

น้ำมันชีวภาพชนิดใหม่จากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปร
สำหรับยางธรรมชาติ

NEW BIO-BASED OILS FROM MODIFIED CASHEW NUT SHELL
LIQUID FOR NATURAL RUBBER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-014-030

น้ำมันชีวภาพชนิดใหม่จากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปร
สำหรับยางธรรมชาติ

NEW BIO-BASED OILS FROM MODIFIED CASHEW NUT SHELL
LIQUID FOR NATURAL RUBBER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-014-030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NEW BIO-BASED OILS FROM MODIFIED CASHEW NUT SHELL
LIQUID FOR NATURAL RUBBER



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
2017

KMITL-2017-SC-M-014-030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “น้ำมันชีวภาพชนิดใหม่จากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปรสำหรับยางธรรมชาติ”
“NEW BIO-BASED OILS FROM MODIFIED CASHEW NUT SHELL LIQUID FOR NATURAL RUBBER”

ชื่อนักศึกษา นางสาวสุพรรณภางศ์ รักษาวงศ์
รหัสประจำตัว 57605054
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มจัต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทราวุธ มนต์วีเศษ ประธานกรรมการ	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง)	
รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ ธนะวันต์ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ	
รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มจัต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ พุทธศักราชที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ.2560 เวลา 09.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 301 อาคารพระจอมเกล้า

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศษณ ธนะวันต์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 19 เดือน ๗ พ.ศ. 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	น้ำมันชีวภาพชนิดใหม่จากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ตัดแปรสำหรับยางธรรมชาติ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสุพรรณางค์ รักษาวงศ์
รหัสประจำตัว	57605054
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ไขมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) ตัดแปรเป็นสารเติมแต่งชีวภาพสำหรับยางธรรมชาติ (NR) โดยศึกษาแนวเปรียบเทียบกับคาร์ดานอล (C) น้ำมันพาราฟิน และน้ำมันอะโรมาติก (AO) ในตอนแรกเป็นการตัดแปร CNSL ด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 160°C เวลา 30 นาที ได้น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดีคาร์บอกซิเลต (DCNSL) ที่มีปริมาณคาร์ดานอลสูงสุด จากนั้นเตรียมคาร์ดานอลอีพอกไซด์ (EC) และน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดีคาร์บอกซิเลตอีพอกไซด์ (EDCNSL) จากการทำปฏิกิริยากับกรดเปอร์ออกซิติกโดยมี Amberlite® IR-120H เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า EDCNSL และ EC ที่เตรียมได้มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์แตกต่างกัน จากนั้นผสมยางและสารเติมแต่งต่าง ๆ ด้วยเครื่องผสมระบบปิดและขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของยาง ได้แก่ ชนิดและปริมาณน้ำมันตัดแปร พบว่า CNSL ตัดแปรสามารถใช้เป็นน้ำมันยางได้ เนื่องจากทำให้ยางคอมพาวด์มีค่าแรงบิดที่ใช้ในการผสมและความหนืดมูนนี้ใกล้เคียงกับการใช้ AO ทั้งยังไม่ส่งผลต่อเวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{s2}) และเวลาในการเชื่อมโยง (t_{c90}) อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ CNSL ตัดแปร 10 phr ทำให้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงต่ำกว่าเมื่อใช้ CNSL ตัดแปร 5 phr เนื่องจากกัมมะถันบางส่วนถูกใช้ในการเชื่อมโยงระหว่างพันธะไม่อิ่มตัวของหมู่ข้างเคียงของน้ำมันและยาง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง ส่วนการใช้ไขมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 phr ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น DCNSL จึงสามารถใช้แทน AO ได้ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ CNSL ตัดแปรสามารถปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มเร่งได้ เนื่องจากโครงสร้างเป็นสารประกอบฟีนอลิกจึงสามารถทำหน้าที่เป็นสารจับอนุมูลอิสระได้ โดยการใช้ EC หรือ EDCNSL สามารถปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มเร่งของยางได้ดีกว่าการใช้ C หรือ DCNSL ทั้งนี้เป็นผลมาจากการแทนที่พันธะไม่อิ่มตัวบางส่วนด้วยหมู่อีพอกไซด์ จากการศึกษาการใช้ไขมันชนิดต่าง ๆ สำหรับการผสมยาง พบว่ายางที่เติม EC ปรับปรุงสมบัติการรับแรงดึงหลังการบ่มเร่งได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับยางที่เติม AO ร่วมกับ Wingstay® L โดยยางที่เติม Wingstay® L ร่วมกับ EC ปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มเร่งได้ดีที่สุด

คำสำคัญ : น้ำมันชีวภาพ น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตัดแปร ยางธรรมชาติ สารต้านการเกิดออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	New Bio-based oils from Modified Cashew Nut Shell Liquid for Natural Rubber
Student Name	Miss Supunnapang Raksawong
Student ID	57605054
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud

Abstract

In this work, modified cashew nut shell liquids (CNSLs) were studied as bio-additives for natural rubber (NR) and were comparatively studied with cardanol (C), paraffinic oil and aromatic oil (AO). First, CNSL was decarboxylated at 160°C for 30 min yielding decarboxylated CNSL (DCNSL) with the highest % cardanol. Then, epoxidized cardanol (EC) and epoxidized DCNSL (EDCNSL) were prepared by reacting with peracetic acid in the presence of Amberlite® IR-120H catalyst. It was revealed that the prepared EDCNSL and EC were significantly different in epoxy content. Next, NR and other additives were mixing in an internal mixer and shaped by compression molding machine. Factors effecting rubber properties were investigated including types and loading of modified CNSLs. It was found that modified CNSLs could be used as rubber oil because NR with modified CNSLs had torque during mixing and Mooney viscosity closed to AO, also no effect to t_{s2} and t_{c90} . However, NR with modified CNSLs 10 phr showed crosslink density lower than those with modified CNSLs 5 phr. This is because some sulfur performed crosslinking between unsaturated side chain of oil and rubber, resulting in poor mechanical properties. Since mechanical properties of NR with 5 phr of each rubber oil were insignificantly different, DCNSL could be replaced AO due to the same production cost. Furthermore, modified CNSLs showed improvement in aging properties of rubber because their phenolic structures acted as radical scavengers. NR with EC or EDCNSL gave aging properties better than that with C or DCNSL caused by the partial replacement of epoxy group on unsaturated side chain. Among rubber oils NR with EC showed the best improvement in tensile properties after aging. Their tensile properties after aging could reach those values of NR with the combination of AO and Wingstay® L. Moreover, the best tensile properties of NR after aging were achieved when using EC with Wingstay® L.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keywords : Bio-based Oil, Cashew Nut Shell Liquid (CNSL), Modified Cashew Nut Shell Liquid, Natural Rubber, Antioxidant



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัต อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมบัติ ธนะวันต์ อาจารย์ประจำศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ประจำอาคารปฏิบัติการพอลิเมอร์ รวมทั้งคุณขวัญใจ พูลสวัสดิ์ ที่อำนวยความสะดวกในการเบิกอุปกรณ์รวมทั้งแนะนำการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนอุดหนุนการศึกษาและทุนค่าครองชีพในระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนนำเสนองานทางวิชาการแบบโปสเตอร์ ในงานประชุมวิชาการพอลิเมอร์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 6 (PCT-6)

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลอื่น ๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวสุพรรณางค์ รักษาวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญคำย่อ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ยางธรรมชาติ.....	6
2.1.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ.....	6
2.1.2 องค์ประกอบของยางธรรมชาติ.....	6
2.1.3 สมบัติของยางธรรมชาติ.....	7
2.1.4 การเกิดผลึกของยางธรรมชาติ.....	8
2.2 สารตัวเติม.....	9
2.3 พลาสติกไฮเซออร์.....	11
2.3.1 กลไกการทำงานของพลาสติกไฮเซออร์.....	12
2.3.2 ประเภทของพลาสติกไฮเซออร์.....	14
2.4 สารช่วยกระบวนการผลิต.....	15
2.4.1 เปปไทเซออร์.....	15
2.4.2 สารทำให้เหนียวติด.....	15
2.4.3 แฟกทิส.....	16
2.4.4 สารหล่อลื่น.....	16
2.5 มะม่วงหิมพานต์.....	16
2.5.1 ลักษณะทั่วไปของมะม่วงหิมพานต์.....	16
2.5.2 น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์.....	17
2.5.2.1 การสกัดน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์.....	20
2.5.2.2 การใช้ประโยชน์น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์.....	20
2.6 ปฏิกริยาอ็อกซิเดชัน.....	21
2.6.1 รูปแบบการเกิดปฏิกริยาอ็อกซิเดชัน.....	22
2.6.2 การทดสอบการดำเนินไปของปฏิกริยาอ็อกซิเดชัน.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การผสมยาง.....	24
2.7.1 การออกสูตรเคมียาง.....	24
2.7.2 การผสมยาง.....	26
2.7.3 การตรวจสอบคุณภาพยางคอมพาวด์เบื้องต้น.....	27
2.7.4 การขึ้นรูปและเชื่อมโยงยาง.....	29
2.8 การเสื่อมสภาพของยาง.....	29
2.8.1 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	29
2.8.2 สารต้านการเกิดออกซิเดชัน.....	30
2.8.2.1 สารต้านการเกิดออกซิเดชันปฐมภูมิ.....	31
2.8.2.2 สารต้านการเกิดออกซิเดชันทุติยภูมิ.....	32
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 สารเคมี.....	37
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	39
3.3 วิธีการทดลอง.....	40
3.3.1 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมัน.....	41
3.3.2 การดัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน.....	41
3.3.3 การดัดแปรด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน.....	41
3.3.4 การทดสอบสมบัติน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปร.....	42
3.3.4.1 ค่าไอโอดีน (IV).....	42
3.3.4.2 ค่ากรด (AV).....	42
3.3.4.3 ค่าความถ่วงจำเพาะ.....	43
3.3.4.4 ค่าความหนืด.....	43
3.3.4.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR.....	43
3.3.4.6 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอลด้วยเทคนิค GC-MS.....	43
3.3.5 การผสมยาง.....	44
3.4 การทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์และยางเชื่อมโยง.....	45
3.4.1 การทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์.....	45
3.4.1.1 ลักษณะการเชื่อมโยง.....	45
3.4.1.2 ความหนืดมูนี่.....	45
3.4.1.3 การขึ้นรูปและเชื่อมโยงยาง.....	46
3.4.2 การทดสอบสมบัติของยางเชื่อมโยง.....	46
3.4.2.1 ร้อยละการบวมตัว.....	46
3.4.2.2 การแพร่ออกของน้ำมัน.....	46
3.4.2.3 ความแข็งกด.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2.4 สมบัติแรงดึง.....	47
3.4.2.5 สมบัติหลังการบ่มแรง.....	47
3.4.2.6 การยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัด.....	48
3.4.2.7 ความต้านทานต่อการขีดถู.....	48
3.4.2.8 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	50
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	51
4.1 ผลการตัดแปรโครงสร้าง CNSL.....	52
4.1.1 การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน.....	52
4.1.1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างน้ำมันด้วยเทคนิค FTIR.....	52
4.1.1.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอลด้วยเทคนิค GC-MS.....	54
4.1.2 การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน.....	55
4.1.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างน้ำมันด้วยเทคนิค FTIR.....	56
4.1.2.2 สมบัติบางประการของน้ำมันชนิดต่าง ๆ.....	57
4.2 ผลของน้ำมันต่อสมบัติของยาง.....	59
4.2.1 พลังงานที่ใช้ในการผสม.....	59
4.2.2 ลักษณะการเชื่อมโยง.....	61
4.2.3 ร้อยละการบวมตัว.....	63
4.2.4 ความหนืดมูนี้.....	65
4.2.5 การแพร่ออกของน้ำมัน.....	65
4.2.6 สมบัติเชิงกล.....	66
4.2.7 สมบัติหลังการบ่มแรง.....	70
4.2.8 สัณฐานวิทยา.....	74
4.3 ประสิทธิภาพของ CNSL ตัดแปรในการต้านการเกิดออกซิเดชัน.....	77
4.4 ต้นทุนการผลิต.....	82
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	83
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
เอกสารอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	96
ภาคผนวก ค.....	102
ภาคผนวก ง.....	105
ประวัติผู้เขียน.....	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบของน้ำยางสดและยางแห้งโดยทั่วไป..... 7
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของ CNSL และ Technical CNSL 19
2.3	สมบัติทางกายภาพของ CNSL และ Technical CNSL 19
2.4	สถานะการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของน้ำมันพืชแต่ละชนิด 36
3.1	สมบัติบางประการของคาร์ดานอล 37
3.2	สมบัติบางประการของ Amberlite® IR-120H 38
3.3	สถานะในการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน 41
3.4	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำมันอีพอกซิไดซ์แต่ละชนิด 42
3.5	สูตรยางที่ใช้ในการศึกษา 45
3.6	จำนวนรอบการหมุนสำหรับการ Running-in และการทดสอบจริง 49
4.1	อักษรย่อที่ใช้ในการวิจัย 51
4.2	แถบการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัมของ CNSL, C และ DCNSL ที่ผ่านการตัดแปรด้วย ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสถานะต่าง ๆ (แถบที่ 1-13 สอดคล้องตามรูปที่ 4.2) 53
4.3	แถบการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัมของ C, DCNSL, EC และ EDCNSL (แถบที่ 1-6 สอดคล้องตามรูปที่ 4.6) 56
4.4	สมบัติบางประการของน้ำมันชนิดต่าง ๆ 59
4.5	ค่าแรงบิดที่ใช้ในการผสมยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr 61
4.6	ค่า M_L , M_{HF} , t_{s2} , t_{c90} และ CRI ของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 phr 62
4.7	ค่า M_L , M_{HF} , t_{s2} , t_{c90} และ CRI ของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10 phr 63
4.8	ปริมาตรของยางที่สูญเสียเมื่อใช้น้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 phr 74
4.9	ต้นทุนการผลิต DCNSL 82
4.10	ต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางเมื่อใช้น้ำมัน AO และ DCNSL 82
ก-1	ความเข้มข้นของน้ำมันตัวอย่างที่เตรียมได้ 92
ก-2	พื้นที่ใต้พีคของสารมาตรฐานคาร์ดานอลความเข้มข้นต่าง ๆ และน้ำมันตัวอย่าง 93
ก-3	ปริมาณคาร์ดานอลในน้ำมันตัวอย่าง 94
ข-1	แรงบิดสุดท้ายที่ใช้ในการผสมยาง ร้อยละการบวมตัว ความหนืดมูนี้ และการแพร่ออก ของน้ำมัน 96
ข-2	ความแข็งกดยางก่อนการบ่มแรง หลังการบ่มแรง และร้อยละคงเหลือหลังการบ่มแรง . 97
ข-3	ความแข็งแรงดึงของยางก่อนการบ่มแรง หลังการบ่มแรง และร้อยละคงเหลือหลังการ บ่มแรง 98
ข-4	มอดูลัสที่ 100% ของยางก่อนการบ่มแรง หลังการบ่มแรง และร้อยละคงเหลือหลังการ บ่มแรง 99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-5	ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางก่อนการบ่มเร่ง หลังการบ่มเร่ง และร้อยละคงเหลือ หลังการบ่มเร่ง	100
ข-6	มอดูลัสที่ 300% ของยางก่อนการบ่มเร่ง และการยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัด.....	101
ง-1	ค่าตัวแปรการละลาย (δ) ของยางธรรมชาติและน้ำมันชนิดต่าง ๆ	105



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ปริมาณการผลิตยางธรรมชาติของประเทศต่าง ๆ ปี พ.ศ. 2550–2558	1
1.2	ข้อบังคับการติดฉลากยางรถยนต์	2
1.3	เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	3
2.1	โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ Cis-1,4-polyisoprene	6
2.2	ลักษณะโครงสร้างของซิลิกา	9
2.3	หมู่ฟังก์ชันเคมีที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกา	10
2.4	สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน (Si-69)	11
2.5	การทำปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบไซเลน (Si-69) กับซิลิกา	11
2.6	กระบวนการ Plasticization และ Antiplasticization ในพอลิเมอร์	13
2.7	ผลมะม่วงหิมพานต์	17
2.8	โครงสร้างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	17
2.9	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	18
2.10	องค์ประกอบทางเคมีของ CNSL	18
2.11	กลไกการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของ CNSL	19
2.12	กลไกการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันระหว่างยางธรรมชาติ กรดอะซิติก และไฮโดรเจน-เปอร์ออกไซด์	21
2.13	ปฏิกิริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ในยางธรรมชาติอีพอกซิโดซ์	22
2.14	การเกิดกรดเปอร์ออกซิอะซิติก จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดอะซิติกและไฮโดรเจน-เปอร์ออกไซด์ โดยมี Acidic ion exchange resin เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	23
2.15	วงออกไซเรน	24
2.16	แผนผังกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง	25
2.17	กราฟการเชื่อมโยงของยาง	28
2.18	กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลยาง	29
2.19	กลไกการทำงานของ Chain breaking antioxidants (AH)	31
3.1	แผนผังการเตรียมน้ำมัน CNSL ดัดแปร	40
3.2	การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน	41
3.3	การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน	42
3.4	แผนผังการใช้งานน้ำมันดัดแปรและการทดสอบสมบัติของยาง	44
3.5	ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ แบบ Die C	47
3.6	การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัด	48
3.7	การทดสอบความต้านทานต่อการขัดถูด้วยเครื่อง Akron abrasion tester	50
4.1	ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดอนาคาร์ดิก	52
4.2	อินฟราเรดสเปกตรัมของ CNSL, C และ DCNSL ที่ผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์- บอกซิเลชันสถานะต่าง ๆ	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 โครมาโทแกรม GC-MS ของสารมาตรฐานคาร์ดานอล, CNSL และ DCNSL ที่ผ่านการ ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสภาวะต่าง ๆ.....	54
4.4 ปริมาณคาร์ดานอลของ DCNSL ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสภาวะต่าง ๆ ...	55
4.5 ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของคาร์ดานอล.....	55
4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของ C, DCNSL, EC และ EDCNSL.....	56
4.7 ปฏิกิริยาการสลายตัวของวงอีพอกไซด์.....	57
4.8 โครงสร้างหมู่ข้างเคียงของ CNSL.....	57
4.9 ปฏิกิริยาโอลิโกเมโรเซชันของคาร์ดานอลภายใต้อุณหภูมิสูง (a) มีพันธะไม่อิ่มตัว 1 พันธะ และ (b) มีพันธะไม่อิ่มตัว 3 พันธะ.....	58
4.10 แรงบิดที่ใช้ในการผสมยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 phr.....	60
4.11 แรงบิดที่ใช้ในการผสมยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10 phr....	60
4.12 กราฟลักษณะการเชื่อมโยงของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 phr.....	61
4.13 กราฟลักษณะการเชื่อมโยงของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10 phr.....	62
4.14 ร้อยละการบวมตัวของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr.....	64
4.15 แบบจำลองการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางและ CNSL ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ..	64
4.16 ความหนืดของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr.....	65
4.17 การแพร่ของน้ำมันของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr.....	66
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกล.....	67
4.19 ความแข็งแรงของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr.....	67
4.20 ความแข็งแรงดึงของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr.....	68
4.21 มอดูลัสที่ 100% ของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr.....	68
4.22 มอดูลัสที่ 300% ของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr.....	68
4.23 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr ...	69
4.24 การยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัดของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr .	69
4.25 ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มแรงของความแข็งแรงดึงของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr.....	71
4.26 ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มแรงของมอดูลัสที่ 100% ของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr.....	71
4.27 ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มแรงของร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางเมื่อเติมน้ำมัน ชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr.....	72
4.28 กลไกป้องกันการเกิดออกซิเดชันของ DCNSL และ C ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น.....	73
4.29 กลไกป้องกันการเกิดออกซิเดชันของ ECD.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.30	แบบจำลองการทำหน้าที่เป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันของ CNSL ตัดแปรในโมเลกุลของยางที่คาดว่าจะเกิดขึ้น	74
4.31	SEM แสดงสัญญาณวิทยาของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 phr ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	75
4.32	SEM แสดงสัญญาณวิทยาของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10 phr ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า	76
4.33	ความแข็งกดยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L.....	77
4.34	ความแข็งแรงดึงของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L	78
4.35	มอดูลัสที่ 100% ของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L	78
4.36	ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L.....	79
4.37	ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มเร่งของความแข็งกดยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L	80
4.38	ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มเร่งของความแข็งแรงดึงของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L.....	80
4.39	ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มเร่งของมอดูลัสที่ 100% ของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L.....	81
4.40	ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มเร่งของร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L.....	81
ก-1	โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานคาร์บอนอล 0.5 mg/cm ³	93
ก-2	กราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานคาร์บอนอล	94
ค-1	SEM แสดงสัญญาณวิทยาของซิลิกา ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	102
ค-2	SEM แสดงสัญญาณวิทยาภาคตัดขวางของยางที่เติมน้ำมัน WO และ CNSL ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญคำย่อ

NR	ยางธรรมชาติ
NO	ไม่เติมน้ำมัน
WO	น้ำมันพาราฟิน
AO	น้ำมันอะโรมาติก
CNSL	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
C	คาร์บอนอล
DCNSL	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดีคาร์บอกซิเลต
EC	คาร์บอนอลอีพอกซีไดซ์
EDCNSL	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดีคาร์บอกซิเลตอีพอกซีไดซ์
AOW	เติมน้ำมันอะโรมาติกและ Wingstay® L
ECW	เติมคาร์บอนอลอีพอกซีไดซ์และ Wingstay® L
DCNSL1	ทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 140°C 30 นาที
DCNSL2	ทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 160°C 30 นาที
DCNSL3	ทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 140°C 60 นาที
DCNSL4	ทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 160°C 60 นาที
IV	ค่าไอโอดีน
OOC	ปริมาณออกไซเรน
M _L	ค่าแรงบิดต่ำสุด
M _{HF}	ค่าแรงบิดสูงสุด
t _{s2}	เวลาเริ่มเชื่อมโยง
t _{c90}	เวลาในการเชื่อมโยง
CRI	ดัชนีอัตราการเชื่อมโยง
phr	สัดส่วนปริมาณสารต่าง ๆ เมื่อเทียบกับยาง 100 ส่วน

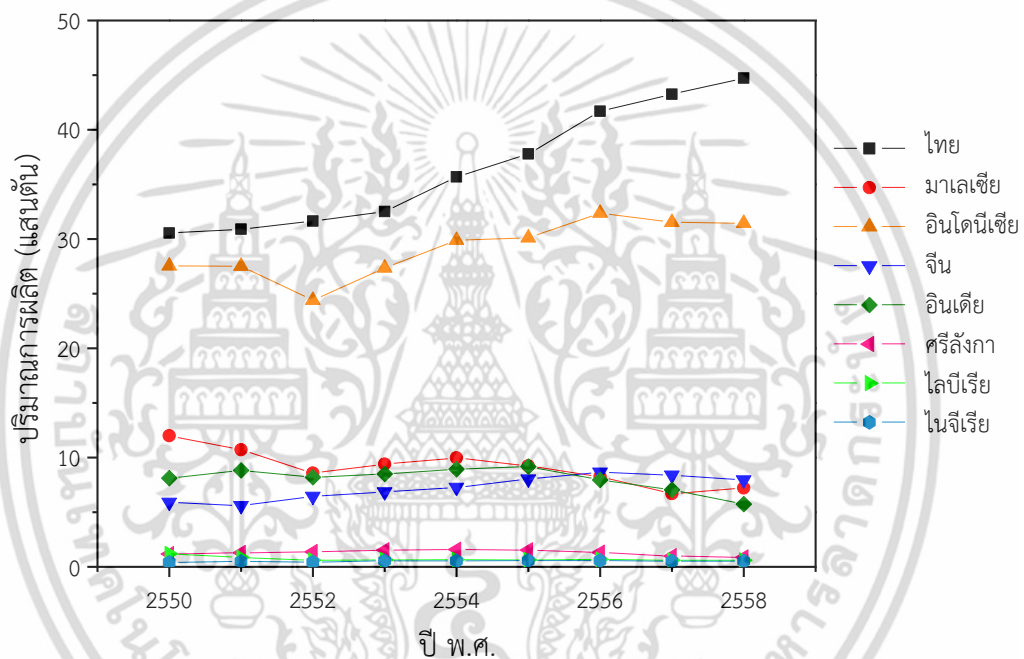
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผลผลิตยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ของโลกประมาณร้อยละ 70 มาจากแหล่งผลิตที่สำคัญคือ ไทยและอินโดนีเซีย โดยประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตยางธรรมชาติมากเป็นอันดับหนึ่งของโลกและมีปริมาณการผลิตเพิ่มมากขึ้นทุกปี ดังรูปที่ 1.1 พบว่าปี พ.ศ. 2558 มีปริมาณการผลิต 44.73 แสนตัน คิดเป็นอัตราการเติบโตเท่ากับร้อยละ 7 [1] ทำให้ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกยางธรรมชาติรายใหญ่ที่สุด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการส่งออกในรูปแบบของยางแท่งและน้ำยางข้น



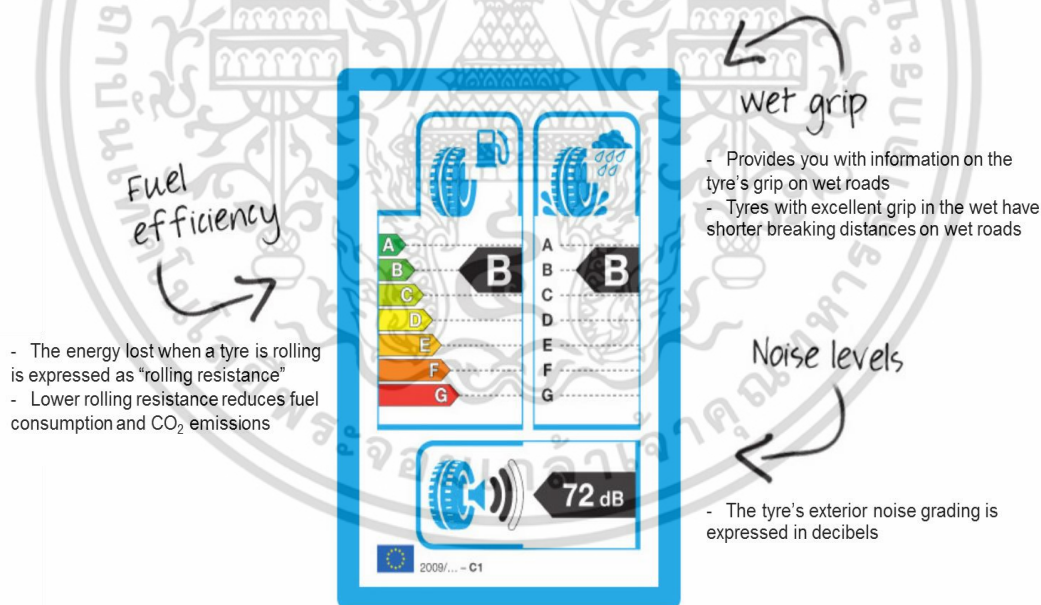
รูปที่ 1.1 ปริมาณการผลิตยางธรรมชาติของประเทศต่าง ๆ ปี พ.ศ. 2550–2558 [1]

ยางธรรมชาติสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางได้หลากหลายชนิด โดยผลิตในรูปแบบยางยานพาหนะคิดเป็นร้อยละ 65 และมีปริมาณการใช้ยางธรรมชาติเพื่อผลิตยางยานพาหนะเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 4 กล่าวคือ จาก 3.14 แสนตัน ในปี พ.ศ. 2554 เป็น 3.53 แสนตัน ในปี พ.ศ. 2557 [2] ทำให้ตลาดการใช้ยางเพื่อผลิตยางยานพาหนะมีอิทธิพลในการกำหนดราคาของตลาดโลก นอกจากนี้ยังใช้ผลิตผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้แก่ ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางรัดของ รองเท้า ยางยึดและท่อยาง เป็นต้น

ยางรถยนต์เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงประมาณ 20-30% และปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO₂) ประมาณ 24% จากการขับขี่ ทำให้สหภาพยุโรปกำหนดมาตรการเพื่อลดการปลดปล่อย CO₂ โดยประกาศใช้ข้อบังคับการติดฉลากยางรถยนต์ (Tire labeling legislation) เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2555 ซึ่งแบ่งระดับของยางจากการวัดประสิทธิภาพ 3 ประการ ได้แก่ การประหยัดเชื้อเพลิง (Fuel efficiency) การยึดเกาะถนนบนพื้นเปียก (Wet grip)

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และระดับเสียงที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของล้อรถ (Noise levels) ยางฉลากเขียว (Green tires) เป็นยางที่มีแรงต้านการหมุนของล้อ (Rolling resistance) ต่ำ ลดการสูญเสียพลังงาน ทำให้ลดอัตราการบริโภคเชื้อเพลิง รวมทั้งลดการปลดปล่อย CO₂ ทั้งในระหว่างกระบวนการผลิต การขับเคลื่อน และการกำจัดทิ้ง พบว่ารถยนต์มีการใช้เชื้อเพลิงประมาณ 10 ลิตรต่อการขับเคลื่อน 100 กิโลเมตร โดยยางฉลากเขียวใช้เชื้อเพลิงลดลง เหลือประมาณ 9.5 ลิตรต่อการขับเคลื่อน 100 กิโลเมตร และลดการปล่อย CO₂ ลงได้ประมาณ 1.2 กิโลกรัมต่อการขับเคลื่อน 100 กิโลเมตร ฉลากยางรถยนต์จึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญทำให้รัฐบาลของหลายประเทศทั่วโลกผลักดันให้มีการใช้ยางฉลากเขียวมากขึ้น เพื่อตระหนักและตื่นตัวในการมุ่งเน้นรักษาสิ่งแวดล้อมทั่วโลก นอกจากนี้ยังเน้นการใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติที่สามารถทดแทนใหม่ได้ ใช้ได้ไม่หมดสิ้น (Renewable resources) และลดการพึ่งพาวัตถุดิบจากปิโตรเลียม [3-5] ซึ่งบริษัทผู้ผลิตยางรถยนต์ต่าง ๆ ได้หันมาใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติในการผลิตมากยิ่งขึ้น เช่น บริษัท คอนติเนนทอล ไทร์ส จำกัด ใช้ซิลิกาที่ได้จากกรดซิลิซิก (Silicic acid) ทดแทนการใช้เขม่าดำใช้น้ำมันพืชทดแทนการใช้น้ำมันปิโตรเลียม เป็นต้น คิดเป็นสัดส่วน 45% โดยน้ำหนักของปริมาณวัตถุดิบทั้งหมด และคาดว่าจะสามารถทดแทนได้ 100% ภายในปี พ.ศ. 2563 [6] นอกจากนี้บริษัท ดันลอป ไทร์ส จำกัด ได้ผลิตยางรถยนต์รุ่น ENASAVE 97 ซึ่งใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติประมาณ 97% ของปริมาณวัตถุดิบทั้งหมด โดยใช้ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติดัดแปรแทนการใช้ยางสังเคราะห์ ใช้น้ำมันพืช ซิลิกา และเส้นใยเรยอน ทดแทนการใช้ น้ำมันจากปิโตรเลียม เขม่าดำ และเส้นใยสังเคราะห์ ตามลำดับ [7]



รูปที่ 1.2 ข้อบังคับการติดฉลากยางรถยนต์ [5]

ปัจจุบันทุกประเทศทั่วโลกต่างตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมและปิโตรเลียมที่มีอยู่อย่างจำกัด ทำให้กระแสเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Green trend) มีความสำคัญมากยิ่งขึ้น อุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ยางรถยนต์ ก่อสร้าง สิ่งทอ พลาสติก เป็นต้น ต่างพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อให้สอดคล้องกับกระแสดังกล่าว ส่งผลให้มีการใช้ประโยชน์จากสารชีวมวล (Biomass) มากขึ้น ชีวมวลเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ ได้จากพืช สัตว์ เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และกากจาก

เอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย กากปาล์ม เศษไม้ มูลสัตว์ เป็นต้น เนื่องจากสารชีวมวลมีหลายประเภท สามารถปลูกทดแทนได้ ใช้ได้ไม่มีวันหมดสิ้น ทั้งยังเป็นการช่วยกำจัดและเพิ่มมูลค่าเศษวัสดุเหลือทิ้ง ซึ่งประเทศไทยนับเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญแห่งหนึ่ง มีความอุดมสมบูรณ์และความหลากหลายของผลผลิตทางการเกษตร ได้แก่ มันสำปะหลัง ปาล์ม ยางพารา อ้อย ข้าว ข้าวโพด มะพร้าว ถั่วเหลือง มะม่วงหิมพานต์ เป็นต้น จึงสามารถนำสารชีวมวลดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ได้

มะม่วงหิมพานต์ (Cashew fruit) เป็นพืชอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศไทย ได้รับความสนใจจากทั้งภาครัฐและเอกชนพัฒนาให้เป็นพืชเศรษฐกิจเพื่อการส่งออก พบมากในภาคตะวันออก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid, CNSL) เป็นน้ำมันที่ได้จากการสกัดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งเป็นเศษเหลือจากการกะเทาะเปลือกเพื่อนำเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาแปรรูปเป็นอาหาร CNSL มีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวหนืด สีดำคล้ำ มีโครงสร้างทางเคมีเป็นอนุพันธ์ของฟินอลที่มีหมู่ข้างเคียงเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ทำให้สามารถดัดแปรโครงสร้างทางเคมีได้ สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผ้าเบรก แผ่นคลัตช์ ยาฆ่าแมลงและปลวก สารเคลือบ และน้ำหมัก เป็นต้น [8]



รูปที่ 1.3 เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ [9]

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง การออกสูตรเคมียางเป็นขั้นตอนแรกที่มีความสำคัญอย่างมากและส่งผลกระทบต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากมีการกำหนดชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่ผสมเข้ากับยาง โดยทั่วไปส่วนประกอบในสูตรเคมียางประกอบด้วยยาง (Elastomers) สารทำให้ยางเชื่อมโยง (Vulcanizing agents) สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators) สารตัวเติม (Fillers) พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) และสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) และสารเติมแต่งอื่น ๆ นอกจากนี้การผสมยางเป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตและสมบัติของยาง การผสมที่มีประสิทธิภาพดีทำให้สารเติมแต่งกระจายตัวในยางได้สม่ำเสมอ ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามความต้องการ

ปัจจุบันมีการนำน้ำมันจากพืชมาใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับยางมากมาย เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม น้ำมันรำข้าว น้ำมันเมล็ดทานตะวัน เป็นต้น โดยงานวิจัยก่อนหน้า [10] ได้ศึกษาการใช้

น้ำมันพืชและน้ำมันพืชดัดแปรเป็นสารช่วยกระบวนการผลิตสำหรับยางธรรมชาติ พบว่าน้ำมันปาล์มไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Palm oil) สามารถใช้ทดแทนน้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) ได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของยาง เช่น ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล เป็นต้น ทั้งมีต้นทุนการผลิตต่ำ สามารถผลิตได้ในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังช่วยลดอันตรายจากการใช้น้ำมันอะโรมาติก เนื่องจากมีสารพอลิไซคลิกอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งประกอบอยู่ ส่วนการใช้ CNSL ส่งผลกระทบต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยาง ทำให้ใช้เวลาในการเชื่อมโยงมากขึ้น เนื่องจากมีความเป็นกรดสูง จำเป็นต้องตัดแปรโครงสร้างทางเคมีก่อนนำไปใช้งาน อย่างไรก็ตาม CNSL เป็นน้ำมันอีกชนิดหนึ่งที่สามารถผลิตได้ในประเทศ ราคาถูก และมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อย จึงควรศึกษาเพื่อนำมาใช้ประโยชน์มากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ CNSL ตัดแปรเป็นสารเติมแต่งชีวภาพ (Bio-additive) เช่น น้ำมันยาง (Rubber oil) สารหล่อลื่น (Lubricant) เป็นต้น สำหรับยางธรรมชาติ เนื่องจาก CNSL เป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิดและมีความบริสุทธิ์ต่ำ จึงทำการศึกษาแนวเปรียบเทียบกับการ์ดานอล (Cardanol) ซึ่งเป็นน้ำมันที่ได้จากการกลั่นกรดอนาคาร์ดิก (Anacardic acid) องค์ประกอบหลักของ CNSL ทำให้คาร์ดานอลมีความบริสุทธิ์สูงและมีความเป็นกรดต่ำ นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบกับการใช้ น้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟิน ซึ่งเป็นน้ำมันเชิงพาณิชย์ที่นิยมใช้ในยาง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาการเตรียม CNSL ตัดแปรชนิดต่าง ๆ ได้แก่ น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดีคาร์บอกซิเลต (DCNSL) คาร์ดานอลอีพอกซิไดซ์ (EC) และน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดีคาร์บอกซิเลตอีพอกซิไดซ์ (EDCNSL) เพื่อนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งชีวภาพสำหรับยางธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการเตรียมน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตัดแปร
 - 1.1) วิเคราะห์คุณภาพน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
 - 1.2) การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation)
 - 1.3) การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxydation)
 - 1.4) ศึกษาสมบัติน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตัดแปรที่เตรียมได้
- 2) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของยางคอมพาวด์และยางเชื่อมโยง
 - 2.1) ชนิดน้ำมัน ได้แก่
 - น้ำมันพาราฟิน (WO)
 - น้ำมันอะโรมาติก (AO)
 - น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL)
 - คาร์ดานอล (C)
 - น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดีคาร์บอกซิเลต (DCNSL)
 - คาร์ดานอลอีพอกซิไดซ์ (EC)
 - น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดีคาร์บอกซิเลตอีพอกซิไดซ์ (EDCNSL)
 - 2.2) ปริมาณน้ำมัน ได้แก่ 5 และ 10 phr
- 3) ศึกษาพลังงานที่ใช้ขณะผสมยางกับสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ศึกษาสมบัติของยางคอมพาวด์และยางเชื่อมโยงที่เตรียมได้

4.1) ลักษณะการเชื่อมโยง ได้แก่ ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque, M_L) ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque, M_{HF}) เวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{s2}) เวลาในการเชื่อมโยง (t_{c90}) และดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI)

4.2) ร้อยละการบวมตัว (%Swelling)

4.3) ความหนืดมูนี (Mooney viscosity)

4.4) การแพร่ออกของน้ำมัน (Bleeding)

4.5) สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งกด (Hardness) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) โมดูลัสของยาง (Rubber modulus) ที่ 100% (M_{100}) และ 300% (M_{300}) ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) การยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัด (Compression set) และความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance)

4.6) สมบัติหลังการบ่มเร่ง (Aging properties)

4.7) สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถใช้น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตัดแปรรูปเป็นสารเติมแต่งชีวภาพสำหรับยางธรรมชาติได้

2) ลดปริมาณและเพิ่มมูลค่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากผลิตผลทางการเกษตร ทั้งยังเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร

3) ลดการใช้น้ำมันจากปิโตรเลียมซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพและใช้แล้วหมดไป

4) ใช้ความรู้ที่ได้ในการปรับปรุงโครงสร้างน้ำมันจากธรรมชาติในอนาคต

บทที่ 2

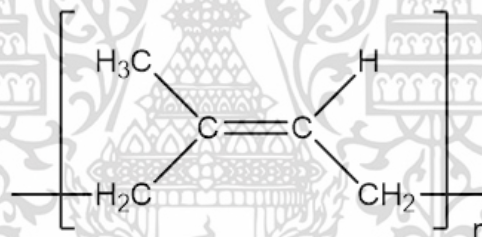
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีต้นกำเนิดแถบอะเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ มีหลายสายพันธุ์ที่สามารถให้น้ำยางได้ เช่น มานีฮอต กลาซีโอวี (*Manihot glaziovii*) แคสทิลโลอา อีลาสติก (*Castilloa elastica*) ฟิกส์ อีลาสติก (*Ficus elastica*) แลนด์โอฟี (*Landophia*) เป็นต้น พันธุ์ยางที่มีคุณภาพดีที่สุดและใช้ผลิตเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันคือ ยางพันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียนซิส (*Hevea brasiliensis*) ถูกนำมาแพร่พันธุ์ที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้พบว่าต้านทานโรคได้ดีมาก ต่างจากต้นยางที่ปลูกในอะเมซอนมักเป็นโรค *Dothidella* ทำให้แหล่งผลิตยางธรรมชาติที่สำคัญอยู่ในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เป็นส่วนใหญ่ [11]

