง การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ความต้านทานต่อการสึกหรอ สัญญาณวิทยา และระดับการกระจายตัวของเขม่าดำในยางที่เติมเขม่าดำกับยางที่เติมซิลิกา พบว่าโครงสร้างที่มีขั้วของน้ำมันที่สูงขึ้นไม่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยางที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม แต่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม โดยน้ำมันปาล์มไม่ตัดแปรรูปมีสภาพโครงสร้างที่มีขั้วต่ำ มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดอันตรกิริยาของสารตัวเติม ทำให้การดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาและสารเคมีต่างๆ ของซิลิกาลดลง การเชื่อมโยงยางจึงดีขึ้น การกระจายตัวของสารตัวเติมในยางธรรมชาติดีขึ้น ซึ่งเห็นได้จากผลของระดับการกระจายของเขม่าดำ น้ำมันปาล์มไม่ตัดแปรรูปให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กได้ดีที่สุด อีกทั้งผลของสมบัติต่างๆ ของยางที่ไม่เติมน้ำมัน เติมน้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มตัดแปรรูปออกซิไดซ์ ในสารตัวเติมเขม่าดำส่วนใหญ่ให้ผลในแนวโน้มเดียวกับยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งน้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มตัดแปรรูป สามารถนำมาใช้กับยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำหรือซิลิกาเป็นสารตัวเติมได้ โดยส่งผลต่อสมบัติต่างๆ คล้ายกัน

#### 4.2.5 สรุปการใช้น้ำมันพืชทดแทนน้ำมันอะโรมาติก

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาน้ำมันพืช 6 ชนิดได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน น้ำมันรำข้าว น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และน้ำมันสั้ม ที่ใช้ในคอมพาวด์ยางธรรมชาติ (STR 5L) ที่ใช้ซิลิกาและเขม่าดำเป็นสารตัวเติม เปรียบเทียบกับน้ำมันอะโรมาติก โดยใช้อัตราส่วนของน้ำมันต่อสารตัวเติมคงที่คือปริมาณน้ำมัน 5 phr ปริมาณสารตัวเติมซิลิกา 50 phr ซึ่งศึกษาถึงผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดน้ำมันพืชและน้ำมันพืชตัดแปร ลำดับการผสมซิลิกา การเติม PEG และชนิดของสารตัวเติม ต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงพลวัต และสัญญาณวิทยาของยางคงรูป พบว่าน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันพืชที่เหมาะสมที่สุดในการทดแทนน้ำมันอะโรมาติก หลังจากนั้นอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C สมบัติของยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันปาล์มทดแทนน้ำมันอะโรมาติก แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบระหว่างสมบัติของยางที่ใช้น้ำมันปาล์มกับน้ำมันอะโรมาติก โดยมีซิลิกาเป็นสารตัวเติม

สมบัติของยาง	ยางที่ใช้น้ำมันอะโรมาติก (AO)	ยางที่ใช้น้ำมันปาล์ม (PO)	ผลต่าง (%)
ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 (100°C))	69.4	62.2	-10.4
ความแข็งกด (Shore A)	63	64	+1.6
มอดุลัสที่ 300% (MPa)	6.9	6.5	-5.8
ความแข็งแรงดึง (MPa)	26.5	24.8	-6.4
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	676	652	-3.6
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	86.1	97.9	+13.7
การกระดอน (%)	66.0	69.2	+4.8
ความต้านทานต่อการสึกหรอ (cm <sup>3</sup> /1,000 cycles)	0.43	0.35	-18.6
ความถ่วงจำเพาะ	1.15	1.15	0
ความร้อนสะสมในยาง (°C)	11	11	0
การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ 100 °C, 22 hr (%)	63.6	68.4	+7.6

#### ตัวอย่างการคำนวณร้อยละผลต่างของสมบัติของยาง

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละผลต่างของความหนืดมูนนี่} &= (PO - AO) \times 100 / AO & (4.1) \\
 &= (62.2 - 69.4) \times 100 / 69.4 & = -10.4
 \end{aligned}$$

จากการเปรียบเทียบสมบัติของยางจากงานวิจัยนี้ เทียบกับยางคอมพาวด์ที่เติมน้ำมันอะโรมาติก ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน พบว่ายางคอมพาวด์จากงานวิจัยนี้ มีสมบัติบางประการที่ดีกว่า เช่น ความหนืดมูนี้ (น้อยกว่าหรือดีกว่า 10.4%) ความแข็งแรงฉีกขาด (สูงกว่า 13.7%) ความต้านทานต่อการสึกหรอ (น้อยกว่าหรือดีกว่า 18.6%) อย่างไรก็ตามก็ยังมีสมบัติบางประการที่ยังต้องการปรับปรุง เช่น การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ 100 °C, 22 hr (มากกว่าหรือต่อยกว่า 7.55%)

#### 4.3 ผลการประมาณค่าสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงปริมาณของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogens) ทั้ง 8 ชนิดตามที่กฎระเบียบควบคุมเคมีภัณฑ์ หรือเกณฑ์มาตรฐานยุโรป (REACH) ซึ่งกำหนดให้มีปริมาณรวมกันได้ไม่เกิน 10 mg/kg ในสินค้าที่มีการใช้น้ำมันและเขม่าดำในการผลิต [52] ดังแสดงในตารางที่ 4.14 พบว่า น้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันปาล์มมีปริมาณรวมของสาร PAHs เท่ากับ 864 และ 0.013 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำมันปาล์มมีค่าสาร PAHs ต่ำกว่าน้ำมันอะโรมาติก และเกณฑ์มาตรฐานยุโรป (REACH)

ตารางที่ 4.14 การแสดงปริมาณของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ทั้ง 8 ชนิดที่ EU REACH กำหนด ในน้ำมันอะโรมาติกเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์ม [54-55]

ชนิดของ PAHs	น้ำมันอะโรมาติก (AO)	น้ำมันปาล์ม (PO) (mg/kg)
Benzo[a]pyrene (BaP)	-	$<0.3-67 \times 10^{-3}$
Benzo[e]pyrene (BeP)	-	-
Benz[a]anthracene (BaA)	-	$<0.1-97 \times 10^{-3}$
Chrysene (CHR)	-	$<0.2-217 \times 10^{-3}$
Benzo[b]fluoranthene (BbFA)	-	$<0.2-67 \times 10^{-3}$
Benzo[j]fluoranthene (BjFA)	-	-
Benzo[k]fluoranthene (BkFA)	-	$<0.3-16 \times 10^{-3}$
Dibenz[a,h]anthracene (DBAhA)	-	$<0.3-3.6 \times 10^{-3}$
ปริมาณรวมของ PAHs (คิดที่สูงสุด)	3% โดยน้ำหนัก	$4.676 \times 10^{-1}$
PAHs ในยางคอมพาวด์ 1kg (ในคอมพาวด์ 1kg ใช้น้ำมัน 28.8 g)	864	0.013

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์ต้นทุน

ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตจะเลือกใช้ยางคอมพาวด์ที่ใช้ไขมันปาล์มที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ ที่เทียบเท่ากับน้ำมันอะโรมาติก คือ ยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติ STR 5L สารตัวเติมที่ใช้คือ ซิลิกา (Silica) 50 phr โดยวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบของยางคอมพาวด์ที่มี น้ำหนัก 1 กิโลกรัม แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางคอมพาวด์

รายการ	ราคาต่อหน่วย <sup>1</sup> (บาท/ กิโลกรัม)	สูตรที่ใช้ไขมันอะโรมาติก (AO)		สูตรที่ใช้ไขมันปาล์ม (PO)	
		ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	เป็นเงิน (บาท)
1. ยางธรรมชาติ (STR 5L)	90	575	51.75	575	51.75
2. ซิงค์ออกไซด์	118	28.8	3.39	28.8	3.39
3. กรดสเตียริก	120	11.5	1.38	11.5	1.38
4. ซิลิกา (233)	80	287.5	23.00	287.5	23.00
5.1 น้ำมันอะโรมาติก	50	28.8	1.44	0.0	0.00
5.2 น้ำมันปาล์ม	39	0.0	0.00	28.8	1.12
6.PEG-4000	130	17.3	2.24	17.3	2.24
7. สารคู่ควบ Si-69	600	25.9	15.53	25.9	15.53
8. วิงสเตย์แอล	340	8.6	2.93	8.6	2.93
9. สารเร่ง CBS	350	4.6	1.61	4.6	1.61
10. สารเร่ง TMTD	75	1.2	0.09	1.2	0.09
11. กำมะถัน	45	11.5	0.52	11.5	0.52
รวมต้นทุนวัตถุดิบที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม		103.87		103.56	

หมายเหตุ : <sup>1</sup>เป็นราคาโดยประมาณ ณ เดือนสิงหาคม 2558

ตารางที่ 4.16 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

รายการ	ปริมาณที่ใช้ (กิโลกรัม)	สูตรที่ใช้น้ำมันอะโรมาติก (AO)		สูตรที่ใช้น้ำมันปาล์ม (PO)	
		ราคาต่อ หน่วย <sup>1</sup> (บาท/ กิโลกรัม)	เป็นเงิน (บาท)	ราคาต่อ หน่วย <sup>1</sup> (บาท/ กิโลกรัม)	เป็นเงิน (บาท)
1. วัตถุดิบ	1	103.87	103.87	103.56	103.56
2. ค่าจ้างผลิต <sup>2</sup>	1	12	12	12	12
รวมต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม <sup>3</sup>			115.87	115.56	

หมายเหตุ : <sup>1</sup>เป็นราคาโดยประมาณ ณ เดือน สิงหาคม 2558

<sup>2</sup>คิดจากค่าแรง, ค่าไฟฟ้า, ค่าเสื่อมของเครื่องจักร

<sup>3</sup>ราคานี้ไม่รวมต้นทุนของเครื่องจักรการผลิต และค่าขนส่ง

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันปาล์มทดแทนน้ำมันอะโรมาติก ดังแสดงในตารางที่ 4.16 พบว่าปริมาณต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันปาล์ม 1 กิโลกรัม ใช้ ต้นทุนประมาณ 115.56 บาท ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันอะโรมาติก ที่มีราคา ประมาณ 115.87 บาท (ราคา ณ เดือน สิงหาคม 2558) ซึ่งกล่าวได้ว่า การผลิตยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันปาล์มทดแทนน้ำมันอะโรมาติก ในงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาน้ำมันพืช ได้แก่ น้ำมันอะโรมาติก น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน น้ำมันรำข้าว น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และน้ำมันสั้ม เพื่อใช้เป็นสารเติมแต่งหลายหน้าที่ (Multifunctional additives) สำหรับยางธรรมชาติ ได้แก่ สารหล่อลื่น (Lubricants) น้ำมันช่วยกระบวนการผลิต (Processing oils) จากการวิจัยเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของยางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันพืชกับยางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันอะโรมาติกที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน โดยควบคุมอัตราส่วนผสมต่อน้ำมันคงที่ที่ 50 : 5 phr ทำการศึกษาชนิดของน้ำมันพืชและน้ำมันพืชดัดแปร ลำดับการผสมซิลิกา การเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และชนิดของสารตัวเติม จากนั้นทำการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลพลวัต สันฐานวิทยา ตลอดจนการประมาณค่าสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) และวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การศึกษาผลชนิดของน้ำมันพืชสามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต โดยพิจารณาจากลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสันฐานวิทยา พบว่าน้ำมันพืชทุกชนิดสามารถทดแทนน้ำมันอะโรมาติกได้ น้ำมันพืชไม่ทำให้สมบัติต่างๆ ของยางเปลี่ยนไป ได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกล ยกเว้นน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่มีเวลาการเชื่อมโยงสูงกว่าน้ำมันชนิดอื่น เนื่องจากความเป็นกรดของน้ำมันสูง แต่ยังให้สมบัติเชิงกลที่ดี น้ำมันพืชสามารถทำหน้าที่เป็นสารทำให้นุ่มได้เช่นเดียวกับน้ำมันอะโรมาติก ยืนยันจากผลของค่าความหนืดมูนินี้ มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับน้ำมันอะโรมาติก

2. การศึกษาผลลำดับการผสมซิลิกาและการเติม PEG โดยพิจารณาจากลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลและค่าทอร์กขณะผสม พบว่าน้ำมันพืชไม่สามารถทำหน้าที่ทดแทน PEG จึงส่งผลให้ยางที่เติม PEG มีลักษณะการเชื่อมโยงยางและสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางที่ไม่เติม PEG ลำดับการผสมซิลิกา ก่อนสารกระตุ้นให้ค่าทอร์กขณะผสมต่ำหรือใช้พลังงานการผสมน้อย การผสมสารเคมีทำได้ง่าย

3. การศึกษาผลของน้ำมันพืชดัดแปรสามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิตและปรับปรุงสมบัติของยาง โดยพิจารณาจากลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลพลวัต สันฐานวิทยา พบว่าโครงสร้างที่มีหัวของน้ำมันส่งผลให้เวลาการเชื่อมโยงสูงขึ้น เนื่องจากความเป็นกรดของน้ำมันที่สูงขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของยาง และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ยางที่เติม PPO และ ESBO ให้ค่ามอดุลัสสูญเสียสูงสุด

4. การศึกษาผลชนิดของสารตัวเติมต่อสมบัติของยางที่ใช้ น้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มดัดแปรช่วยกระบวนการผลิต โดยพิจารณาจากลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา ระดับการกระจายตัวของเขม่าดำ พบว่าน้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มดัดแปรไม่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยางที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม โครงสร้างที่มีหัวของน้ำมันไม่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของยาง ซึ่งส่งผลเช่นเดียวกับยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

5. การวิเคราะห์ต้นทุน การผลิตยางคอมพาวด์ที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติ (STR 5L) น้ำมันปาล์มช่วยกระบวนการผลิต (Processing oils) สารตัวเติม (Filler) คือ ซิลิกา ซึ่งเป็นสูตรที่มีสมบัติที่ดีมีต้นทุนวัตถุดิบประมาณ 104 บาทต่อยางคอมพาวด์ 1 กิโลกรัม และเมื่อรวมทั้งค่าจ้างในการผลิตมีต้นทุนประมาณ 116 บาทต่อยางคอมพาวด์ 1 กิโลกรัม ซึ่งเท่ากับราคาของยางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันอะโรมาติกเป็นน้ำมันช่วยกระบวนการผลิต

ดังนั้นยางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันปาล์มทดแทนน้ำมันอะโรมาติก ในงานวิจัยนี้สามารถใช้งานได้จริง ต้นทุนการผลิตต่ำ และมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber) เช่น ยางเอสบี-อาร์ (Styrene butadiene rubber, SBR) และยางบีอาร์ (Butadiene rubber) และศึกษาอัตราส่วนของซิลิกาต่อเขม่าดำ เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้ดียิ่งขึ้น ได้ยางที่เหมาะสมกับการใช้งาน ยางล้อรถ โดยปรับปรุงสมบัติเรื่องการทนความร้อนและน้ำมัน (Heat and oil resistance) การยึดเกาะถนนบนพื้นเปียก (Wet grip) ความต้านทานการหมุน (Rolling resistance) ความต้านทานการสึกหรอ (Abrasion resistance) ที่ต่ำลง ลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

2. ศึกษาผลของยางที่มีขั้ว เช่น ยางเอ็นบีอาร์ (Nitrile rubber, NBR) ยางคลอโรพรีน (Chloroprene, CR) เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้งานให้กับผลิตภัณฑ์ยางประเภทอื่น

3. ศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมในปริมาณที่สูงๆ เพื่อทดสอบว่าน้ำมันพืชยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต เช่น พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) สารหล่อลื่น (Lubricant) ในการช่วยแปรรูป ให้การผสมสารเคมีเข้ากับยางได้ง่ายขึ้น หรือเป็นสารเพิ่มความนิ่ม (Softener) เพื่อให้ยางนิ่มลงได้หรือไม่

4. ศึกษาสมบัติอื่นๆ ของยางที่ใช้ น้ำมันพืช เช่น การต้านทานต่อการหักงอ สมบัติการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและโอโซน ทดสอบทางจุลชีววิทยา เพื่อทดสอบว่าน้ำมันพืชยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งชนิดอื่นได้หรือไม่