2.1.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีหน่วยย่อยเป็นไอโซพรีน (Isoprene) ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น C_5H_8 อยู่ในลักษณะโครงสร้างแบบซิส 1,4 (Cis-1,4-polyisoprene) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ Cis-1,4-polyisoprene

2.1.2 องค์ประกอบของยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติประกอบด้วยส่วนที่เป็นเนื้อยาง (Rubber component) 30-36% ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber component) ประมาณ 5-6% และที่เหลือเป็นน้ำประมาณ 58-59% [11] ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทั่วไปของน้ำยางสดและยางแห้ง ทั้งนี้ปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ของยาง ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด เช่น ดินที่ใช้ปลูก ฤดูกาล พันธุ์ยาง อายุต้นยาง เวลากรีดยาง รวมถึงวิธีการเตรียมยางแห้ง เป็นต้น

ยางธรรมชาติประกอบด้วยส่วนที่ไม่ใช่ยางหลายชนิด แต่ละชนิดส่งผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติแตกต่างกัน สามารถจำแนกได้ 4 ประเภท ดังนี้

1. โปรตีนและกรดอะมิโน (Proteins and amino acids) พบในยางหลากหลายชนิด ได้แก่ แอลฟา-โกลบูลิน (α -globulin) กรดกลูตามิก (Glutamic acid) กรดแอสพาทิก (Aspartic acid) เป็นต้น ส่งผลให้ความเหนียวติด (Stiffening) ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) การเกิดความร้อนสะสม (Heat build-up) และความต้านทานต่อการแตกเมื่อได้รับแรงเชิงพลวัต (Dynamic crack growth) ของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ไขมัน (Lipids) ประกอบด้วย 3 กลุ่มหลักคือ นิวทรอลลิปิด (Neutral lipids) ไกลโคลิปิด (Glycolipids) และฟอสฟอลิปิด (Phospholipids) ซึ่งส่งผลกระทบต่อตรงต่อการเกิดออกซิเดชันจากความร้อน (Thermal oxidation) โดยฟอสฟอลิปิดทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตามธรรมชาติ

3. คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) มักเป็นน้ำตาล สารที่พบมากที่สุดคือ 2-อโอโท-เมทิล-แอลอีโนซิทอล (2-o-methyl-L-inositol) หรือคิวบราซิทอล (Quebrachitol) มีประมาณ 1% ในน้ำยางสด นอกจากนี้ประกอบด้วยน้ำตาลชนิดอื่นในปริมาณน้อย เช่น ซูโครส (Sucrose) กลูโคส (Glucose) กาแลคโตส (Galactose) ฟรุคโตส (Fructose) แรฟฟิโนส (Raffinose) และเพนโตส (Pentose) น้ำตาลเหล่านี้ถูกแบคทีเรียย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นกรดไขมันที่ระเหยได้ (Volatile fatty acid, VFA) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าน้ำยางมีการเก็บรักษาดีหรือไม่

4. ไอออนของโลหะ (Metal ions) ปริมาณไอออนของโลหะที่มีอยู่ในยางธรรมชาติต่างกัน เนื่องจากกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของน้ำยาง (Colloidal stability) และการเสื่อมสภาพเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตัวอย่างไอออนของโลหะที่พบ ได้แก่ โพแทสเซียม (K^+) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) โซเดียม (Na^+) แคลเซียม (Ca^{2+}) ทองแดง (Cu^{2+}) แมงกานีส (Mn^{2+}) และเหล็ก (Fe^{2+}) เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำยางสดและยางแห้งโดยทั่วไป [11]

องค์ประกอบ	น้ำยางสด (%โดยน้ำหนัก)	ยางแห้ง (%โดยน้ำหนัก)
ยาง (ไฮโดรคาร์บอน)	36.0	93.7
โปรตีนและกรดอะมิโน	1.4	2.2
นิวทรอลลิปิด	1.0	2.4
ไกลโคลิปิดและฟอสฟอลิปิด	0.6	1.0
คาร์โบไฮเดรต	1.6	0.4
สารอนินทรีย์	0.5	0.2
อื่น ๆ	0.4	0.1
น้ำ	58.5	-

2.1.3 สมบัติของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ ดังนี้ [11-12]

1. ความยืดหยุ่น (Elasticity) มีความยืดหยุ่นสูง สามารถกลับคืนสู่รูปร่างที่มีขนาดเดิมหรือใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็วภายหลังการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากมีแรงภายนอกกระทำ

2. ความแข็งแรงดึง เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึง ส่งผลให้มีความแข็งแรงดึงสูงทั้งก่อนและหลังการเชื่อมโยง

3. ความแข็งแรงฉีกขาด ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงฉีกขาดสูง เนื่องจากความสามารถในการเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึง ผลึกที่เกิดขึ้นมีการเรียงตัวในแนวเดียวกับแรงดึงและตั้งฉากกับรอยฉีกขาด ทำให้ขัดขวางการฉีกขาดที่เกิดขึ้น

4. การกระด้างกระดอน (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูงมากในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง มีการสูญเสียพลังงานและความร้อนสะสม (Hysteresis) ทำให้เหมาะแก่การผลิตยางล้อรถที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นแปะใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความต้านทานการขาดฤดู มีความต้านทานการขาดฤดูที่ดี
6. ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติมีความเหนียวติดสูง โดยเฉพาะยางที่ไม่ได้ผ่านการเชื่อมโยง สามารถยึดติดกับวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะ สิ่งทอ เป็นต้น
7. ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) สูงถึง 1×10^{15} - 2×10^{15} $\Omega \cdot \text{cm}$
8. ความต้านทานต่อสารเคมี (Chemical resistance) ยางธรรมชาติไม่สามารถต้านทานต่อสารเคมีที่ไม่มีขี้ เช่น น้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ เช่น เฮกเซน (Hexane) โทลูอิน (Toluene) เบนซีน (Benzene) เป็นต้น เนื่องจากยางธรรมชาติมีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอน ทำให้สามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ แต่ต้านทานตัวทำละลายที่มีขี้ เช่น อะซิโตน (Acetone) แอลกอฮอล์ (Alcohol) เป็นต้น
9. สมบัติการเสื่อมสภาพ (Degradations) เนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด ยางธรรมชาติมีความไวในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ โดยเฉพาะเมื่อมีความร้อนหรือแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย นอกจากนี้ยังไม่ทนต่อโอโซน เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพและยืดอายุการใช้งาน จึงนิยมเติมสารต้านการเสื่อมสภาพหรือสารต้านการเกิดออกซิเดชันลงในยางธรรมชาติ
10. ความแปรปรวนของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติมักมีสมบัติที่ไม่แน่นอน อันมีสาเหตุหลักมาจากความไม่สม่ำเสมอในองค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในน้ำยาง ซึ่งกำหนดโดยตัวแปรทางสภาพภูมิอากาศและทางชีวภาพ เช่น ลักษณะดินที่ใช้ปลูกต้นยาง ฤดูกาล พันธุ์ยาง อายุต้นยาง ส่วนของต้นยางที่ถูกกรีด ความถี่การกรีด เวลาการกรีด และอื่น ๆ ล้วนส่งผลต่อปริมาณองค์ประกอบที่ไม่ใช่ยาง ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

2.1.4 การเกิดผลึกของยางธรรมชาติ

โดยทั่วไปในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้อง ยางธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงถึงช่วงที่เหมาะสมหรือได้รับแรงดึงที่มากพอ โมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือเกิดผลึกขึ้นได้ [11]

1. การเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -20°C การตกผลึกนี้ใช้เวลานาน แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงมากขึ้น ส่งผลให้อัตราเร็วในการตกผลึกเพิ่มตามไปด้วย การเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำทำให้ยางแข็ง ผสมเข้ากับสารเคมีได้ยาก แต่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้โดยการให้ความร้อนเพื่อให้ผลึกถูกทำลาย
2. การเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึง (Strain-induced crystallization) ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกเมื่อได้รับแรงดึงจนมีความยาว 2-3 เท่าของความยาวเริ่มต้น ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อถูกดึงให้มีความยาวเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อปล่อยให้ยางหดตัว ปริมาณผลึกสูงสุดที่มีการตรวจพบคือ 25% โดยโมเลกุลส่วนใหญ่ยังคงมีการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน ผลึกที่เกิดขึ้นช่วยให้ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดสูงขึ้นทั้งก่อนและหลังการเชื่อมโยง

ยางธรรมชาติมีสมบัติโดดเด่นหลายประการที่ดีกว่ายางไอโซพรีนสังเคราะห์ (Isoprene rubber, IR) เช่น ความยืดหยุ่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด ความต้านทานการขาดฤดู และสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ทำให้ยางธรรมชาติเหมาะกับการใช้งานเชิงวิศวกรรมที่ต้องรับแรงสูง อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติมีข้อด้อยหลายประการ ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน เช่น สีเข้ม

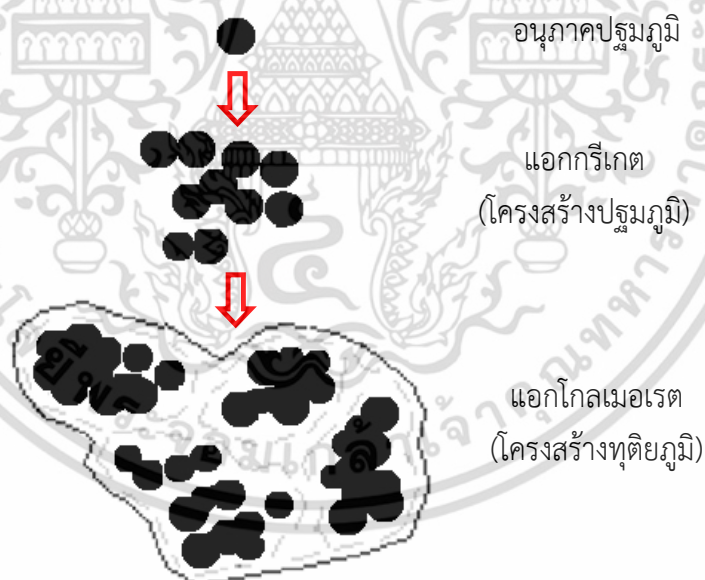
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีสีอ่อน และโปรตีนที่มีอยู่ในยางธรรมชาติอาจทำให้เกิดการแพ้ จึงไม่เหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เป็นต้น

2.2 สารตัวเติม

สารตัวเติม คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อลดต้นทุน สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing fillers) และสารตัวเติมไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers)

ซิลิกา (Silica) เป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมสีอ่อน (Light colored fillers) ชนิดอื่น มีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร ซิลิกามักไม่อยู่ในรูปอนุภาคปฐมภูมิ แต่มักอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่า แอกริเกต (Aggregate) ซึ่งเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary filler structure) ไม่ถูกทำลายในระหว่างกระบวนการผสมเนื่องจากมีแรงดึงดูดทางเคมีที่แข็งแรง นอกจากนี้แอกริเกตของซิลิกาแต่ละกลุ่มมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้นที่เรียกว่า แอกลอเมอเรต (Agglomerate) จัดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary filler structure) ดังรูปที่ 2.2 เมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำ (Carbon black) โครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกามีความแข็งแรงสูงกว่าโครงสร้างทุติยภูมิของเขม่าดำ เนื่องจากการเกาะกลุ่มของซิลิกาเกิดจากแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ซึ่งมีความแข็งแรงกว่าแรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals) ที่พบในเขม่าดำ [13]



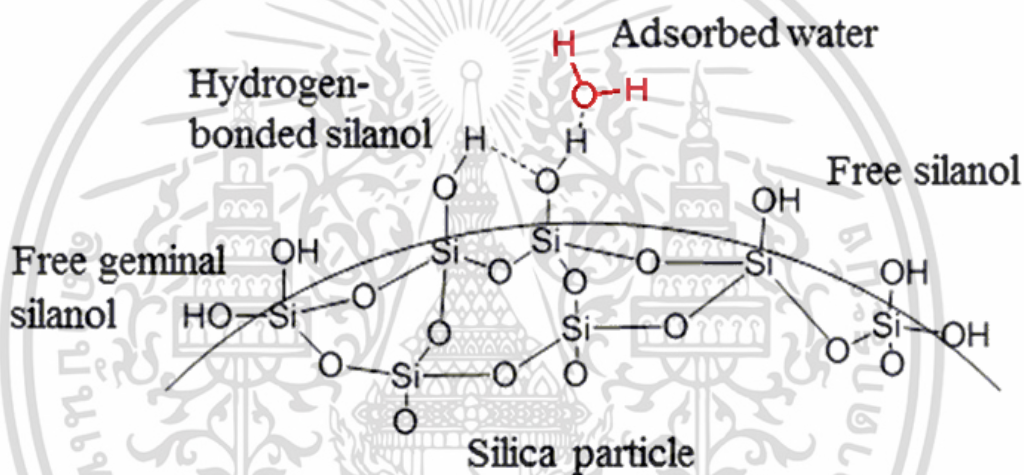
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของซิลิกา [13]

เนื่องจากผิวซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, -OH) หรือหมู่ซิลานอล (Silanol, Si-OH) ปริมาณมาก ทำให้มีขั้วและว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูง จึงมีแนวโน้มดูดซับสารเคมีต่าง ๆ มาเกาะบนพื้นผิวได้ดี โดยทั่วไปซิลิกาสามารถดูดซับน้ำหรือความชื้นได้ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของยางในระหว่างกระบวนการผลิตและกระบวนการขึ้นรูป ถ้ามีปริมาณความชื้นสูง ซิลิกาแตกตัวและกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวได้ยาก เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางเพิ่มขึ้น เพราะซิลิกาที่อิมตัวด้วยน้ำหน่วงปฏิกิริยาเชื่อมโยง ทำให้ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงในปริมาณมากขึ้น

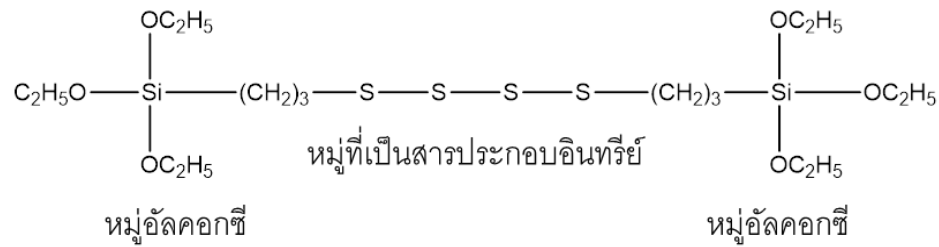
นอกจากนี้แล้ว หมูไซลันอลทำให้ซิลิกาสามารถดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่มีฤทธิ์เป็นต่างและสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้ โดยเฉพาะสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสี (Zn complex) ทำให้มีปริมาณสารเร่งและสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยงในยางน้อยลง จึงต้องเพิ่มปริมาณสารเหล่านี้เพื่อชดเชยบางส่วนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวซิลิกาหรือเติมสารเคมีที่ทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับหมูไซลันอล ได้แก่ สารประกอบกลุ่มไกลคอล เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) กลีเซอรอล (Glycerol) หรือสารประกอบในกลุ่มเอมีน เช่น ไตรเอทานอลามีน (Triethanolamine) และเฮกซะเมทิลีนเตตระมีน (Hexamethylene tetramine, HEXA) เพื่อลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซิลิกา ทำให้แอกไกลเมอเรตของซิลิกาถูกทำลายได้ง่ายขณะกระบวนการผสม ซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายขึ้น



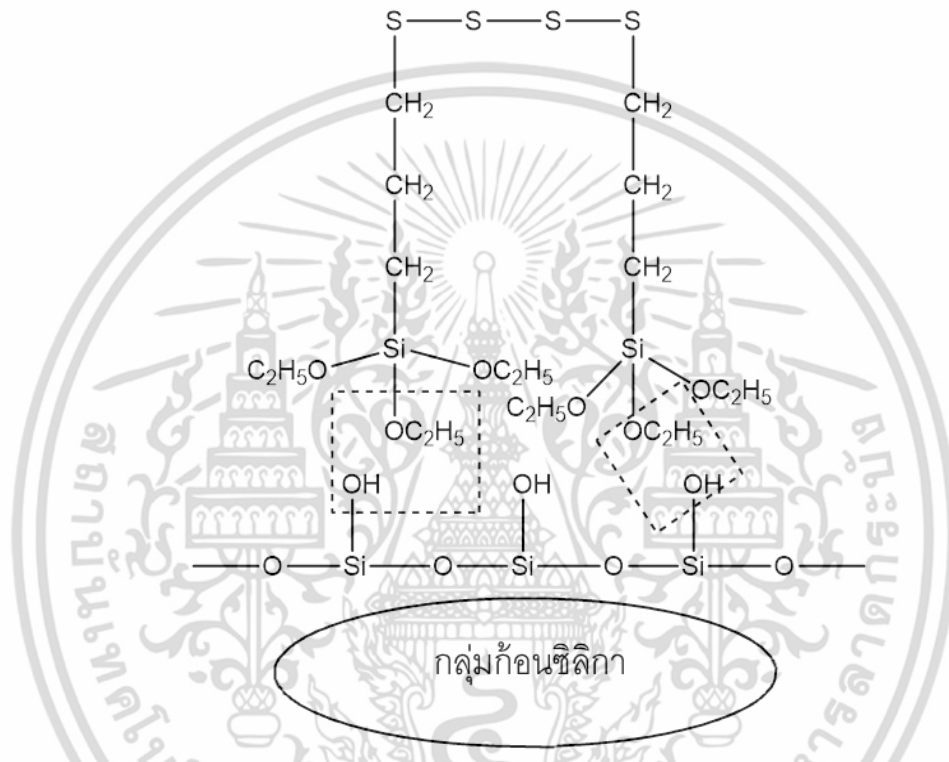
รูปที่ 2.3 หมูฟังก์ชันเคมีที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกา [14]

บนพื้นผิวของซิลิกาไม่มีหมูฟังก์ชันเคมีที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา มีเพียงหมูไซลันอลปริมาณมากทำให้ซิลิกามีความเป็นขั้วสูง เข้ากับยางไม่มีขั้วได้ยาก จึงต้องมีการเติมสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) เพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา โดยทั่วไปสารคู่ควบไซเลนประกอบด้วย 2 หมูฟังก์ชันคือ หมูอัลคอกซี (Alkoxy) และหมู่ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ (Organo functional groups) ดังรูปที่ 2.4 หมูอัลคอกซีทำปฏิกิริยากับหมูไซลันอลเกิดเป็นพันธะซิลอกเซน (Siloxane) ซึ่งมีความเสถียรและขจัดแอลกอฮอล์ออกมา แสดงดังรูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ทำให้พื้นผิวของซิลิกามีหมูไซลันอลลดลง อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซิลิกาตกลง ซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายขึ้น ส่วนหมู่ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ทำให้มีส่วนในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยพันธะเคมี ดังนั้นสารคู่ควบไซเลนจึงทำหน้าที่เสมือนสะพานเชื่อมระหว่างยางกับซิลิกา ทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ยางมีสมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน (Si-69) [13]



รูปที่ 2.5 การทำปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบไซเลน (Si-69) กับซิลิกา [13]

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่เสริมแรงได้ดี เพราะอนุภาคปฐมภูมิตัวเล็กและพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้ยางมีความแข็ง ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด และความต้านทานการขัดถูสูงขึ้น เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมสีอ่อน จึงนิยมใช้มากในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งแสงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ยางพื้นรองเท้า ปัจจุบันมีการนำไปใช้ในการผลิตยางล้อรถยนต์ เพราะซิลิกาทำให้ยางมีแรงต้านทานการหมุนต่ำลง ทำให้ช่วยประหยัดเชื้อเพลิง

2.3 พลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ คือ สารเคมีที่เติมลงในยางเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น ทำให้ยางนิ่มลง ความแข็งลดลง ส่งผลต่ออย่างดังนี้

- ความหนืดลดลง ช่วยปรับปรุงสมบัติการไหล ทำให้ยางไหลได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ใช้พลังงาน

และระยะเวลาในการผลิตลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ทำให้ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และความสามารถในการรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ความแข็งแรงดิ่งลดลง
- อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ลดลง ปรับปรุงสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ
- เพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่างยางกับสารตัวเติม ทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดี
- ลดสัดส่วนของยางลง ทำให้สามารถใช้สารตัวเติมได้ในปริมาณมากขึ้น

2.3.1 กลไกการทำงานของพลาสติกไซเซออร์

การใช้พลาสติกไซเซออร์เริ่มขึ้นในศตวรรษที่ 19 โดยมีการศึกษาและนำเสนอกลไกการทำงานของพลาสติกไซเซออร์ในปีช่วง ค.ศ. 1930-ค.ศ. 1950 ทฤษฎีที่นำเสนอในช่วงแรกไม่ได้อธิบายปรากฏการณ์ขณะเกิดการพลาสติกไซเซชัน (Plasticization) แต่เป็นการอธิบายสัจฐานวิทยาศาสตร์ของกระบวนการพลาสติกไซเซชัน เนื่องจากไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการเข้าใจ โดยทฤษฎีการหล่อลื่นและทฤษฎีเจลได้ถูกพัฒนาขึ้น ต่อมาได้มีการนำเสนอทฤษฎีปริมาตรอิสระ ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการพลาสติกไซเซชันได้ชัดเจนกว่าทฤษฎีในช่วงแรก อย่างไรก็ตามจนถึงปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีอื่นเพิ่มเติม มีเพียงการพัฒนาต่อโดยอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีปริมาตรอิสระ เช่น การใช้คณิตศาสตร์เข้ามาช่วยอธิบาย คาดว่าทฤษฎีที่มีอยู่เพียงพอต่อการอธิบายกระบวนการพลาสติกไซเซชันได้อย่างสมบูรณ์ [15-16]

1. ทฤษฎีการหล่อลื่น (Lubricity theory)

ทฤษฎีการหล่อลื่นถูกนำเสนอโดย Kirkpatrick อธิบายว่ากระบวนการพลาสติกไซเซชันเกิดขึ้นในสภาวะหลวมเหลวหรือสภาวะสารละลาย โดยพลาสติกไซเซออร์ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นแทรกระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้แรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลลดลง สายโซ่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ประสิทธิภาพในการทำงานของพลาสติกไซเซออร์ขึ้นอยู่กับความหนืดที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดอันตรกิริยาที่ตึระหว่างพลาสติกไซเซออร์กับพอลิเมอร์ ขนาดโมเลกุลพลาสติกไซเซออร์เป็นต้น ต่อมา Clark เสนอว่าพลาสติกไซเซออร์เข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นและมีระนาบของการลื่นไถล ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ผ่านไปมาซึ่งกันและกันได้ ส่วน Verhoek เสนอว่าการเติมพลาสติกไซเซออร์ส่งผลให้ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทฤษฎีการหล่อลื่นของ Kirkpatrick

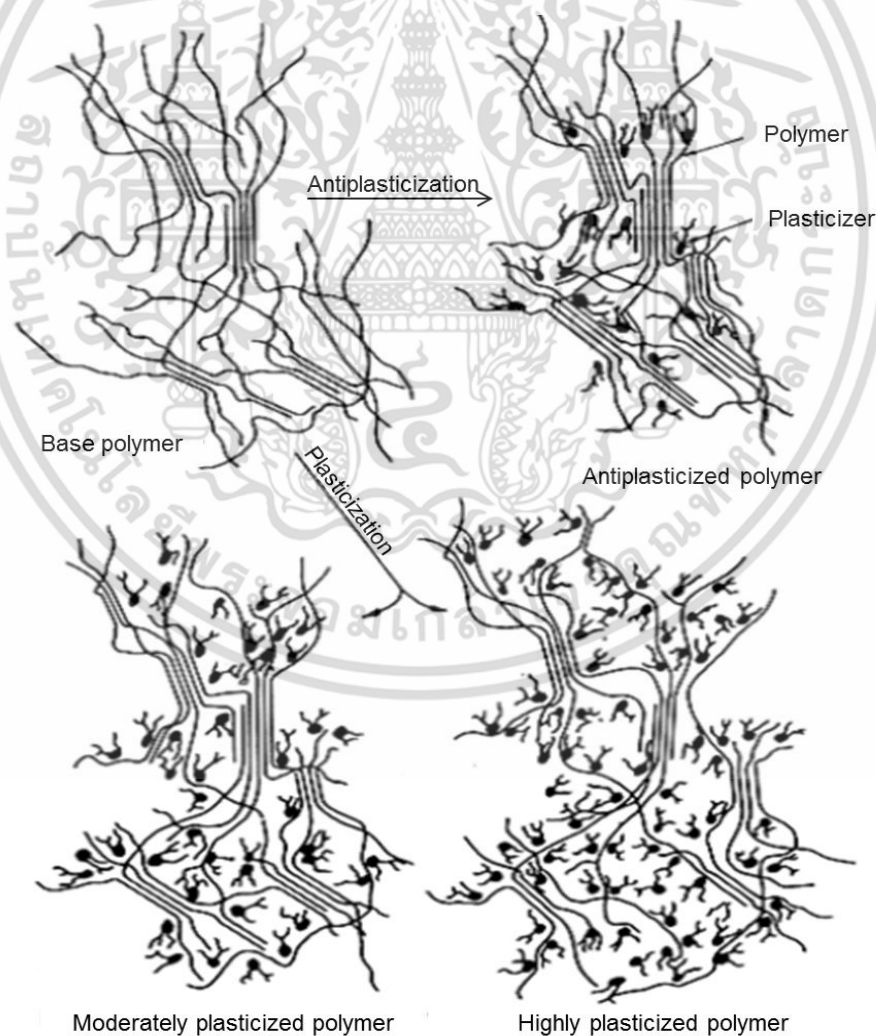
2. ทฤษฎีเจล (Gel theory)

Aiken ศึกษาการคืบของพอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl) chloride, PVC) โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของพลาสติกไซเซออร์ที่ส่งผลต่อความนิ่ม ความเข้ากันได้ และประสิทธิภาพการทำงานของพลาสติกไซเซออร์ พบว่าส่วนที่มีขั้วของพลาสติกไซเซออร์เกิดการจัดเรียงตัวและดึงดูดกับส่วนที่มีขั้วของพอลิไวนิลคลอไรด์ ในขณะที่ส่วนที่ไม่มีขั้วรวมตัวเป็นกลุ่มเพื่อกำบังส่วนที่มีขั้วออกจากกัน ทำให้สายโซ่ของพอลิไวนิลคลอไรด์เคลื่อนที่ได้ง่าย เกิดโครงสร้างเจล ส่งผลให้มีการไหลแบบหนืด (Viscous flow) ส่วนพลาสติกไซเซออร์ที่อยู่รอบ ๆ สายโซ่ของพอลิไวนิลคลอไรด์มีการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) ดังนั้นพลาสติกไซเซออร์ที่ดีต้องประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและไม่ขั้ว

3. ทฤษฎีปริมาตรอิสระ (Free volume theory)

ทฤษฎีปริมาตรอิสระถูกนำเสนอโดย Sears และ Derby ในปี ค.ศ. 1982 กล่าวถึงช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์หรือเรียกว่าปริมาตรอิสระ (Free volume) ซึ่งพลาสติกไซเซออร์สามารถแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างเหล่านี้ ส่งผลให้การเคลื่อนไหวหรือการหมุนรอบพันธะภายในสายโซ่

พอลิเมอร์เกิดได้ง่าย พอลิเมอร์ทั่วไปมีสัณฐานวิทยาแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) บริเวณที่เป็นผลึกสายโซ่มีการจัดเรียงตัวแน่นและเป็นระเบียบ ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรง ส่วนอสัณฐานเป็นบริเวณที่สายโซ่จัดเรียงตัวแบบสุ่ม ไม่เป็นระเบียบ โมเลกุลพลาสติกไซเซอร์มักล้อมรอบและแทรกตัวบริเวณนี้เนื่องจากมีปริมาตรอิสระสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 การเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปเล็กน้อยทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น มีความแข็งแรงดึงและมอดูลัสสูงขึ้น เนื่องจากปริมาตรอิสระที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยทำให้สายโซ่พอลิเมอร์จัดเรียงตัวเป็นระเบียบเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณผลึกสูงขึ้น เรียกปรากฏการณ์ลักษณะนี้ว่า แอนติพลาสติกไซเซชัน (Antiplasticization) ในขณะที่การเติมปริมาณมากขึ้นอาจทำให้ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น แต่ส่วนที่เป็นอสัณฐานมีปริมาตรอิสระเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลพลาสติกไซเซอร์แทรกตัวอยู่ ทำให้สายโซ่แยกออกจากกัน เรียกปรากฏการณ์ลักษณะนี้ว่า พลาสติกไซเซชัน ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่น สามารถยืดตัว และทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ส่งผลต่อสมบัติเชิงความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิการอ่อนตัว อุณหภูมิการโค้งตัวภายใต้แรงกด และ T_g มีค่าลดลง ทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดีขึ้น ต่อมา Fox และ Flory รายงานเพิ่มเติมว่า กระบวนการพลาสติกไซเซชันไม่เกิดหรือเกิดขึ้นได้ยากมากเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าค่า T_g ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าค่า T_g ปริมาตรอิสระขยายตัวมากขึ้น ทำให้กระบวนการพลาสติกไซเซชันเกิดได้ง่าย



รูปที่ 2.6 กระบวนการ Plasticization และ Antiplasticization ในพอลิเมอร์ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการวิจัยและพัฒนา เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ประเภทของพลาสติกไซเซออร์

พลาสติกไซเซออร์เป็นสารโมเลกุลเล็กที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวย่าง มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น T_g ลดลง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายขึ้น [13] พลาสติกไซเซออร์มีหลายประเภท ดังนี้

1. น้ำมันมิเนอรัล (Mineral oils) เป็นสารที่มีความสำคัญมากที่สุด เนื่องจากราคาถูกและสามารถเข้ากับยางได้หลากหลายชนิด ส่วนใหญ่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ได้แก่ น้ำมันพาราฟิน (Paraffinic oil) น้ำมันแนฟทาติก (Naphthenic oil) และน้ำมันอะโรมาติก

2. พาราฟิน (Paraffins) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ไฮพาราฟินมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง โดยไฮพาราฟินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์ได้

3. คูมาโรนเรซินและอินดีนเรซิน (Coumarone and indene resins) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เรซินทั้งสองสามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซออร์และสารทำให้เหนียวติด มักใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

4. กรดไขมันและอนุพันธ์ (Fatty acid and its derivatives) ถ้าเติมปริมาณน้อยมักทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง เมื่อเติมปริมาณมากขึ้นทำให้ยางนิ่มลง แต่ส่งผลให้การเหนียวติดและอัตราเร็วการเชื่อมโยงลดลง เนื่องจากยางมีความเป็นกรดมากขึ้นทำให้ห่วงปฏิกิริยาเชื่อมโยงกรดไขมันที่นิยมใช้มากที่สุดคือ กรดสเตียริก นอกจากนี้เกลือโลหะของกรดไขมัน เช่น เกลือของสังกะสี นิยมใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์และสารช่วยกระบวนการผลิต เนื่องจากละลายในยางได้มากกว่ากรดไขมัน สามารถเติมลงไปปริมาณมากโดยไม่แพร่ออกมาที่ผิว ทั้งยังเป็นสารหล่อลื่นที่ดี ช่วยลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ประหยัดพลังงาน ช่วยให้สารตัวเติมกระจายในยางได้ดี และทำให้ใช้สารตัวเติมได้ปริมาณมากขึ้น

5. ไขมันสัตว์และน้ำมันพืช (Animal and vegetable fats) ไขมันสัตว์หรือลาโนลิน (Lanolin) สามารถใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์ได้ นอกจากช่วยให้กระบวนการผสมเป็นไปได้ง่ายขึ้น ยังช่วยปรับปรุงการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดรีดผ่านด้ายและการรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องคาลเอนเดอร์ ส่วนการใช้ไขมันพืช เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง ทำให้ยางมีความหนืดลดลง สามารถใช้สารตัวเติมในปริมาณมากขึ้น แต่พันธะคูที่มีอยู่ในน้ำมันเหล่านี้จะส่งผลเสียต่ออายุการใช้งานของยาง

6. พลาสติกไซเซออร์สังเคราะห์ (Synthetic plasticizers) มักเป็นพลาสติกไซเซออร์ปฐมภูมิ (Primary plasticizers) นิยมใช้น้อยกว่าน้ำมันมิเนอรัลเนื่องจากมีราคาแพง ส่วนใหญ่ใช้ในยางที่เข้ากันได้กับน้ำมันมิเนอรัล เช่น ยางไนไตรล์ (Acrylonitrile butadiene rubber, NBR) เกรดที่มีขั้วสูง นอกจากทำให้ยางมีความหนืดลดลง ยังช่วยปรับปรุงสมบัติการเหนียวติด การกระด้างกระดอน และการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ สามารถแบ่งได้หลายกลุ่ม ดังนี้

- กลุ่มอีเทอร์ (Ether plasticizers) เช่น พอลิอีเทอร์ (Polyether) พอลิอีเทอร์-ไทโออีเทอร์ (Polyether-thioether) และไทโออีเทอร์-เอสเทอร์ (Thioether-ester) นิยมใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์สำหรับยาง NBR และยางคลอโรพรีน (Chloroprene, CR) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและปรับปรุงสมบัติที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากเป็นสารระเหยได้ง่าย จึงไม่เหมาะกับยางที่ใช้งานอุณหภูมิสูง

- กลุ่มเอสเทอร์ (Ester plasticizers) เช่น ไดออกทิลฟทาเลต (Dioctylphthalate, DOP) ไดไอโซออกทิลฟทาเลต (Diisooctyl phthalate, DIOP) เป็นต้น จัดเป็นพลาสติกไซเซออร์ที่มีราคาถูก นิยมใช้กับยาง NBR และยาง CR เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและปรับปรุงสมบัติที่อุณหภูมิต่ำ

- กลุ่มคลอรีเนเตดไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbon) เช่น คลอรีเนเตดพาราฟิน (Chlorinated paraffins) นิยมเติมในยางร่วมกับแอนติโมนีไตรออกไซด์ (Sb_2O_3) เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการติดไฟของยาง แต่ถ้าใส่ปริมาณมากเกินไปอาจทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

- กลุ่มที่เป็นพอลิเมอร์ (Polymerization products) เช่น ยางบิวตะไดอีน (Butadiene rubber, BR) ยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (Ethylene-propylene diene monomer, EPDM) ยางสไตรีนบิวตะไดอีน (Styrene-butadiene rubber, SBR) ที่อยู่ในสถานะของเหลว น้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์ชนิดที่ไม่ระเหยและไม่สามารถสกัดออกมาได้ เช่น ยาง BR เหลวสามารถใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์สำหรับยาง BR ซึ่งอยู่ในสถานะของแข็ง

2.4 สารช่วยกระบวนการผลิต

สารช่วยกระบวนการผลิต คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตในขั้นตอนต่าง ๆ เป็นไปได้ง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้น ช่วยลดระยะเวลา และพลังงานที่ใช้ในระหว่างกระบวนการผลิต สารช่วยกระบวนการผลิตบางชนิดทำให้ยางนิ่มขึ้น ช่วยให้สารเติมแต่งกระจายตัวในยางได้สม่ำเสมอ หรือสามารถปรับปรุงสมบัติเฉพาะด้านของยางได้ [13, 17] ได้แก่

2.4.1 เปปไทเซออร์

เปปไทเซออร์ คือ สารที่เติมลงไปในช่วงแรกของการผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดโมเลกุลของยางในขั้นตอนการบดยาง (Mastication) การตัดสายโซ่ของยางเกิดผ่านกลไก 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการตัดสายโซ่ของยางเนื่องจากแรงเชิงกลหรือแรงเฉือน (Thermo-mechanical breakdown) ที่เกิดจากการหมุนของโรเตอร์เครื่องผสม ทำให้เกิดอนุมูลอิสระของยาง ถ้าอยู่ในระบบที่ไม่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาหรือระบบที่มีเฉพาะแก๊สเฉื่อย อนุมูลอิสระเหล่านี้สามารถรวมตัวกันทำให้สายโซ่ของยางยาวเหมือนเดิม แต่เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระสูง เกิดเป็นอนุมูลอิสระเปอร์ออกไซด์และสามารถเกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของยางทางเคมีด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Thermo-oxidative) การเติมเปปไทเซออร์ทำให้โมเลกุลของยางขาดได้ง่ายขึ้น เนื่องจากเปปไทเซออร์ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของยางที่เกิดจากการตัดสายโซ่ขณะทำการผสมอย่างรวดเร็ว ป้องกันการรวมตัวของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น ทำให้ลดระยะเวลาในการบดยาง และประหยัดพลังงานในกระบวนการผสม

2.4.2 สารทำให้เหนียวติด

การผลิตผลิตภัณฑ์ยางบางชนิดต้องประกอบขึ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันก่อนเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง จึงจำเป็นต้องเติมสารทำให้เหนียวติดเพื่อให้ยางคอมพาวด์มีความเหนียวมากขึ้น สามารถนำยางแต่ละส่วนมาประกอบกันได้ง่ายขึ้น แต่ไม่ทำให้ยางที่ผ่านการเชื่อมโยงมีความเหนียวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ยางมีความหนืดลดลง เนื่องจากสารกลุ่มนี้มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูง จึงสามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซออร์ได้ ตัวอย่างสารทำให้เหนียวติดที่นิยมใช้ ได้แก่ คูมาโรนเรซินและอินดีนเรซิน ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) โคเรซิน (Koresins) ไชลอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Xylo-formaldehyde resin) ปีโตรเลียมเรซิน (Petroleum resin) เป็นต้น

โดยทั่วไปเรซินที่มีจุดหลอมเหลวสูงควรเติมในช่วงแรกของการผสม เพื่อให้เรซินแตกตัวและหลอมเหลวได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนเรซินที่มีจุดหลอมเหลวต่ำสามารถเติมพร้อมกับสารตัวเติม เพื่อให้

ยางและสารตัวเติมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น ถ้าต้องการให้ยางมีความเหนียวติดสูงควรเติมในช่วงท้ายของการผสม ส่วนใหญ่นิยมใช้สารทำให้เหนียวติดปริมาณ 3-15 phr

2.4.3 แปกทิกซ์

แปกทิกซ์ คือ สารที่เติมลงไปในช่วงกระบวนการผลิตเพื่อประหยัดพลังงานในการผสม เพิ่มความแข็งแรงยางคอมพาวด์ (Green strength) เพิ่มเสถียรภาพทางรูปร่างของยางที่ขึ้นรูปด้วยการอัดรีดผ่านตาย เพิ่มความต้านทานต่อการล้า และทำให้พื้นผิวมีความเรียบมากขึ้น แต่ทำให้สมบัติบางประการด้อยลง เช่น ความแข็งแรงดึง การยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัด และความต้านทานการขีดถู

2.4.4 สารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นเป็นสารที่เติมลงไปเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติการไหล ลดแรงต้านการเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ในช่วงกระบวนการผลิต โดยไม่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

- สารหล่อลื่นภายใน (Internal lubricants) เป็นสารหล่อลื่นที่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้ ทำให้ความหนืดลดลง ส่งผลให้พอลิเมอร์ไหลได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ การใช้ปริมาณมากจึงอาจส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์

- สารหล่อลื่นภายนอก (External lubricants) เป็นสารหล่อลื่นที่ไม่สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ เกิดเป็นชั้นฟิล์มเกาะระหว่างอนุภาคพอลิเมอร์และผิวโลหะ ทำหน้าที่ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์กับผิวโลหะเพื่อไม่ให้พอลิเมอร์เกาะติดแม่พิมพ์