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2557. สลัดียงประเทศไทย. (43)4 : หน้า 5-19
- [2] อธิพิล แจ้งชัด. 2545. เทคโนโลยีการยาง. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] Alchymist'53. 2558. อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน. [Online]. Available : [http://pumpchimpalee.blogspot.com/2011/07/blog-post\\_21.html](http://pumpchimpalee.blogspot.com/2011/07/blog-post_21.html).
- [4] สถาบันรับรองมาตรฐานไอเอสโอ. 2557. Commission Regulation (EU) No 1272/2013. [Online]. Available : [http://www.masci.or.th/intelligence/standardregulation\\_list\\_detail.php?IndustryID=6&StandardregulationID=531](http://www.masci.or.th/intelligence/standardregulation_list_detail.php?IndustryID=6&StandardregulationID=531).
- [5] Google. 2015. น้ำมันพืช (Vegetable Oil). [Online]. Available : <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:vfnigidGavlsJ:hot.muslimthaipost.com/news/7628/+&cd=2&hl=th&ct=clnk&gl=th>.
- [6] Yokohamathailand. 2557. Yokohama-Earth1. [Online]. Available : <http://www.Yokohamathailand.com/Yokohama-Earth1.html>.
- [7] Google. 2558. Carbon Black Structure. [Online]. Available : <http://bekbiochar.pbworks.com/f/1276665510/Black-Carbon-Structures.jpg>.
- [8] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2548. สารเคมียาง. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) : 89-92.
- [9] Stéphane, M. 2007. Surface Structure of Silica Gel, Dry and Hydrated. [Online]. Available : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic\\_silica\\_gel\\_Surface.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_silica_gel_Surface.png).
- [10] พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. ปัตตานี : ภาควิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [11] Google. 2558. Plasticizer in Polymer. [Online]. Available : [http://cdn.iopscience.com/images/17585090/7/1/015002/Full/bf505929f8\\_online.jpg](http://cdn.iopscience.com/images/17585090/7/1/015002/Full/bf505929f8_online.jpg).
- [12] มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์. 2543. เคมีพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [13] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2557. น้ำมันปาล์ม. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1300/>
- [14] Scientificpsychic. 2014. Fats, Oils, Fatty Acids, Triglycerides. [Online]. Available : <http://www.scientificpsychic.com/fitness/fattyacids1.html>.
- [15] Ricebranoil.info. 2014. Rice Bran Oil. [Online]. Available : <http://www.ricebranoil.info/why/index.html>.
- [16] กรมวิชาการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2557. สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้มปี2557. [Online]. Available : [http://www.oae.go.th/ewt\\_news.php?nid=146](http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=146).

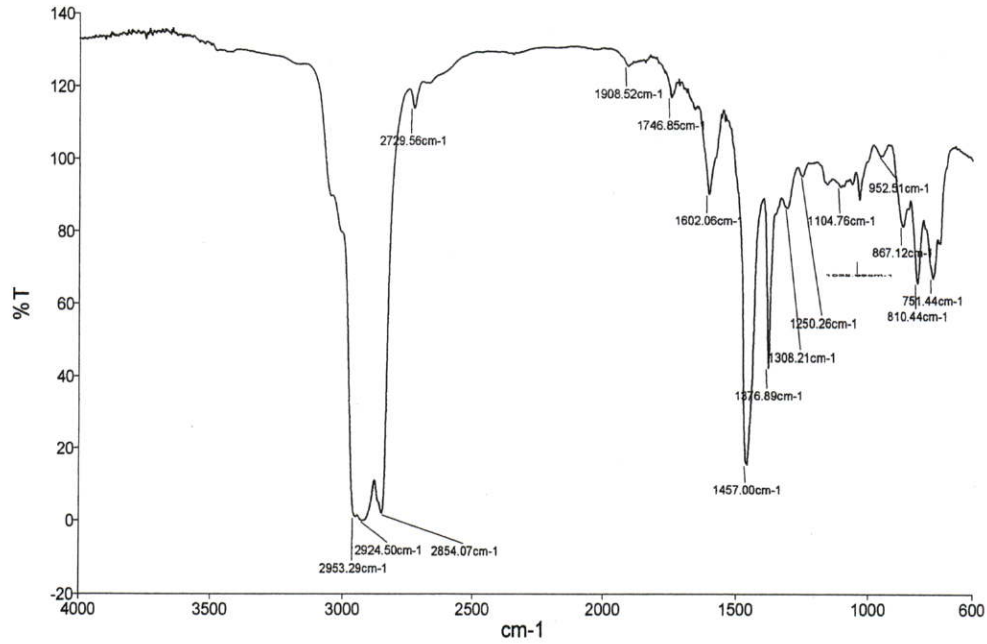
- [17] อรุษา สรวารี. 2539. สารเคลือบผิว (สี วาร์นิชและแล็กเกอร์). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [18] สถาบันอาหาร กระทรวงอุตสาหกรรม. 2558. สารตกค้างจากวัสดุและสิ่งของที่ใช้สัมผัสอาหาร: ESBO [Online]. Available : <http://fic.nfi.or.th/foodsafety/upload/damage/pdf/esbo.pdf>.
- [19] ช.วยากรณ์ เพ็ชฌุไพศิษฐ์. 2552. “นวัตกรรมใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมของน้ำมันธรรมชาติดีดแปรพอลิออลสำหรับการเตรียมพอลิยูรีเทนชีวภาพ” *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*. 12(2) : 66-74.
- [20] โครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชฯ. 2557. พืชน้ำมัน. [Online]. Available : [http://www.rspg.or.th/plants\\_data/use/oil-8.htm](http://www.rspg.or.th/plants_data/use/oil-8.htm).
- [21] กรีนไฮเปอร์มาร์ท. 2556. น้ำมันพืช. [Online]. Available : <http://www.sc.mahidol.ac.th/wiki/doku.php?id=%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%9E%E0%B8%B7%E0%B8%8A>.
- [22] guru.sanook. 2556. น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน. [Online]. Available : <http://guru.sanook.com/5879/>.
- [23] ดริญญา มุลชัย. 2553. “การใช้รำสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ.” หน้า 437-444. ใน การประชุมวิชาการ ประจำปี 2553. เชียงใหม่ : ศูนย์การศึกษาและฝึกอบรมนานาชาติ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [24] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2557. น้ำมันรำข้าว. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1527/rice-bran-oil%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%A3%E0%B8%B3%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A7>
- [25] จีระวัฒน์ พันธุ์นิตย์. 2547. “การใช้ไขมันเปลือกหุ้มเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เป็นสารช่วยในการแปรรูปในอุตสาหกรรมยาง” *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรังสิต*.
- [26] Voirin, C. Caillol, S. Sadavarte, N.V. Tawade, B.V. Boutevin, B. and Wadgaonkar, P.P. 2014. “Functionalization of Cardanol: Towards Biobased Polymers and Additives.” *Polym. Chem.* 5 : 3142–3162.
- [27] เสาวรจน ช่วยจุลจิตร. 2547. “การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินที่เตรียมจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์.” *รายงานวิจัยกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*
- [28] เศรษฐการ พรหมศิริ. 2553. “การพัฒนาสารเติมแต่งไฮบริดสำหรับป้องกันการเสื่อมสภาพยางจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และปิโตรเลียมเร็กซ์.” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- [29] วีรนุช สระแก้ว. 2546. “การศึกษาสารเติมแต่งในยางจากน้ำมันหอมระเหย : น้ำมันมะนาว น้ำมันส้ม น้ำมันมะกรูด.” *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.

- [30] Swewe. 2558. **Limonene**. [Online]. Available : [http://th.swewe.net/word\\_show.htm/?68207\\_1&Limonene](http://th.swewe.net/word_show.htm/?68207_1&Limonene)
- [31] Dgfett. 2557. **Physical Properties of Fats and Oils**. [Online]. Available : [http://www.dgfett.de/material/physikalische\\_eigenschaften.pdf](http://www.dgfett.de/material/physikalische_eigenschaften.pdf)
- [32] Kuriakose, A.P. and Rajendran, G. 1995. "Rice Bran Oil as a Novel Compounding Ingredient in Sulphur Vulcanization of Natural Rubber." *European Polymer Journal*. 31(6) : 595-602.
- [33] Ismail, H. and Anuar, H. 1998. "Palm Oil Fatty acid as an Activator in Carbon Black Filled Natural Rubber Compounds : Dynamic Properties, Curing Characteristics, Reversion and Fatigue Studies." *Polymer Testing*. 19(2000) : 349-359.
- [34] Jayewardhana, W.G.D. and Perera, G.M. 2007. "Study on Natural Oils as Alternative Processing Aids and Activators in Carbon Black filled Natural Rubber." *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*. 37(3) : 187-193.
- [35] Chandrasekara, G. and Mahanama, M.K. 2011. "Epoxidized Vegetable Oils as Processing Aids and Activators in Carbon Black filled Natural Rubber Compounds." *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*. 39(3) : 243-250.
- [36] Arayapranee, W. and Rempel, G.L. 2007. "Effects of Cashew Nut Shell Liquid as a Plasticizer on Cure Characteristics, Processability, and Mechanical Properties of 50 : 50 NR/EPDM Blends : A Comparison with Paraffin Oil." *Journal of Applied Polymer Science*. 106 : 2696-2702.
- [37] กรรณิการ์ สหกะโร และอัมบุวา ปือราเฮง. 2554. "การใช้น้ำมันปาล์มอีพอกซิไดซ์และน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซิไดซ์ทดแทนน้ำมันอะโรมาติกในสูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ในสารตัวเติมเขม่าดำ." *วิจัยยางพารา เล่มที่ 6* : 45-58.
- [38] ปิยวิทย์ เหล่าบ้านค้อ ไชยวัฒน์ รักสกุลพิวัฒน์ และเฉลิม เรืองวิริยะชัย. 2009. "ผลของน้ำมันเมล็ดสับปะรดที่มีต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางสไตรีน-บิวตาไดอิน และยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก." *วารสารวิจัย มข.* 14(11) : 1060-1071.
- [39] International Organization for Standardization. 1988. **ISO 177. Plastics-Determination of Migration of Plasticizers**. 2<sup>nd</sup>. Geneva : International Organization for Standardization.
- [40] Peter, A.C. and Hewitt, N. 1954. **The Rubber Formulary**. Second edition. Plastics Design Library. : NOYES Publications.
- [41] Meyer, P. 2008. "Epoxidation of Soybean Oil and Jatropha Oil." *Thammasat International Journal of Science and Technology*. 13 : 1-5.
- [42] Cynthia, F. Beyer, L. and Klekamp, D. 2013, 11 February. "Using Bio-Based Plasticizers, Alternative Rubber." **Rubber & Plastics News**. Pages 15-19.
- [43] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2532. **มอก.367. ยางรถยนต์ เล่ม 1 สมรรถนะที่ต้องการและการทดสอบ**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.

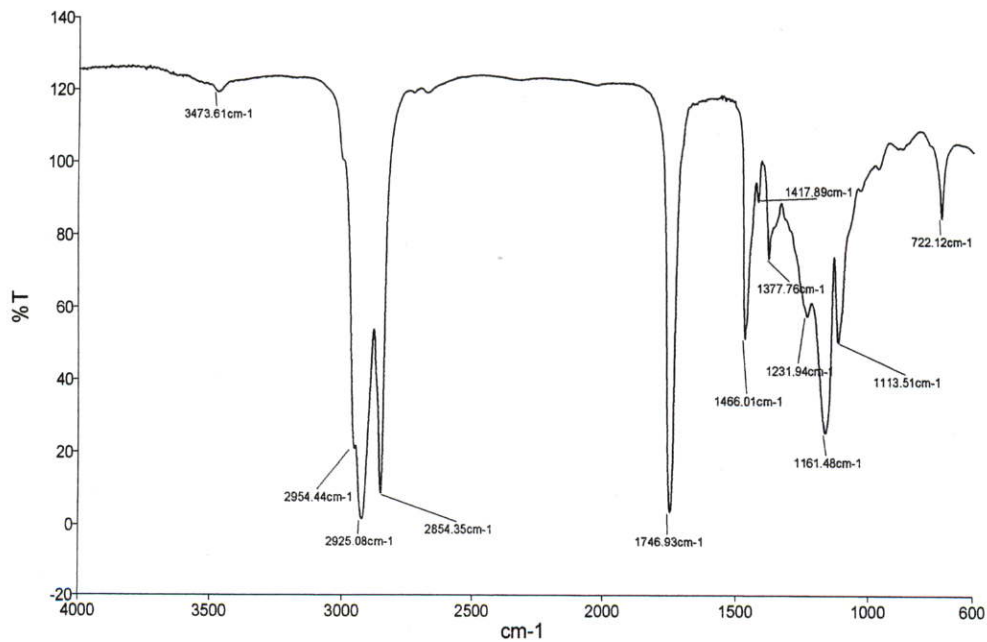
- [44] วีรยา วรคันธ์ ณรงค์ฤทธิ สมบัติสมภพ เอกชัย วิมลมาลา และศิรินทร ทองแสง. 2550. “การเสริมแรงของสารประกอบยางธรรมชาติด้วยซิลิกาผสมระหว่างถั่วลอและพรีซิพิเทตซิลิกา.” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 12(4) : 9-20
- [45] David, S. 2007. “Study of Cardanol as Antioxidant in Truck Tyre Tread in Place of TMQ.” Doctor of Polymer Science & Rubber Technology, Cochin University of Science & Technology.
- [46] ศิรินทร ทองแสง และณรงค์ฤทธิ สมบัติสมภพ 2007. “การเสริมแรงของยางธรรมชาติด้วยถั่วลอจากแหล่งต่างๆภายในประเทศ.” *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*. 14(1) : 77-89
- [47] Park, K. and Kim, G. 2008. “Improvement of Compression Set Property of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer/Ethylene-1-Butene Copolymer/Organoclay Nanocomposite Foams.” *Polymer Engineering and Science*. 48(6) : 1183-1190.
- [48] ณัฐวิษต์ งามวงศ์น้อย. 2554. “การปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติด้วยอนุภาคคาร์บอน-ฟออร์มัลดีไฮด์เรซิน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [49] Maiti, S. De, S.K. and Bhowmick, A.K. 1992. “Quantitative Estimation of Filler Distribution in Immiscible Rubber Blends by Mechanical Damping Studies.” *Rubber Chemistry and Technology*. 65(2) : 293-302.
- [50] Blow, C.M. and Hepburn, C. 1978. **Rubber Technology and Manufacture**. Second edition. Loughborough. : University of Technology.
- [51] Kundu, P.P. 2000. “Improvement of Filler–Rubber Interaction by the Coupling Action of Vegetable Oil in Carbon Black Reinforced Rubber.” *Journal of Applied Polymer Science*. 75(6) : 735–739.
- [52] Kundu, P.P. and Kukreja, T.R. 2002. “Surface Modification of Carbon Black by Vegetable Oil—Its Effect on the Rheometric, Hardness, Abrasion, Rebound Resilience, Tensile, Tear, and Adhesion Properties.” *Journal of Applied Polymer Science*. 84(2) : 256–260.
- [53] European Tyre and Rubber Manufacturers’ Association. 2010. **Replacement of Highly Aromatic Oils in Tyres**. [Online]. Available : <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20100712-etrma-qanda---replacement-of-ha-oils-in-tyres.pdf>.
- [54] Petchkaew, A. 2015. “Implications of Non- Carcinogenic PAH-Free Extender Oils in Natural Rubber Based Tire Compounds.” Doctor of Philosophy thesis, University of Twente.
- [55] FAO/WHO. 2006. **Safety Evaluation of Certain Contaminants in Food**. [Online]. Available : <https://books.google.co.th/books?id=qJwX5gqcbf0C&pg=PA644&dq=pah+in+oils&hl=th&sa=X&ved=0CDAOUwUwAmoVChMI3pjO67SkxwIVCnGOCh1xWAYC#v=onepage&q=pah%20in%20oils&f=false>

ภาคผนวก

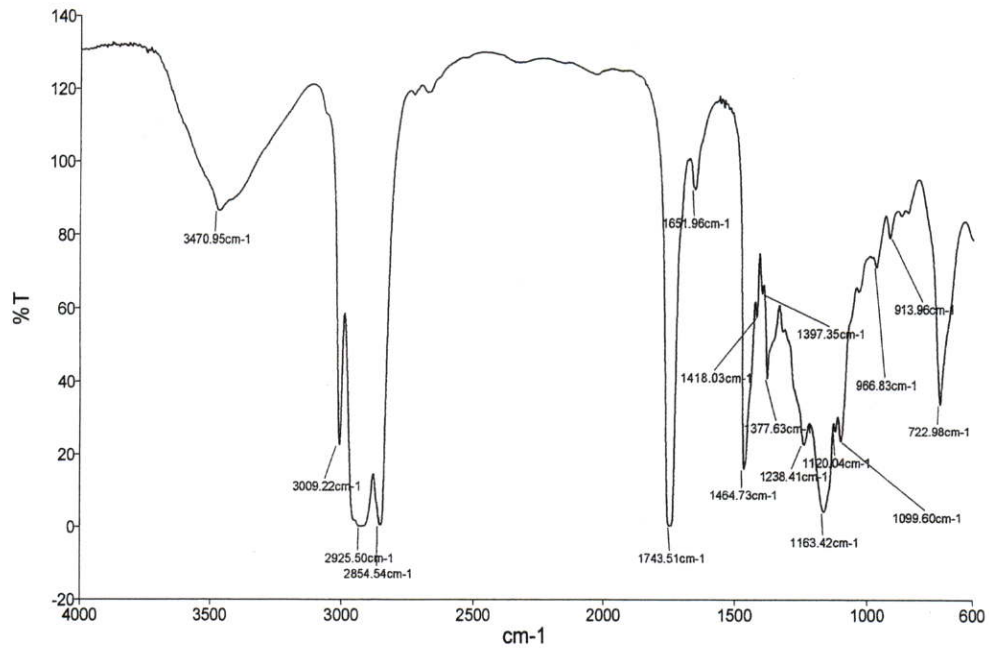
## ภาคผนวก ก การศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมัน



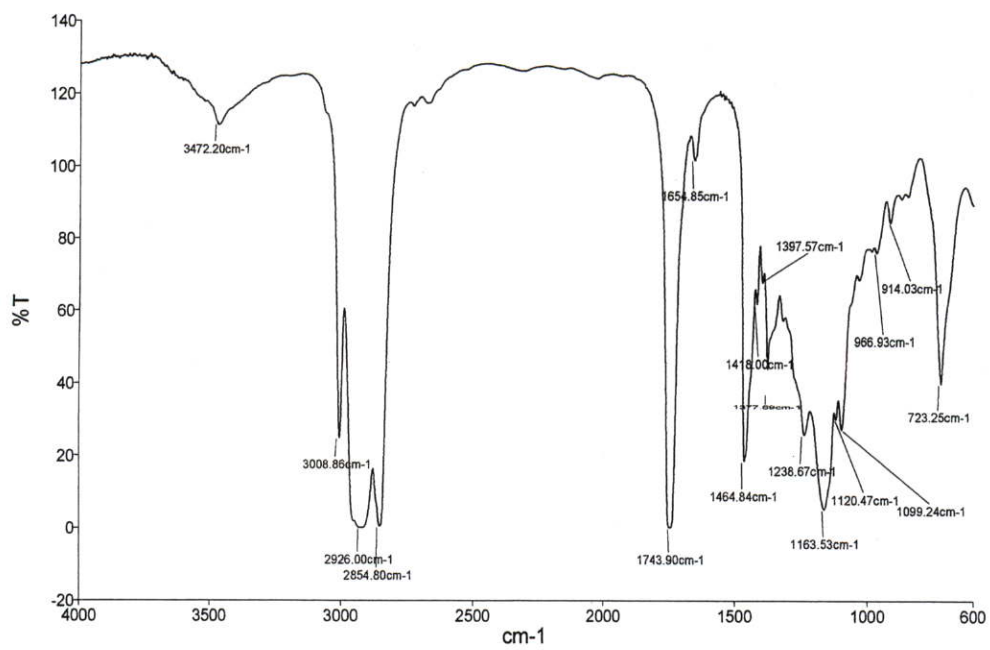
รูปที่ ก.1 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์โดย Infrared Spectrophotometer ของน้ำมันอะโรมาติก



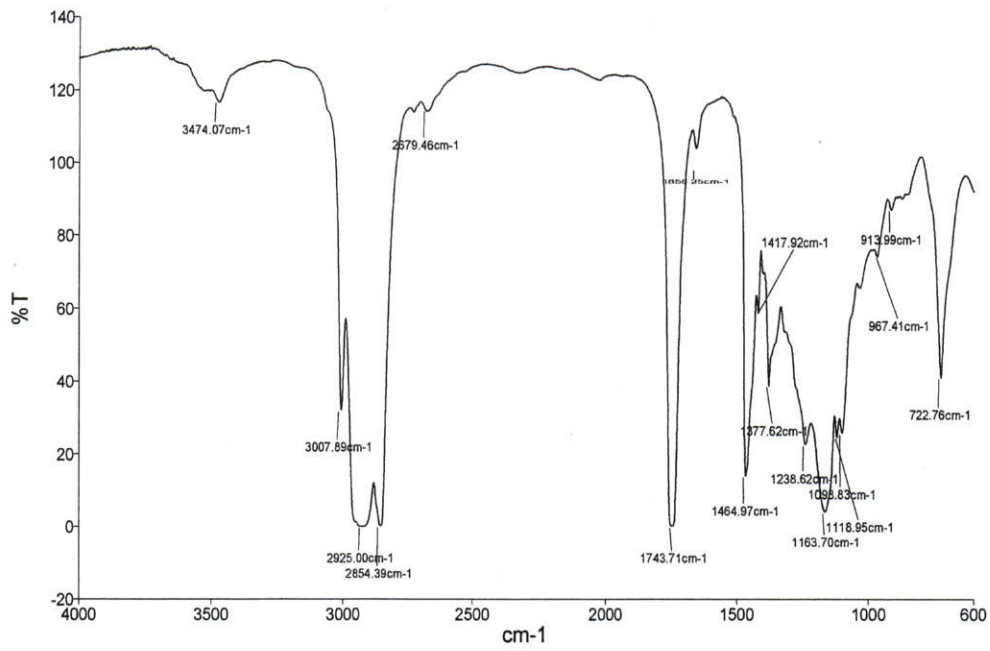
รูปที่ ก.2 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์โดย Infrared Spectrophotometer ของน้ำมันปาล์ม



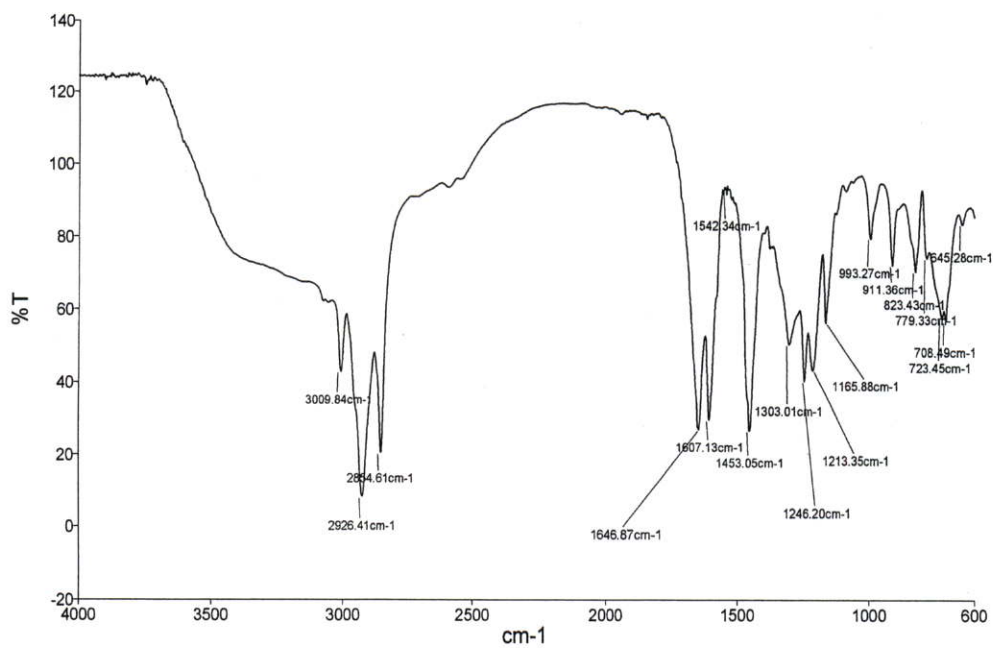
รูปที่ ก.3 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์โดย Infrared Spectrophotometer ของน้ำมันถั่วเหลือง



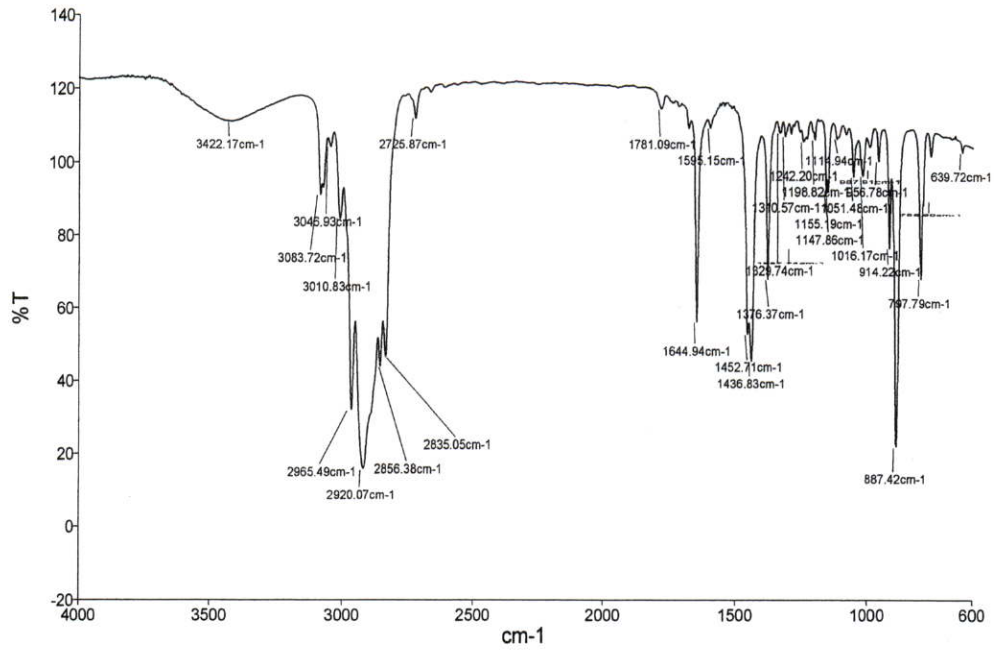
รูปที่ ก.4 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์โดย Infrared Spectrophotometer ของน้ำมันทานตะวัน