2.5 มะม่วงหิมพานต์

2.5.1 ลักษณะทั่วไปของมะม่วงหิมพานต์

มะม่วงหิมพานต์เป็นพืชอุตสาหกรรมที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ได้รับความสนใจทั้งภาครัฐบาลและเอกชนพัฒนาเป็นพืชเศรษฐกิจเพื่อเป็นสินค้าส่งออก สามารถปลูกได้ทั่วทุกภาคของประเทศเนื่องจากเป็นพืชทนแล้ง ปลูกได้ในดินที่ระบายน้ำดี เจริญเติบโตเร็ว และดูแลง่าย มะม่วงหิมพานต์เป็นไม้ผลพื้นเมืองของอเมริกาใต้ ต่อมาได้ขยายพันธุ์ไปยังทวีปแอฟริกา อเมริกาเหนือ อเมริกาใต้ และหมู่เกาะต่าง ๆ ในมหาสมุทรแปซิฟิกตลอดจนถึงทวีปเอเชีย ส่วนการเข้ามาในประเทศไทยคาดว่าในปี พ.ศ. 2444 พระยารัษฎานุประดิษฐ์ (คอซิมบี๊ ณ ระนอง) ได้นำเข้ามาจากอินเดียพร้อมกับยางพารา ปัจจุบันประเทศที่ส่งออกผลิตผลจากมะม่วงหิมพานต์รายใหญ่ของโลก ได้แก่ เวียดนาม ไนจีเรีย อินเดีย บราซิล เป็นต้น [8, 18-19]

มะม่วงหิมพานต์มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Anacardium Occidentale L.* วงศ์ *Acardiaceae* เป็นไม้ผลยืนต้น ไม่ผลัดใบ สูงราว 6-12 เมตร แผ่กิ่งก้านสาขาเป็นพุ่มกว้าง ใบหนาคล้ายรูปไข่ ปลายใบป้อม โคนใบแหลมยาว ออกช่อดอกที่ปลายกิ่ง บางดอกรวมเกสรตัวผู้ บางดอกรวมเกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียอยู่ในช่อดอกเดียวกัน ดังนั้นการผสมพันธุ์จึงทำการผสมในช่อเดียวกัน

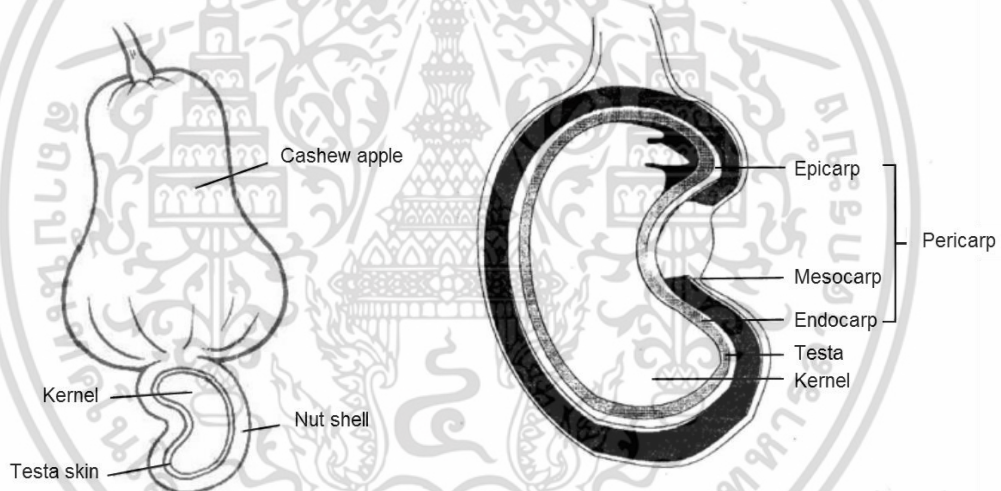
ผลของมะม่วงหิมพานต์ประกอบด้วยผลปาลอม (Cashew apple) อยู่ด้านบน ซึ่งเป็นก้านดอกที่ขยายตัวพองขึ้น ส่วนผลจริงคือเมล็ดที่รูปร่างเหมือนไตติดอยู่ตรงผลปาลอม ประกอบด้วยเปลือก (Cashew nut shell) เยื่อหุ้มเมล็ดใน (Cashew testa) และเมล็ดใน (Cashew kernel) ส่วนของเปลือกมีพืวด้านนอก (Epicarp) และพืวด้านใน (Endocarp) หุ้มชั้น Mesocarp ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คล้ายรังผึ้งซึ่งเป็นชั้นที่กักเก็บน้ำมันไว้ น้ำมันนี้เป็นผลพลอยได้จากการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เพื่อผลิตมะม่วงหิมพานต์สำหรับการบริโภค



รูปที่ 2.7 ผลมะม่วงหิมพานต์ [8]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ [18, 19]

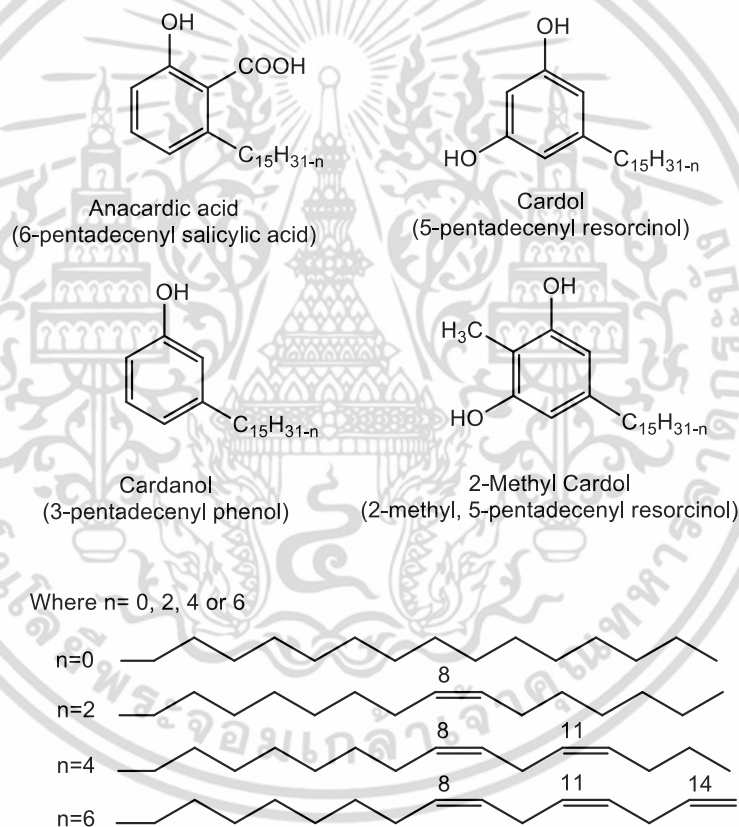
2.5.2 น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

CNSL เป็นของเหลวหนืด สีน้ำตาลเข้มหรือดำ ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvent) มีฤทธิ์เป็นกรด หากสัมผัสเป็นเวลานานอาจทำให้ผิวหนังเปื่อย เมื่อได้รับความร้อนทำให้เกิดกลิ่นฉุนและไอระเหยที่ทำให้ระคายเคืองตาและจมูก ได้จากการสกัดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ องค์ประกอบทางเคมีของ CNSL ประกอบด้วยสาร 4 ชนิด ได้แก่ กรดอนุคาร์ดิก คาร์ดอล (Cardol) คาร์ดานอล และ 2-เมทิลคาร์ดอล (2-Methyl cardol) สารประกอบดังกล่าวมีโครงสร้างทางเคมีเป็นอนุพันธ์ของฟีนอลและมีหมู่ข้างเคียงเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ [20]

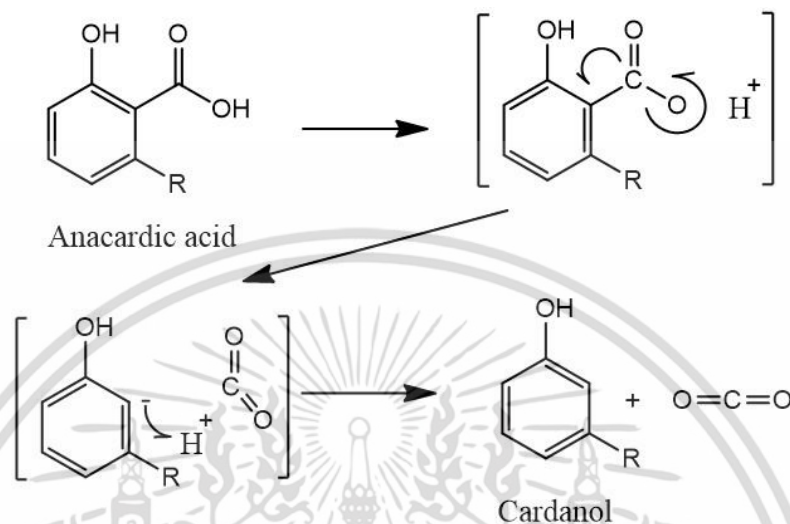


รูปที่ 2.10 องค์ประกอบทางเคมีของ CNSL [21]

เนื่องจาก CNSL มีกรดอนุคาร์บิกเป็นองค์ประกอบหลักทำให้มีความเป็นกรดสูง จึงต้องปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปงาน โดยการให้ความร้อนแก่ CNSL เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเพื่อให้เกิดกรดอนุคาร์บิกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนอลและ CO_2 ทั้งยังเป็นการกำจัดน้ำที่หลงเหลืออยู่ ทำให้ CNSL ที่ผ่านการตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (DCNSL) มีความเป็นกรดลดลง นำไปใช้งานได้ง่ายและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้คาร์บอนอลสามารถทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นภายใต้สุญญากาศที่

อุณหภูมิสูง เอกสารนี้เผยแพร่ฟรีที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดผ่านอนุมูลอิสระ (Free radical) เริ่มจากโปรตอนที่ถูกดีคาร์บอกซิเลชันแตกตัวออกเป็นไอออน อิเล็กตรอนอิสระของออกซิเจนสร้างพันธะกับคาร์บอนที่อยู่ติดกัน เปลี่ยนตำแหน่งเข้าไปอยู่ที่วงเบนซินซึ่งเสถียรกว่า และหลุดออกมาเป็น CO_2 สิ้นสุดที่โปรตอนในตอนแรกสร้างพันธะกับอิเล็กตรอนอิสระที่วงเบนซินได้เป็นคาร์ดานอล [22]



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของ CNSL [22]

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของ CNSL และ Technical CNSL [23]

องค์ประกอบ	CNSL	Technical CNSL
Anacardic acid	64.93	-
Cardol	11.31	11.25
Cardanol	1.2	62.86
2-Methyl cardol	2.04	2.08
Polymer	20.3	23.8

หมายเหตุ : Technical CNSL คือ CNSL ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของ CNSL และ Technical CNSL [24]

องค์ประกอบ	CNSL	Technical CNSL
Specific gravity, 25°C	0.958	0.96
Refractive index, 20°C	1.5158-1.5112	1.5212-1.5218
Viscosity (cP), 25°C	400	435
Iodine value (Wij's)	269	254
Saponification value	19.6	29.7
Acetyl value	173	156

หมายเหตุ : Technical CNSL คือ CNSL ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.1 การสกัดน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

CNSL เป็นของเหลวอยู่ในส่วนที่เป็นรูปพวงคล้ายรังผึ้ง (Mesocarp) ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งมีอยู่ประมาณ 30% ของน้ำหนักเปลือก การสกัด CNSL สามารถทำได้หลายวิธี [19, 22] ดังนี้

1. วิธีทางกล ได้แก่ การบีบอัดด้วยเครื่องบีบอัดแบบสกรู (Screw press) หรือเครื่องบีบอัดระบบไฮดรอลิก (Hydraulic press) ซึ่งเป็นระบบต่อเนื่อง วิธีทางกลเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก โดยทำการบีบอัดเปลือกที่ผ่านการกะเทาะเอาเมล็ดในออกแล้ว ทำให้น้ำมันไหลออกมา วิธีนี้อาจต้องเอาเปลือกไปคั่วให้ความร้อนก่อน เพื่อให้ผิวนอกกรอบและช่วยให้น้ำมันไหลออกมาดีขึ้น น้ำมันที่ได้ต้องนำไปกรองเอาฝุ่นออกอีกครั้งเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน นอกจากนี้ทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นส่งผลให้เกิดไอรระเหยซึ่งระคายเคืองตาและจมูกผู้ทำงาน และ CNSL อาจลุกติดไฟได้ วิธีนี้มีน้ำมันเหลือในกากประมาณ 4-5% โดยน้ำหนักกาก

2. วิธีการสกัด สามารถสกัด CNSL ออกจากเปลือกได้ทั้งก่อนและหลังการกะเทาะเอาเมล็ดในออก แบ่งได้ 3 วิธีคือ

- การสกัดด้วยไอน้ำร้อน โดยการนำเปลือกใส่หม้อทรงกระบอกแล้วผ่านไอน้ำอุณหภูมิ 200-250°C ประมาณ 2-3 นาที วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเพราะเหลือปริมาณน้ำมันในกากมากที่สุดประมาณ 7-12% โดยน้ำหนักกากและไม่คุ้มค่าการลงทุนเนื่องจากใช้พลังงานสูงในการผลิตไอน้ำอุณหภูมิสูง

- การสกัดด้วยการทอดในน้ำมันร้อน เป็นการสกัด CNSL จากเปลือกที่ยังไม่ผ่านการกะเทาะเอาเมล็ดในออก โดยนำไปทอดในน้ำมันพืชที่อุณหภูมิประมาณ 200°C ทำให้ผิวนอกกรอบและเปราะขึ้นจึงกะเทาะเอาเมล็ดในออกได้ง่ายขึ้น แต่อาจทำให้เมล็ดในสุกเกินไปถ้าควบคุมเวลาและอุณหภูมิในการทอดไม่ดี นอกจากนี้การแยก CNSL ออกจากน้ำมันพืชทำได้ยากเนื่องจากละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จึงได้มีการประยุกต์ใช้ CNSL เป็นตัวกลางให้ความร้อนแทนน้ำมันพืชและกากที่เหลือถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อ ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำมาก อย่างไรก็ตาม CNSL ที่ได้มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ ทั้งยังอาจเกิดอันตรายจาก CNSL ที่ลุกติดไฟหรือไอรระเหยที่เกิดขึ้น วิธีนี้มีน้ำมันเหลือในกากประมาณ 6-12% โดยน้ำหนักกาก

- การสกัดด้วยตัวทำละลายเคมี เหมาะกับการสกัด CNSL จากเปลือกที่ผ่านการกะเทาะเอาเมล็ดในออกแล้ว ตัวทำละลายเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ ปิโตรเลียมอีเทอร์ เฮกเซน เป็นต้น เริ่มจากนำเปลือกที่ผ่านการกะเทาะมาทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นออก บดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปสกัดด้วยตัวทำละลายเคมี จากนั้นนำของผสมไปกลั่นเพื่อแยก CNSL ออกจากตัวทำละลาย การสกัดด้วยวิธีนี้ยุ่งยาก ใช้เครื่องมือราคาแพง จึงเหมาะกับการผลิตในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

2.5.2.2 การใช้ประโยชน์น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

เนื่องจาก CNSL มีสีเข้มและเป็นพิษ ทำให้การใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นไปอย่างจำกัด การใช้งาน CNSL มีดังนี้ [22, 25]

1. สารเคลือบผิว สารเคลือบที่ได้จาก CNSL มีสมบัติในการทนต่อความชื้นและต่างได้ดี มีความยืดหยุ่นและการยึดเกาะที่ดี ทั้งยังป้องกันการทำลายของปลวกและแมลงได้ แต่เนื่องจาก CNSL มีสีเข้ม จึงมักใช้ในงานสีเข้มหรือสีดำเท่านั้น เช่น ใช้เป็นสีรองพื้นทากันสนิม สีกันเปรียงสำหรับท้องเรือ เป็นต้น แลคเกอร์จาก CNSL สามารถใช้เคลือบผิวสำหรับปกป้องหรือตกแต่งเฟอร์นิเจอร์ อาคาร ยานยนต์ เป็นต้น โดยฟิล์มเคลือบผิวที่ได้มีความเหนียว เงามาม และยึดเกาะผิวได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

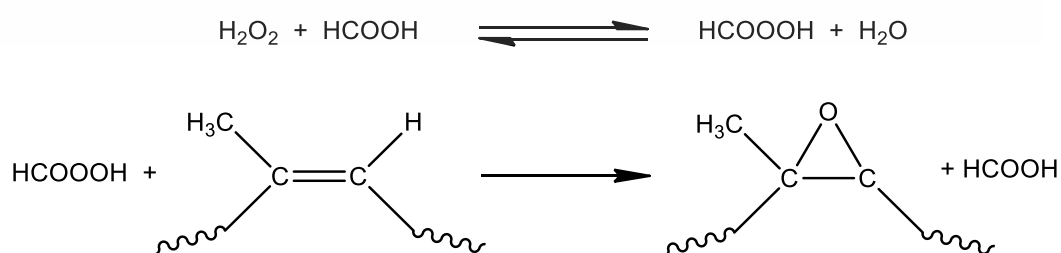
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กาวสำหรับไม้อัด มักใช้ในรูป CNSL-แอลดีไฮด์ (CNSL-aldehyde) คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (Cardanol-formaldehyde) หรือ CNSL-ไซลอล-แอลดีไฮด์ (CNSL-xylol-aldehyde)
3. สารเติมแต่งสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีการเสียดสี เช่น แผ่นคลัชต์ ผ้าเบรก ฝาประกับเพลลา เป็นต้น โดยชิ้นส่วนที่มีส่วนประกอบของเรซินจาก CNSL มีสมบัติในการช่วยลดอุณหภูมิและช่วยลดเสียงที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีในระหว่างการใช้งาน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น
4. สารเติมแต่งสำหรับอุตสาหกรรมยาง เช่น CNSL-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (CNSL-formaldehyde resin) ใช้เป็นสารต้านการเสื่อมสภาพและสารต้านการเกิดออกซิเดชัน
5. สารเติมแต่งสำหรับคอนกรีตเพื่อเพิ่มความทนทานแก่พื้น เช่น การใช้ CNSL-ฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นสารเร่งแข็งคอนกรีตและสารเคลือบผิวภายนอก
6. ฉนวนสำหรับอุปกรณ์เชื่อมต่อทางไฟฟ้า ขดลวดที่ชุบด้วยวานิลินจาก CNSL มีสมบัติเชิงกลดี กระจายความร้อนออกจากขดลวดได้ดี ทนความร้อนสูง และป้องกันน้ำได้
7. วัสดุสำหรับแม่พิมพ์หล่อโลหะ การเติมเรซินจาก CNSL ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับแม่พิมพ์ ทนความชื้น ช่วยให้ผิวของชิ้นงานเรียบขึ้น และถอดจากแม่พิมพ์ได้ง่าย
8. การผลิตโฟมพอลิยูรีเทน โดยใช้ CNSL แทนการใช้พอลิออล
9. การผลิตเชื้อเพลิงแข็งแบบถ่านหิน

2.6 ปฏิกริยาอีพอกซิเดชัน

ปฏิกริยาการดัดแปรโครงสร้างเคมี (Chemical modification) เป็นกลไกสำคัญในการพัฒนาสมบัติของพอลิเมอร์ให้มีสมบัติที่ต้องการโดยไม่ต้องทำปฏิกริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์ เพียงนำพอลิเมอร์ที่มีอยู่แล้วมาทำปฏิกริยาเคมีตามความเหมาะสม เพื่อให้ได้โครงสร้างที่ส่งผลต่อสมบัติที่ต้องการ [26]

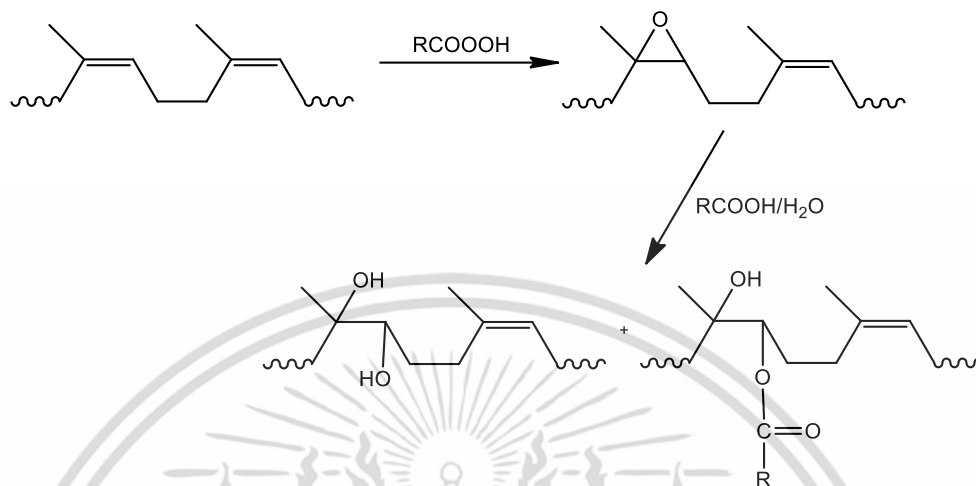
ปฏิกริยาอีพอกซิเดชันเป็นปฏิกริยาการดัดแปรโครงสร้างเคมีชนิดหนึ่ง โดยทำการดัดแปรโครงสร้างที่มีพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอนกับคาร์บอน (C=C) อยู่ในโมเลกุล เกิดเป็นวงอีพอกไซด์ (Epoxide ring) หรือวงออกไซด์ (Oxirane ring) เช่น การสังเคราะห์ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized natural rubber, ENR) จากปฏิกริยาอีพอกซิเดชันระหว่างยางธรรมชาติ กรดอะซิติก (Acetic acid) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยางธรรมชาติ ทำให้ยางมีสภาพขี้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติการทนต่อน้ำมันและความต้านทานการซึมผ่านของอากาศดีขึ้น



รูปที่ 2.12 กลไกการเกิดปฏิกริยาอีพอกซิเดชันระหว่างยางธรรมชาติ กรดอะซิติก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาออกซิเดชันอาจเกิดได้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น เมื่อเติมเปอร์ออกไซด์ลงไปปริมาณมากพบว่าอาจเกิดปฏิกิริยาเปิดวงออกไซด์ ทำให้ได้หมู่แทนที่ประเภทคาร์บอนิล (Carbonyl, C=O) และหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, -OH) เกิดขึ้น



รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาการเปิดวงออกไซด์ในยางธรรมชาติออกซิไดซ์ [26]

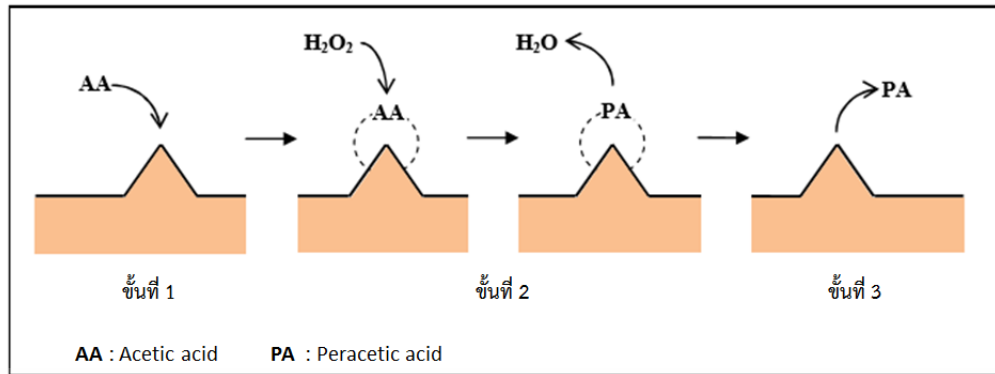
2.6.1 รูปแบบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

การตัดแปรรองสร้างน้ำมันด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถทำได้หลายวิธี [27] ดังนี้

1. ปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบ *in-situ* ด้วยเปอร์ออกไซด์อะซิติก (Peroxyacetic) หรือเปอร์ออกซีฟอร์มิก (Peroxyformic) วิธีนี้สามารถใช้ได้ทั้งการทำวิจัยขนาดเล็ก ๆ และในอุตสาหกรรม นิยมใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เอนไซม์ และเรซินชนิดประจุบวก (Acidic ion exchange resin)
2. ปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้เปอร์ออกไซด์อินทรีย์ (Organic peroxides) หรือเปอร์ออกไซด์อนินทรีย์ (Inorganic peroxides) โดยมีโลหะทรานซิชันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ไนไตรล์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Nitrile hydrogen peroxide) ซึ่งเป็นเปอร์ออกไซด์อนินทรีย์
3. ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยฮาโลไฮไดริน (Halohydrines) เช่น การใช้กรดไฮโปฮาลัส (Hypohalous acids, HOX) และเกลือเป็นรีเอเจนต์ วิธีนี้ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีความเป็นพิษสูง
4. ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโมเลกุลออกซิเจนและใช้ซิลเวอร์ (Ag) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่มีอัตราการเปลี่ยนเป็นหมู่ออกไซด์ต่ำ นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับน้ำมันพืช มักทำให้น้ำมันพืชสลายตัวเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ที่ระเหยได้ เช่น แอลดีไฮด์ คีโตน เป็นต้น ทำให้วิธีนี้ไม่เหมาะกับการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช

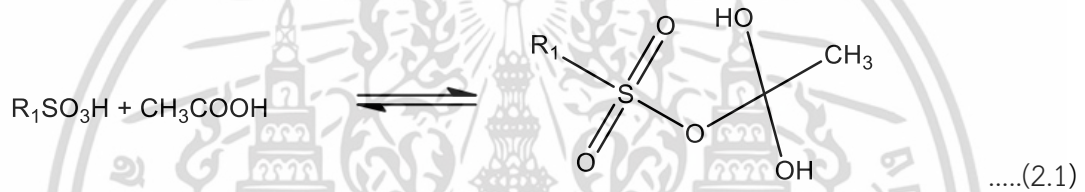
ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบ *in situ* ระหว่างกรดอะซิติก (CH_3COOH) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยมี Acidic ion exchange resin ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid, RSO_3H) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [28] มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

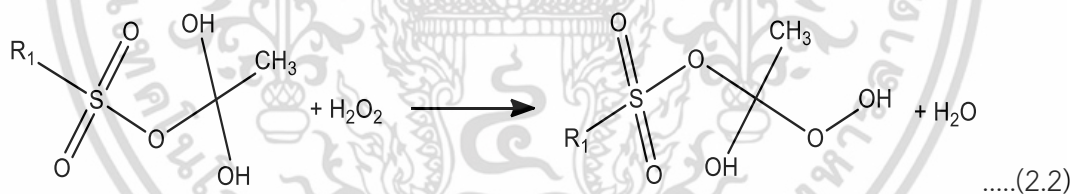


รูปที่ 2.14 การเกิดกรดเปอร์ออกซีอะซีติก จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดอะซีติกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมี Acidic ion exchange resin เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [28]

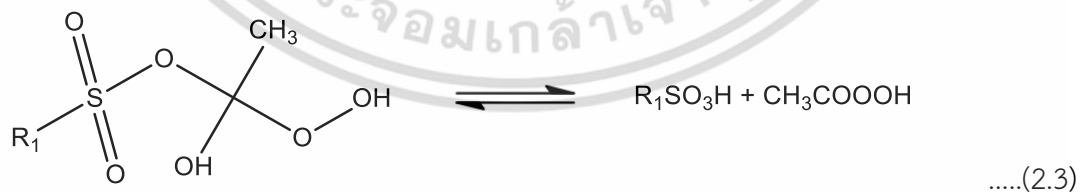
ขั้นที่ 1 กรดอะซีติกถูกดูดซับที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



ขั้นที่ 2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดอะซีติกที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ได้กรดเปอร์ออกซีอะซีติก (CH_3COOOH) ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำ

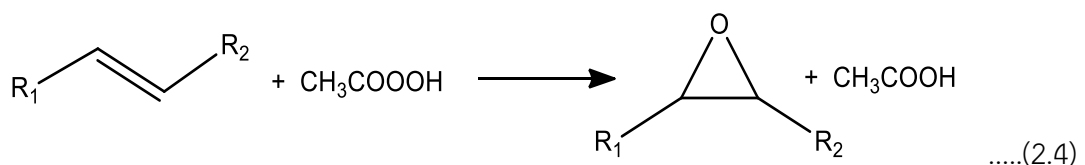


ขั้นที่ 3 กรดเปอร์ออกซีอะซีติกหลุดออกจากผิวตัวเร่งปฏิกิริยา



เมื่อ R_1 คือ styrene-divinylbenzene

ขั้นที่ 4 กรดเปอร์ออกซีอะซีติกทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ เกิดเป็นวงอีพอกไซด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 การทดสอบการดำเนินไปของปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน

อีพอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ซึ่งเป็นสารประกอบไซคลิกอีเทอร์ชนิดหนึ่ง จัดอยู่ในสารประกอบเฮเทอโรไซคลิกที่มี 2 อะตอมของคาร์บอนและ 1 อะตอมของออกซิเจน การดำเนินไปของปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันสามารถทดสอบได้หลายวิธี [27] ดังนี้

1 ปริมาณออกไซเรน (Oxirane oxygen content, OOC)

วงออกไซเรนหรืออีพอกไซด์เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมออกซิเจนถูกเพิ่มไปยังบริเวณพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอน (C=C) ในโครงสร้าง ปริมาณออกไซเรนที่เกิดขึ้นสามารถทดสอบได้จากปริมาณพันธะคู่ที่เปลี่ยนแปลงไปขณะปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันดำเนินไปเพื่อเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา ดังนั้นปริมาณวงออกไซเรนมากแสดงถึงการเปลี่ยนจากพันธะคู่เป็นอีพอกไซด์สูง



รูปที่ 2.15 วงออกไซเรน

2 ค่าไอโอดีน (Iodine value, IV)

ปริมาณพันธะไม่อิ่มตัวสามารถบ่งบอกได้ด้วยค่าไอโอดีน โดยคำนวณจากปริมาณไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยากับพันธะไม่อิ่มตัวภายใต้สภาวะที่กำหนด ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันทำให้พันธะคู่ในโครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นวงอีพอกไซด์ จึงมีปริมาณพันธะคู่ลดลง ส่งผลให้ค่าไอโอดีนลดลง

3 ปริมาณไกลคอล (Glycol content)

ไกลคอลเกิดจากการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของวงอีพอกไซด์ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ทำให้ปริมาณวงอีพอกไซด์ลดลง ทั้งยังแสดงถึงความไม่เสถียรของวงอีพอกไซด์ มักเกิดในสภาวะที่อุณหภูมิสูง และเมื่อมีปริมาณกรดหรือเบสออกไซด์มากเกินไป

2.7 การผสมยาง

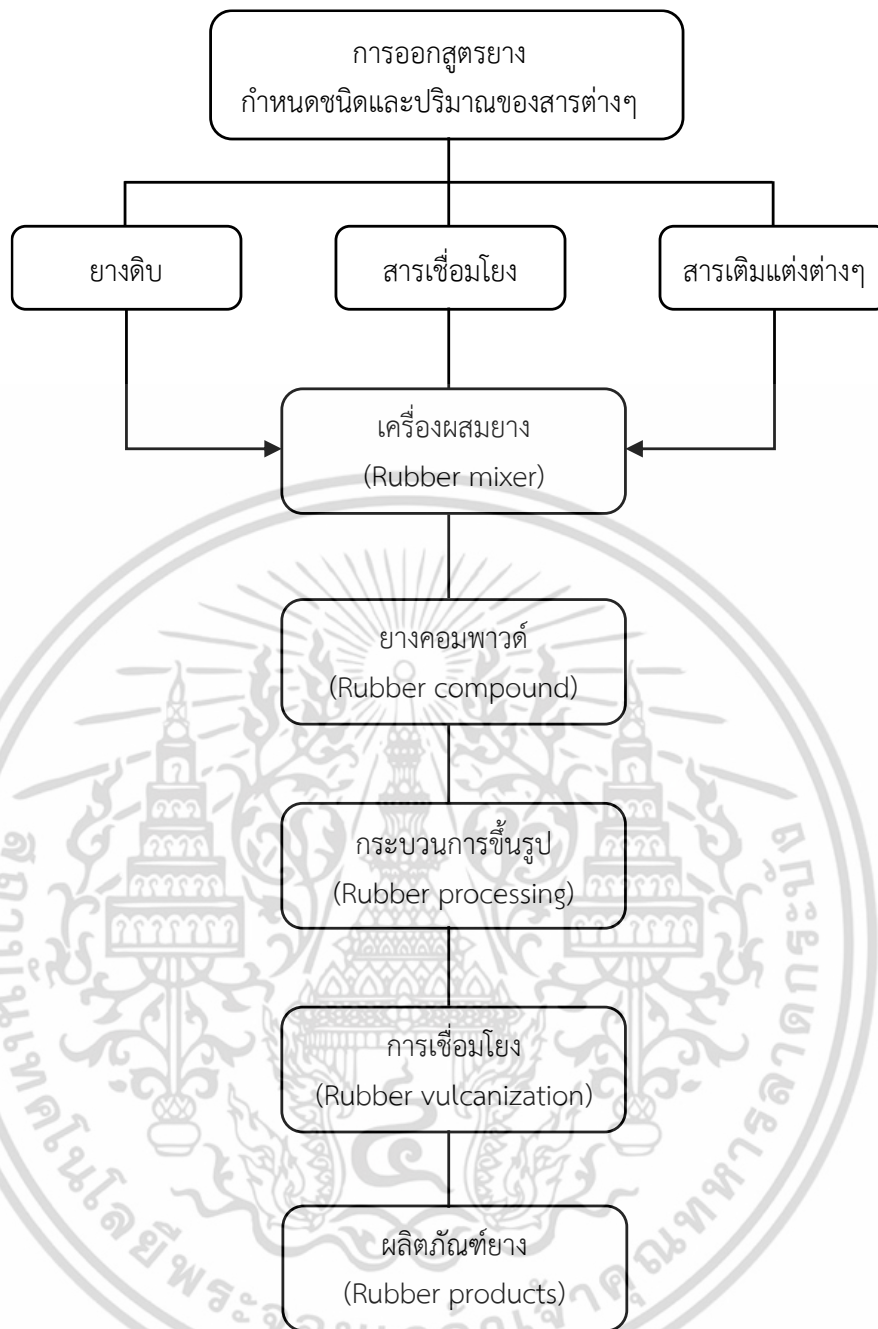
เนื่องจากยางดิบมีสมบัติไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์โดยตรง จำเป็นต้องมีการผสมยางดิบกับสารเคมีต่าง ๆ ได้เป็นยางคอมพาวด์ (Rubber compound) เพื่อปรับสมบัติให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ จากนั้นนำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการเชื่อมโยงและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ทำให้ยางมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ เพื่อให้มีความแข็งแรงเหมาะสมกับการใช้งาน กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง [29] มีดังนี้

2.7.1 การออกสูตรเคมียาง

การออกสูตรเคมียางให้เหมาะสมนั้นนับเป็นขั้นตอนแรกที่มีความสำคัญอย่างมากในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากจะส่งผลต่อสมบัติหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง อีกทั้งยังส่งผลอย่างมากต่อต้นทุนการผลิต จุดประสงค์หลักของการออกสูตรเคมียาง ได้แก่

- เพื่อให้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ (Processability)
- เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีสมบัติตามที่ต้องการ (Properties)

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อควบคุมต้นทุนการผลิตตามที่ต้องการ (Price) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แผนผังกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง [30]

โดยทั่วไปสารที่ใช้ในสูตรเคมียาง ประกอบด้วย

1. ยาง เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber, SR) ยางผสม (Rubber blends) ยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer, TPE) เป็นต้น
2. สารทำให้ยางเชื่อมโยง คือ สารที่ทำให้โมเลกุลยางเปลี่ยนจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-D Network) ผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซชัน (Vulcanization) ได้แก่ กำมะถัน (Sulfur, S) เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ออกไซด์ของโลหะ (Metal oxides) เป็นต้น ยางที่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยงมีความยืดหยุ่นสูงและมีสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง คือ สารเคมีที่เติมลงไปใ้ในยางปริมาณเล็กน้อยเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง ลดเวลาในการเชื่อมโยง ทำให้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) และสมบัติเชิงกลดีขึ้น ได้แก่ สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates) เบนโซไทอะโซลซัลฟีนามาได์ (Benzothiazole sulfenamide) เมอร์แคปโต (Mercapto) ไทยูแรม (Thiurams) และกัวนิติน (Guanidines) เป็นต้น

4. สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง คือ สารเคมีที่เติมลงไปเพื่อทำหน้าที่กระตุ้นให้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงทำงานได้ดีขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเร็วขึ้น เวลาในการเชื่อมโยงลดลง โดยทั่วไปนิยมใช้ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ปริมาณ 2-5 phr ร่วมกับกรดสเตียริก (Stearic acid) ปริมาณ 1-2 phr สำหรับการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน

5. สารตัวเติม คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อลดต้นทุนการผลิต บางชนิดอาจช่วยเสริมแรง ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น สารตัวเติมสามารถแบ่งตามประสิทธิภาพการเสริมแรงออกเป็น 2 กลุ่มคือ

- สารตัวเติมเสริมแรง ได้แก่ เขม่าดำ ซิลิกา
- สารตัวเติมไม่เสริมแรง ได้แก่ ดินขาว แคลเซียมคาร์บอเนต

6. พลาสติไซเซอร์และสารช่วยกระบวนการผลิต คือ สารเคมีที่เติมลงไปแล้วทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดียิ่งขึ้น ความหนืดลดลง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น

7. สารต้านการเสื่อมสภาพ คือ สารเคมีที่เติมลงไปเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่มีพันธะคู่นิโคโรสร้าง ทำให้ยางเสื่อมสภาพได้เมื่อสัมผัสกับความร้อน โอโซน หรือออกซิเจน สารต้านการเสื่อมสภาพมีหลายชนิดทั้งกลุ่มที่เปลี่ยนสียาง เช่น อนุพันธ์ของเอมีน (Amine derivatives) และกลุ่มที่ไม่เปลี่ยนสียาง เช่น อนุพันธ์ของฟีนอล (Phenol derivatives)

8. สารอื่น ๆ เช่น สี (Pigments) สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents) สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants) เป็นต้น

2.7.2 การผสมยาง

เมื่อออกสูตรเคมียางแล้ว ต่อมาเป็นขั้นตอนการผสมยางและสารเคมีเข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องผสม ยางที่ผ่านการผสมสารเคมีแล้วเรียกว่า ยางคอมพาวด์ การผสมยางถือเป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ถ้าสารเคมีที่เติมลงไปกระจายตัวหรือแตกตัวได้ไม่ดี จะส่งผลโดยตรงต่อความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการใช้กระบวนการผสมที่แตกต่างกัน เช่น ชนิดของเครื่องผสม สภาวะในการผสม หรือลำดับการเติมสารเคมีที่แตกต่างกัน ย่อมส่งผลต่อสมบัติที่แตกต่างกันแม้ว่าเป็นยางสูตรเดียวกัน

เครื่องผสมยางที่ใช้โดยทั่วไปมี 2 ประเภทคือ เครื่องผสมยางระบบเปิด เช่น เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เป็นเครื่องผสมที่ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วต่างกัน ทำให้เกิดแรงเฉือนที่จำเป็นสำหรับบดผสมยางกับสารเคมี ยางและสารเคมีถูกใส่ลงในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งและถูกรีดออกมาเป็นแผ่นพันรอบลูกกลิ้ง ผู้ผสมต้องกรีดยางและพับไปมาขณะเติมสารเคมีเพื่อให้สารเคมีกระจายเข้าสู่เนื้อยางได้ดี อีกประเภทหนึ่งคือ เครื่องผสมยางระบบปิด เช่น เครื่องผสมแบบบานบุรี (Banbury internal mixer) เครื่องนวดยางหรือนีดเดอร์ (Kneader)

เป็นต้น เครื่องผสมระบบปิดมีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการผสมมากกว่าการใช้เครื่องผสมแบบเปิด อย่างไรก็ตาม เครื่องผสมระบบปิดมีต้นทุนที่สูงกว่าและต้องบำรุงรักษาบ่อยครั้งกว่า เครื่องผสมแบบเปิดอาจมีต้นทุนที่ต่ำกว่า แต่ต้องบำรุงรักษาบ่อยครั้งกว่า เครื่องผสมระบบปิดไม่ผ่านการฉีกขาดหรือการสึกหรอของลูกกลิ้งมากนัก ในขณะที่เครื่องผสมแบบเปิดมีการสึกหรอของลูกกลิ้งที่รุนแรงกว่า การเลือกใช้เครื่องผสมขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานที่ต้องการ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ 2 ลูกกลิ้ง เพราะสารเคมีไม่ฟุ้งกระจายขณะผสม ลดการสูญเสียสารเคมี ลดการผิดพลาด เนื่องจากการใช้แรงงานคน และสามารถผสมได้ในปริมาณสูง