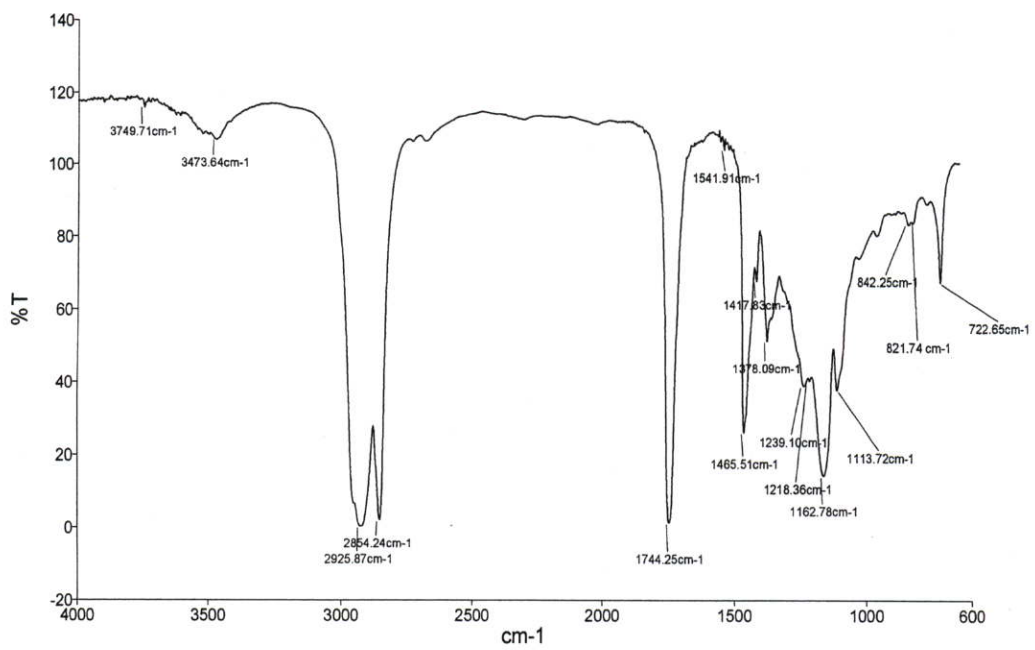
รูปที่ ก.5 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์โดย Infrared Spectrophotometer ของน้ำมันรำข้าว



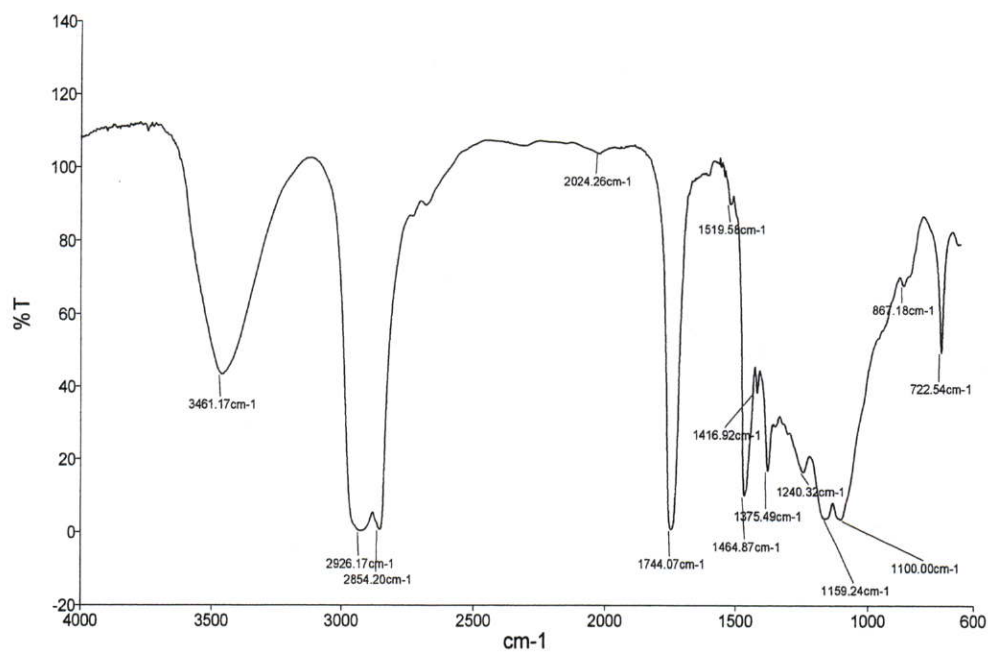
รูปที่ ก.6 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์โดย Infrared Spectrophotometer ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงหิมพานต์



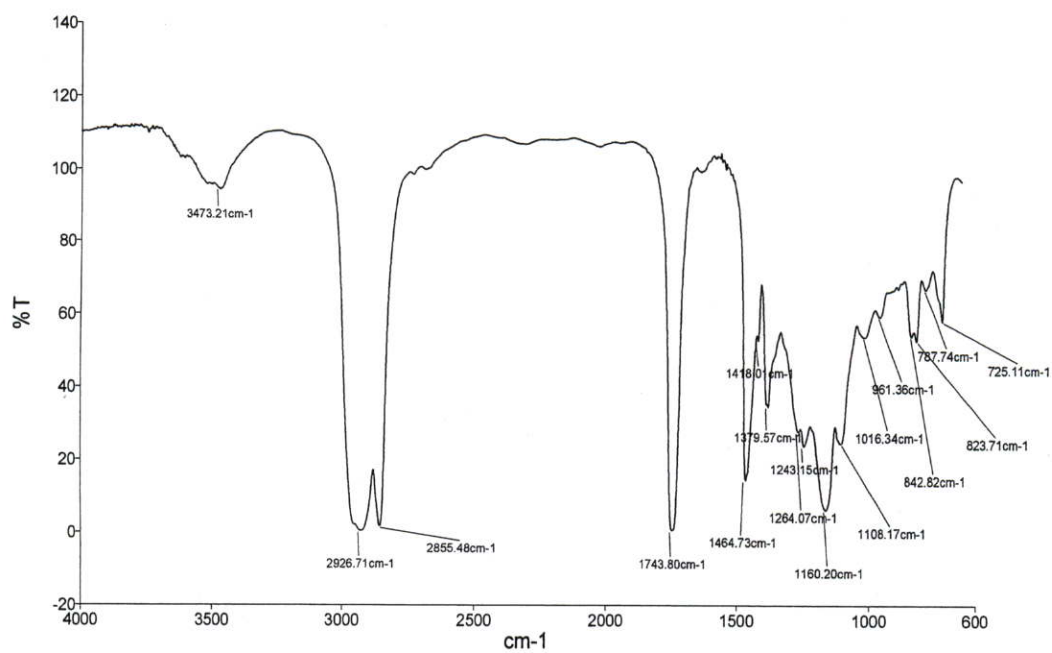
รูปที่ ก.7 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์โดย Infrared Spectrophotometer ของน้ำมันสั้ม



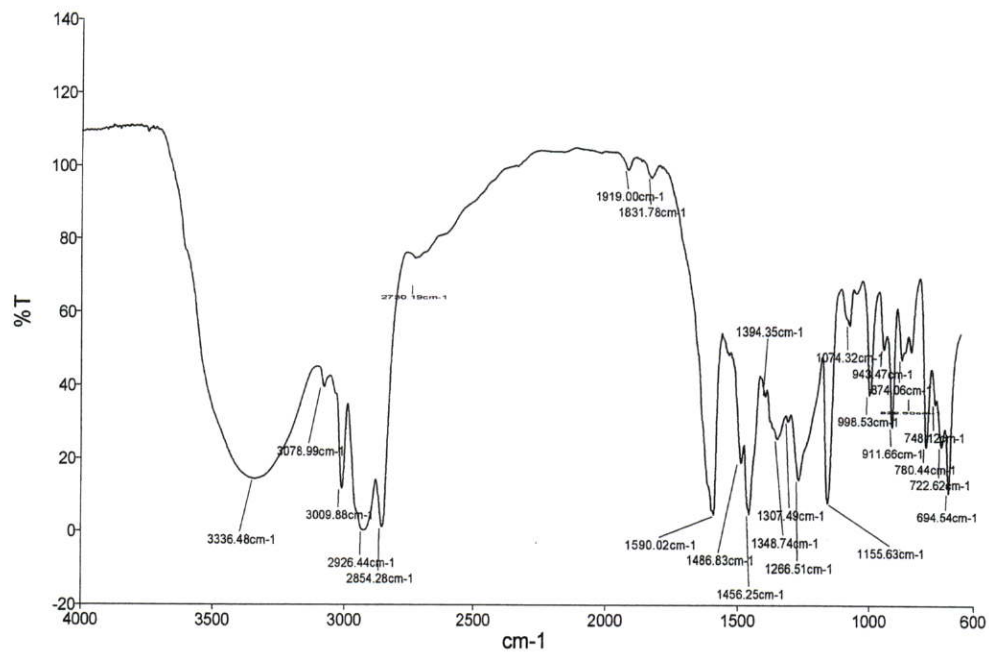
รูปที่ ก.8 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์โดย Infrared Spectrophotometer ของน้ำมันปาล์มตัดแปรรูปออกซิไดซ์