2.7.3 การตรวจสอบคุณภาพยางคอมพาวด์เบื้องต้น

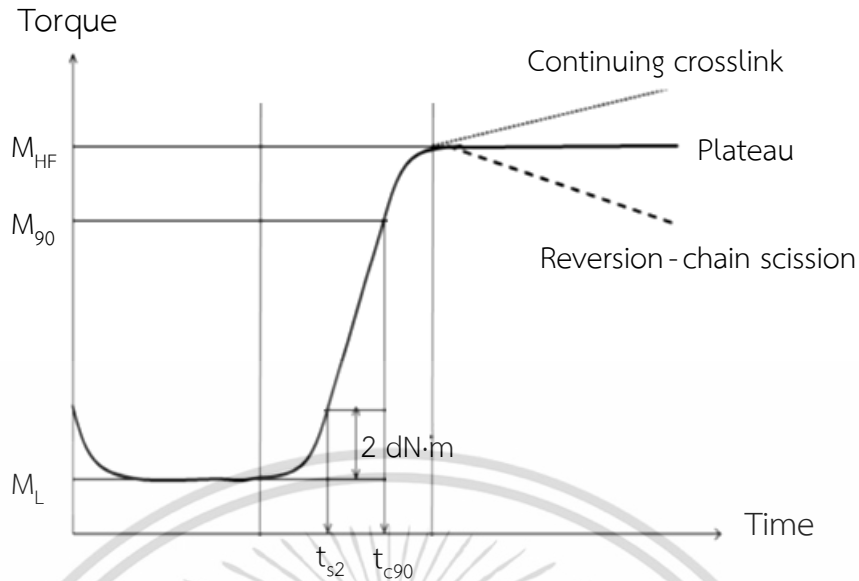
เมื่อผสมยางคอมพาวด์แล้ว ควรตรวจสอบคุณภาพยางคอมพาวด์เบื้องต้นก่อนการนำไปขึ้นรูปในขั้นตอนต่อไป เพื่อให้แน่ใจว่าคุณภาพเป็นไปตามที่ต้องการและไม่เกิดการผิดพลาดในระหว่างกระบวนการผสม นอกจากนี้ยังช่วยควบคุมความสม่ำเสมอทางคุณภาพของการผลิต การตรวจสอบสมบัติพื้นฐานของยางคอมพาวด์ มีดังนี้

1. ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) เป็นสมบัติพื้นฐานที่นิยมใช้ตรวจสอบคุณภาพยางคอมพาวด์ เพราะสามารถบ่งบอกความผิดพลาดในระหว่างกระบวนการผสม ความหนืดมูนนี่เป็นสมบัติที่บ่งชี้ความสามารถในการไหลหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางคอมพาวด์ ทดสอบด้วยเครื่องมือนี้วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) ประกอบด้วยโรเตอร์ที่วางอยู่ระหว่างด้าย 2 อันคือ ด้ายบนและด้ายล่าง การเลือกขนาดโรเตอร์ขึ้นกับความหนืดของยาง ถ้ายางมีความหนืดสูงใช้โรเตอร์ขนาดเล็ก ส่วนยางที่มีความหนืดปานกลางหรือต่ำใช้โรเตอร์ขนาดใหญ่ ทำการทดสอบโดยประกบยางด้านบนและล่างของโรเตอร์แล้วใส่ในช่องว่างระหว่างด้าย ให้ความร้อน (Preheat) เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ยางมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิทดสอบ จากนั้นโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วประมาณ 2 รอบต่อ นาที ทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างผิวโรเตอร์และผิวของด้าย แรงที่ใช้หมุนโรเตอร์สัมพันธ์โดยตรงกับความหนืดยางคอมพาวด์ เครื่องบันทึกแรงบิดที่ใช้หมุนตามเวลาและแปลงค่าที่ได้อยู่ในรูปของ Mooney viscosity (MV) โดยนิยมอ่านค่าความหนืดมูนนี่หลังจากโรเตอร์หมุนไป 4 นาที

2. ลักษณะการเชื่อมโยงของยาง ภายหลังการผสมทุกครั้งควรศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงของยาง เพราะกราฟที่ได้จากการทดสอบสามารถบอกความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสมที่ส่งผลต่อการเชื่อมโยงได้ เช่น เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) เวลาเชื่อมโยง (Cure time, t_{c90}) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของยางคอมพาวด์ที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิต ถ้ายางเชื่อมโยงเร็วเกินไปหรือมีระยะเวลาเริ่มเชื่อมโยงสั้นเกินไป อาจทำให้ยางไหลไม่เต็มแม่พิมพ์ ดังนั้นควรออกสูตรยางให้มีเวลาเริ่มเชื่อมโยงนานพอให้ยางไหลเต็มแม่พิมพ์ แต่ไม่นานจนเกินไปเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มปริมาณการผลิต ลักษณะการเชื่อมโยงของยางสามารถทดสอบโดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating disc rheometer, ODR) หรือเครื่องรีโอมิเตอร์แบบด้ายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer, MDR)

เครื่อง ODR เป็นเครื่องมือที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงของยางโดยตรง ตัวเครื่องประกอบด้วยโรเตอร์ที่เคลื่อนที่อยู่ในช่องว่างระหว่างด้ายบนและด้ายล่าง โดยโรเตอร์ของเครื่องมีรูปร่างเป็นรูปโคนคู่ประกบ (Biconical shape) และการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในระหว่างการทดสอบจะเป็นแบบแกว่งเป็นมุมแคบ ๆ (1° หรือ 3°) ด้วยความถี่ 1.67 Hz หรือ 100 รอบต่อ นาที เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทำลายโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของยาง ส่วนเครื่อง MDR เป็นเครื่องมือทดสอบชนิดไม่มีโรเตอร์ (Rotorless curemeter) โดยทั่วไปเครื่อง MDR มีหลักการทำงานและวิธีการทดสอบเหมือนกับเครื่อง ODR เมื่อเริ่มการทดสอบด้ายล่างจะแกว่งไป-มาเป็นมุมแคบ ๆ (ประมาณ 0.5°) ด้วยความถี่ 1.7 Hz จากนั้นเครื่องบันทึกค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ผลการทดสอบที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง ODR นอกจากนี้เครื่อง MDR มีข้อดีเหนือกว่าเครื่อง ODR คือ มีแรงเสียดทานต่ำกว่าและการถ่ายเทความร้อนจากด้ายสู่ยางเกิดได้รวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 กราฟการเชื่อมโยงของยาง [30]

ตามมาตรฐาน ASTM ได้นิยามค่าต่าง ๆ ในกราฟการเชื่อมโยง ดังนี้

M_L = ค่าแรงบิดต่ำสุด

M_{HF} = ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)

M_{HR} = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟที่สูงสุดแล้วลดลง (Reversion)

M_H = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟในเวลาที่ทดสอบเมื่อกราฟเพิ่มขึ้น (Marching)

t_{s2} = เวลาเริ่มเชื่อมโยง คือ เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจนกระทั่งแรงบิดเพิ่มขึ้น 2 dN·m เปรียบเทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด

M_{90} = ค่าแรงบิดที่ 90% ของการเชื่อมโยง คำนวณได้จาก

$$M_{90} = M_L + 0.9 (M_{HF} - M_L) \quad \dots(2.5)$$

t_{c90} = เวลาเชื่อมโยง คือ เวลาจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อมโยง 90%

CRI = ดัชนีอัตราการเชื่อมโยง คำนวณได้จากสมการ

$$CRI = 100 / t_{c90} - t_{s2} \quad \dots(2.6)$$

ลักษณะการเชื่อมโยงของยางแบ่งเป็น 3 ช่วงคือ

- ช่วงเริ่มต้น (Induction) เมื่อยางได้รับความร้อน ยางนิ่มลง ทำให้แรงบิดลดลงในระยะแรก จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิของยางเริ่มเข้าสู่สมดุล ความหนืดของยางมีค่าต่ำสุดและคงที่อยู่นาน จุดนี้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มเกิดการเชื่อมโยง

- ช่วงการเชื่อมโยง (Curing) เมื่อยางเกิดการเชื่อมโยง ความหนืดของยางเริ่มสูงขึ้น (แรงบิดสูงขึ้นตามเวลา) ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มปิดตายจนถึงเวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยงเรียกว่า เวลาเริ่มเชื่อมโยง เป็นตัวบ่งชี้ระยะเวลาที่ยางยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ เมื่อทดสอบต่อไปค่าแรงบิดจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามระดับของการเชื่อมโยงจนกระทั่งการเชื่อมโยงเกิดขึ้นสมบูรณ์ แรงบิดที่จุดนี้มีค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สุด ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงค่ามอดูลัสเฉือนของยางและเวลาในการเชื่อมโยง ซึ่งเป็นเวลาที่ทำให้ยางเชื่อมโยง 90% เนื่องจากการเชื่อมโยง 100% มักทำให้สมบัติเชิงกลบางประการของยางด้อยลง

- ช่วงการเชื่อมโยงที่มากเกินไป (Overcure) เมื่อปฏิกิริยาเชื่อมโยงเกิดสมบูรณ์แล้วแต่ยังคงทดสอบต่อไป ค่าแรงบิดของยางอาจคงที่ตามเวลา (Plateau) มีค่าสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ (Marching) หรืออาจมีค่าต่ำลง (Reversion) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสารเคมีที่ใช้

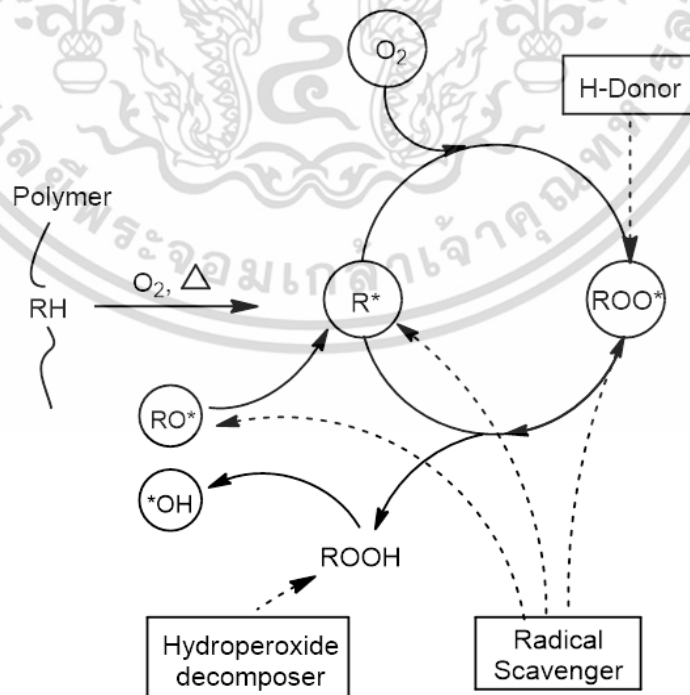
2.7.4 การขึ้นรูปและเชื่อมโยงยาง

หลังจากผสมยางและสารเคมี ยางคอมพาวด์ที่ได้ต้องนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์รูปร่างต่าง ๆ ก่อนนำไปเชื่อมโยงต่อไป การขึ้นรูปยางคอมพาวด์แบ่งได้ 3 เทคนิค ได้แก่ การใช้แม่พิมพ์ (Molding) การอัดรีด (Extrusion) และเครื่องคาลเอนเดอร์ (Calender) ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดเทคนิคการขึ้นรูปคือ รูปร่างของผลิตภัณฑ์ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างแนวตัดขวางคงที่และมีความยาวมาก ๆ เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดรีด ส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ ขนาดใหญ่ และยาว เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเอนเดอร์ นอกจากนี้การขึ้นรูปและการเชื่อมโยงอาจเกิดขึ้นในขั้นตอนเดียวกัน เช่น การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ และแยกออกจากกันชัดเจนสำหรับการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดและเครื่องคาลเอนเดอร์

2.8 การเสื่อมสภาพของยาง

2.8.1 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่จำนวนมาก ทำให้ง่ายต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเกิดผ่านกลไกแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระ (Free-radical chain mechanism) มีสาเหตุจากปัจจัยหลายประการ เช่น ความร้อน รังสี การเหินเชิงกล เป็นต้น



รูปที่ 2.18 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลยาง [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปเมื่ออย่างได้รับอิทธิพลจากปัจจัยข้างต้นทำให้โมเลกุลยางขาดออก เกิดเป็นอนุมูลอิสระ 2 ตัว ดังปฏิกิริยาที่ 2.7 หรือเกิดการหลุดของไฮโดรเจนเกิดอนุมูลอิสระ 1 ตัว ดังปฏิกิริยาที่ 2.8 [32-33]



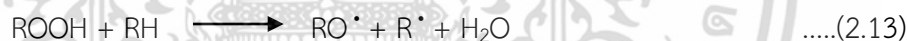
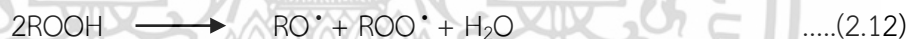
ขั้นตอนนี้เรียกว่า ขั้นตอนการเริ่มต้น (Initiation) อนุมูลอิสระ (R^{\cdot}) ที่เกิดขึ้นมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศสูง เกิดการรวมตัวกับออกซิเจนอย่างรวดเร็วแล้วได้เป็นอนุมูลอิสระเปอร์ออกซี (ROO^{\cdot}) ดังปฏิกิริยาที่ 2.9



อนุมูลอิสระเปอร์ออกซีที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนในโมเลกุลยาง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ($ROOH$) และอนุมูลอิสระตัวใหม่ ดังปฏิกิริยาที่ 2.10 อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ เรียกขั้นตอนนี้ว่า การแผ่ขยายของปฏิกิริยา (Propagation)



ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นไม่เสถียร เนื่องจากมีพันธะ O-O ซึ่งสามารถแตกออกได้ง่าย ทำให้เกิดการสลายตัว ดังปฏิกิริยาที่ 2.11-2.13



ทำให้เกิดอนุมูลอิสระชนิดใหม่คือ RO^{\cdot} และ $\cdot OH$ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ ปฏิกิริยาการสิ้นสุด (Termination) เกิดขึ้นดังนี้



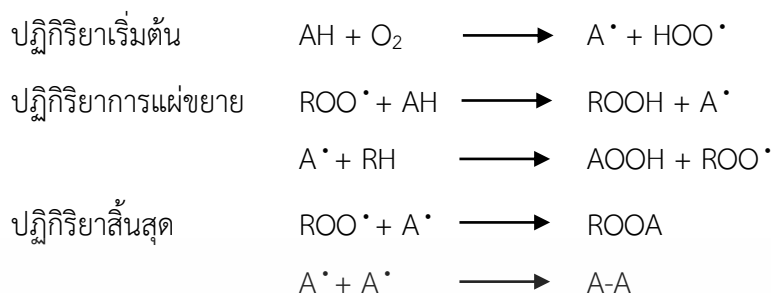
ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ 2.15 และ 2.16 ทำให้โมเลกุลของยางยาวขึ้น ผลของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันส่งผลให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรุนแรง เช่น การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง มักพบออกซิเจนปริมาณสูงเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลยาง อาจอยู่ในรูปหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) หมู่คาร์บอนิล ($-C=O$) หมู่เอสเทอร์ ($-COOR$) และหมู่กรด ($-COOH$) เป็นต้น

2.8.2 สารต้านการเกิดออกซิเดชัน

ยางสามารถเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจนได้เมื่อตั้งทิ้งไว้หรือในขณะที่ใช้งาน เพื่อป้องกันการเสียหายดังกล่าวจำเป็นต้องมีการเติมสารต้านการเกิดออกซิเดชัน ลดการเกิด Autoxidation ของยางให้เหลือน้อยที่สุด สามารถทำได้โดยการทำลายปฏิกิริยาลูกโซ่ โดยการใส่สารเคมีเข้าไปรบกวนปฏิกิริยาหลักในขั้นตอนการแผ่ขยายของสายโซ่ที่เรียกว่า Chain breaking antioxidants ซึ่งมีหน้าที่หลักคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำให้อนุมูลอิสระหมดไป ส่งผลให้ปฏิกิริยาถูกชะลอในการออกซิเดชันยุติไปด้วย กลไกการทำงานของ Chain breaking antioxidants (AH) มีดังนี้



รูปที่ 2.19 กลไกการทำงานของ Chain breaking antioxidants (AH) [32]

สารต้านการเกิดออกซิเดชัน สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทคือ

2.8.2.1 สารต้านการเกิดออกซิเดชันปฐมภูมิ

สารต้านการเกิดออกซิเดชันปฐมภูมิ (Primary antioxidants) หรือสารกลืนอนุมูลอิสระ (Radical scavenger) ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยยับยั้งการแผ่ขยายปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ ตัวอย่างสารต้านการเกิดออกซิเดชันชนิดนี้ ได้แก่ ฟีนอลที่มีหมู่เกาะเกาะ สารประกอบอะโรมาติกเอมีน เป็นต้น สารต้านการเกิดออกซิเดชันชนิดนี้มีความสามารถในการให้ไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระสูงมาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้รวดเร็ว ได้ผลิตภัณฑ์คือ อนุมูลอิสระของสารต้านการเกิดออกซิเดชัน (A^\cdot) และไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ($ROOH$) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นมีความเสถียรมากเนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อได้ แม้ว่าไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นยังคงแตกตัวต่อ จึงมักเติมสารต้านการเกิดออกซิเดชันทุติยภูมิ เพื่อกำจัดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ทำให้การหยุดยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นไปอย่างสมบูรณ์

สารต้านการเกิดออกซิเดชันกลุ่มฟีนอลที่มีหมู่เกาะเกาะ (Hindered phenol) นิยมใช้ในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเทอร์โมพลาสติก สารเคมีชนิดนี้แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มคือ Simple phenols, Bisphenolics, Polyphenolics และ Thiophenolics สารต้านการเกิดออกซิเดชันกลุ่มฟีนอลที่นิยมใช้มากชนิดหนึ่งคือ BHT (Butylated hydroxytoluene) จัดอยู่ในกลุ่ม Simple phenols นิยมใช้กับพอลิโอฟีนส์ พอลิเมอร์กลุ่มไวนิล และอีลาสโตเมอร์ มีข้อเสียคือระเหยง่าย ดังนั้นเมื่อต้องการแปรรูปพลาสติกที่อุณหภูมิสูงหรือนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง มักใช้สารเคมีกลุ่มพอลิฟีนอลิกซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูง เช่น Bisphenolics หรือ Polyphenolics ผสมกับ BHT

สารประกอบอะโรมาติกเอมีน (Secondary arylamines) ทำหน้าที่ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเช่นเดียวกับสารประกอบฟีนอล แต่เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่า นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ในการย่อยสลายเปอร์ออกไซด์ในเวลาเดียวกัน ทำให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารประกอบฟีนอล แต่มีขอบเขตของการใช้งานเนื่องจากมักทำให้พอลิเมอร์เปลี่ยนสี ดังนั้นจึงใช้กับพอลิเมอร์ที่ยอมรับการเปลี่ยนสีได้ ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม เป็นต้น

2.8.2.2 สารต้านการเกิดออกซิเดชันทุติยภูมิ

สารต้านการเกิดออกซิเดชันทุติยภูมิ (Secondary antioxidants) สารเคมีในกลุ่มนี้ได้แก่ สารประกอบของกำมะถัน (ไฮโดรเอสเทอร์และเอสเทอร์ของกรดไฮโดรโพรไพโอติก) และสารประกอบของฟอสฟอรัส (เช่น ฟอสไฟต์) เป็นต้น ทำหน้าที่ป้องกันอนุมูลอิสระจากการสลายตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ มักเรียกว่าสารเสถียรป้องกัน (Preventive stabilizer) นิยมใช้ร่วมกับสารต้านการเกิดออกซิเดชันปฐมภูมิ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มโน ลิ้มวรพันธุ์ [22] ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาเสื่อมสภาพของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) ที่อุณหภูมิ 80, 120, 160, 200 และ 240°C ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่าปริมาณและอัตราการเกิด CO₂ แปรผันตามเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยที่อุณหภูมิ 160°C มีปริมาณ CO₂ สูงสุด ส่วนการลดลงของกรดอนุคาร์ดิกพบว่าที่อุณหภูมิ 80°C มีการลดลงเล็กน้อย ที่อุณหภูมิ 120°C มีการลดลงอย่างชัดเจนสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของ CO₂ และเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 160°C มีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและหมดไปภายในเวลาอันสั้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของคาร์ดานอล พบว่าที่อุณหภูมิ 80°C มีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อยสอดคล้องกับปริมาณกรดอนุคาร์ดิกที่ลดลงเล็กน้อย ที่อุณหภูมิ 120°C มีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และที่อุณหภูมิมากกว่า 160°C มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและลดลงเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาเสื่อมสภาพเริ่มมีผล โดยเกิดที่ตำแหน่งพันธะคู่ของหมู่ข้างเคียงเป็นหลักและเกิดการเสียสภาพของฟินอลเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 200°C ทำให้เกิดการเสียสภาพก่อนเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ปริมาณคาร์ดานอลและ CO₂ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันลดลง สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณของคาร์ดอล ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดอนุคาร์ดิก พบว่าที่อุณหภูมิ 240°C เห็นการลดลงของคาร์ดอลชัดเจน โดยอนุพันธ์ที่มีพันธะคู่ 3 ตำแหน่งมีการลดลงของคาร์ดอลมากกว่าอนุพันธ์ที่มีพันธะคู่ 2 ตำแหน่ง และไม่มีการเปลี่ยนแปลงสำหรับอนุพันธ์ที่มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง แสดงถึงปฏิกิริยาเสื่อมสภาพเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง และอนุพันธ์ที่มีพันธะคู่มากเกิดปฏิกิริยาเสื่อมสภาพได้ดีกว่าอนุพันธ์ที่มีพันธะคู่ย่อย ดังนั้นสภาวะการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่เหมาะสมที่สุดคือ ควรใช้อุณหภูมิไม่เกิน 160°C และระยะเวลาไม่นานนัก (20-40 นาที) เพื่อให้กรดอนุคาร์ดิกเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสูงสุดและคาร์ดานอลเกิดการเสื่อมสภาพต่ำสุด

เศรษฐการ พรหมศิริ [34] ศึกษาการผลิตสารเติมแต่งไฮบริด (Hybrid additives, HA) จาก CNSL และปิโตรเลียมแวกซ์สำหรับป้องกันการเสื่อมสภาพในยาง โดยทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 30 และ 60 นาที พบว่าทำให้ปริมาณคาร์ดานอลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 11 เป็นร้อยละ 82 และ 52 โดยน้ำหนักตามลำดับ ทำการศึกษาสัดส่วนระหว่าง CNSL/แวกซ์ และอุณหภูมิในการตกผลึก พบว่าการตกผลึกที่อุณหภูมิ 30°C ที่มีสัดส่วนของแวกซ์ร้อยละ 27 โดยน้ำหนัก ได้ HA ที่มีลักษณะเป็นของแข็งและมีปริมาณคาร์ดานอลเพียงพอต่อการใช้งาน จากนั้นศึกษาผลของ HA ที่ได้จากการตกผลึกแวกซ์ร่วมกับ CNSL ที่ไม่ปรับสภาพ (HA-C) และผ่านการปรับสภาพ (HA-T) ต่อการป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเปรียบเทียบกับการใช้ Wingstay® L และคาร์ดานอลสังเคราะห์ ปริมาณ 0.6 phr พบว่าการเติม HA-T ปริมาณ 2 phr สามารถป้องกันการเสื่อมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกการดำเนินงาน ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโอโซนและความร้อนในยาง NR ได้ นอกจากนี้เมื่อเติมในปริมาณ 5 และ 10 phr สามารถช่วยให้ยางผสม NR/EPDM ละลายเข้ากันได้ดี การยึดเกาะระหว่างวัฏภาคดีขึ้น และป้องกันการเสื่อมสภาพจากโอโซนและความร้อนดีขึ้น

Menon A.R.R. และคณะ [35] ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติกายภาพ-เชิงกลของยางธรรมชาติเมื่อใช้ Phosphorylated CNSL (PCNSL) เปรียบเทียบกับน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr พบว่าการใช้ PCNSL ทำให้ดัชนีอัตราการเชื่อมโยงและค่าแรงบิดสูงสุดต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ใส่น้ำมันและยางที่ใส่น้ำมันอะโรมาติก ทั้งยังช่วยปรับปรุงสมบัติการทนต่อแรงดึงและการเสียหายจากความล้า (Tensile fatigue failure) แต่ทำให้มอดูลัสที่ 100% และ 300% รวมทั้งความแข็งกดลดลง เนื่องจาก PCNSL มีความเกาะ (Stearic hindrance) สูง ทั้งจากหมู่ฟอสเฟตและหมู่ข้างเคียงทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้น้อย สอดคล้องกับผลความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ที่มีค่าต่ำสุด ส่งผลให้ยางนิ่ม สามารถรับแรงได้ดี ส่วนสมบัติเชิงกลภายหลังการบ่มเร่ง พบว่าการใช้ PCNSL ทำให้มีความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และมอดูลัสที่ 100% สูงที่สุด เนื่องจากการบ่มเร่งทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นระหว่างพันธะคู่ที่หมู่ข้างเคียงของ PCNSL กับพันธะคู่ในโมเลกุลของยาง นอกจากนี้การใช้ PCNSL ทำให้ยางมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงสุด

Arayaprane W. และ Rempel G.L. [36] ศึกษาการใช้ไขมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) เป็นพลาสติกไซเซอรในยางผสม NR/EPDM อัตราส่วน 50:50 เปรียบเทียบกับน้ำมันพาราฟิน โดยศึกษาที่ปริมาณ 2-10 phr พบว่าเมื่อใช้ปริมาณเท่ากัน การใช้ CNSL ทำให้เวลาในการเชื่อมโยง (t_{c90}) และความหนืดมูนนี้ของยางต่ำลง ส่งผลให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น เนื่องจากสายโซ่ข้างเคียงมีความเกาะ ขัดขวางการเชื่อมโยง ทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้น้อย ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง เช่น ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น มอดูลัสที่ 100% (M100) ลดลง และปรับปรุงสมบัติการทนต่อความร้อนและสภาพอากาศ ทั้งนี้โครงสร้างของ CNSL มีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ทำหน้าที่คล้ายสารคู่ควบ (Coupling agent) ทำให้วัฏภาคยาง NR และยาง EPDM เข้ากันได้มากขึ้น มีอันตรกิริยาที่ดี ส่วนน้ำมันพาราฟินเป็นน้ำมันที่ไม่มีขั้ว ทำให้การกระจายตัวของยางทั้ง 2 วัฏภาคไม่ดี ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เกิดการแยกวัฏภาค ส่งผลให้ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติยางผสม NR/EPDM ให้ดีขึ้นได้แม้ว่าใช้ในปริมาณมากขึ้น

Greco A. และคณะ [37] ศึกษาการใช้อนุพันธ์ของคาร์ดานอลเป็นพลาสติกไซเซอรสำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) แบบนิ่ม เปรียบเทียบกับการใช้ไดเอทิลเฮกซิลพทาเลต (Di-ethyl-hexyl-phthalate, DEHP) ในปริมาณ 70 phr โดยเตรียมคาร์ดานอลอะซิเตต (Cardanol acetate, CA) จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างคาร์ดานอลกับอะซิติกแอนไฮไดรด์ มีซิงค์เปอร์คลอเรตเฮกซะไฮเดรต (Zinc perchlorate hexahydrate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันด้วยกรดคลอโรเปอร์เบนโซอิก (Chloroperbenzoic acid) ได้คาร์ดานอลอะซิเตตอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized cardanol acetate, ECA) เมื่อวิเคราะห์ค่า T_g ด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (DSC) พบว่า $ECA > DEHP > CA$ เมื่อใช้ CA ปริมาณ 0.4 โดยเศษส่วนน้ำหนัก ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่าง PVC และ CA ส่วนการใช้ DEHP และ ECA ไม่เกิดการแยกวัฏภาค ทำให้ CA ไม่สามารถใช้เป็นพลาสติกไซเซอรปฐมภูมิได้ เมื่อทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โม-เอกซสาร์เป็นเอกซสาร์ที่สแกนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟิเมตริก อะนาไลซิส (TGA) พบว่า ECA > CA > DEHP และ ECA/PVC มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง สลายตัวที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับ PVC แบบแข็ง นอกจากนี้ CA/PVC และ DEHP/PVC มีอุณหภูมิเกิดเจลสูง ในขณะที่ ECA/PVC มีอุณหภูมิเกิดเจลต่ำ บ่งบอกถึงความเข้ากันได้ (Compatibility) ที่ดีระหว่าง ECA และ PVC ทั้งนี้คาร์บอนอลเข้ากับ PVC ได้ไม่ดี เนื่องจากมีค่า interaction radius (IR) สูง เป็นผลจากหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้มาก ส่วนการแทนที่ไฮโดรเจนด้วยหมู่อะซิetyl (Acetyl, $-\text{COCH}_3$) ทำให้ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนลดลง แต่ CA ยังคงมีค่า IR สูงกว่า DEHP ส่งผลต่อการใช้งานได้ในปริมาณจำกัด จึงทำการแทนที่พันธะคู่ด้วยหมู่อีพอกไซด์ พบว่า ECA มีค่า IR ต่ำกว่า DEHP บ่งบอกความเข้ากันได้ดีระหว่าง ECA และ PVC ทำให้ไม่เกิดการแยกวัฏภาค และมีอุณหภูมิเกิดเจลต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ CA และ DEHP เนื่องจากความเข้ากันได้ไม่ดีระหว่าง CA และ PVC จึงศึกษาการใช้ CA เป็นพลาสติกไซเซออร์ทุติยภูมิ โดยผสม DEHP และ CA อัตราส่วนต่าง ๆ ในปริมาณ 70 phr พบว่าเมื่อปริมาณ CA เพิ่มขึ้นทำให้ PVC มีค่า T_g ลดลง เนื่องจาก CA มี T_g ต่ำกว่า DEHP ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลคือ ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น ความสามารถในการยืดลดลง โดยสัดส่วน DEHP : CA เท่ากับ 28.84% : 12.36% ทำให้ PVC มีค่า T_g ต่ำสุดคือ -49.8°C

Goud V.V. และคณะ [38] ศึกษาจลนพลศาสตร์และสภาวะการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของน้ำมันสบู่ดำ (Jatropha oil) เมื่อใช้ Acidic ion exchange resin (AIER) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาผลของความเร็วการปั่นกวน ชนิดของกรด ได้แก่ กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก (Formic acid) จำนวนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อพันธะไม่อิ่มตัวของน้ำมัน (H_2O_2 : Ethylenic unsaturation) จำนวนโมลของกรดต่อพันธะไม่อิ่มตัวของน้ำมัน (Acid : Ethylenic unsaturation) อุณหภูมิ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ส่งผลต่อค่าไอโอดีน (IV) และปริมาณออกไซเรน (OOC) ของน้ำมันที่เตรียมได้ พบว่าค่า OOC แปรผันตรงกับความเร็วจลนการปั่นกวน แต่เมื่อสูงกว่า 1500 rpm ไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาในสภาวะที่ไม่มีไทลูอินเป็นตัวทำละลาย พบว่าที่อุณหภูมิต่ำ (30, 50 และ 70°C) กรดเปอร์ออกซีฟอร์มิก (Peroxyformic acid) มีประสิทธิภาพสูง ในขณะที่อุณหภูมิสูง (85°C) เหมาะกับการใช้กรดเปอร์ออกซีอะซิติก (Peroxyacetic acid) แต่กรดทั้งสองให้ผลใกล้เคียงกันเมื่อใช้ไทลูอินเป็นตัวทำละลาย ซึ่งช่วยให้ น้ำมันอีพอกซิไดซ์ที่เตรียมได้มีความเสถียรมากขึ้น ป้องกันปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้น เช่น การเปิดวงอีพอกไซด์ ส่วนการเพิ่มปริมาณ H_2O_2 และกรดอะซิติกทำให้ค่า OOC เพิ่มขึ้น ค่า IV ลดลง แต่เมื่อมีปริมาณมากขึ้นทำให้เกิดการสลายตัวของวงอีพอกไซด์ นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ Amberlite® IR-120H มีความไวต่อปฏิกิริยาสูงสุดที่อุณหภูมิ 70°C โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น ทำให้เกิดวงอีพอกไซด์มากขึ้น ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ จำนวนโมลของ Ethylenic unsaturation : Acetic acid : H_2O_2 เท่ากับ 1 : 0.5 : 1.5 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 16% โดยน้ำหนักของน้ำมัน ทำปฏิกิริยาในสภาวะที่มีไทลูอินเป็นตัวทำละลาย พร้อมทั้งปั่นกวนด้วยความเร็ว 2500 rpm ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

Mungroo R. และคณะ [39] ศึกษาปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของน้ำมันคาโนลา (Canola oil) เมื่อใช้ Acidic ion exchange resin (AIER) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อ น้ำมันคาโนลาอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized canola oil, ECO) ที่เตรียมได้ ได้แก่ ชนิดกรดคาร์บอกซิลิก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่ากรดอะซิติกมีประสิทธิภาพดีกว่า ทำให้ ECO ที่เตรียมได้มีค่าไอโอดีน (IV) และปริมาณไกลคอลต่ำกว่าการใช้กรดฟอร์มิค ซึ่งไกลคอลเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาอีพอกซิชัน เกิดจากการไฮโดรไลซิสของอีพอกไซด์ การใช้กรดฟอร์มิคจึงทำให้มีปริมาณออกซิเจนน้อย จากนั้นศึกษาอุณหภูมิ จำนวนโมลของกรดอะซิติกต่อพันธะไม่อิ่มตัวของน้ำมัน (Acetic acid : Ethylenic unsaturation) และจำนวนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อพันธะไม่อิ่มตัวของน้ำมัน (H_2O_2 : Ethylenic unsaturation) ที่ใช้ทำปฏิกิริยา พบว่าเมื่ออุณหภูมิ ปริมาณกรดอะซิติก และ H_2O_2 เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ค่า IV ลดต่ำลง และมีปริมาณไกลคอลเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (Amberlite® IR-120H) พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการเกิดวงอีพอกไซด์สูง ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ จำนวนโมลของ Ethylenic unsaturation : Acetic acid : H_2O_2 เท่ากับ 1 : 0.5 : 1.5 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 22% โดยน้ำหนักของน้ำมัน ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์โครงสร้าง ECO ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าไม่ปรากฏการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 3007 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ $=C-H$ แต่ปรากฏการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 823 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่อีพอกไซด์ ($C-O-C$) สอดคล้องกับการทดสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (NMR)

Cooney T. [27] ศึกษาการเตรียมน้ำมันกัญชงอีพอกไซด์ (Epoxidized hemp oil, EHO) โดยใช้ Acetic acid, H_2O_2 และ Amberlite® IR-120H เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สภาวะที่เหมาะสมคือจำนวนโมลพันธะไม่อิ่มตัวของน้ำมันกัญชง : Acetic acid : H_2O_2 เท่ากับ 1 : 0.67 : 1 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 15% โดยน้ำหนักของน้ำมันกัญชง ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 7 ชั่วโมง พร้อมทั้งปั่นกวนที่ความเร็ว 130 rpm พบว่า EHO ที่เตรียมได้ มีการเปลี่ยนจากพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอนและคาร์บอนเป็นวงอีพอกไซด์ 88% เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค FTIR พบว่าไม่ปรากฏการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 3008 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ $=C-H$ และการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1656 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ $C=C$ แต่พบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 823 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่อีพอกไซด์ ($C-O-C$)

Fiser S.S. และคณะ [40] ศึกษาปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของน้ำมันละหุ่ง (Castor oil) ด้วยกรดเปอร์อะซิติก และ Ion exchange resin (Amberlite® IR-120H) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาจำนวนโมล Ethylenic unsaturation : Acetic acid : H_2O_2 ซึ่งกำหนดปริมาณกรดอะซิติกคงที่เท่ากับ 0.5 โมล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ H_2O_2 จาก 1.1 เป็น 1.5 โมล ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ค่าไอโอดีนลดลงและมีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิส่งผลแปรผันกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณออกซิเจน โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10% โดยน้ำหนัก (Acetic acid + H_2O_2) มีปริมาณออกซิเจนใกล้เคียงกับการใช้ปริมาณ 15% นอกจากนี้เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง (75°C) ส่งผลให้การควบคุมปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นทำได้ยากและมีปริมาณออกซิเจนน้อยลง เนื่องจากวงอีพอกไซด์มีเสถียรภาพต่ำที่อุณหภูมิสูง การทำปฏิกิริยาในสภาวะที่มีเบนซีนเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ปั่นกวนที่ 1500 rpm ได้น้ำมันละหุ่งอีพอกไซด์ (Epoxidized castor oil) ที่มีค่าไอโอดีนลดลง 91.3% และมีปริมาณออกซิเจน 3.81% เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสรุปได้ว่า

- น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และอนุพันธ์สามารถใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์และสารต้านการเสื่อมสภาพของยางได้
- น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บออกซิเลชันก่อนนำไปใช้งาน เพื่อลดความเป็นกรด
- สถานะการทำปฏิกิริยาอ็อกซิเดชันของน้ำมันพืชแต่ละชนิด แสดงได้ตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สถานะการทำปฏิกิริยาอ็อกซิเดชันของน้ำมันพืชแต่ละชนิด

ชนิดน้ำมัน	C=C : acid : H ₂ O ₂	%ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.)	ตัวทำละลาย	ความเร็วปั่น กวน (rpm)	%การเกิดหมู่ฟอกซี
สบู่ดำ [38]	1 : 0.5 : 1.5	16 wt% oil	70	5	โทลูอิน	2500	75
คาโนลา [39]	1 : 0.5 : 1.5	22 wt% oil	65	5	-	N/A	90
ถั่วเหลือง [27]	1 : 0.67 : 1.0	15 wt% oil	75	7	-	130	88
ละหุ่ง [40]	1 : 0.5 : 1.5	10 wt% (acid+ H ₂ O ₂)	50	9	เบนซีน	1500	78

จากตารางที่ 2.4 พบว่าสถานะในการสังเคราะห์น้ำมันคาโนลาฟอกซีไดซ์ มี %การเกิดหมู่ฟอกซีสูงสุด จึงเลือกใช้สถานะดังกล่าวในการเตรียมน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ฟอกซีไดซ์ โดยสามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ กรดอะซิติก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตรา 1 : 0.5 : 1.5 โมล โดยมี Amberlite® IR-120H เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ปริมาณ 22% โดยน้ำหนักของน้ำมัน ทำปฏิกิริยาในสถานะที่มีโทลูอินเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ไขมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) ดัดแปรเป็นสารเติมแต่งชีวภาพ เช่น น้ำมันยาง สารหล่อลื่น และสารต้านการเกิดออกซิเดชัน สำหรับยางธรรมชาติ และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของยาง โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 การเตรียม CNSL ดัดแปร ได้แก่ การดัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน รวมทั้งทดสอบสมบัติน้ำมันดัดแปรที่เตรียมได้

ตอนที่ 2 การใช้งานน้ำมันดัดแปรที่เตรียมได้เป็นสารเติมแต่งชีวภาพสำหรับยางธรรมชาติ โดยศึกษาชนิดน้ำมันดัดแปรและปริมาณน้ำมันดัดแปรที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางคอมพาวด์และยางเชื่อมโยง เปรียบเทียบกับการใช้ CNSL ที่ไม่ผ่านการดัดแปร, คาร์ดานอล (C) ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีชนิดหนึ่งของ CNSL น้ำมันพาราฟิน และน้ำมันอะโรมาติก ซึ่งเป็นน้ำมันเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง

ตอนที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพในการต้านการเกิดออกซิเดชันของ CNSL ดัดแปรเปรียบเทียบกับการใช้สารต้านการเกิดออกซิเดชันเชิงพาณิชย์

3.1 สารเคมี

ตอนที่ 1 : การเตรียม CNSL ดัดแปร

1. ไขมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) : บริษัท มาบุญครองศิริชัย 25 อินดัสเทรียลโปรดักส์ จำกัด
2. คาร์ดานอล (C) : Satya Cashew Chemicals Pvt. Ltd.

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของคาร์ดานอล

สมบัติ	ข้อมูลเฉพาะ
ความหนืด ที่ 30°C (cP)	40-55
ความถ่วงจำเพาะ ที่ 30°C	0.923-0.935
ความชื้น	น้อยกว่า 1.0%
ลักษณะทางกายภาพ	ของเหลว สีเหลืองอ่อน

ที่มา : ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3. 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H₂O₂) เกรตดิเคาระห์ : Farnitalia Carlo Erba Ltd.

4. กรดอะซิติกเข้มข้น (Glacial acetic acid) เข้มข้น 99.5% เกรตดิเคาระห์ : Avantor Performance Materials, Inc.

5. Amberlite® IR-120H เกรตดิเคาระห์ : The Dow Chemical Company

6. โทลูอีน (Toluene) เกรตดิเคาระห์ : Farnitalia Carlo Erba Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เฮกเซน (n-Hexane) เกรดวิเคราะห์ : Farmitalia Carlo Erba Ltd.
8. แก๊สไนโตรเจน (N₂) เกรดการค้า : Praxair (Thailand) Co., Ltd.
9. เกลือ トラปรุงทิพย์ : บริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด
10. น้ำกลั่น

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ Amberlite® IR-120H

สมบัติ	ข้อมูลเฉพาะ
ความหนาแน่นของไอ	มากกว่า 1 (เทียบกับอากาศ)
ความดันไอ ที่ 20°C	17 mmHg
อุณหภูมิลุกติดไฟได้เอง	800°F
ข้อจำกัดใช้งาน	สูงสุดที่อุณหภูมิ 121°C
การเชื่อมโยง	8%
ความชื้น	53-58%
การสลายตัว	สลายตัว 50% ที่อุณหภูมิ 110°C
เมทริกซ์	Styrene-divinylbenzene
หมู่ฟังก์ชัน	Sulfonic acid
ขนาดอนุภาค	620-830 μm

ที่มา : ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตอนที่ 2 : การใช้งานน้ำมันตัดแปรที่เตรียมได้เป็นสารเติมแต่งชีวภาพ

1. ยางธรรมชาติ (NR) ยางแท่ง STR 5L : บริษัท ไทยอรั๊วรับเบอร์ จำกัด
2. สารตัวเติม
 - ซิลิกา (Silica) ชนิดตกตะกอน TOKUSIL® URT : Tokuyama Siam Silica Co., Ltd.
3. สารทำให้ยางเชื่อมโยง
 - กำมะถัน (Sulfur) เกรดการค้า : บริษัท สหไพศาล อินดัสทรี จำกัด
4. พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) เกรด PEG 4000 : Caldic Co., Ltd.
5. สารคู่ควบ
 - ไทรอเททอกซีไซลิลโพรพิลเททระซัลไฟด์ (Bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide, Si-69®) เกรดการค้า : Evonik Industries Co., Ltd.
6. น้ำมันหล่อลื่น
 - น้ำมันพาราฟิน (White oil, WO) เกรดการค้า : Fisher Scientific International, Inc.
 - น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil, AO) เกรด 2535 : IRPC Public Company Limited
7. สารต้านการเกิดออกซิเดชัน
 - วิงสเตย์แอล (Butylated reaction product of p-cresol and dicyclopentadiene ; Wingstay® L) เกรดการค้า : OMNOVA Solutions, Inc.
8. สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง
 - ไซโคลเฮกซิลเบนโซไซโรอะโซลซัลฟีนามิด (N-Cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide, CBS) เกรดการค้า : General Química S.A. Co., Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ และสงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อน เมื่อผู้ซื้อได้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เทตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide, TMTD) เกรดการค้า : Taminco N.V. Co., Ltd.

9. สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง

- ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) เกรดการค้า : บริษัท จักรवालเคมี จำกัด

- กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า : PT. Cisadane Raya Chemicals Co., Ltd.

10. ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เกรดการค้า : Linde (Thailand) Co., Ltd.

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

ตอนที่ 1 : การเตรียม CNSL ดัดแปร

1. ขวดสามคอ (Three-necked round bottom flask)
2. กรวยแยก (Separatory funnel)
3. กรวยหยด (Dropping funnel)
4. คอนเดนเซอร์ (Condenser)
5. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
6. กระจกตวง (Graduated cylinder)
7. ปีกเกอร์ (Beaker)
8. ขวดพิกโนมิเตอร์ (Pycnometer)
9. ผ้ากรอง ขนาด 55 ไมโครเมตร
10. กระดาษกรอง
11. กระดาษวัดค่า pH (Universal indicator paper)
12. เครื่องชั่งดิจิตอล (Analytical balances) รุ่น ML204 : Mettler Toledo Co., Ltd.
13. เครื่องกวนสารชนิดใบพัดกวนสาร (Overhead stirrer) รุ่น EURO-ST D : IKA Works, Inc.
14. เครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน (Magnetic stirrer with heating) และชุดวัดอุณหภูมิ รุ่น RCT Basic : IKA Works, Inc.
15. เครื่องวัดความหนืด (Brookfield viscometer) รุ่น LVT71420 : Brookfield Engineering Laboratories, Inc.
16. เครื่องระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator) รุ่น N-N Series : Tokyo Rikakikai Co., Ltd.
17. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) รุ่น NICOLET 6700 : Thermo Fisher Scientific Inc.
18. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph-Mass spectrometer, GC-MS) รุ่น GC C1530N MS G2573A : Agilent Technologies Co., Ltd.

ตอนที่ 2 : การใช้งานน้ำมันดัดแปรที่เตรียมได้เป็นสารเติมแต่งชีวภาพ

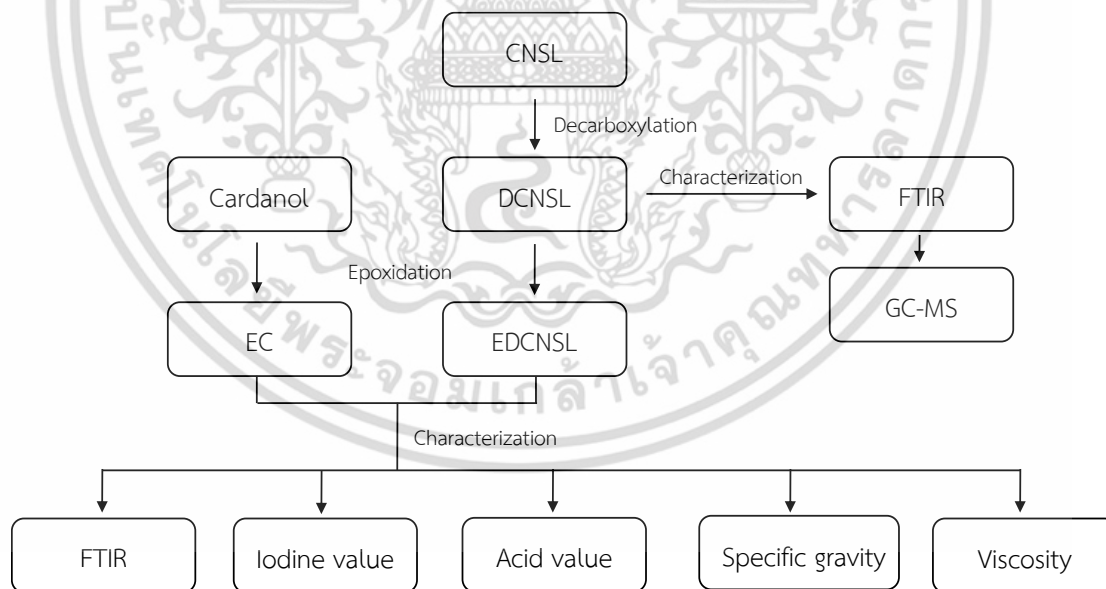
1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) รุ่น MX500-D75L90 : บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด
2. เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น LRM150 : Labtech engineering Co., Ltd.
3. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) โรงงานชัยเจริญการช่าง
4. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่น SMV-201 : Shimadzu Co. Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นโดยโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องวัดการเชื่อมโยงของยาง (Moving die rheometer, MDR) รุ่น II F 150 : Nichigo Shoji Co., Ltd.
6. เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) รุ่น QC-536M1 : Comotech Testing Machines Co., Ltd.
7. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Durometer hardness tester) ชนิด Shore A รุ่น TECLOCK GS-719N : ATS Fars P A Co., Ltd.
8. ชุดทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัด (Compression set test fixture) แบบ B
9. เครื่องทดสอบความต้านทานการขัดถู (Abrasion tester) แบบ Akron รุ่น C9004 : H.W. Wallace & Co., Ltd.
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น QUANTA 250 : Thermo Fisher Scientific Inc.
11. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น UF 260 : Memmert GmbH + Co.KG
12. เครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น ML204 : Mettler Toledo Co., Ltd.
13. เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้กำลังลม
14. ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) และเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier caliper)

3.3 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 : การเตรียม CNSL ดัดแปร



รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมน้ำมัน CNSL ดัดแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมัน

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ CNSL และคาร์ดานอล ด้วยเทคนิค FTIR เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของน้ำมัน วิเคราะห์ค่าไอโอดีน (IV) บ่งบอกปริมาณพันธะไม่อิ่มตัวของน้ำมัน และวิเคราะห์ค่ากรด (AV) บ่งบอกถึงความเป็นกรดของน้ำมัน

3.3.2 การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

ชั่ง CNSL ประมาณ 400 กรัม ลงในขวดสามคอขนาด 1 ลิตร ทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่สภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.3 ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน พร้อมทั้งปั่นกวนโดยใช้เครื่องกวนสารชนิดใบพัดกวนสารตลอดเวลา ที่ความเร็ว 300 รอบ/นาที



รูปที่ 3.2 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

ตารางที่ 3.3 สภาวะในการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

สูตร	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)
DCNSL1	140	30
DCNSL2	160	30
DCNSL3	140	60
DCNSL4	160	60

3.3.3 การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน

1. ชั่งคาร์ดานอล กรดอะซิติกเข้มข้น Amberlite® IR-120H และโทลูอีน ดังตารางที่ 3.4 ลงในขวดสามคอขนาด 1 ลิตร

2. ปั่นกวนที่ความเร็ว 500 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน พร้อมทั้งให้ความร้อน จนกระทั่งอุณหภูมิ 50°C ค่อย ๆ หยด 30% H₂O₂ จนหมดภายใน 30 นาที

3. ทำปฏิกิริยาต่ออีก 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 65°C พร้อมทั้งปั่นกวนตลอดเวลา

4. เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และกรองของเหลวด้วยผ้ากรองเพื่อกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาออก

5. เทของเหลวที่เตรียมได้ลงในกรวยแยก ล้างชั้นสารอินทรีย์ด้วยน้ำเกลืออิ่มตัวเพื่อกำจัด

กรดที่เหลืออยู่ ทดสอบความเป็นกรดต่างด้วยกระดาษ Universal indicator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ระเหยตัวทำละลายโดยเครื่องระเหยสารแบบหมุน ที่อุณหภูมิ 80°C ความดัน 0 mmHg
7. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนชนิดน้ำมันเป็น DCNSL

หมายเหตุ การเตรียมน้ำเกลืออิมัลชันนี้ ตวงน้ำกลั่นประมาณ 1 ลิตร ลงในบีกเกอร์ ให้ความร้อนจนอุณหภูมิ 50°C ค่อย ๆ ใส่เกลือลงไปพร้อมทั้งปั่นจนตลอดเวลา เพิ่มปริมาณเกลือไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเกลือไม่ละลาย จากนั้นกรองน้ำเกลืออิมัลชันที่ได้ด้วยกระดาษกรองก่อนนำไปใช้งาน



รูปที่ 3.3 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาอิมัลชัน

ตารางที่ 3.4 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำมันอิมัลชันแต่ละชนิด

สารเคมี	คาร์ดานอลอิมัลชัน (EC)	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ดีคาร์บอกซิเลตอิมัลชัน (EDCNSL)
C (g)	100	-
DCNSL (g)	-	100
Glacial acetic acid (g)	27.62	28.22
30% H ₂ O ₂ (g)	156.45	159.85
Amberlite® IR-120H (g)	22	22
Toluene (g)	100	100

3.3.4 การทดสอบสมบัติน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดัดแปร

3.3.4.1 ค่าไอโอดีน (IV)

วิเคราะห์ปริมาณพันธะไม่อิ่มตัวในโครงสร้างของน้ำมันดัดแปร โดยไทเทรตหาปริมาณไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยากับพันธะไม่อิ่มตัวด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulphate, Na₂S₂O₃) มีน้ำแฉ่งเป็นอินดิเคเตอร์ ตามมาตรฐาน AOCS Cd 1b-87 (1997) [41]

3.3.4.2 ค่ากรด (AV)

วิเคราะห์ความเป็นกรดของน้ำมันดัดแปรแต่ละชนิด โดยไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) มีฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ ตามมาตรฐาน ISO 660 (1996) [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.3 ค่าความถ่วงจำเพาะ

เติมน้ำกลั่นในขวดพิกโนมิเตอร์ขนาด 10 มิลลิลิตร จนเต็ม เช็ดขวดด้านนอกให้แห้ง นำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าที่ได้ ทำความสะอาดขวดพิกโนมิเตอร์และอบให้แห้ง จากนั้นเปลี่ยนเป็นน้ำมันตัดแปรแต่ละชนิด โดยความถ่วงจำเพาะสามารถคำนวณจากสมการที่ 3.1

$$\text{Specific gravity} = \frac{\text{น้ำหนักขวดพิกโนมิเตอร์บรรจุสารตัวอย่าง (g)}}{\text{น้ำหนักขวดพิกโนมิเตอร์บรรจุน้ำกลั่น (g)}} \quad \dots(3.1)$$

3.3.4.4 ค่าความหนืด

วิเคราะห์สมบัติการไหลของน้ำมันด้วยเครื่องวัดความหนืดบรุคฟิลด์ ซึ่งเป็นเครื่องวัดความหนืดชนิดหมุน ใช้สำหรับวัดแรงบิด (Torque) ที่เกิดการหมุนของหัวทดสอบ (Spindle) ซึ่งจุ่มอยู่ในของเหลวที่ต้องการทดสอบ หัวทดสอบนี้ต่อกับมอเตอร์เพื่อให้หัวทดสอบหมุนได้และวัดแรงเสียดทานออกมาเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงบิด ค่าแรงบิดสามารถคำนวณเป็นค่าความหนืดโดยคูณกับค่าคงที่มากับเครื่อง (ขึ้นอยู่กับขนาดหัวทดสอบและความเร็วรอบในการหมุน) ทดสอบน้ำมันตัวอย่างโดยใช้หัวทดสอบขนาด LV2 ความเร็วรอบ 12 rpm อ่านค่าแรงบิดที่ได้และคำนวณหาค่าความหนืดทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้ง และรายงานค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้

3.3.4.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

FTIR เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ เนื่องจากการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในแต่ละช่วงความยาวคลื่น โดยวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการตัดแปรด้วยปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากน้ำมันตัวอย่างมีสีดำคล้ำ จึงทำการทดสอบโดยใช้เทคนิค Attenuated Total Reflectance (ATR) ซึ่งเป็นการวัดการสะท้อนกลับของลำแสงอินฟราเรดที่เหมาะสมกับตัวอย่างทึบแสง ทำให้แสงส่องผ่านได้น้อย โดยทดสอบในช่วง $500-4000 \text{ cm}^{-1}$

3.3.4.6 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอลด้วยเทคนิค GC-MS

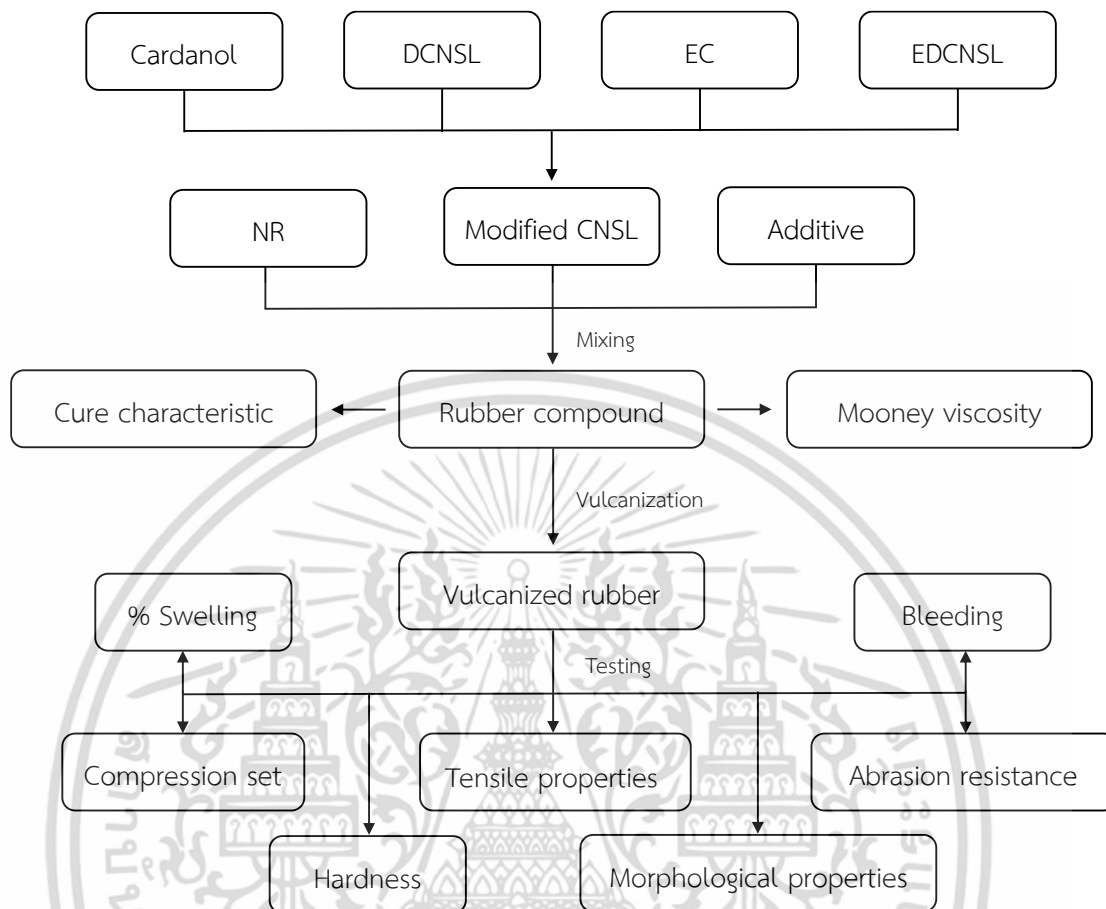
เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน [34]

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานคาร์บอนอล โดยชั่งคาร์บอนอลประมาณ 1 กรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ละลายในเฮกเซนและปรับปริมาตรเป็น 100 cm^3 จากนั้นเจือจางให้ได้สารละลายเข้มข้น 0.1, 0.5 และ 1 mg/cm^3
2. เตรียมสารละลายตัวอย่าง CNSL และ DCNSL โดยชั่งสารตัวอย่าง 0.02 กรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ละลายในเฮกเซนและปรับปริมาตรเป็น 100 cm^3
3. วิเคราะห์หาพื้นที่พีคของสารละลายตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานคาร์บอนอล โดยมีสถานะในการทดสอบ ดังนี้

คอลัมน์	Zebtron ZB-5 HT INFERNO ขนาด $30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm}$ เส้นผ่านศูนย์กลาง $0.25 \mu\text{m}$
วิญภาคของเหลว	5% phenyl-95% dimethylpolysiloxane
สถานะทดสอบ	200°C เป็นระยะเวลา 3 นาที และเพิ่มเป็น 300°C ด้วยอัตรา $50^\circ\text{C} / \text{min}$
อุณหภูมิขณะฉีด	250°C
แก๊สตัวพา	ฮีเลียม (อัตราการไหล $0.4 \text{ cm}^3/\text{min}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 : การใช้งานน้ำมันดัดแปรที่เตรียมได้เป็นสารเติมแต่งชีวภาพ



รูปที่ 3.4 แผนผังการใช้งานน้ำมันดัดแปรและการทดสอบสมบัติของยาง

3.3.5 การผสมยาง

ลำดับการผสมยางและสารเคมี มีดังนี้

1. ชั่งยางและสารเคมีตามสูตรที่กำหนด ดังตารางที่ 3.5
2. ผสมสารเคมีต่าง ๆ ให้เข้ากัน เริ่มจากนำยางมาบดย่อยที่อุณหภูมิ 50°C โดยใช้เครื่องผสมระบบปิด ความเร็วรอบ 35 rpm เป็นเวลา 3 นาที
3. เติมซิลิกา (ผสม PEG 4000 และ Si-69® ลงในซิลิกา เขย่าให้เข้ากัน) และน้ำมันสลักกัน ครั้งละ 1/3 จำนวน 3 ครั้ง ใช้เวลาในการผสม 6 นาที
4. เติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (ZnO และกรดสเตียริก) ผสมเป็นเวลา 1 นาที
5. เติมสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (CBS และ TMTD) ผสมเป็นเวลา 2 นาที
6. เติมกำมะถัน ใช้เวลาผสมอีก 2 นาที
7. ผสมยางให้เข้ากันอีกครั้งด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 2 นาที ให้มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร เก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบในขั้นต่อไป

หมายเหตุ ในสูตรที่มีการเติมสารต้านการเกิดออกซิเดชัน (Wingstay® L) ให้เติมพร้อมสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษา

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr)							
	NO	WO	AO	CNSL	C	DCNSL	EC	EDCNSL
NR	100	100	100	100	100	100	100	100
Silica	50	50	50	50	50	50	50	50
PEG 4000	3	3	3	3	3	3	3	3
Si-69 [®]	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
WO	-	5,10	-	-	-	-	-	-
AO	-	-	5,10	-	-	-	-	-
CNSL	-	-	-	5,10	-	-	-	-
C	-	-	-	-	5,10	-	-	-
DCNSL	-	-	-	-	-	5,10	-	-
EC	-	-	-	-	-	-	5,10	-
EDCNSL	-	-	-	-	-	-	-	5,10
ZnO	5	5	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2
CBS	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
TMTD	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Sulfur	2	2	2	2	2	2	2	2

หมายเหตุ * ศึกษาชนิดและปริมาณน้ำมันตัดแปรที่ส่งผลต่อสมบัติยางคอมพาวด์และยางเชื่อมโยง

** สูตรที่มีการเติมสารต้านการเกิดออกซิเดชัน (Wingstay[®] L) ใช้ปริมาณ 1.5 phr

3.4 การทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์และยางเชื่อมโยง

3.4.1 การทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์

หลังจากผสมยางดิบกับสารเคมีต่าง ๆ และเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์ ดังนี้

3.4.1.1 ลักษณะการเชื่อมโยง

ทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ด้วยเครื่อง MDR ตามมาตรฐาน ASTM D5289 [43] ที่อุณหภูมิ 150°C รายงานผล ได้แก่ ค่าแรงบิดต่ำสุด (M_L) ค่าแรงบิดสูงสุด (M_{HF}) เวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{s2}) เวลาในการเชื่อมโยง (t_{c90}) และดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (CRI)

3.4.1.2 ความหนืดมูนนี่

ทดสอบค่าความหนืดมูนนี่ด้วยเครื่อง Mooney viscometer ตามมาตรฐาน ASTM D1646 [44] โดยใช้โรเตอร์ขนาดใหญ่ ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ให้ความร้อนแก่ยางคอมพาวด์เป็นเวลา 1 นาที และอ่านค่าความหนืดหลังจากโรเตอร์หมุนไป 4 นาที รายงานผลในรูป ML 1+4 (100°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1.3 การขึ้นรูปและเชื่อมโยงยาง

ขึ้นรูปยางคอมพาวด์ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป โดยตัดยางวางในแม่พิมพ์โลหะสี่เหลี่ยม หนา 2 มิลลิเมตร ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 160 bar เป็นเวลา 1.2 เท่าของ t_{c90} ส่วนการเตรียมชิ้นงานทดสอบที่มีรูปร่างอื่นสามารถเตรียมได้ ดังนี้

การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัด ตัดยางวางในแม่พิมพ์โลหะทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร หนา 12.5 มิลลิเมตร ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 160 bar เป็นเวลา 2 เท่าของ t_{c90}

การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบความต้านทานการขูด ตัดยางวางในแม่พิมพ์โลหะทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 63.5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12.7 มิลลิเมตร หนา 12.5 มิลลิเมตร ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 160 bar เป็นเวลา 2 เท่าของ t_{c90}

3.4.2 การทดสอบสมบัติของยางเชื่อมโยง

ก่อนทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของยางเชื่อมโยง จำเป็นต้องมีการปรับสภาพชิ้นงานโดยเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางเชื่อมโยงน้อยสุด

3.4.2.1 ร้อยละการบวมตัว

ทดสอบการบวมตัวของยางในโทลูอีน ตามมาตรฐาน ASTM D471 [45] โดยตัดชิ้นงานทดสอบขนาดกว้าง × ยาว เท่ากับ 1 × 1 ตารางเซนติเมตร หนาประมาณ 2 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้น แช่ชิ้นงานทดสอบในโทลูอีนปริมาตร 30 มิลลิลิตร ในภาชนะที่ฝาปิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซับด้วยกระดาษทิชชู ชั่งน้ำหนักก่อนและหลังแช่ในโทลูอีน ร้อยละการบวมตัวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.2

$$\text{Swelling (\%)} = \frac{(W_s - W_o)}{W_o} \times 100 \quad \dots(3.2)$$

เมื่อ W_o คือ น้ำหนักชิ้นงานทดสอบก่อนแช่ในโทลูอีน (g)

W_s คือ น้ำหนักชิ้นงานทดสอบหลังแช่ในโทลูอีน (g)

3.4.2.2 การแพร่ออกของน้ำมัน

ทดสอบการแพร่ออกของน้ำมัน ตามมาตรฐาน ISO 177 [46] ตัดชิ้นงานทดสอบขนาดกว้าง × ยาว เท่ากับ 5 × 5 ตารางเซนติเมตร หนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบก่อนอบ (ความละเอียด 4 ตำแหน่ง) นำกระดาษซับน้ำมันที่มีขนาดกว้าง × ยาว เท่ากับ 6 × 6 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 ชิ้น ซึ่งได้ชั่งน้ำหนักแล้วประกบชิ้นงานทดสอบ จากนั้นนำไปวางระหว่างแผ่นกระจกผิวเรียบ 2 แผ่น ใช้แผ่นน้ำหนักหนัก 5 กิโลกรัม กดทับบนแผ่นกระจกด้านบน นำทั้งหมดเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบหลังอบ คำนวณการแพร่ออกของน้ำมันดังสมการที่ 3.3 โดยมีการแพร่ออกของน้ำมันเมื่อค่าความแตกต่างของน้ำหนักชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังอบมากกว่า 0.45 กรัม

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

เมื่อ W_o คือ น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบก่อนอบ (g)

W_s คือ น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบหลังอบ (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต จะถือว่าผิดกฎหมาย และต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.3 ความแข็งกด

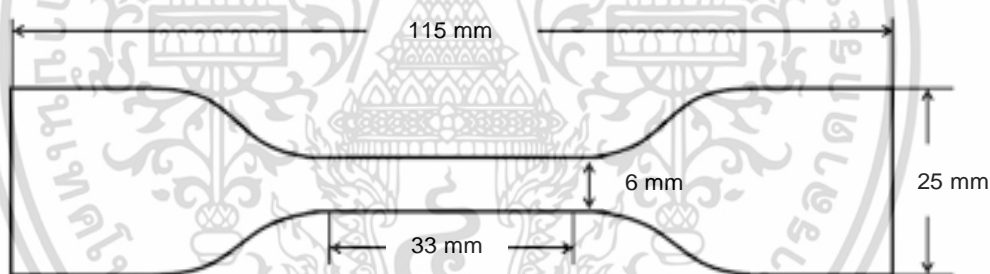
ทดสอบความแข็งกดด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์แบบ Shore A ตามมาตรฐาน ASTM D2240 [47] โดยนำชิ้นงานทดสอบจำนวน 3 ชิ้น วางซ้อนกัน (ความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร) บนแท่นทดสอบ ออกแรงกดให้ฐานของหัวกดแนบสนิทกับชิ้นงานทดสอบ แล้วอ่านค่าความแข็งภายใน 1 วินาที วัดความแข็ง 10 จุดบนชิ้นงานทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยที่วัดได้

3.4.2.4 สมบัติแรงดึง

ทดสอบสมบัติแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 [48] ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ โดยเครื่องทดสอบดึงชิ้นงานทดสอบจนขาดด้วยความเร็วในการดึงคงที่ ทดสอบชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้น รายงานค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 100% และ 300% รวมทั้งร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด

ชิ้นงานทดสอบมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumb-bell) แบบ Die C โดยวัดความหนา 3 จุดคือ บริเวณกึ่งกลางและบริเวณปลายทั้งสองด้านของคอดัมเบลล์ นำค่าเฉลี่ยที่ได้ใช้ในการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด และไม่นำชิ้นงานทดสอบที่มีความหนาท่ำสุดและความหนาสูงสุดต่างกันเกิน 0.08 มิลลิเมตร มาทดสอบ สภาวะการทดสอบ มีดังนี้

โหลดเซลล์ (Load cell)	2 kN
ความยาวของระยะทดสอบ (Gauge length)	25 mm
ความเร็วในการดึง (Test speed)	500 mm/min



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ แบบ Die C [48]

3.4.2.5 สมบัติหลังการบ่มเร่ง

ตัดชิ้นงานทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์แบบ Die C อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 7 วัน ตามมาตรฐาน ASTM D573 [49] เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด นำชิ้นงานทดสอบออกจากตู้อบและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อเป็นการปรับสภาวะชิ้นงาน นำไปทดสอบสมบัติแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 ดังสภาวะในการทดสอบข้างต้น ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มเร่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.5

$$P (\%) = \frac{(A - O)}{O} \times 100 \quad \dots(3.4)$$

$$R (\%) = 100 + P \quad \dots(3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

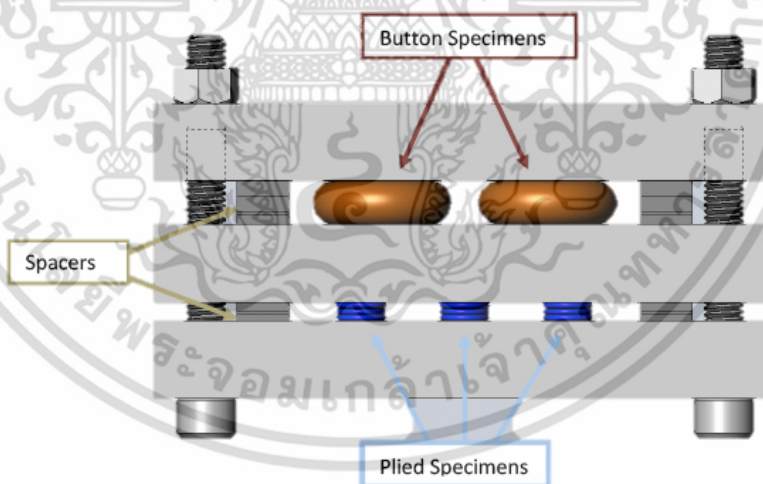
- เมื่อ P คือ % การเปลี่ยนแปลงสมบัติ
 R คือ % การคงเหลือของสมบัติ
 O คือ ค่าสมบัติก่อนการบ่มเร่ง
 A คือ ค่าสมบัติหลังการบ่มเร่ง

3.4.2.6 การยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัด

ทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัดด้วยเครื่อง Compression set tester ตามมาตรฐาน ASTM D395 (Method B) [50] โดยวัดขนาดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ระยะยุบตัว) ของชิ้นงานทดสอบ นำชิ้นงานทดสอบมาวางระหว่างแผ่นเหล็กของเครื่องอัด ซึ่งมีแท่งเหล็กกั้น (Spacer bars) ในแต่ละข้างเป็นตัวกำหนดระยะในการกดอัด แสดงดังรูปที่ 3.4 อัดชิ้นงานทดสอบให้มีความหนาลดลงจากความหนาเริ่มต้น 25% จากนั้นนำเครื่องอัดที่มีชิ้นงานทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ปลดชิ้นงานทดสอบคืนตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้ววัดความหนา ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.6

$$\text{Compression set (\%)} = \frac{(t_o - t_i) \times 100}{(t_o - t_n)} \quad \dots(3.6)$$

- เมื่อ t_o คือ ความหนาของชิ้นทดสอบก่อนอบ (mm)
 t_i คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังอบ (mm)
 t_n คือ ความหนาของแท่งเหล็กกั้น (mm)



รูปที่ 3.6 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัด [51]

3.4.2.7 ความต้านทานการขัดถู

ทดสอบความต้านทานการขัดถูตามมาตรฐาน BS 903 Part A9 [52] ด้วยเครื่อง Akron abrasion tester ซึ่งนำหนักชิ้นงานก่อนนำไปทดสอบเพื่อหาปริมาตรและความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = \pi r^2 h \quad \dots(3.7)$$

$$D = m / V \quad \dots(3.8)$$

- เมื่อ V คือ ปริมาตรชิ้นงานทดสอบ (cm^3)
 r คือ รัศมีพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานทดสอบ (mm)
 h คือ ความหนาชิ้นงานทดสอบ (mm)
 D คือ ความหนาแน่นชิ้นงานทดสอบ (g/cm^3)
 m คือ น้ำหนักชิ้นงานทดสอบ (g)

นำไปทดสอบด้วยเครื่อง Akron abrasion tester โดยชิ้นงานทดสอบถูกยึดติดกับแกนหมุน ระหว่างการทดสอบชิ้นงานทดสอบถูกหมุนด้วยความเร็วตามที่กำหนดและสัมผัสกับล้อหินขัด (Abrasion wheel) ระบายของชิ้นทดสอบและล้อหินขัดทำมุมกัน 15° แบ่งขั้นตอนการทดสอบเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นขั้นตอนของการทดลอง (Trial run) ในช่วงทดสอบ 500 รอบแรกของการหมุน ชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบและคำนวณหาปริมาตรที่สูญหายไป เพื่อศึกษาระดับความต้านทานการขัดถูของชิ้นงานทดสอบคร่าว ๆ

ขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบให้พร้อมกับการทดสอบจริง โดยชิ้นงานทดสอบถูกขัดถูจนถึงระยะเวลาการสึกหรือเข้าที่ (Running-in) จำนวนรอบในการทดสอบขึ้นกับระดับความต้านทานการขัดถูในขั้นตอนแรก ดังตารางที่ 3.6 เมื่อทดสอบเสร็จ ชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบและคำนวณหาปริมาตรที่สูญหายไป

ตารางที่ 3.6 จำนวนรอบการหมุนสำหรับการ Running-in และการทดสอบจริง [52]

ปริมาตรที่สูญหาย (cm^3) ใน ขั้นตอน Trial run	จำนวนรอบการ Running-in (รอบ)	จำนวนรอบการทดสอบจริง (รอบ)
0.05 – 0.09	4,000	1,000
0.10 – 0.19	2,000	500
0.20 – 0.40	750	250
มากกว่า 0.40	125	125

ขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนการทดสอบจริง โดยทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง เมื่อทดสอบเสร็จในแต่ละครั้ง ชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบและคำนวณหาปริมาตรที่สูญหายไป รายงานผลในรูปของค่าดัชนีความต้านทานการขัดถู (ARI) ดังสมการที่ 3.9

$$ARI = 100 \times (S / T) \quad \dots(3.9)$$

- เมื่อ ARI คือ ดัชนีความต้านทานการขัดถู
 S คือ ปริมาตรชิ้นงานมาตรฐานที่หายไป (cm^3)
 T คือ ปริมาตรชิ้นงานทดสอบที่หายไป (cm^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การทดสอบความต้านทานการขัดถูด้วยเครื่อง Akron abrasion tester [53]

3.4.2.8 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM แซ่ชิ้นงานทดสอบขนาดกว้าง × ยาว เท่ากับ 1 × 5 ตารางเซนติเมตร ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และหักภายใต้ไนโตรเจนเหลว เพื่อให้ได้ผิวทดสอบใหม่ที่เรียบ เคลือบบริเวณผิวทดสอบด้วยทองคำ แล้วนำไปทดสอบเพื่อศึกษา ลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางธรรมชาติเมื่อนำน้ำมันตัดแปรชนิดต่าง ๆ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ไขมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) ตัดแปรเป็นสารเติมแต่งชีวภาพ เช่น น้ำมันยาง สารหล่อลื่น สารต้านการเกิดออกซิเดชัน เป็นต้น โดยใช้ยางธรรมชาติเป็นยางตัวแทนแบบจำลอง (Model) อย่างไรก็ตาม ใดก็ดี CNSL เป็นน้ำมันที่มีฤทธิ์เป็นกรด จากงานวิจัยก่อนหน้า [10] พบว่าการใช้ CNSL ทำให้ห่วงปฏิบัติการเชื่อมโยง ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยาง จึงทำการตัดแปรโครงสร้าง CNSL ก่อนนำมาใช้งาน ได้แก่ การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดีคาร์บอกซิเลต (DCNSL) และการตัดแปรด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันได้น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดีคาร์บอกซิเลตอีพอกซิไดซ์ (EDCNSL) เนื่องจาก CNSL เป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิด ทั้งยังมีสิ่งปนเปื้อนตามธรรมชาติ จึงทำการศึกษาแนวเปรียบเทียบกับคาร์ดานอลบริสุทธิ์ (C) องค์ประกอบทางเคมีชนิดหนึ่งของ CNSL ที่ได้จากการกลั่นกรดอนุคาร์บิก ซึ่งเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันในระหว่างกระบวนการกลั่น ทำให้คาร์ดานอลมีความบริสุทธิ์สูง และทำการตัดแปรด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันได้คาร์ดานอลอีพอกซิไดซ์ (EC) เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้ EDCNSL นอกจากนี้ยังศึกษาแนวเปรียบเทียบกับน้ำมันเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในยาง ได้แก่ น้ำมันพาราฟิน (WO) และน้ำมันอะโรมาติก (AO) เนื่องจาก CNSL ที่ไม่ผ่านและผ่านการตัดแปรมีโครงสร้างเป็นสารประกอบฟีนอลิกและมีหมู่ข้างเคียงเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ทำให้มีโครงสร้างเคมีในส่วนที่เป็นอะโรมาติกและอะลิฟาติก จากนั้นนำ CNSL ตัดแปรที่เตรียมได้มาใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับยางธรรมชาติ โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของยาง

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อที่ใช้ในการวิจัย

อักษรย่อ	ความหมาย
NO	ยางสูตรควบคุมที่ไม่มีการเติมน้ำมัน
WO	น้ำมันพาราฟิน
AO	น้ำมันอะโรมาติก
CNSL	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
C	คาร์ดานอล
DCNSL	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดีคาร์บอกซิเลต
DCNSL1	ทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 140°C 30 นาที
DCNSL2	ทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 160°C 30 นาที
DCNSL3	ทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 140°C 60 นาที
DCNSL4	ทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 160°C 60 นาที
EC	คาร์ดานอลอีพอกซิไดซ์
EDCNSL	น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดีคาร์บอกซิเลตอีพอกซิไดซ์
AOW	เติมน้ำมันอะโรมาติกและ Wingstay® L
ECW	เติมคาร์ดานอลอีพอกซิไดซ์และ Wingstay® L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 การดัดแปรโครงสร้าง CNSL ได้แก่ การดัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน รวมทั้งทดสอบสมบัติน้ำมันดัดแปรที่เตรียมได้

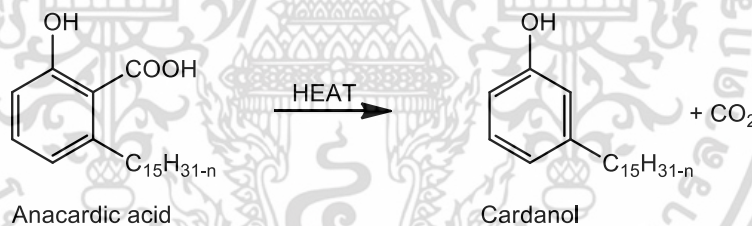
ตอนที่ 2 การใช้งานน้ำมันดัดแปรที่เตรียมได้เป็นสารเติมแต่งชีวภาพสำหรับยางธรรมชาติ โดยศึกษาชนิดน้ำมันดัดแปรและปริมาณน้ำมันดัดแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของยาง

ตอนที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพในการต้านการเกิดออกซิเดชันของ CNSL ดัดแปรเปรียบเทียบกับการใช้สารต้านการเกิดออกซิเดชันเชิงพาณิชย์