รูปที่ ก.9 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์โดย Infrared Spectrophotometer ของน้ำมันปาล์มตัดแปรรูป  
พอลิโออล



รูปที่ ก.10 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์โดย Infrared Spectrophotometer ของน้ำมันถั่วเหลือง  
ตัดแปรรูปออกซิไดซ์



รูปที่ ก.11 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์โดย Infrared Spectrophotometer ของน้ำมันเมทิลเมทาครีเลต  
หิมพานต์ดีดแปร์ดีคาร์บอกซิเลต

**ภาคผนวก ข**  
**การทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล**

ตารางที่ ข-1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ในการศึกษาชนิดของน้ำมันพืช

สูตร	ความหนืด มูนี (Mooney viscosity) (ML1+4 (100°C))	ความ ถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	ร้อยละการ บวมตัว (%Swelling)	การแพร่ออก ของน้ำมัน (Bleeding) (g.)	ความแข็งกด (Hardness) (Shore A)	100% มอดูลัส (M100) (MPa)	300% มอดูลัส (M300) (MPa)	ความ แข็งแรงดึง (Tensile strength) (MPa)	ร้อยละการยืด จน จุดขาด (%Elongation at break)	ความ แข็งแรง ฉีกขาด (Tear strength) (kN/m)
NOSi <sub>6</sub> PEG	77.1 ± 0.0	1.14 ± 0.02	170 ± 0.7	0.05 ± 0.00	66.3 ± 2.0	2.3 ± 0.4	7.8 ± 0.6	26.9 ± 0.6	661 ± 22.6	83.7 ± 8.8
AOSi <sub>6</sub> PEG	69.4 ± 0.0	1.15 ± 0.00	167 ± 0.7	0.05 ± 0.01	62.8 ± 0.5	2.0 ± 0.2	6.7 ± 0.4	26.1 ± 1.0	672 ± 30.6	93.2 ± 3.9
POSi <sub>6</sub> PEG	66.2 ± 0.0	1.15 ± 0.00	177 ± 1.4	0.05 ± 0.00	63.6 ± 0.6	1.9 ± 0.1	6.5 ± 0.2	24.8 ± 0.8	656 ± 14.3	94.3 ± 4.0
SBOSi <sub>6</sub> PEG	67.7 ± 0.0	1.15 ± 0.00	183 ± 0.6	0.05 ± 0.00	63.2 ± 1.2	1.7 ± 0.2	5.5 ± 0.5	24.9 ± 0.6	711 ± 26.5	94.9 ± 5.9
SFOSi <sub>6</sub> PEG	64.4 ± 0.0	1.15 ± 0.00	185 ± 0.9	0.05 ± 0.00	62.9 ± 0.7	1.8 ± 0.1	5.9 ± 0.4	24.6 ± 1.4	678 ± 46.4	95.6 ± 8.9
RBOSi <sub>6</sub> PEG	67.0 ± 0.0	1.15 ± 0.01	173 ± 0.7	0.05 ± 0.00	62.3 ± 0.8	2.0 ± 0.2	6.6 ± 0.5	27.3 ± 0.4	708 ± 31.3	94.7 ± 8.5
CNSLSi <sub>6</sub> PEG	62.7 ± 0.0	1.15 ± 0.00	169 ± 1.7	0.05 ± 0.00	63.0 ± 0.3	2.0 ± 0.0	7.0 ± 0.3	25.4 ± 2.1	663 ± 53.2	102.9 ± 4.4
OOSi <sub>6</sub> PEG	67.2 ± 0.0	1.15 ± 0.01	175 ± 1.3	0.07 ± 0.00	63.6 ± 1.7	2.3 ± 0.1	7.5 ± 0.2	27.6 ± 0.6	674 ± 18.1	100.8 ± 9.9

หมายเหตุ : ในตารางแสดง ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข-2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ในการศึกษาการผสมซิลิกาและการเติม PEG

สูตร	ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) (ML1+4 (100°C))	ร้อยละการบวมตัว (%Swelling)	ความแข็งกด (Hardness) (Shore A)	100% มอดุลัส (M100) (MPa)	300% มอดุลัส (M300) (MPa)	ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) (MPa)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)	ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) (kN/m)
POS <sub>10</sub> PEG <sup>1</sup>	32.4 ± 0.0	179 ± 1.7	62.6 ± 0.3	1.8 ± 0.1	5.9 ± 0.3	27.4 ± 0.5	742 ± 19.4	97.8 ± 15.8
POS <sub>10</sub> PEG <sup>1</sup>	35.0 ± 0.0	177 ± 1.4	60.5 ± 1.1	1.9 ± 0.1	6.9 ± 0.3	25.9 ± 0.7	648 ± 18.0	118.4 ± 10.5
POS <sub>10</sub> WPEG <sup>1</sup>	46.3 ± 0.0	203 ± 1.3	56.0 ± 0.8	1.3 ± 0.1	5.1 ± 0.4	19.2 ± 0.6	617 ± 25.1	85.8 ± 3.1
POS <sub>10</sub> WPEG <sup>1</sup>	44.8 ± 0.0	200 ± 1.2	58.2 ± 0.8	1.4 ± 0.0	4.9 ± 0.2	19.1 ± 1.1	626 ± 29.6	83.8 ± 7.5

หมายเหตุ : ในตารางแสดง ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

<sup>1</sup> ใช้เครื่อง Brabender Plasticorder ในการทดสอบยาง

ตารางที่ ข-3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ในการศึกษาชนิดของน้ำมันพืชตัดแปร

สูตร	ความหนืด มูนี (Mooney viscosity) (ML1+4 (100°C))	ความ ถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	ร้อยละการ บวมตัว (%Swelling)	การแพร่ออก ของน้ำมัน (Bleeding) (g.)	ความแข็งกด (Hardness) (Shore A)	100% มอดุลัส (M100) (MPa)	300% มอดุลัส (M300) (MPa)	ความ แข็งแรงดึง (Tensile strength) (MPa)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)	ความ แข็งแรง ฉีกขาด (Tear strength) (kN/m)
POSi <sub>ig</sub> PEG	66.2 ± 0.0	1.15 ± 0.00	177 ± 1.4	0.05 ± 0.00	63.6 ± 0.6	1.9 ± 0.1	6.5 ± 0.2	24.8 ± 0.8	656 ± 14.3	94.3 ± 4.0
EPOSi <sub>ig</sub> PEG	74.0 ± 1.1	1.14 ± 0.01	195 ± 4.6	0.06 ± 0.00	65.0 ± 1.2	2.1 ± 0.1	6.2 ± 0.3	25.8 ± 1.1	698 ± 31.8	90.4 ± 3.0
PPOSi <sub>ig</sub> PEG	77.5 ± 2.9	1.15 ± 0.00	194 ± 2.6	0.07 ± 0.00	65.5 ± 0.8	2.1 ± 0.1	6.2 ± 0.3	25.4 ± 1.0	692 ± 35.2	84.4 ± 7.9
SBOSi <sub>ig</sub> PEG	67.7 ± 0.0	1.15 ± 0.00	183 ± 0.6	0.05 ± 0.00	63.2 ± 1.2	1.7 ± 0.2	5.5 ± 0.5	24.9 ± 0.6	711 ± 26.5	94.9 ± 5.9
ESBOSi <sub>ig</sub> PEG	71.6 ± 0.8	1.15 ± 0.00	206 ± 2.2	0.06 ± 0.00	64.3 ± 0.7	1.9 ± 0.1	5.6 ± 0.2	25.7 ± 0.6	725 ± 25.9	85.2 ± 11.2
CNSLSi <sub>ig</sub> PEG	62.7 ± 0.0	1.15 ± 0.00	169 ± 1.7	0.05 ± 0.00	63.0 ± 0.3	2.0 ± 0.0	7.0 ± 0.3	25.4 ± 2.1	663 ± 53.2	102.9 ± 4.4
DCNSLSi <sub>ig</sub> PEG	69.1 ± 0.0	1.15 ± 0.00	199 ± 1.7	0.06 ± 0.00	61.3 ± 0.2	1.9 ± 0.1	6.0 ± 0.1	25.6 ± 0.2	707 ± 21.7	94.8 ± 8.2