4.1 ผลการดัดแปรโครงสร้าง CNSL

4.1.1 การดัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

เนื่องจาก CNSL มีองค์ประกอบหลักเป็นกรดอนุคาร์ดิก ส่งผลให้น้ำมันมีความเป็นกรดสูง ทำให้ใช้งานได้จำกัดโดยเฉพาะการใช้เป็นสารเติมแต่งในยาง เนื่องจากสารที่มีฤทธิ์เป็นกรดมีแนวโน้มห่วงปฏิกิริยาเชื่อมโยงของยาง [10] การดัดแปรโครงสร้าง CNSL ด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเป็นการกำจัดหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) กรดอนุคาร์ดิกเปลี่ยนเป็นคาร์ดานอลและ CO₂ ดังรูปที่ 4.1 นอกจากนี้การสกัด CNSL มีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีส่งผลต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของ CNSL แตกต่างกัน จึงต้องศึกษาสภาวะในการดัดแปร ได้แก่ การทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 140°C 30 นาที (DCNSL1), 160°C 30 นาที (DCNSL2), 140°C 60 นาที (DCNSL3) และ 160°C 60 นาที (DCNSL4) เพื่อให้กรดอนุคาร์ดิกเปลี่ยนเป็นคาร์ดานอลสูงสุด

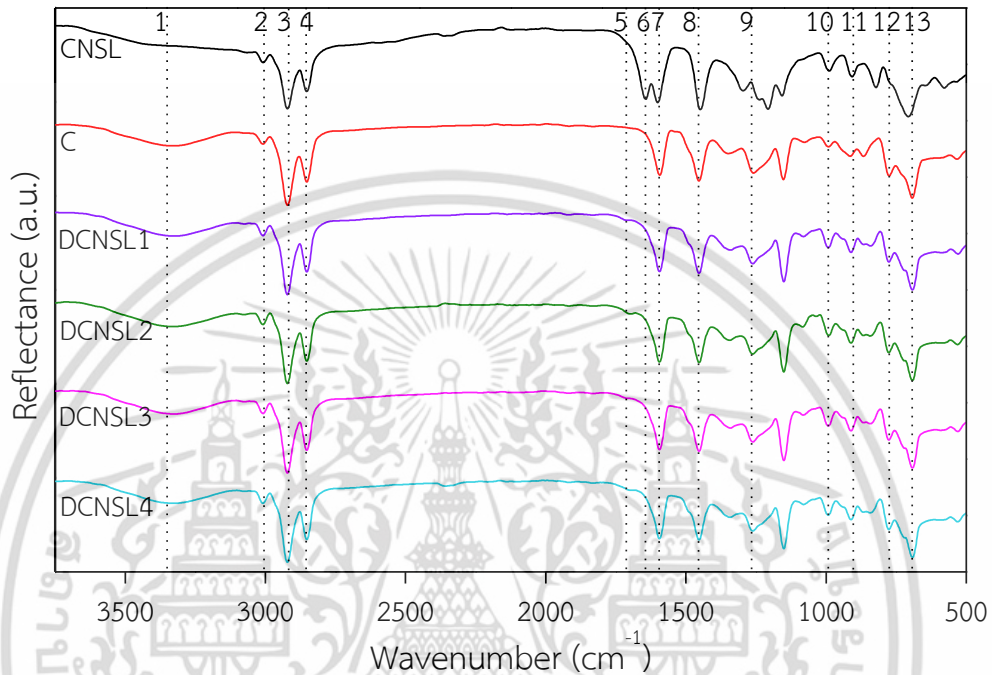


รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดอนุคาร์ดิก [54]

4.1.1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างน้ำมันด้วยเทคนิค FTIR

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างน้ำมันหลังผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันด้วยเทคนิค FTIR แสดงดังรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 พบว่าสเปกตรัมของ CNSL, C และ DCNSL มีความคล้ายคลึงกัน โดยปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 3331, 1453 และ 1258 cm⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ O-H, C=C และ C-O ของสารประกอบอะโรมาติก สอดคล้องกับโครงสร้างในส่วนที่เป็นฟีนอล และปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 3007, 2921-2852 และ 1593 cm⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ =C-H, -C-H และ C=C สอดคล้องกับโครงสร้างของหมู่ข้างเคียงที่เป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว นอกจากนี้สเปกตรัมของ CNSL ปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1643 cm⁻¹ แต่ไม่ปรากฏในสเปกตรัมของ C คาดว่าเป็นการสั่นของพันธะ C=O ของหมู่คาร์บอกซิลิก โดยพีคที่ปรากฏมีความเข้มสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chuayjuljit S. [55] พบว่าสเปกตรัมของ CNSL มีแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1670-1640 cm⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ C=O ของหมู่คาร์บอกซิลิก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันไม่สามารถทำให้กรดอนาคาร์ดิกทั้งหมดเปลี่ยนเป็นคาร์ดานอล โดยสเปกตรัมของ DCNSL ปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1700 cm^{-1} (ความเข้มต่ำ) ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ของหมู่คาร์บอกซิลิกที่หลงเหลืออยู่ จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่าการตัดแปร CNSL ด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันทำให้กรดอนาคาร์ดิกลดลงแต่ไม่สามารถบ่งบอกปริมาณคาร์ดานอลที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ CNSL, C และ DCNSL ที่ผ่านการตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสภาวะต่าง ๆ

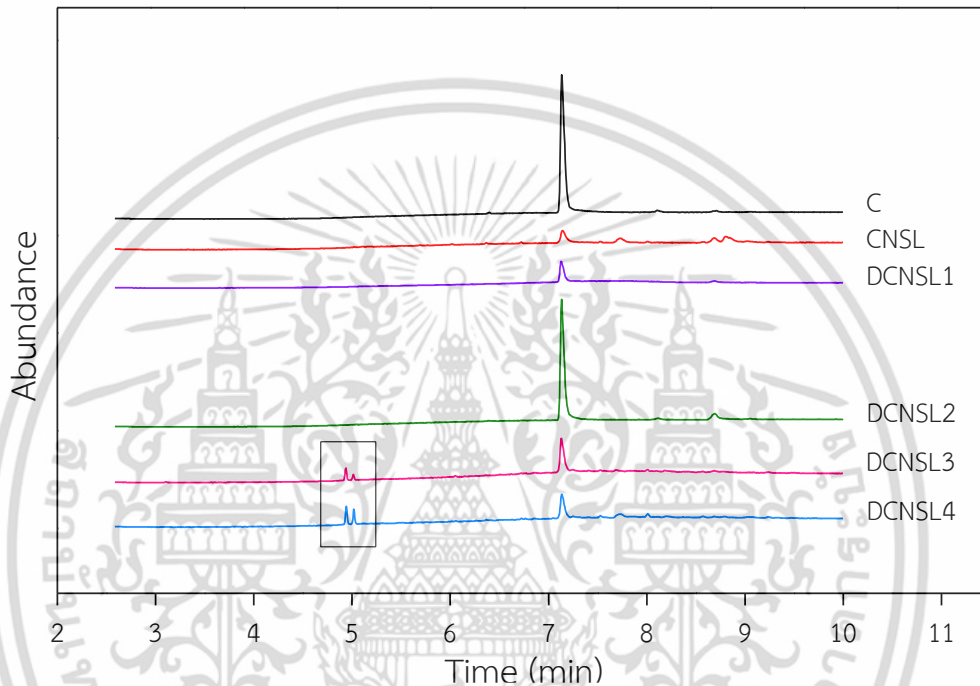
ตารางที่ 4.2 แถบการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัมของ CNSL, C และ DCNSL ที่ผ่านการตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสภาวะต่าง ๆ (แถบที่ 1-13 สอดคล้องตามรูปที่ 4.2)

แถบที่	เลขคลื่น (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
1	3331	การสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{O}-\text{H}$
2	3007	การสั่นแบบยืดของพันธะ $=\text{C}-\text{H}$
3, 4	2921, 2852	การสั่นแบบยืดของพันธะ $-\text{C}-\text{H}$
5, 6	1700, 1643	การสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{C}=\text{O}$
7	1593	การสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ (Aliphatic)
8	1453	การสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ (Aromatic)
9	1258	การสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{C}-\text{O}$ (Aromatic)
10, 11	990, 911	การสั่นแบบงอของพันธะ $-\text{C}-\text{H}$ (Aliphatic)
12, 13	776, 692	การสั่นแบบงอของพันธะ $-\text{C}-\text{H}$ (Aromatic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์ดานอลด้วยเทคนิค GC-MS

ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์ดานอลด้วยเทคนิค GC-MS ได้โครมาโทแกรมแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าโครมาโทแกรมของ DCNSL ที่ผ่านการตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเป็นเวลา 30 นาที (DCNSL1 และ DCNSL2) คล้ายกับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐานคาร์ดานอล ซึ่งมีพีคเกิดขึ้นนาที่ที่ 7.1 ในขณะที่การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเป็นเวลา 60 นาที (DCNSL3 และ DCNSL4) พบว่ามีพีคใหม่เกิดขึ้น 2 ตำแหน่ง คือ บริเวณนาที่ที่ 4.9 และนาที่ที่ 5 เนื่องจากการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเป็นเวลานานอาจทำให้คาร์ดานอลสลายตัว

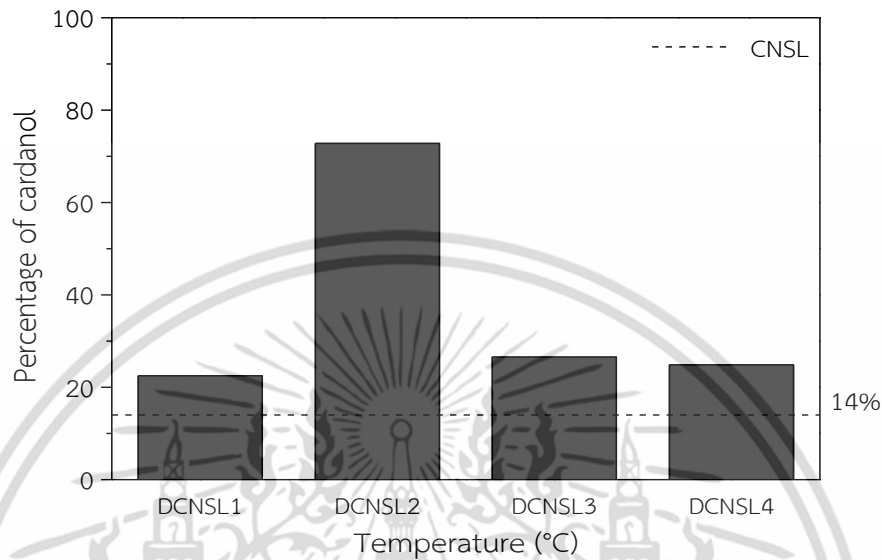


รูปที่ 4.3 โครมาโทแกรม GC-MS ของสารมาตรฐานคาร์ดานอล, CNSL และ DCNSL ที่ผ่านการตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสภาวะต่าง ๆ

เมื่อนำพื้นที่ใต้พีคนาที่ที่ 7.1 มาคำนวณหาปริมาณคาร์ดานอลที่พบใน DCNSL หลังการตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสภาวะต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 30 นาที (DCNSL2) มีปริมาณคาร์ดานอลสูงสุด ส่วนการทำปฏิกิริยาที่สภาวะอื่น ๆ ทำให้ปริมาณคาร์ดานอลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ (140°C) ทำให้ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ในขณะที่การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงขึ้น (160°C) ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดได้มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคาร์ดานอลเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการทำปฏิกิริยาเป็นเวลานาน (60 นาที) ไม่ทำให้ปริมาณคาร์ดานอลเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการคาร์ดานอลเกิดการเสื่อมสภาพ (Deterioration) ดังปรากฏพีคใหม่ในโครมาโทแกรม จากงานวิจัยของมโน ลิมวรพันธุ์ [22] พบว่าการตัดแปร CNSL ด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ทำให้กรดอนุคาร์ดิกลดลง สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของคาร์ดานอลและ CO₂ แต่เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลานาน (40-80 นาที) พบว่าการลดอนุคาร์ดิกลดลง ส่วนผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ได้แก่ คาร์ดานอลและ CO₂ มีปริมาณลดลงเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากการลดอนุคาร์ดิกและคาร์ดานอลเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาการเชื่อมสภาพ ซึ่งสามารถเกิดได้ 2 แบบ คือ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ฟีนอลและปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Thermal polymerization) ที่ตำแหน่งพันธะคู่ของหมู่ข้างเคียง พบว่าปฏิกิริยาการเชื่อมสภาพเกิดขึ้นบริเวณพันธะคู่ของหมู่ข้างเคียงเป็นส่วนใหญ่ และสามารถเกิดได้ทั้งบริเวณหมู่ฟีนอลและพันธะคู่ของหมู่ข้างเคียงเมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงเกิน 200°C

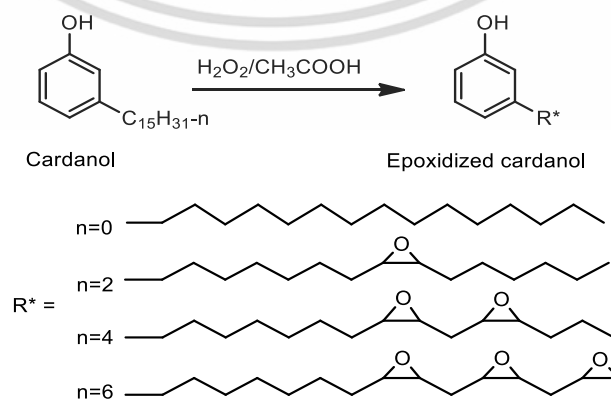


รูปที่ 4.4 ปริมาณคาร์ดานอลของ DCNSL ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสภาวะต่าง ๆ

จากการดัดแปรโครงสร้าง CNSL ด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน พบว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 30 นาที กรดอนาคาร์บอกซิเลชันเป็นคาร์ดานอลสูงสุด จึงใช้ DCNSL ที่ได้จากสภาวะดังกล่าวนี้ในการทดลองต่อไป

4.1.2 การดัดแปรด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน

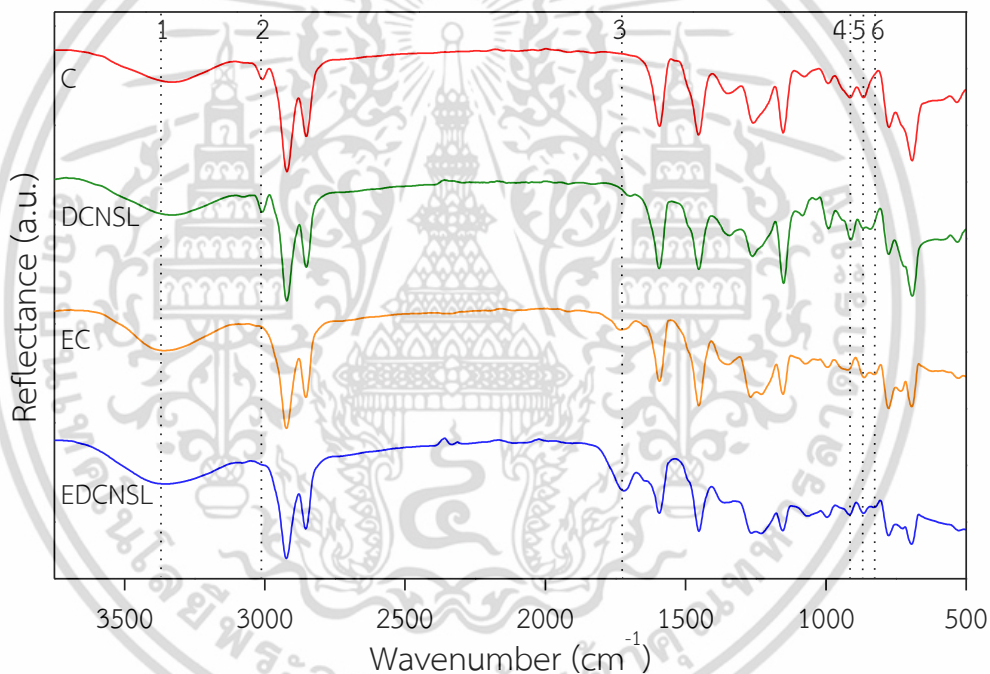
เมื่อได้สภาวะในการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่เหมาะสมแล้ว จากนั้นทำการดัดแปร DCNSL ที่ได้จากสภาวะดังกล่าวและคาร์ดานอลบริสุทธิ์ด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ซึ่งเป็นการแทนที่พันธะไม่อิ่มตัว (C=C) ด้วยหมู่อีพอกซิ ดังรูปที่ 4.5 และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันที่เตรียมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.5 ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของคาร์ดานอลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างน้ำมันด้วยเทคนิค FTIR

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างน้ำมันอีพอกซีไดซ์ชนิดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.3 พบว่าแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 3007 cm^{-1} ของ EC และ EDCNSL หายไป ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ $=\text{C}-\text{H}$ และปรากฏแถบการดูดกลืนเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง $825, 871$ และ 917 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่อีพอกซี แสดงถึงการแทนที่พันธะไม่อิ่มตัว ($\text{C}=\text{C}$) ของน้ำมันด้วยวงอีพอกไซด์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu Z. และคณะ [56] พบว่าสเปกตรัมของคาร์บอนอีพอกซีไดซ์ (ECD) ไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 3008 cm^{-1} แต่ปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง $823, 871$ และ 917 cm^{-1} (มีความเข้มต่ำ) นอกจากนี้พบว่าแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 3341 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ $\text{O}-\text{H}$ และการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1753 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ของ EC และ EDCNSL มีความเข้มมากขึ้น คาดว่าเนื่องจากการสลายตัวของวงอีพอกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบคาร์บอนิลและไกลคอล ดังรูปที่ 4.7 โดย EDCNSL เกิดการสลายตัวของวงอีพอกไซด์สูงกว่า EC เนื่องจากแถบการดูดกลืนของพันธะ $\text{O}-\text{H}$ และ $\text{C}=\text{O}$ มีความเข้มสูงกว่า

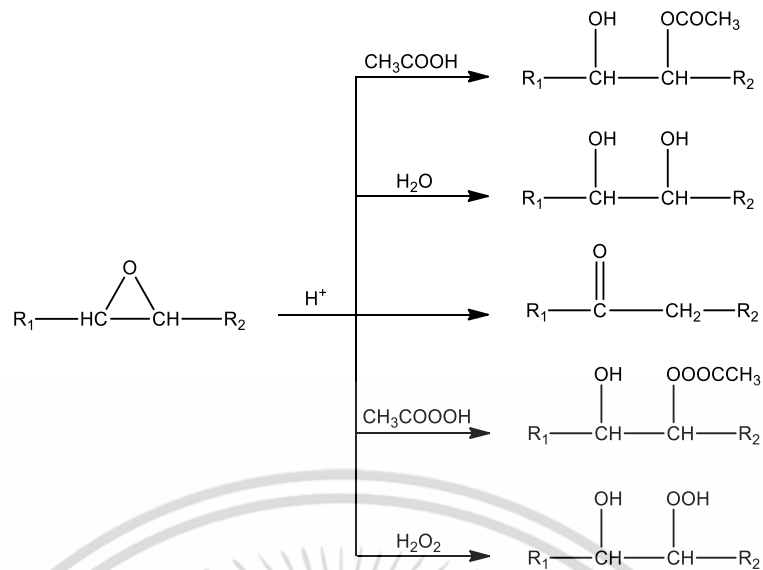


รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของ C, DCNSL, EC และ EDCNSL

ตารางที่ 4.3 แถบการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัมของ C, DCNSL, EC และ EDCNSL (แถบที่ 1-6 สอดคล้องตามรูปที่ 4.6)

แถบที่	เลขคลื่น (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
1	3341	การสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{O}-\text{H}$
2	3007	การสั่นแบบยืดของพันธะ $=\text{C}-\text{H}$
3	1753	การสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{C}=\text{O}$
4, 5, 6	917, 871, 825	การสั่นของหมู่อีพอกซี (Epoxy group)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

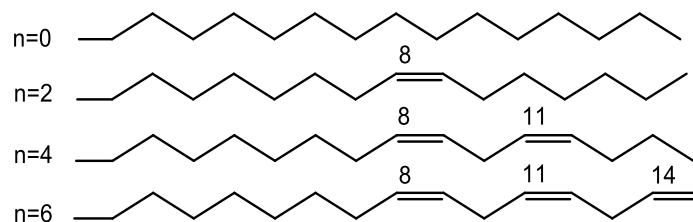


รูปที่ 4.7 ปฏิกิริยาการสลายตัวของวงอีพอกไซด์ [38]

4.1.2.2 สมบัติบางประการของน้ำมันชนิดต่าง ๆ

นอกจากนี้ศึกษาสมบัติบางประการของน้ำมันชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ค่าไอโอดีน ค่ากรด ความถ่วงจำเพาะ และความหนืด ดังตารางที่ 4.4

ค่าไอโอดีน เป็นค่าที่บ่งบอกปริมาณพันธะไม่อิ่มตัวในโครงสร้าง พบว่า CNSL เป็นน้ำมันที่มีค่าไอโอดีนสูง เนื่องจากมีหมู่ข้างเคียงเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว แสดงดังรูปที่ 4.8 เมื่อผ่านการตัดแปรรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน DCNSL ที่เตรียมได้มีค่าไอโอดีนใกล้เคียงกับ C แต่มีค่าสูงกว่า CNSL อาจเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเป็นการกำจัดหมู่คาร์บอกซิลิก ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง นั่นคือน้ำมัน 100 กรัม มีปริมาณพันธะไม่อิ่มตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้ไอโอดีนในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่วนการตัดแปรรด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน พบว่า EC และ EDCNSL มีค่าไอโอดีนลดลง เนื่องจากพันธะไม่อิ่มตัวบางส่วนถูกแทนที่ด้วยวงอีพอกไซด์ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR อย่างไรก็ดีตามพบว่า EDCNSL มีค่าไอโอดีนต่ำกว่า EC แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันได้มากกว่า เนื่องจาก EDCNSL เป็นน้ำมันที่ได้จากการตัดแปรรโครงสร้าง CNSL ซึ่งเป็นน้ำมันจากธรรมชาติ อาจมีสิ่งปนเปื้อนทำให้เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันได้ดีขึ้น จากงานวิจัยของ Akinhanmi T.F. และคณะ [57] พบว่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีเหล็ก (Fe) และสังกะสี (Zn) เป็นองค์ประกอบ อาจปนเปื้อนในระหว่างกระบวนการสกัด CNSL ซึ่งโลหะดังกล่าวสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันได้



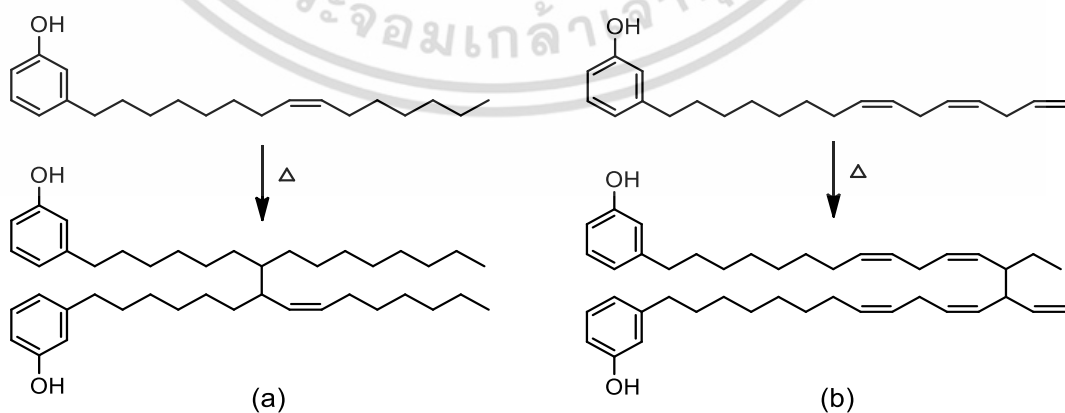
รูปที่ 4.8 โครงสร้างหมู่ข้างเคียงของ CNSL [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากรด เป็นค่าที่บ่งบอกความเป็นกรดของน้ำมัน พบว่า CNSL มีค่ากรดสูงที่สุดคือ 113.65 g KOH/100g เนื่องจากมีกรดอนุคาร์บิกเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อทำการตัดแปรด้วย ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน กรดอนุคาร์บิกเปลี่ยนเป็นคาร์ดานอลและ CO₂ ทำให้ DCNSL มีค่ากรด ลดลงและมีค่าใกล้เคียงกับ C ส่วนการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันไม่ทำให้ค่ากรดเปลี่ยนแปลงไป

ค่าความถ่วงจำเพาะ สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลรวมไปถึงต้นทุนในการผลิต พบว่า การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะลดลง เนื่องจากการกำจัดหมู่ คาร์บอกซิลิก ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง โดย C และ DCNSL ที่เตรียมได้มีค่าความถ่วงจำเพาะ ใกล้เคียงกัน ในขณะที่การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันทำให้น้ำมันมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงขึ้น เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของวงอีพอกไซด์ ซึ่งอะตอมของออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นมีน้ำหนักอะตอมสูงกว่า อะตอมของไฮโดรเจนและอะตอมของคาร์บอน ทั้งยังทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ ทั้งนี้ CNSL และ DCNSL ตัดแปรชนิดต่าง ๆ มีค่าความ ถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับ AO ยกเว้น EDCNSL ที่มีความถ่วงจำเพาะสูงมากจนไม่สามารถทดสอบด้วย เทคนิคนี้ได้

ความหนืด เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความต้านการไหลของของเหลวซึ่งสัมพันธ์กับน้ำหนัก โมเลกุล พบว่าการตัดแปรด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันทำให้น้ำมันมีความหนืดลดลงเนื่องจากการ กำจัดหมู่คาร์บอกซิลิก โดยที่ความหนืดของ C และ DCNSL มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการตัดแปรด้วย ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น โดย EC มีความหนืดใกล้เคียงกับ AO ในขณะที่ EDCNSL มีความหนืดสูงมากจนไม่สามารถหาค่าได้จากสถานะที่ใช้ในการทดสอบ ทั้งนี้อาจ เนื่องมาจาก EDCNSL เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันได้มาก (ค่าไอโอดีนต่ำ) ทำให้น้ำมันมีความหนืดมาก จึงใช้เวลาในการระเหยไหลอยู่นานเมื่อเปรียบเทียบกับ EC ซึ่งน้ำมันที่มีพันธะไม่อิ่มตัวและวงอีพอก- ไซด์ในโมเลกุล เมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานอาจทำให่วงอีพอกไซด์เกิดความเครียดและเปิด วงได้เป็นสารประกอบคาร์บอนิลและไกลคอล สอดคล้องกับผลทดสอบจากเทคนิค FTIR นอกจากนี้ อาจเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ทำให้ EDCNSL ที่เตรียมได้มีความหนืดสูงมาก จากงานวิจัยของ Rodrigues F.H.A. และคณะ [58] พบว่าคาร์ดานอลสามารถเกิดปฏิกิริยาโอลิโกเมอไรเซชัน (Oligomerization) ได้ เมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ทำให้คาร์ดานอลมีความหนืดเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.9 ส่วน WO มีความหนืดต่ำที่สุด เนื่องจากโมเลกุลมีขนาดเล็กสุด



รูปที่ 4.9 ปฏิกิริยาโอลิโกเมอไรเซชันของคาร์ดานอลภายใต้อุณหภูมิสูง (a) มีพันธะไม่อิ่มตัว 1 พันธะ และ (b) มีพันธะไม่อิ่มตัว 3 พันธะ [58]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 สมบัติบางประการของน้ำมันชนิดต่าง ๆ

น้ำมัน	ค่าไอโอดีน (g I/100g)	ค่ากรด (g KOH/100g)	ค่าความ ถ่วงจำเพาะ	ค่าความหนืด (mPa·s)
CNSL	184.26	113.65	1.0004	183
C	234.19	5.73	0.9756	87
DCNSL	238.98	4.89	0.9822	95
EC	138.43	3.40	1.0089	2967
EDCNSL	91.81	4.55	N/A	N/A
WO	N/A	N/A	0.9041	22
AO	N/A	N/A	1.0022	3158

หมายเหตุ การหาค่าความหนืด ทดสอบที่ความเร็วรอบ 12 rpm ยกเว้น EC, EDCNSL และ AO ทดสอบที่ความเร็วรอบ 6 rpm

4.2 ผลของน้ำมันต่อสมบัติของยาง

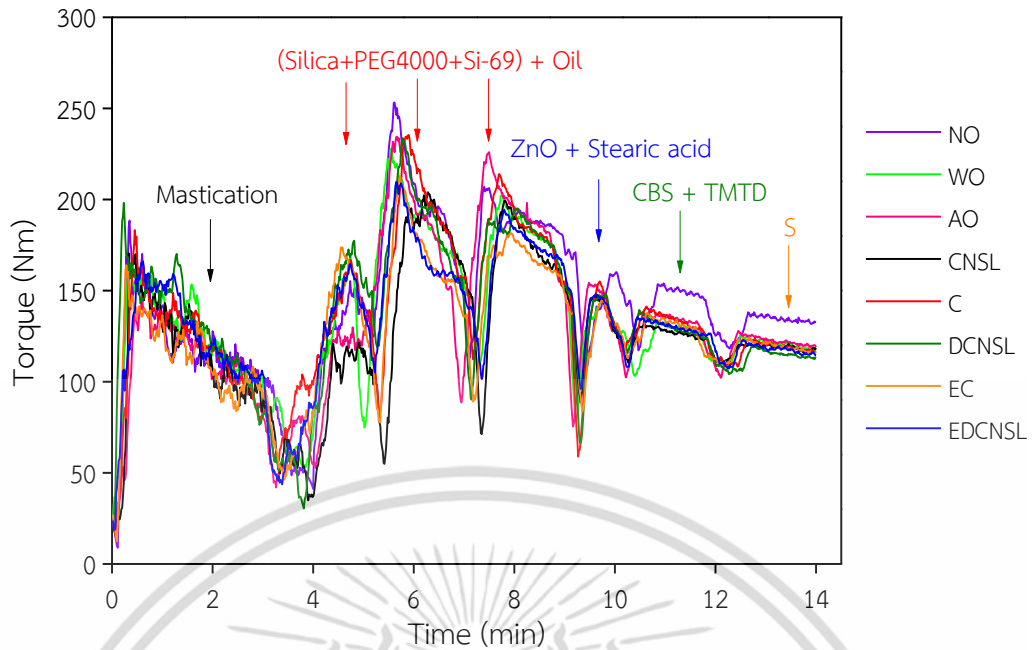
ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของยาง ได้แก่ ชนิดของน้ำมัน เช่น CNSL, C, DCNSL, EC และ EDCNSL เปรียบเทียบกับการใช้ AO และ WO ซึ่งเป็นน้ำมันเชิงพาณิชย์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยาง และศึกษาปริมาณน้ำมัน เช่น 5 และ 10 phr ที่ส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการผสม สมบัติของยางคอมพาวด์ และยางเชื่อมโยง

4.2.1 พลังงานที่ใช้ในการผสม

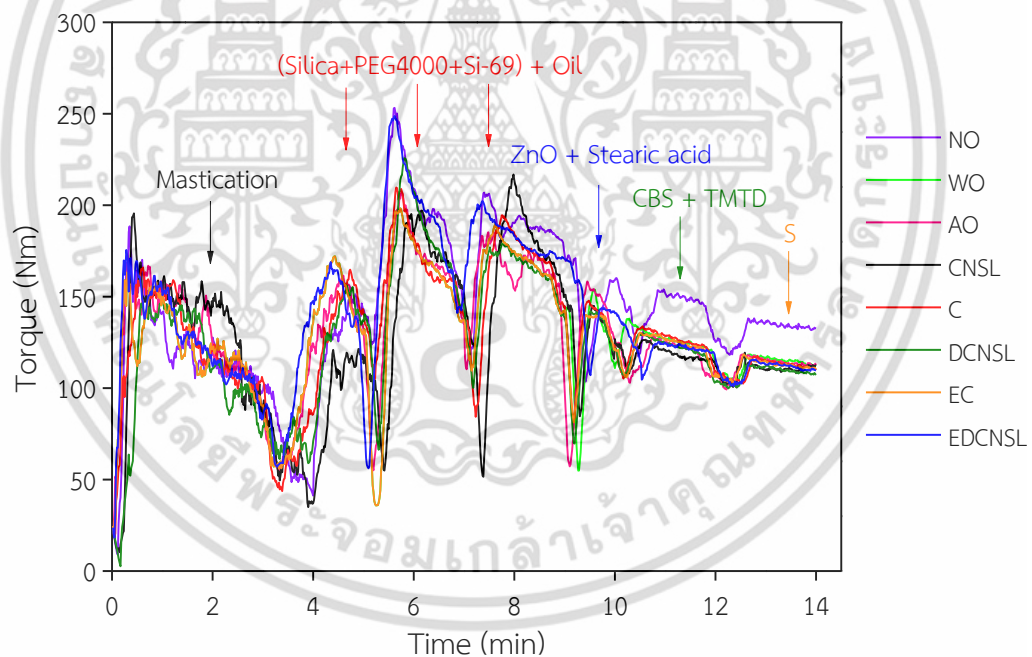
แรงบิดที่ได้จากเครื่องผสมระบบปิดขณะผสมยางและสารเคมีบ่งบอกถึงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตรวมไปถึงต้นทุนในการผลิต รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงค่าแรงบิดที่ใช้ในการผสมยางที่ไม่เติมน้ำมันและยางที่เติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr ตามลำดับ ในช่วงแรกค่าแรงบิดที่ใช้เพิ่มสูงขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการบดย่อยยาง (Mastication) ทำให้โมเลกุลของยางบางส่วนถูกตัดสายโซ่ให้สั้นลง ความหนืดลดลง ทำให้ยางไหลได้ง่ายขึ้น เมื่อเติมซิลิกา ลงไปทำให้ยางมีความแข็งและความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงบิดที่ใช้ในการผสมเพิ่มขึ้นเพื่อให้ซิลิกา แยกตัวและผสมเข้ากับยางได้ ในช่วงสุดท้ายเป็นการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง และสารเชื่อมโยง พบว่าค่าแรงบิดค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากสารเคมีที่เติมลงไปมีปริมาณน้อยและการผสมเป็นเวลานานทำให้ความหนืดลดลง

การเติมน้ำมันช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการผสม จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าค่าแรงบิดสุดท้ายที่ใช้ในการผสมลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากน้ำการเติมมันทำให้ยางมีความแข็งลดลง ทั้งยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น ช่วยลดแรงเสียดทานในระหว่างการผสม ทำให้ยางไหลได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ใช้พลังงานในการผสมลดลง นอกจากนี้พบว่าชนิดของน้ำมันส่งผลต่อการลดลงของแรงบิดที่ใช้ในการผสมน้อยกว่าปริมาณน้ำมัน โดยยางที่เติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณเท่ากันมีค่าแรงบิดสุดท้ายไม่แตกต่างกัน ในขณะที่การเติมน้ำมันปริมาณ 10 phr ส่งผลให้ค่าแรงบิดสุดท้ายลดลงกว่าการเติมน้ำมันปริมาณ 5 phr อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการใช้น้ำมันปริมาณมากขึ้น ยิ่งทำให้ยางมีความแข็งและความหนืดลดลง สายโซ่ของยางเคลื่อนที่ได้ง่าย ทำให้ใช้พลังงานในการผสมลดลง กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แรงบิดที่ใช้ในการผสมยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 phr



รูปที่ 4.11 แรงบิดที่ใช้ในการผสมยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10 phr

เมื่อทำการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟค่าแรงบิดที่ใช้ในการผสมตั้งแต่วันที่ 0 ถึงวันที่ 14 ของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันเติมและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การลดลงของแรงบิดที่ใช้ในการผสม แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าการเติมน้ำมันทำให้พลังงานที่ใช้ในการผสมลดลงอย่างชัดเจนและลดลงมากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันเป็น 10 phr

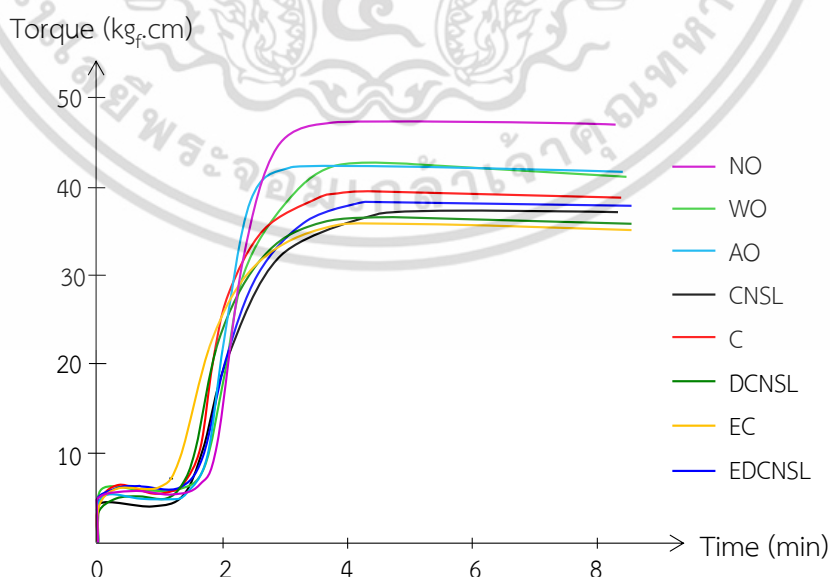
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงบิดที่ใช้ในการผสมยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr

ชนิดน้ำมัน	5 phr		10 phr	
	ค่าแรงบิดทั้งหมด (Nm·s)	ลดลง (%)	ค่าแรงบิดทั้งหมด (Nm·s)	ลดลง (%)
NO	119040	0	119040	0
WO	112800	5.2	103440	13.1
AO	110760	7.0	105000	11.8
CNSL	112140	5.8	106140	10.8
C	111600	6.3	102780	13.7
DCNSL	113760	4.4	104880	11.9
EC	114540	3.8	108480	8.9
EDCNSL	110880	6.9	106140	10.5

4.2.2 ลักษณะการเชื่อมโยง

น้ำมันที่ดีไม่ควรส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยาง ไม่ทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{s2}), เวลาเชื่อมโยงยาง (t_{c90}) และความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางเปลี่ยนไปเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่เติมน้ำมัน กราฟลักษณะการเชื่อมโยงของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr แสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 และค่า M_L , M_{HF} , t_{s2} , t_{c90} และ CRI ของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr แสดงดังตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ พบว่าเมื่อให้แรงกับยาง ยางนิ่มลงเนื่องจากแรงเฉือน ทำให้แรงบิดมีค่าต่ำลง (M_L) เมื่อทดสอบเป็นเวลานานยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเปลี่ยนจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ส่งผลให้แรงบิดมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดและคงที่ (M_{HF})



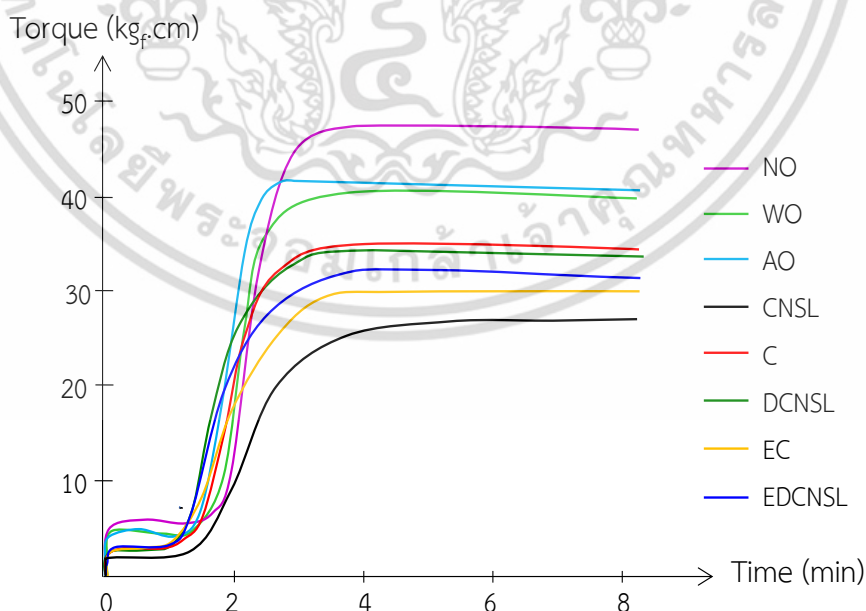
รูปที่ 4.12 กราฟลักษณะการเชื่อมโยงของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 5 phr เป็นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่า M_L , M_{HF} , t_{s2} , t_{c90} และ CRI ของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 phr