หมายเหตุ : ในตารางแสดง ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข-3 (ต่อ) สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ในการศึกษาชนิดของน้ำมันพืชดัดแปร

สูตร	การกระดอน (Rebound resilience) (%)	ความร้อนสะสมในยาง (Heat build-up) (°C)	การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set) (%)	ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion) (cm <sup>3</sup> /1,000 cycles)
POSi <sub>g</sub> PEG	69.2 ± 0.9	11 ± 0.6	63.4 ± 0.4	0.35 ± 0.00
EPOSi <sub>g</sub> PEG	64.2 ± 1.7	12 ± 1.3	52.3 ± 0.3	0.44 ± 0.02
PPOSi <sub>g</sub> PEG	64.3 ± 1.8	13 ± 0.8	54.5 ± 0.5	0.47 ± 0.00
SBOSi <sub>g</sub> PEG	67.4 ± 0.3	12 ± 0.6	61.9 ± 0.4	0.39 ± 0.00
ESBOSi <sub>g</sub> PEG	65.3 ± 1.7	13 ± 0.8	54.9 ± 1.5	0.47 ± 0.01
CNSLSi <sub>g</sub> PEG	63.8 ± 0.6	13 ± 0.6	52.9 ± 0.1	0.35 ± 0.01
DCNSLSi <sub>g</sub> PEG	67.9 ± 0.7	11 ± 0.6	68.4 ± 0.2	0.41 ± 0.00

หมายเหตุ : ในตารางแสดง ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข-4 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ในการศึกษาชนิดของสารตัวเติม

สูตร	ความหนืด มูนี (Mooney viscosity) (ML1+4 (100°C))	ความ ถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	ร้อยละการ บวมตัว (%Swelling)	การแพร่ออก ของน้ำมัน (Bleeding) (g.)	ความแข็งกด (Hardness) (Shore A)	100% มอดุลัส (M100) (MPa)	300% มอดุลัส (M300) (MPa)	ความ แข็งแรงดึง (Tensile strength) (MPa)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)	ความ แข็งแรง ฉีกขาด (Tear strength) (kN/m)
NOSi <sub>6</sub> PEG	77.1 ± 0.0	1.14 ± 0.02	170 ± 0.7	0.05 ± 0.00	66.3 ± 2.0	2.3 ± 0.4	7.8 ± 0.6	26.9 ± 0.6	661 ± 22.6	83.7 ± 8.8
POSi <sub>6</sub> PEG	66.2 ± 0.0	1.15 ± 0.00	177 ± 1.4	0.05 ± 0.00	63.6 ± 0.6	1.9 ± 0.1	6.5 ± 0.2	24.8 ± 0.8	656 ± 14.3	94.3 ± 4.0
EPOSi <sub>6</sub> PEG	74.0 ± 1.1	1.14 ± 0.01	195 ± 4.6	0.06 ± 0.00	65.0 ± 1.2	2.1 ± 0.1	6.2 ± 0.3	25.8 ± 1.1	698 ± 31.8	90.4 ± 3.0
NOCB	74.0 ± 1.1	1.13 ± 0.01	153 ± 1.2	0.03 ± 0.00	67.9 ± 1.3	4.1 ± 0.2	17.6 ± 0.6	27.7 ± 1.1	453 ± 13.4	84.6 ± 17.5
POCB	70.6 ± 0.6	1.12 ± 0.00	157 ± 1.5	0.03 ± 0.00	66.2 ± 1.1	3.6 ± 0.2	15.3 ± 0.5	27.9 ± 0.7	501 ± 18.6	97.1 ± 13.4
EPOCB	77.5 ± 2.9	1.12 ± 0.01	156 ± 0.6	0.03 ± 0.00	66.2 ± 0.7	3.4 ± 0.2	14.3 ± 0.6	27.4 ± 1.2	514 ± 20.4	94.9 ± 21.0

หมายเหตุ : ในตารางแสดง ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข-4 (ต่อ) สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ในการศึกษาชนิดของสารตัวเติม

สูตร	การกระดอน (Rebound resilience) (%)	ความร้อนสะสมในยาง (Heat build-up) (°C)	การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set) (%)	ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion) (cm <sup>3</sup> /1,000 cycles)
NOSi <sub>6</sub> PEG	63.5 ± 0.6	13 ± 0.6	51.5 ± 0.2	0.40 ± 0.00
POSi <sub>6</sub> PEG	69.2 ± 0.9	11 ± 0.6	63.4 ± 0.4	0.35 ± 0.00
EPOSi <sub>6</sub> PEG	64.2 ± 1.7	12 ± 1.3	52.3 ± 0.3	0.44 ± 0.02
NOCB	63.7 ± 1.0	14 ± 1.5	32.2 ± 2.0	0.17 ± 0.01
POCB	64.7 ± 1.7	13 ± 0.8	35.0 ± 1.7	0.15 ± 0.01
EPOCB	63.3 ± 2.0	14 ± 0.4	33.5 ± 2.5	0.19 ± 0.02

หมายเหตุ : ในตารางแสดง ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ภาคผนวก ค

### นิยามศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย [2, 9]

1. ยางผสมสูตรหรือยางคอมพาวด์ (Rubber compound) หมายถึง ยางดิบที่ผสมสารเติมแต่ง (Additive) ต่างๆ เช่น สารเชื่อมโยง สารกระตุ้น สารเร่ง สารตัวเติม ฯลฯ
2. การเชื่อมโยงยาง (Rubber vulcanization) หมายถึง กระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนโครงสร้างยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ บางครั้งอาจเรียกว่าการทำให้ยางสุก (Curing) หรือทำให้ยางคงรูป
3. สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) หมายถึง สารที่ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์
4. สารคู่ควบ (Coupling agent) หมายถึง สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารเสริมแรงประเภทซิลิกาให้มีแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มสูงขึ้น โดยหมู่อัลคอกซิบนสารคู่ควบจะทำปฏิกิริยาเคมีกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาเกิดเป็นพันธะไฮดรอกซิลที่เสถียร ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลลดลง อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาจึงลดลงด้วย ตัวอย่างของสารคู่ควบ ได้แก่ ไทโรเททอกซีไซลิลโพรพิลเททระซิลไฟด์ (Si-69<sup>®</sup>)
5. สารตัวเติม (Filler) หมายถึง สารเคมีที่ใส่ลงในยางเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆของยาง (Property enhancement) และเพื่อช่วยกระบวนการผลิต (Processability) ให้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ง่ายขึ้น
6. ยางแท่ง (Block rubber) หมายถึง ยางธรรมชาติที่ผลิตจากน้ำยางสดและยางแห้งที่จับตัวแล้ว ตัดย่อยก้อนยางให้เป็นเม็ดเล็กๆ ล้างยางด้วยน้ำสะอาด อบให้แห้งแล้วปล่อยให้เย็นตัว จึงอัดเป็นก้อนหรือแท่งสี่เหลี่ยมหน้าหนาแท่งละ 33.3 กิโลกรัม ขนาด 33 x 670 x 170 มิลลิเมตร โดยมีการควบคุมคุณภาพ
7. การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set) หมายถึง ความสามารถในการคืนตัวของยางหลังถูกอัดไว้ตามระยะเวลาและสภาวะที่กำหนด โดยทั่วไปการรายงานค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดจะรายงานในหน่วยร้อยละ ซึ่งบอกให้ทราบถึงปริมาณร้อยละซึ่งขึ้นทดสอบยางขนาดมาตรฐานไม่สามารถคืนสู่รูปเดิม (ความหนา) หลังปล่อยจากแรงอัด
8. การกระดอน (Rebound resilience) หมายถึง ความสามารถในการกลับคืนสู่รูปร่างตั้งต้นได้อย่างรวดเร็วภายหลังจากที่ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างชั่วคราว
9. ความร้อนสะสมในยาง (Heat build-up) หมายถึง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ยางเนื่องจากการสะสมความร้อนของผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่และหนาที่ใช้งานในเชิงพลวัต (Dynamic)
10. phr (part per hundred of rubber) หมายถึง ส่วนในยางหนึ่งร้อยส่วน

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวภทรีญา เอื้อสว่างพร
วัน เดือน ปีเกิด	26 ธันวาคม 2522
ที่อยู่ปัจจุบัน	239/6 หมู่ 2 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ. 2545 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา เคมี เกรดเฉลี่ย 2.18 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	งบพิเศษการค้นคว้าวิจัย สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวง เกษตรและสหกรณ์
ผลงานทางวิชาการ	“Study of Vegetable Oils as Bioadditives for Natural Rubber” PETROMAT and PPC SYM 2015. 531-537