ชนิดน้ำมัน	M_L (kg _f -cm)	M_{HF} (kg _f -cm)	t_{s2} (min)	t_{c90} (min)	CRI (s ⁻¹)
NO	6	47	1.75	2.75	100
WO	6	43	1.6	2.9	77
AO	5	42	1.6	2.5	111
CNSL	4	37	1.4	3.1	59
C	6	39.5	1.5	2.8	77
DCNSL	5	36.5	1.5	2.8	77
EC	6	36	1.3	2.9	63
EDCNSL	6	38	1.35	2.8	69

รูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.6 แสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 phr พบว่าการเติมน้ำมันไม่ส่งผลต่อค่า M_L ของยาง แต่ส่งผลต่อค่า M_{HF} เนื่องจากน้ำมันสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้ยางนิ่มลง ความแข็งลดลง ส่งผลให้ค่า M_{HF} ลดลง โดยยางที่เติม CNSL และ CNSL ดัดแปรชนิดต่าง ๆ มีค่า M_{HF} ต่ำกว่ายางที่เติม AO และ WO อาจเนื่องจากความหนาแน่นเชื่อมโยงที่ต่างกัน นอกจากนี้พบว่าการใช้ CNSL ดัดแปรไม่ทำให้ค่า t_{s2} และ t_{c90} แตกต่างกับการใช้ AO และ WO ยกเว้นการใช้ CNSL พบว่าทำให้ค่า t_{c90} เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและมีค่าดัชนีอัตราการเชื่อมโยง (CRI) ต่ำที่สุด เนื่องจากมีความเป็นกรดสูงกว่าน้ำมันชนิดอื่น ทำให้เกิดการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง



รูปที่ 4.13 กราฟลักษณะการเชื่อมโยงของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่า M_L , M_{HF} , t_{s2} , t_{c90} และ CRI ของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10 phr

ชนิดน้ำมัน	M_L ($kg_f \cdot cm$)	M_{HF} ($kg_f \cdot cm$)	t_{s2} (min)	t_{c90} (min)	CRI (s^{-1})
NO	6	47	1.75	2.75	100
WO	4.5	40.5	1.6	2.95	74
AO	4.5	41	1.65	2.5	118
CNSL	2	27	1.6	3.5	53
C	3	35	1.3	2.6	77
DCNSL	2.5	34	1.25	2.6	74
EC	3	30	1.25	2.8	65
EDCNSL	2.5	32	1.3	2.9	63

จากรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.7 เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันเป็น 10 phr พบว่ายางมีค่า M_L และ M_{HF} ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเติมน้ำมันปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ยางนิ่มลง และมีความแข็งลดลงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำมันปริมาณ 5 phr โดยเฉพาะการใช้ CNSL ดัดแปร ทำให้ยางมีค่า M_L และ M_{HF} ต่ำกว่าการใช้ AO และ WO ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นเชื่อมโยงของยาง อย่างไรก็ตามการใช้ไขมันชนิดต่าง ๆ ไม่ส่งผลต่อค่า t_{s2} และ t_{c90} ยกเว้นการใช้ CNSL พบว่ามีค่า M_{HF} ลดลง และค่า t_{c90} เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับใช้น้ำมันชนิดอื่นและการใช้ที่ปริมาณ 5 phr ซึ่งเป็นผลจากการหน่วงปฏิกิริยาเชื่อมโยง

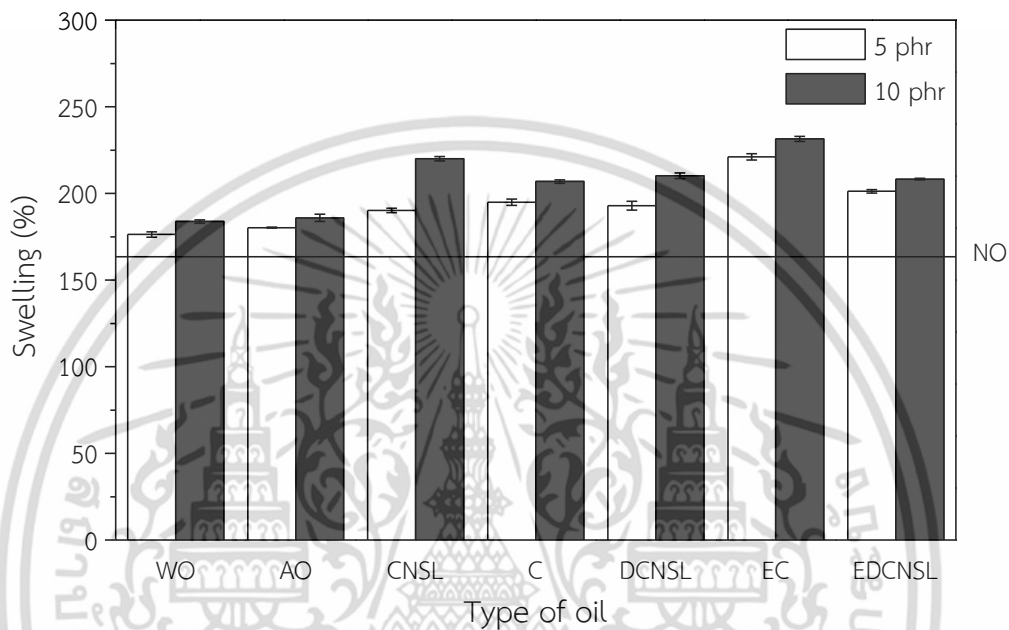
4.2.3 ร้อยละการบวมตัว

การบวมตัวของยาง (Swelling) ในตัวทำละลายเป็นวิธีหนึ่งในการหาความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้วซึ่งส่งผลอย่างมากต่อสมบัติของยาง ร้อยละการบวมตัวของยางแปรผกผันกับความหนาแน่นเชื่อมโยง นั่นคือยางที่มีความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อยสามารถบวมตัวในตัวทำละลายมาก ในขณะที่ยางที่มีความหนาแน่นเชื่อมโยงสูงต้านทานการบวมตัวในตัวทำละลายได้ดีขึ้น

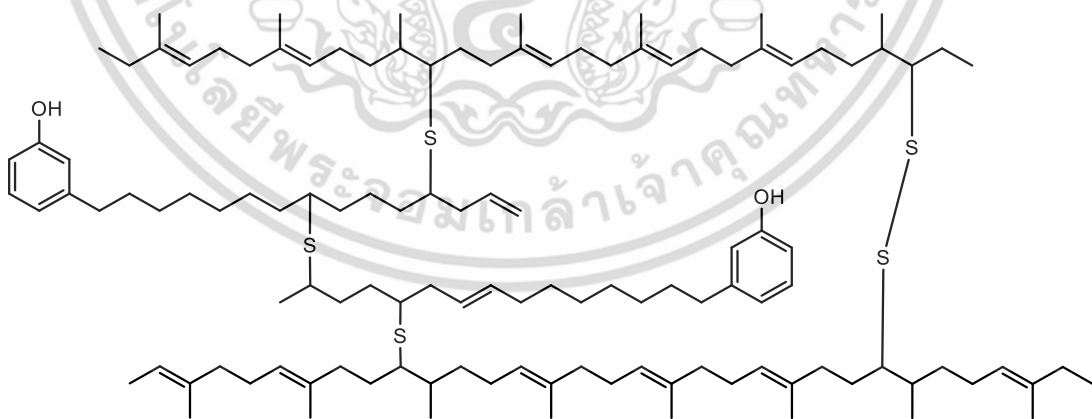
จากรูปที่ 4.14 พบว่ายางที่ไม่เติมน้ำมันมีร้อยละการบวมตัวต่ำ ขณะที่การเติมน้ำมันทำให้ยางบวมตัวสูงขึ้น เนื่องจากน้ำมันเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่ของยาง ทำให้แต่ละสายโซ่อยู่ห่างกันมากขึ้น ปริมาตรอิสระสูงขึ้น ตัวทำละลายสามารถล้อมรอบโมเลกุลของยางได้มากขึ้น โดยยางที่ใช้ AO และ WO ปริมาณ 5 และ 10 phr มีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกัน ในขณะที่การใช้ CNSL และ CNSL ดัดแปรทำให้ยางมีค่าการบวมตัวสูงกว่าการใช้ AO และ WO และเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเติมน้ำมันปริมาณ 10 phr เนื่องจากหมู่ข้างเคียงเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว แม้ว่า EC และ EDCNSL ซึ่งผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาอ็อกซิเดชัน ยังคงมีพันธะคู่ ($C=C$) หลงเหลืออยู่ยืนยันด้วยค่าไอโอดีน ทำให้สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงกับโมเลกุลของยางหรือระหว่างพันธะคู่ของน้ำมันด้วยกันได้ กำมะถันบางส่วนจึงถูกใช้ในการเชื่อมโยงบริเวณดังกล่าว ดังรูปที่ 4.15 ทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Menon A.R.R. และคณะ [35] พบว่าเมื่อใช้ Phosphorylated CNSL (PCNSL) เป็นพลาสติกไซเซอร์สำหรับยางธรรมชาติ ทำให้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่เติมน้ำมันและยางที่เติมน้ำมันอะโรมาติก เนื่องจากผลความเกะกะ (Steric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

hindrance) ของหมู่ฟอสเฟตและหมู่ข้างเคียง รวมทั้งการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยางและหมู่ข้างเคียงของน้ำมัน นอกจากนี้อาจเป็นผลจากค่าตัวแปรการละลาย (δ) เนื่องจาก CNSL และ CNSL ดัดแปรชนิดต่าง ๆ มีโครงสร้างเคมีใกล้เคียงกับโพลูอิน ทำให้สามารถเข้ากับโพลูอินได้มากกว่า AO และ WO ส่งผลให้ยางบวมตัวได้มากกว่า ส่วนการใช้ CNSL นอกจากเหตุผลข้างต้นแล้ว ความเป็นกรดของ CNSL ส่งผลโดยตรงต่อการบวมตัวของยาง หน่วงปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ทำให้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงต่ำ



รูปที่ 4.14 ร้อยละการบวมตัวของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr

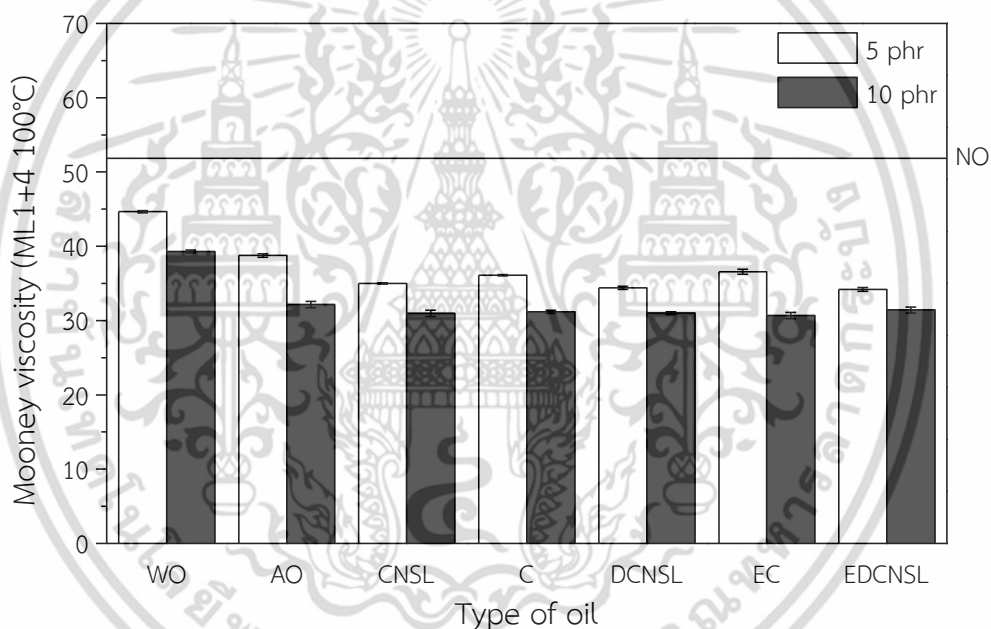


รูปที่ 4.15 แบบจำลองการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางและ CNSL ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ความหนืดมูนิ

ความหนืดมูนิของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่ายางที่เติมน้ำมันมีค่าความหนืดมูนิลดลง เนื่องจากน้ำมันสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ในโมเลกุลของยาง ทำให้ยางนิ่มลง ไหลได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ใช้แรงบิดในการหมุนลดลง โดยยางที่เติม CNSL และ CNSL ดัดแปรมีค่าความหนืดมูนิต่ำกว่ายางที่เติม AO และ WO เนื่องจาก WO มีโครงสร้างเล็กสุด (มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำสุด) ส่วน AO มีโครงสร้างใหญ่ขึ้นจากส่วนที่เป็นวงอะโรมาติก ในขณะที่ CNSL ดัดแปรเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่มีหมู่ข้างเคียงเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว (C และ DCNSL) และบางส่วนถูกแทนที่ด้วยวงอีพอกไซด์ (EC และ EDCNSL) ส่งผลให้โครงสร้างน้ำมันดังกล่าวมีความเกาะเกาะมากที่สุดและสามารถเกิดพันธะเชื่อมโยระหว่างโมเลกุลน้ำมันได้ ทำให้โมเลกุลของยางอยู่ห่างกันมากขึ้น ความหนืดลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันเป็น 10 phr พบว่าความหนืดมูนิลดลง เนื่องจากน้ำมันปริมาณมากขึ้นยิ่งทำให้ยางนิ่มลง นอกจากนี้การใช้ CNSL ดัดแปรต่างชนิดกันไม่ทำให้ค่าความหนืดมูนิแตกต่างกัน

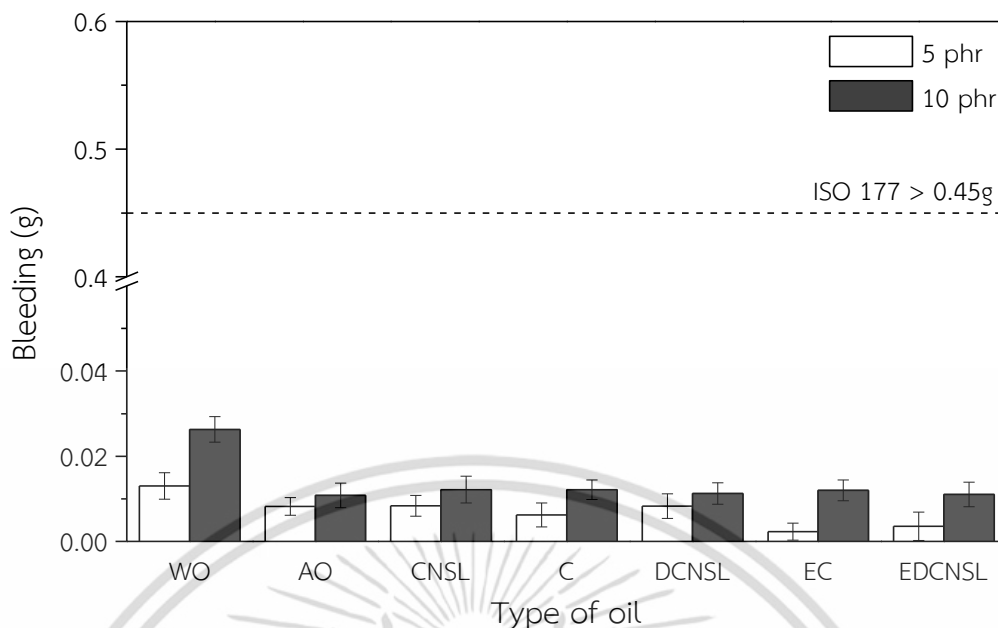


รูปที่ 4.16 ความหนืดมูนิของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr

4.2.5 การแพร่ออกของน้ำมัน

การแพร่ออกของน้ำมัน เป็นค่าที่แสดงถึงความเข้ากันได้ระหว่างยางกับน้ำมัน ซึ่งเป็นผลมาจากค่าตัวแปรการละลาย (δ) ตามมาตรฐาน ISO 177 การแพร่ออกของน้ำมันเกิดขึ้นเมื่อความแตกต่างระหว่างน้ำหนักชิ้นงานทดสอบก่อนอบและหลังอบมีค่ามากกว่า 0.45 กรัม เนื่องจากยางที่ไม่เติมน้ำมันมีน้ำหนักหลังอบลดลง ค่าการแพร่ออกของน้ำมันของยางที่เติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ รายงานด้วยค่าน้ำหนักที่หายไปของยางเมื่อเติมน้ำมันแต่ละชนิดลบด้วยน้ำหนักที่หายไปของยางที่ไม่เติมน้ำมัน จากรูปที่ 4.17 พบว่ายางที่เติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr ไม่เกิดการแพร่ออกของน้ำมัน และการเติมน้ำมันแต่ละชนิดทำให้ยางมีค่าการแพร่ออกของน้ำมันใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 การแพร่ออกของน้ำมันของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr

4.2.6 สมบัติเชิงกล

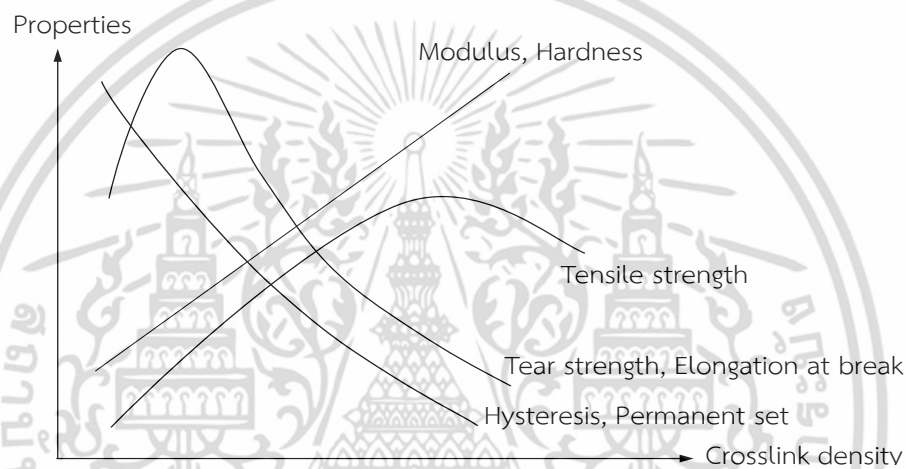
สมบัติเชิงกลเป็นสมบัติที่มีความสำคัญมากที่สุด เพราะเป็นสมบัติที่นิยมใช้ในการกำหนดมาตรฐานหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์เพื่อให้มีความแข็งแรงและเหมาะสมต่อการใช้งาน ซึ่งความหนาแน่นเชื่อมโยงส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกล ดังรูปที่ 4.18 สมบัติเชิงกลของยางแสดงด้วยค่าความแข็งกด สมบัติแรงดึง การยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัด และความต้านทานการขาด

ความแข็งกด ความแข็งแรงดึง มอดูลัสที่ 100% และ 300% และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr แสดงดังรูปที่ 4.19-4.23 ซึ่งสมบัติเชิงกลดังกล่าวเป็นผลมาจากความหนาแน่นเชื่อมโยง จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่ายางที่ไม่เติมน้ำมันมีความหนาแน่นเชื่อมโยงสูงสุด ส่งผลให้มีค่าความแข็งกด ความแข็งแรงดึง มอดูลัสที่ 100% และ 300% สูง เนื่องจากมีปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูง ทำให้โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้ยางเปลี่ยนแปลงขนาด และมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะเชื่อมโยง

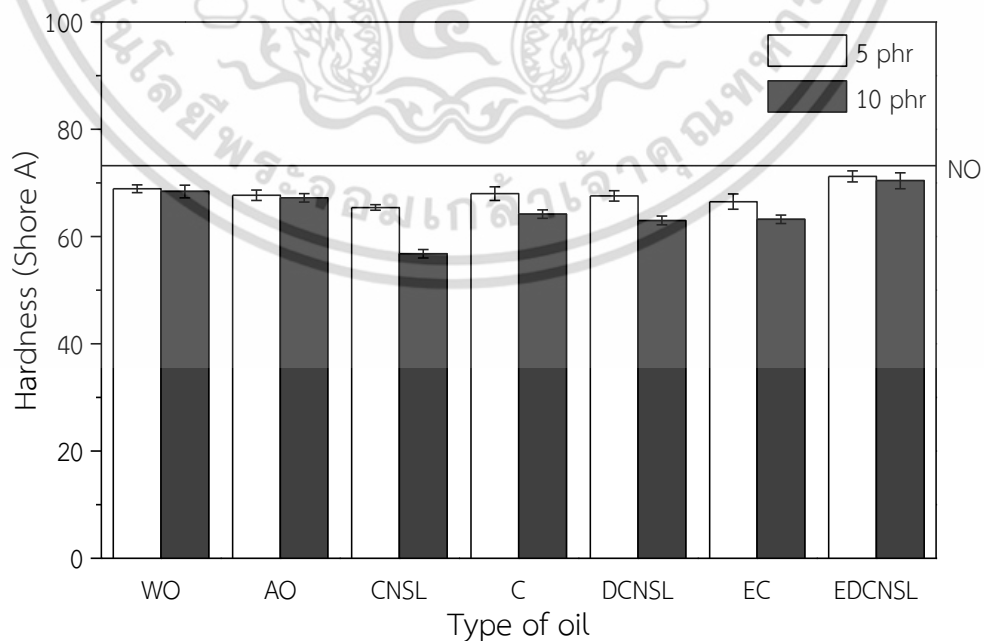
เมื่อเติมน้ำมัน ยางมีความแข็งกด ความแข็งแรงดึง มอดูลัสที่ 100% และ 300% ลดลง และมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับยางที่ไม่เติมน้ำมัน เนื่องมาจากผลการทดสอบร้อยละการบวมตัวของยาง พบว่าการเติมน้ำมันทำให้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงลดลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง โดยยางที่เติม AO และ WO มีค่าความแข็งกด ความแข็งแรงดึง มอดูลัสที่ 100% และ 300% ลดลง และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากมีความหนาแน่นเชื่อมโยงใกล้เคียงกัน ทั้งการใช้น้ำมันปริมาณ 5 และ 10 phr

ส่วนยางที่เติม CNSL และ CNSL ดัดแปรมีความหนาแน่นเชื่อมโยงต่ำกว่ายางที่เติม AO และ WO อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความแข็งกด ความแข็งแรงดึง มอดูลัสที่ 100% และ 300% และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางเมื่อเติม CNSL ดัดแปรปริมาณ 5 phr ใกล้เคียงกับยางที่เติม AO และ WO เนื่องจากหุ้มข้างเคียงของ CNSL ดัดแปรเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ประกอบด้วยคาร์บอน 15

อะตอม ซึ่งมีความเคอะกะสูง ทำให้เกิดการเกี่ยวพัน (Chain entanglement) กับโมเลกุลของยางหรือ อาจเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางกับน้ำมัน ทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Menon A.R.R. และคณะ [35] พบว่ายางที่เติม PCNSL สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงดึง แม้ว่ามีความหนาแน่นเชื่อมโยงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่เติมน้ำมันอะโรมาติก ทั้งนี้เนื่องจากความเคอะกะของหมู่ฟอสเฟตและหมู่ข้างเคียงทำให้ยางมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ส่งผลให้ช่วยยับยั้งการเติบโตของรอยแตกจากการทดสอบ นอกจากนี้พบว่าการใช้ CNSL ทำให้ความแข็งแรงกด ความแข็งแรงดึง มอดูลัสที่ 100% และ 300% ลดลง และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก CNSL มีความเป็นกรดสูง ทำให้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันเป็น 10 phr ซึ่งทำให้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงลดลง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกด ความแข็งแรงดึง มอดูลัสที่ 100% และ 300% ลดลง และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น

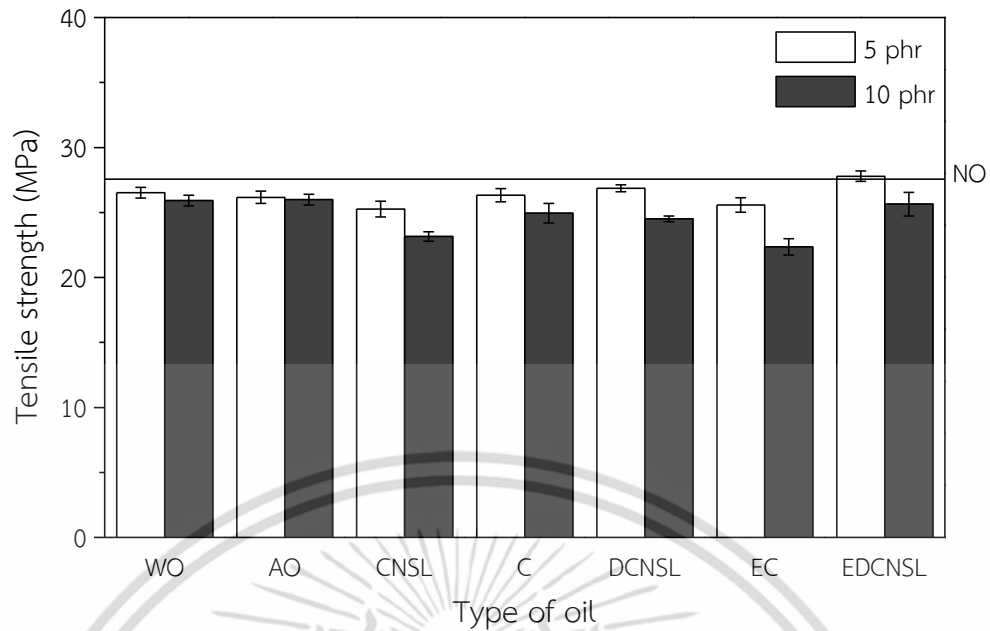


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกล [27]

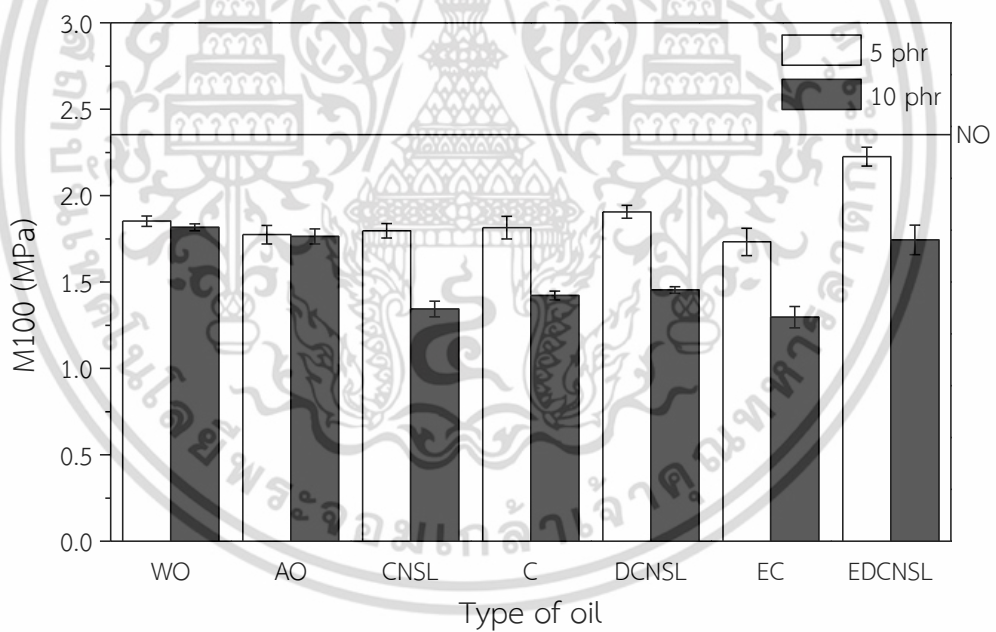


รูปที่ 4.19 ความแข็งแรงกดของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



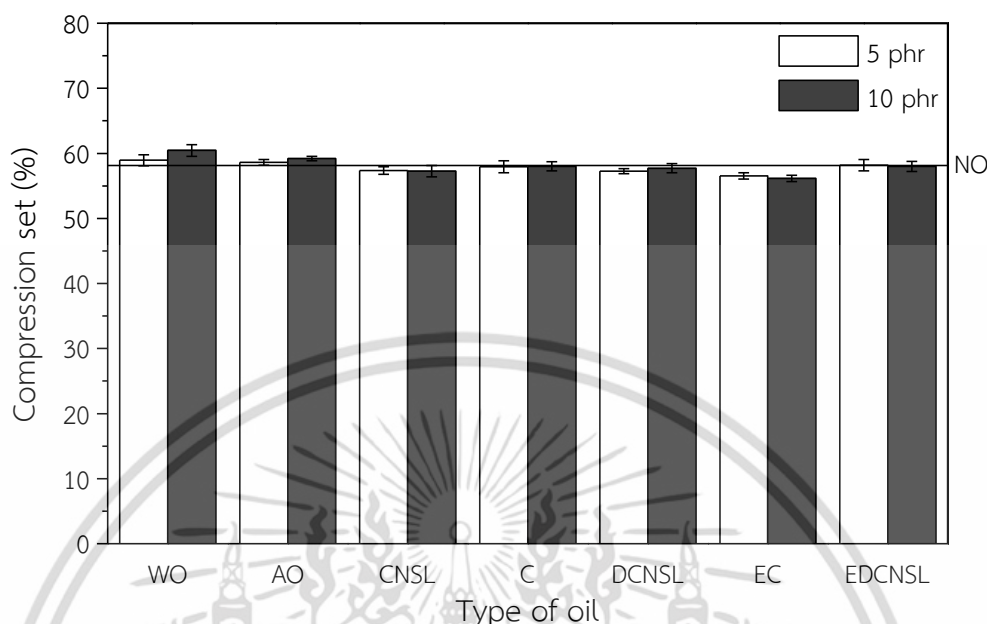
รูปที่ 4.20 ความแข็งแรงดึงของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr



รูปที่ 4.21 โมดูลัสที่ 100% ของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณพันธะคู่ของน้ำมันกับโมเลกุลของยางได้ ทำให้ค่าการยุบตัวลดลง ส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำมันเป็น 10 phr ไม่ทำให้ค่าการยุบตัวแตกต่างกัน



รูปที่ 4.24 การยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัดของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr

4.2.7 สมบัติหลังการบ่มเร่ง

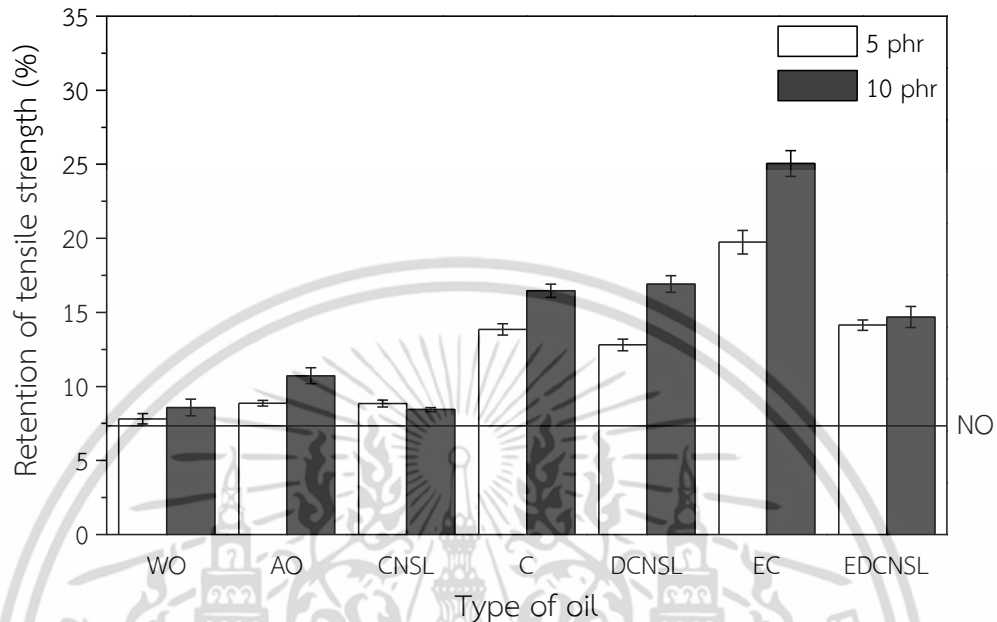
สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 7 วัน แสดงดังรูปที่ 4.25–4.27 พบว่าเมื่อทำการบ่มเร่งยางเกิดการเสถียรภาพทางความร้อน เนื่องจากโครงสร้างของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ซึ่งไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เมื่อมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สมบัติเชิงกลลดต่ำลง โดยเฉพาะยางที่เติม AO และ WO มีการยึดตัว ณ จุดขาดไม่ถึง 100% เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้สายโซ่ของยางสั้นลง

การใช้ CNSL ดัดแปรสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งได้ ทำให้ยางมีร้อยละคงเหลือหลังการบ่มเร่งของความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 100% และร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่เติม AO และ WO เนื่องจากโครงสร้างของ CNSL ดัดแปรเป็นสารประกอบฟีนอลิกและมีหมู่ข้างเคียงเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว แม้ว่าพันธะไม่อิ่มตัวไวต่อการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพของยาง แต่โครงสร้างหลักเป็นสารประกอบฟีนอลิกสามารถทำหน้าที่เป็นสารต้านการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจนได้ ส่วนยางที่เติม CNSL พบว่ามีสมบัติหลังการบ่มเร่งใกล้เคียงกับยางที่เติม AO และ WO ยกเว้นร้อยละคงเหลือของร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก CNSL มีค่ากรดสูง ทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้น้อย

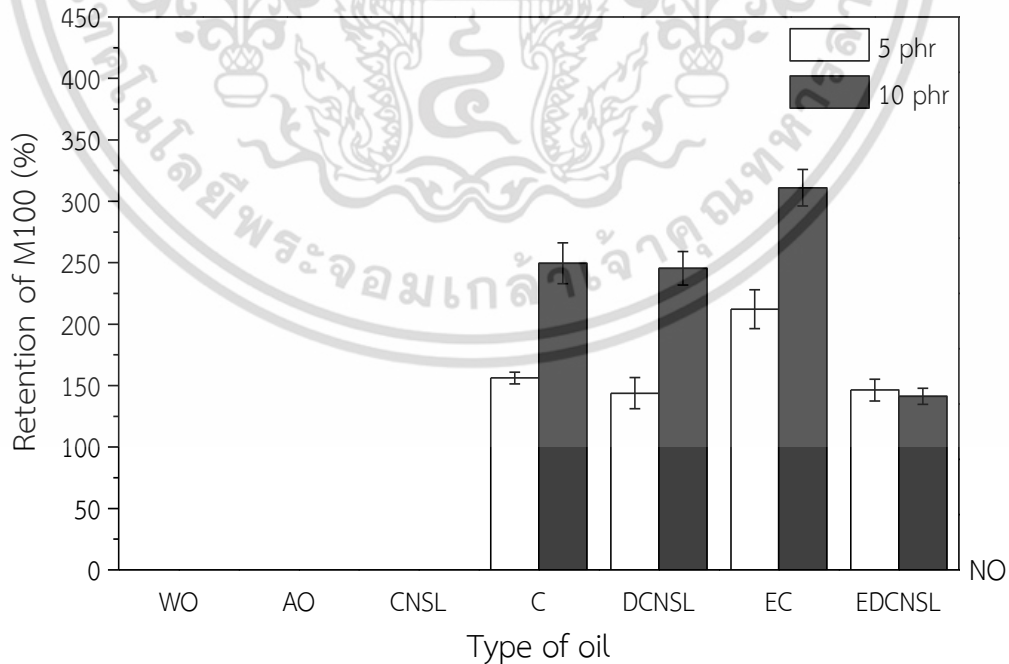
ชนิดของ CNSL ดัดแปรส่งผลต่อสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง พบว่ายางที่เติม EC และ EDCNSL ทำให้ยางเสถียรภาพทางความร้อนได้น้อยกว่ายางที่เติม C และ DCNSL ซึ่งมีปริมาณพันธะไม่อิ่มตัวสูงกว่า เนื่องจากพันธะคู่บางส่วนถูกแทนที่ด้วยวงอิมิดาโซล อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้ EC ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งได้ดีที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันเป็น 10 phr พบว่ายางที่เติม CNSL ดัดแปรมีค่าคงเหลือหลังการบ่มเร่งของความแข็งแรงดึงและมอดุลัสที่ 100% เพิ่มขึ้น เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันดังกล่าวสามารถทำหน้าที่เป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชัน รวมทั้งเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางกับน้ำมันหรือระหว่างโมเลกุลน้ำมันด้วยตัวเอง ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการลดลงของร้อยละคงเหลือหลังการบ่มเร่งของร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด

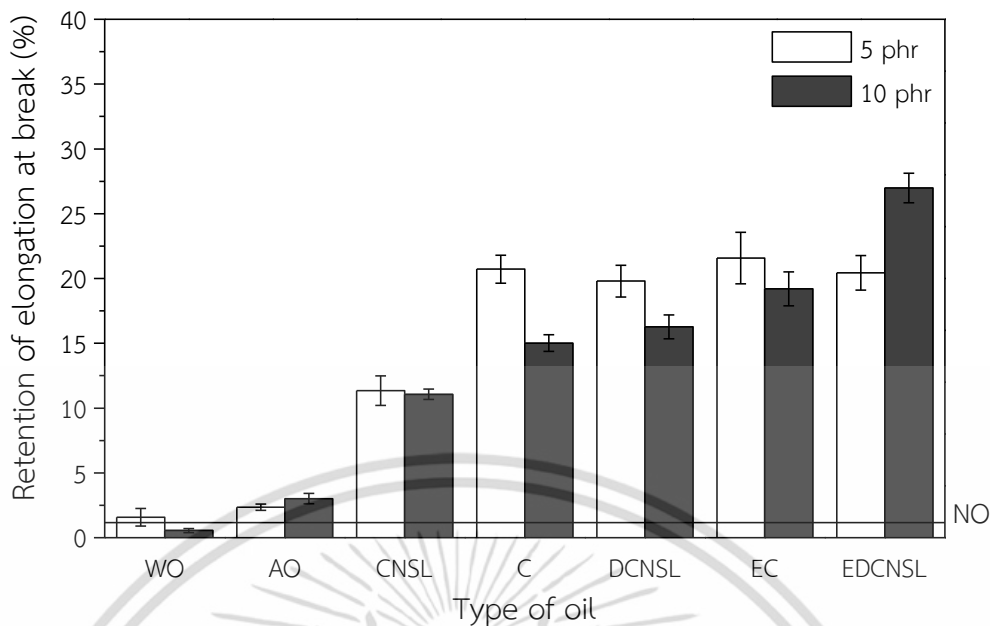


รูปที่ 4.25 ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มเร่งของความแข็งแรงดึงของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr



รูปที่ 4.26 ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มเร่งของมอดูลัสที่ 100% ของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ

ปริมาตร 5 และ 10 phr เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



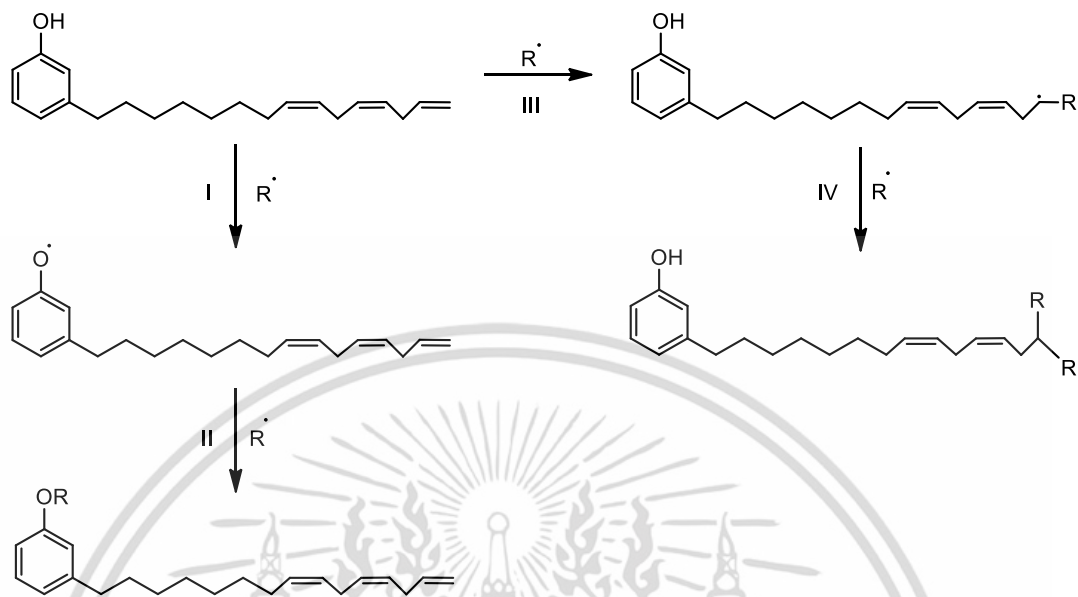
รูปที่ 4.27 ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มแรงของร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางเมื่อเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr

จากสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงข้างต้น พบว่า CNSL ตัดแปรสามารถทำหน้าที่เป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชัน กลไกป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจนของ DCNSL และ C ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.28 ซึ่งเป็นการลดการเกิดปฏิกิริยาลูกลูโซ (Autoxidation) โดยตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิล DCNSL และ C สามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของยาง (R) ดังปฏิกิริยาที่ I ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุมูลอิสระของ DCNSL และ C ซึ่งมีความเสถียรเนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์ ทำให้การขยายสายโซ่ของอนุมูลอิสระสิ้นสุดลง ส่งผลให้สมบัติหลังการบ่มแรงดีขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยของ Ohkatsu Y. และคณะ [59] พบว่าสารประกอบฟีนอลิกที่มีหมู่ allyl เป็นหมู่แทนที่ สามารถทำหน้าที่เป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของฟีนอลและหมู่ allyl สามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ (R) ได้ และจากงานวิจัยของ Rodrigues F.H.A. และคณะ [60] พบว่าคาร์ดานอลสามารถทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเกิดออกซิเดชันสำหรับยางไอโซพรีนได้ และมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ไฮโดรจิเนเตดคาร์ดานอล (Hydrogenated cardanol) เนื่องจากคาร์ดานอลมีหมู่ข้างเคียงเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว สามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นคาดว่าพันธะคู่ของหมู่ข้างเคียงของ DCNSL และ C สามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของยางได้เช่นกัน ดังปฏิกิริยาที่ III

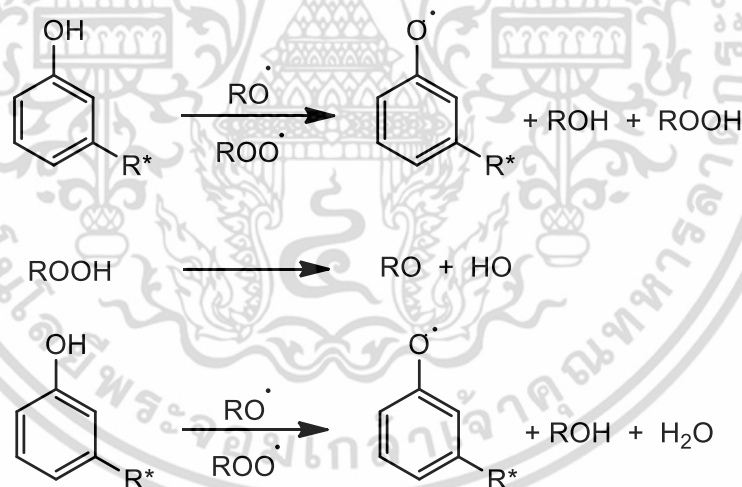
ส่วนการใช้ EC และ EDCNSL พบว่าสามารถช่วยปรับปรุงหลังการบ่มแรงได้ดีกว่าการใช้ DCNSL และ C เนื่องจากพันธะคู่ (C=C) บางส่วนถูกแทนที่ด้วยหมู่เอพอกซี ทำให้ความว่องไวในการเสื่อมสภาพลดลง กลไกการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันคล้ายกับ DCNSL และ C จากงานวิจัยของ Liu Z. และคณะ [56] พบว่าคาร์ดานอลเอพอกไซด์ (Epoxidized Cardanol, ECD) สามารถต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืชและไบโอดีเซลได้ และมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ Butylated hydroxytoluene (BHT) ซึ่งเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันกลุ่มฟีนอลิกที่นิยมใช้เชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาซีล เมื่อใช้ ECD ปริมาณมากขึ้นยิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการต้านการเสื่อมสภาพเพิ่มสูงขึ้น กลไกป้องกันการเกิดออกซิเดชันของ ECD แสดงดังรูปที่ 4.29



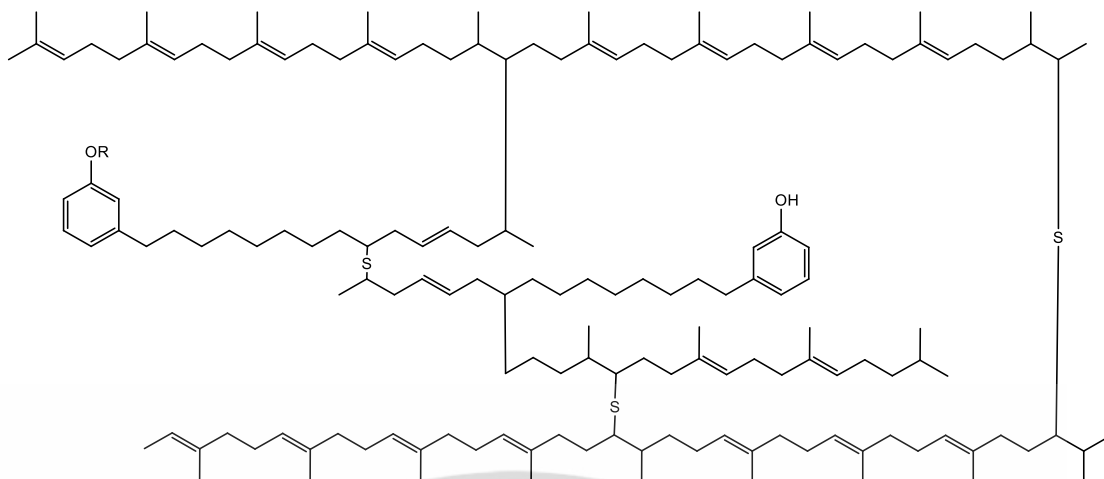
รูปที่ 4.28 กลไกป้องกันการเกิดออกซิเดชันของ DCNSL และ C ที่คาดว่าเกิดขึ้น



รูปที่ 4.29 กลไกป้องกันการเกิดออกซิเดชันของ ECD [56]

จากผลการทดสอบข้างต้น พบว่ายังสามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน และการใช้น้ำมัน CNSL ดัดแปรสามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยางกับน้ำมัน และระหว่างโมเลกุลน้ำมันด้วยกันเอง นอกจากนี้ CNSL ดัดแปรยังสามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น ช่วยยับยั้งการขยายสายโซ่ของอนุมูลอิสระ ส่งผลให้ CNSL ดัดแปรช่วยปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มแรงได้ โดยแบบจำลองดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แบบจำลองการทำหน้าที่เป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันของ CNSL ดัดแปรในโมเลกุลของยางที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

ความต้านทานการขจัด uly รายงานด้วยค่าปริมาตรของยางที่สูญเสียหลังการขจัด 1000 รอบ จากตารางที่ 4.8 พบว่าการใช้ AO, C และ EC ปริมาณ 5 phr มีปริมาตรของยางที่สูญเสียน้อยและมีค่าไม่แตกต่างกัน นั่นคือยางสามารถต้านทานการขจัดได้ดี เนื่องจากการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมซึ่งสามารถเสริมแรงได้ มีความแข็ง และสามารถต้านทานการขจัดได้ดี นอกจากนี้การใช้ AO, C และ EC ทำให้อนุภาคซิลิกากระจายตัวในยางได้ดี ไม่เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนแอ็กโกลเมอเรต ยืนยันด้วยผลการศึกษาระยะการกระจายตัวของซิลิกาด้วยเทคนิค SEM

ตารางที่ 4.8 ปริมาตรของยางที่สูญเสียเมื่อใช้น้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 phr

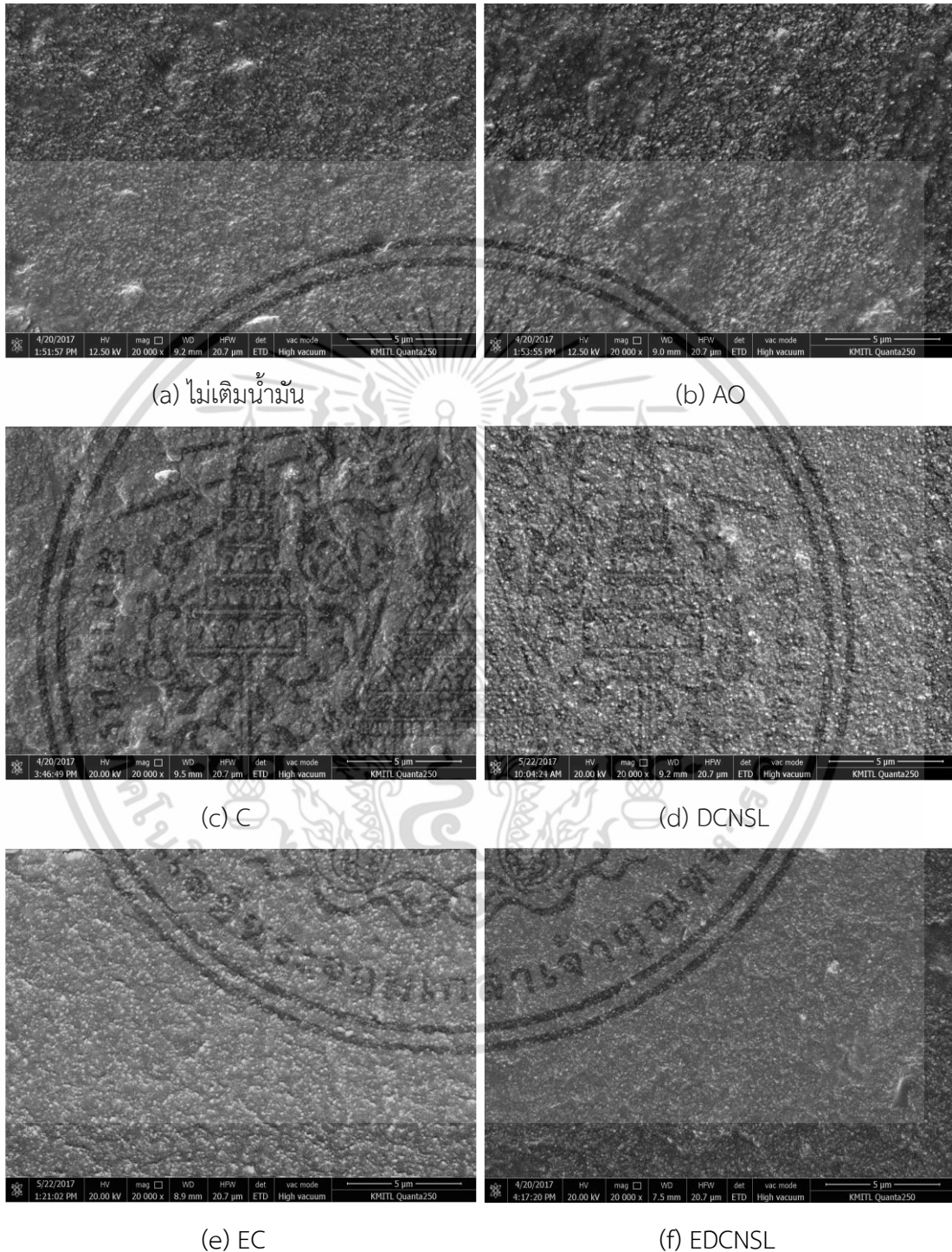
ชนิดน้ำมัน	ปริมาตรของยางที่สูญเสีย (cm ³ /1000 รอบ)
AO	0.37
C	0.38
EC	0.36

4.2.8 สันฐานวิทยา

สันฐานวิทยาจากเทคนิค SEM แสดงภาคตัดขวางของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 และ 10 phr เพื่อศึกษาผลของการเติมน้ำมัน ชนิดน้ำมัน และปริมาณน้ำมันต่อการกระจายตัวของซิลิกาในยาง แสดงดังรูปที่ 4.31-4.32 พบว่าสันฐานวิทยาของยางที่ไม่เติมน้ำมันซิลิกากระจายตัวไม่ดีและไม่สม่ำเสมอ บางบริเวณมีกลุ่มก้อนของซิลิกาขนาดประมาณ 1-2 ไมครอน เมื่อเติมน้ำมัน โมเลกุลน้ำมันสามารถแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้ยางนิ่มลง ไหลได้ง่ายขึ้น ทำให้ซิลิกากระจายตัวได้ดี แต่ยังคงมีกลุ่มก้อนซิลิกาบางบริเวณ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันเป็น 10 phr พบว่าซิลิกากระจายตัวได้สม่ำเสมอขึ้นและไม่ปรากฏการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของซิลิกา อย่างไรก็ตามการรวมตัวของซิลิกาที่พบในยางที่ไม่เติมน้ำมันและยางที่เติมน้ำมันปริมาณ 5 phr มีขนาดเล็กมาก จึงไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของยาง โดยชนิดของน้ำมันส่งผลต่อการกระจายตัวของซิลิกา AO เป็นน้ำมันที่เข้ากับยาง NR ได้ดี ส่งผลให้ซิลิกากระจายตัวได้ดี ในขณะที่ CNSL ดัดแปร เป็นน้ำมันที่มีขั้วมากขึ้น

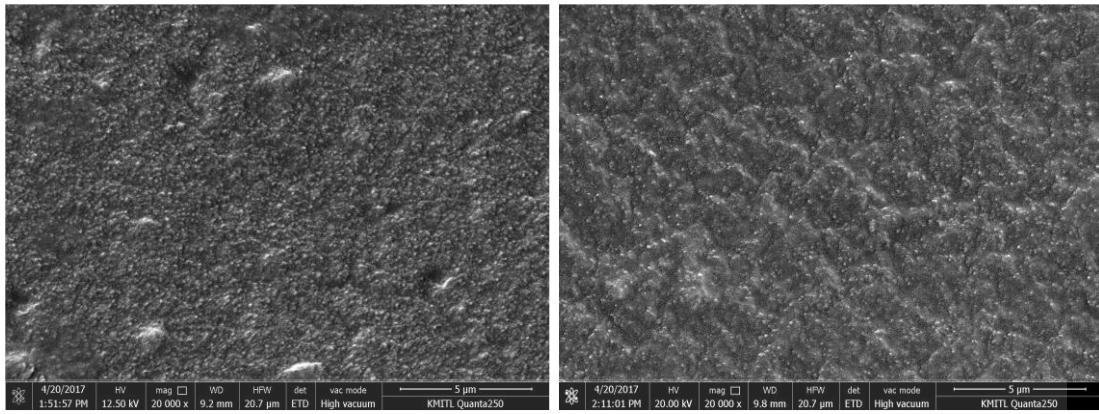
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโครงสร้างในส่วนที่เป็นฟินอลและวงอ็อกไซด์ ทำให้อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซิลิกาตกลง นอกจากนี้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล อนุภาคซิลิกา และหมู่ฟอสเฟตได้ ทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ดี



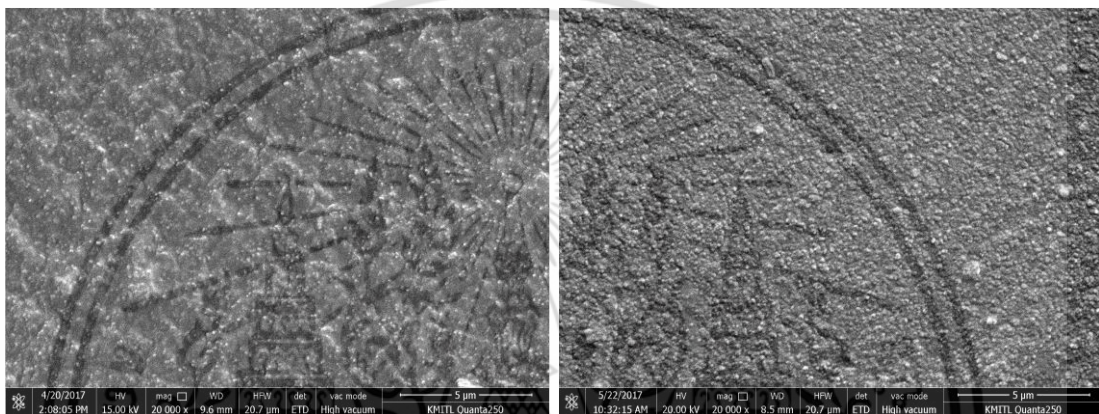
รูปที่ 4.31 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 5 phr ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



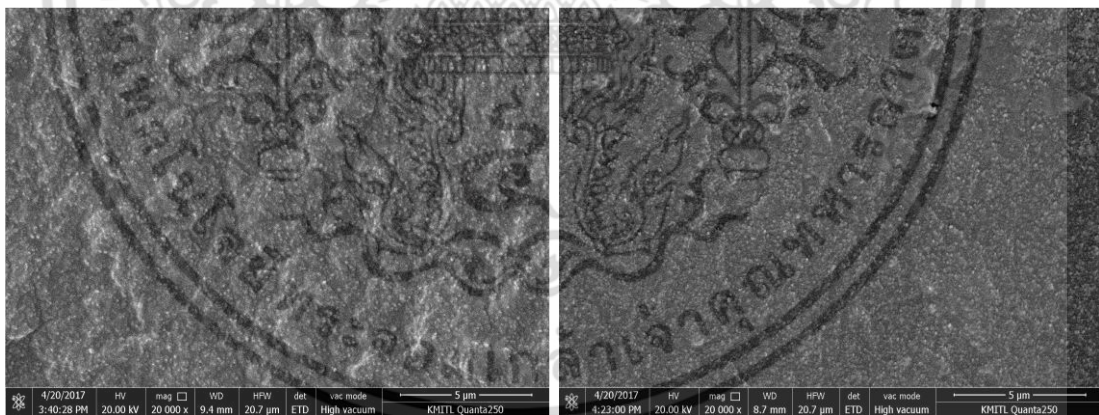
(a) ไม่เติมน้ำมัน

(b) AO



(c) C

(d) DCNSL



(e) EC

(f) EDCNSL

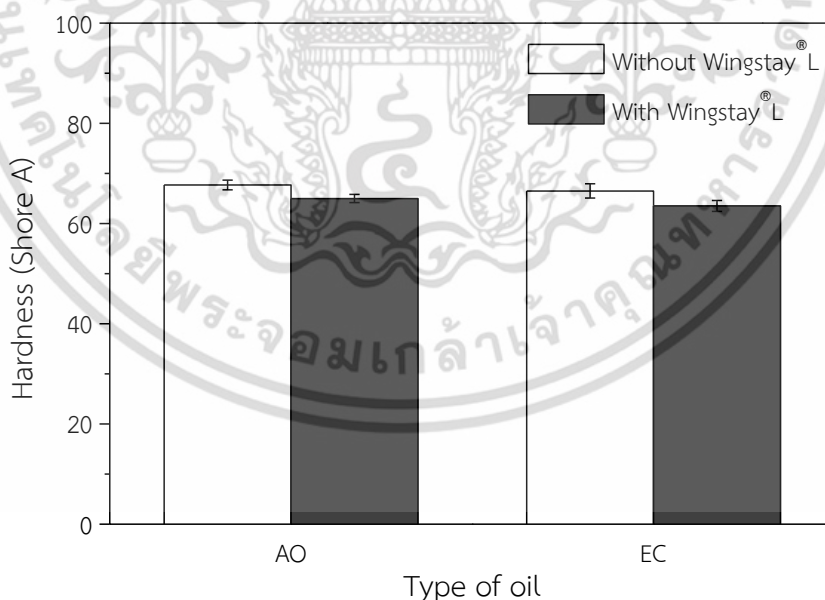
รูปที่ 4.32 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางเมื่อไม่เติมน้ำมันและเติมน้ำมันชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10 phr ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

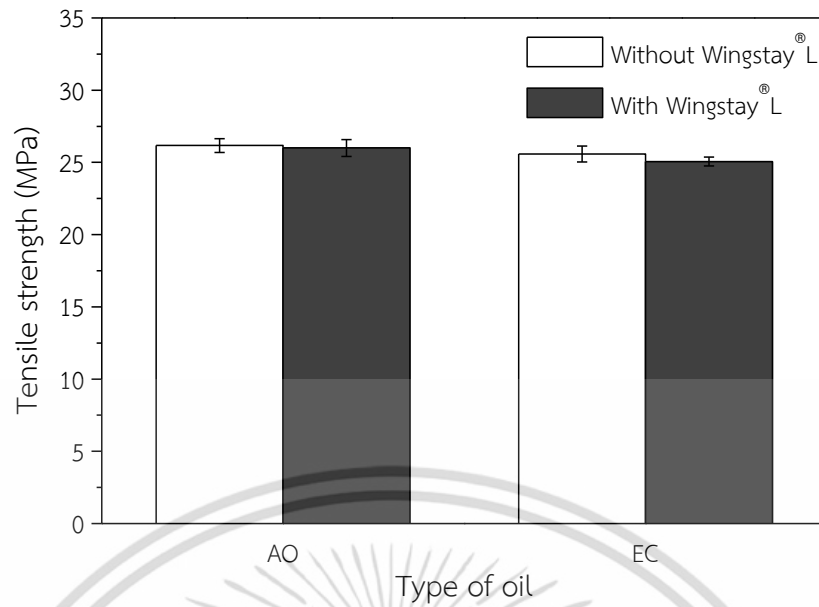
4.3 ประสิทธิภาพของ CNSL ดัดแปรในการต้านการเกิดออกซิเดชัน

จากผลข้างต้นพบว่า CNSL ดัดแปรสามารถปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนได้ และจากงานวิจัยของ Liu Z. และคณะ [56] พบว่าคาร์ดานอลอีพอกซีไดซ์ (ECD) สามารถต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืชและไบโอดีเซลได้ และมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ BHT ซึ่งเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันกลุ่มฟีนอลิกที่นิยมใช้เชิงพาณิชย์ ในตอนนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของ CNSL ดัดแปรในการทำหน้าที่เป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันเปรียบเทียบกับการใช้ Wingstay® L (Butylated reaction product of p-cresol and dicyclopentadiene) ซึ่งเป็นสารต้านการออกซิเดชันกลุ่มฟีนอลิกเชิงพาณิชย์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยาง โดยเลือกใช้น้ำมัน 2 ชนิด คือ AO เนื่องจากเป็นน้ำมันที่นิยมใช้กับยางธรรมชาติ และ EC ซึ่งเป็นน้ำมัน CNSL ดัดแปรที่ปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มเร่งได้ดีที่สุด จากผลทดสอบข้างต้นพบว่ายางที่เติม EC ปริมาณ 10 phr สามารถปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มเร่งได้ดีที่สุด แต่ทำให้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงต่ำ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลก่อนการบ่มเร่งต่ำ จึงเลือกใช้น้ำมันที่ปริมาณ 5 phr

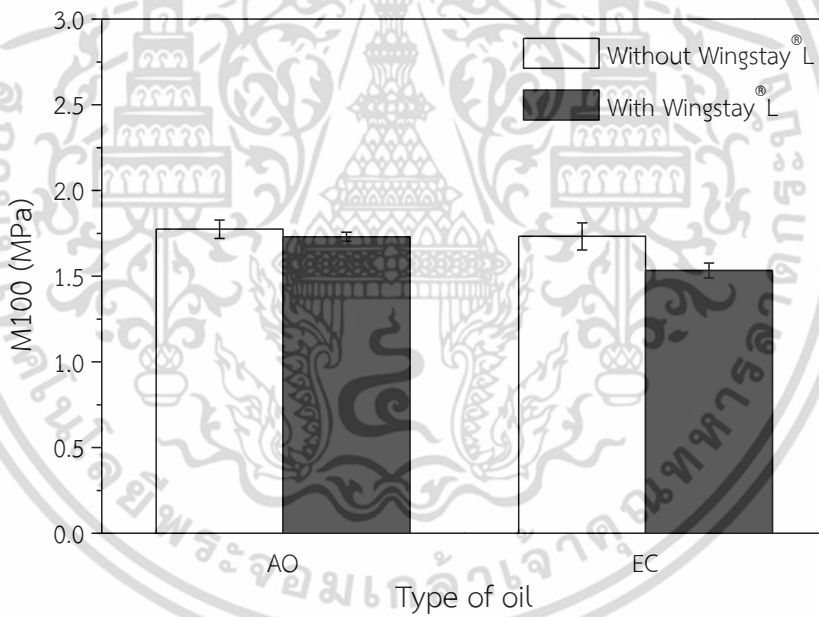
ค่าความแข็งกด ความแข็งแรงดึง มอดุลัสของยางที่ 100% และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L ก่อนการบ่มเร่ง แสดงดังรูปที่ 4.33-4.36 พบว่ายางที่เติม AO, AOW, EC และ ECW มีความแข็งกด ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสที่ 100% ใกล้เคียงกัน ในขณะที่การใช้ AOW และ ECW ทำให้ยางมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่าการใช้ AO และ EC อาจเนื่องจาก Wingstay® L ช่วยลดการขาดของสายโซ่โมเลกุลยางในระหว่างการบดย่อยยาง ซึ่งกระบวนการดังกล่าวยางได้รับแรงเฉือนและความร้อนจากแรงเฉือน ทำให้ยางเสื่อมสภาพเกิดเป็นอนุมูลอิสระได้



รูปที่ 4.33 ความแข็งกดของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L

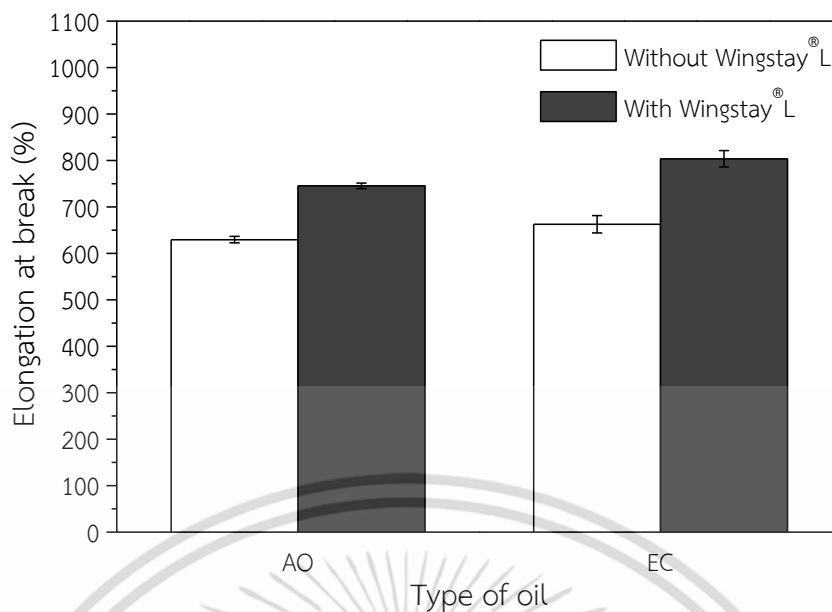


รูปที่ 4.34 ความแข็งแรงดึงของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay[®] L



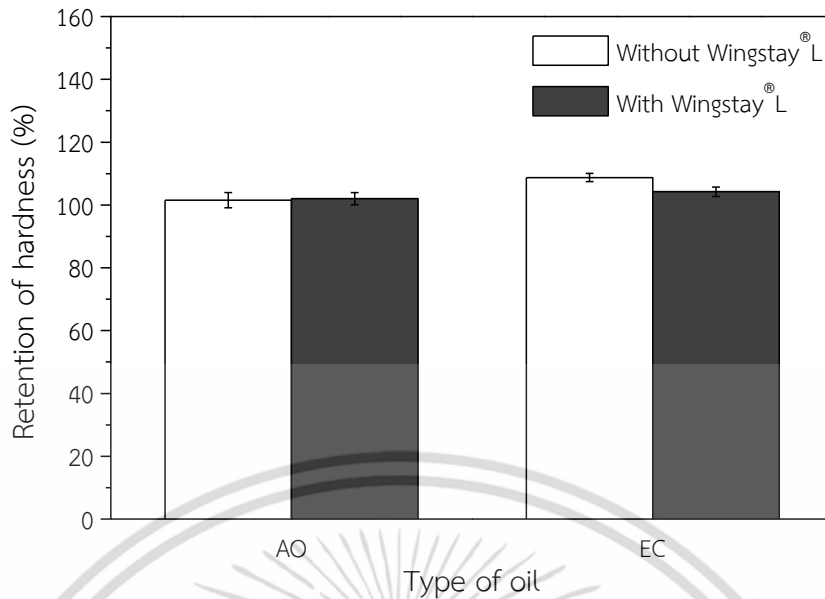
รูปที่ 4.35 โมดูลัสที่ 100% ของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay[®] L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L

ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มเร่งของค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัสที่ 100% และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L แสดงดังรูปที่ 4.37-4.40 พบว่า EC และ Wingstay® L สามารถปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มเร่งของยางได้ โดยยางที่เติม EC มีค่าคงเหลือหลังการบ่มเร่งของความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกับยางที่เติม AOW อย่างไรก็ตาม EC ยังคงมีพันธะคู่ที่หมู่ข้างเคียงหลงเหลืออยู่ ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางและน้ำมัน ส่งผลให้ความสามารถในการยืดตัวลดลง ทำให้ค่าคงเหลือหลังการบ่มเร่งของมอดูลัสที่ 100% เพิ่มขึ้นและค่าคงเหลือหลังการบ่มเร่งของร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่เติม AOW ส่วนยางที่เติม ECW มีสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งดีกว่ายางที่เติม AOW และ EC ทั้งนี้เนื่องจาก Wingstay® L และ EC ต่างสามารถปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มเร่งได้ โดยยางที่เติม ECW มีค่าคงเหลือหลังการบ่มเร่งของมอดูลัสที่ 100% สูงกว่าและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำกว่ายางที่เติม AOW เนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางและน้ำมัน

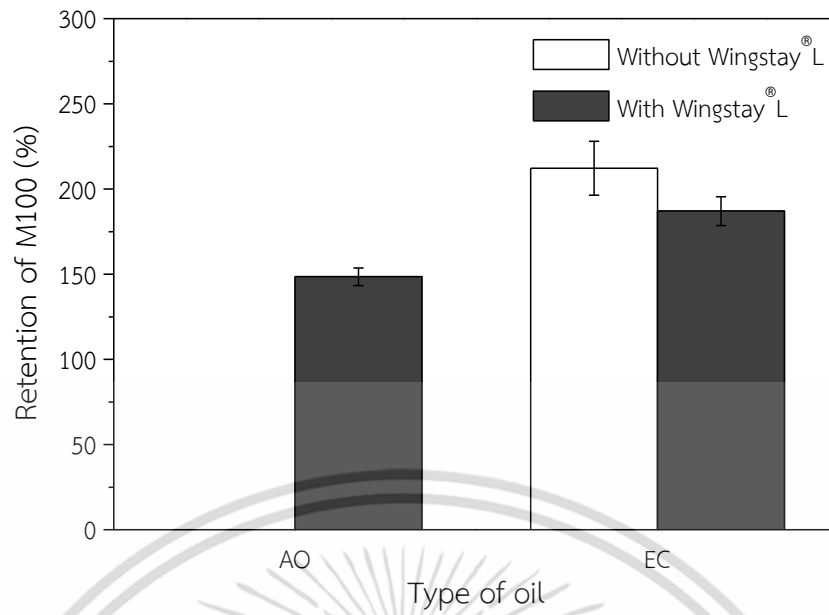


รูปที่ 4.37 ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มเร่งของความแข็งกดของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay[®] L

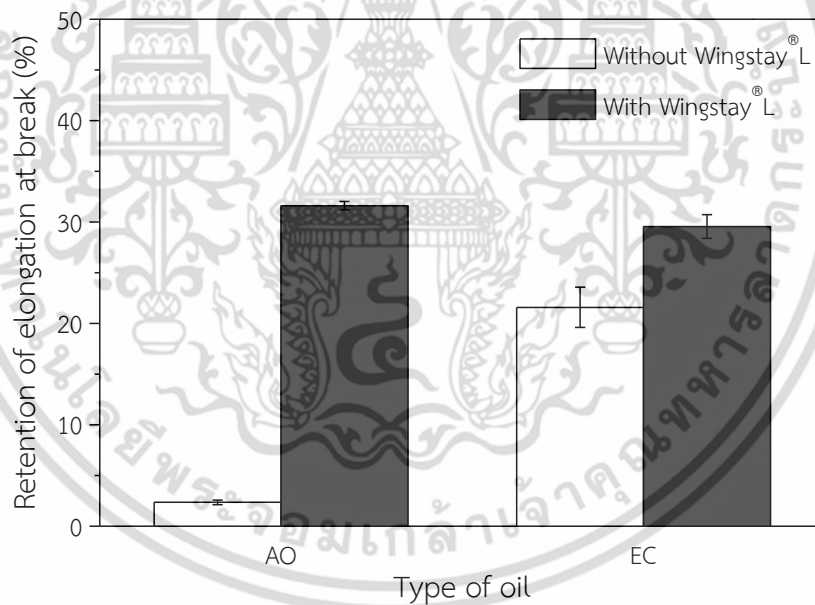


รูปที่ 4.38 ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มเร่งของความแข็งแรงดึงของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay[®] L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มแรงของมอดูลัสที่ 100% ของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L



รูปที่ 4.40 ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มแรงของร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางเมื่อเติมและไม่เติม Wingstay® L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ต้นทุนการผลิต

การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตยางเมื่อใช้น้ำมันเชิงพาณิชย์เปรียบเทียบกับ CNSL ดัดแปร เลือกใช้ AO และ DCNSL ตารางที่ 4.9 แสดงต้นทุนการผลิต DCNSL และตารางที่ 4.10 แสดงต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์ที่เติมน้ำมัน AO และ DCNSL ปริมาณ 5 phr พบว่าต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์ 1 กิโลกรัม เมื่อใช้ AO มีต้นทุนการผลิต 80.17 บาท มีราคาใกล้เคียงกับการใช้ DCNSL ที่มีต้นทุนการผลิต 80.31 บาท ดังนั้นสามารถใช้ DCNSL ทดแทนการใช้ AO ได้

ตารางที่ 4.9 ต้นทุนการผลิต DCNSL

สารเคมี	ราคา	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	คิดเป็นเงิน (บาท)
CNSL (บาท/กิโลกรัม)	20	400	8
แก๊สไนโตรเจน (บาท/ลบ.ม.)	400	N/A	2
รวมราคาค่าต้นทุนวัตถุดิบ (บาท/กิโลกรัม)			25

ตารางที่ 4.10 ต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางเมื่อใช้น้ำมัน AO และ DCNSL

สารเคมี	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	สูตรที่ใช้ AO		สูตรที่ใช้ DCNSL	
		ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	คิดเป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	คิดเป็นเงิน (บาท)
NR	57	579.71	33.04	579.71	33.04
Si	80	289.86	23.19	289.86	23.19
PEG 4000	79	17.39	1.37	17.39	1.37
AO	20	28.99	0.58	-	-
DCNSL	25	-	-	28.99	0.72
Si-69®	735	26.09	19.18	26.09	19.18
ZnO	51	28.99	1.48	28.99	1.48
Stearic acid	38	11.59	0.44	11.59	0.44
CBS	132	4.64	0.61	4.64	0.61
TMTD	75	1.16	0.09	1.16	0.09
Sulfur	16	11.59	0.19	11.59	0.19
รวมต้นทุนวัตถุดิบ 1 กิโลกรัม		80.17		80.31	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) ดัดแปรเป็นสารเติมแต่งชีวภาพสำหรับยางธรรมชาติ โดยทำการดัดแปรโครงสร้าง CNSL ด้วยปฏิกิริยาต่าง ๆ จากนั้นนำ CNSL ดัดแปรที่เตรียมได้ใช้เป็นสารเติมแต่งชีวภาพในยาง ศึกษาชนิด CNSL ดัดแปรและปริมาณน้ำมันดัดแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของยาง เปรียบเทียบกับยางที่เติมน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินซึ่งเป็นน้ำมันที่ใช้เชิงพาณิชย์ และศึกษาประสิทธิภาพในการต้านการเกิดออกซิเดชันของ CNSL ดัดแปรเปรียบเทียบกับสารต้านการเกิดออกซิเดชันเชิงพาณิชย์ ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. การดัดแปรโครงสร้าง CNSL

การดัดแปรโครงสร้าง CNSL ด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 160°C เวลา 30 นาที ได้ DCNSL ที่มีปริมาณคาร์บอนอลสูงสุดและมีสมบัติต่าง ๆ ใกล้เคียงกับคาร์บอนอลบริสุทธิ์ (C) มาก เช่น เอกลักษณ์ของโครงสร้าง ค่าไอโอดีน ค่ากรด ค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าความหนืด เป็นต้น เมื่อทำการดัดแปรคาร์บอนอลและ DCNSL ด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน พบว่า EC และ EDCNSL ที่เตรียมได้มีค่าไอโอดีนแตกต่างกัน แสดงถึงประสิทธิภาพในการเกิดหมู่อีพอกซิแตกต่างกัน โดย EDCNSL เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันได้ดีกว่า เนื่องจากการปนเปื้อนของเหล็กและสังกะสีในระหว่าง การสกัด CNSL ซึ่งช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันได้ นอกจากนี้ EC และ EDCNSL ที่เตรียมได้ ยังเกิดการสลายตัวของหมู่อีพอกซิ ทำให้มีปริมาณหมู่อีพอกซิต่ำ โดยเฉพาะ EDCNSL ที่เกิดการสลายตัวในระหว่างขั้นตอนการระเหยตัวทำละลาย

2. การใช้งาน CNSL ดัดแปรเป็นสารเติมแต่งสำหรับยางธรรมชาติ

CNSL ไม่สามารถใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับยางได้ เนื่องจากเป็นน้ำมันที่มีความเป็นกรดสูง ทำให้หน่วยปฏิกิริยาเชื่อมโยง ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงต่ำ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง ส่วน CNSL ดัดแปรสามารถใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นและสารต้านการเกิดออกซิเดชัน สรุปได้ดังนี้

- การใช้งานเป็นน้ำมันหล่อลื่น

CNSL ดัดแปรชนิดต่าง ๆ สามารถใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นหรือน้ำมันยางสำหรับยางธรรมชาติได้ เนื่องจากช่วยลดพลังงานในระหว่างการผสม ทำให้ยางมีความหนืดลดลง โดยทำให้ยางมีค่าแรงบิดที่ใช้ในการผสมและค่าความหนืดมูนนี่ใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันอะโรมาติก ไม่เกิดการแพร่ ออกของน้ำมัน รวมทั้งไม่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง (t_{s2} , t_{c90}) ของยาง อย่างไรก็ตามยางที่เติม CNSL ดัดแปรทำให้มีค่าการบวมตัวสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่เติม AO และ WO โดยที่การใช้ CNSL ดัดแปรปริมาณ 5 phr ไม่ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลต่างจากการใช้น้ำมันชนิดอื่น ในขณะที่การใช้ ปริมาณ 10 phr ทำให้สมบัติการรับแรงดึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการก่อกำมะถันบางส่วนถูกใช้ ในการเชื่อมโยงระหว่างพันธะคู่ของหมู่ข้างเคียงของน้ำมันกับโมเลกุลของยาง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง ทั้งนี้ DCNSL สามารถใช้ทดแทน AO ได้ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การใช้งานเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชัน

CNSL ดัดแปรชนิดต่าง ๆ สามารถปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มเร่งได้ เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นสารประกอบฟีนอลิกสามารถทำหน้าที่เป็นตัวจับอนุมูลอิสระได้ โดยอย่างที่เดิม EC และ EDCNSL มีสมบัติหลังการบ่มเร่งดีกว่าอย่างที่เดิม C และ DCNSL เนื่องจากพันธะไม่อิ่มตัวของหมู่ข้างเคียงบางส่วนถูกแทนที่ด้วยหมู่เอพอกซี ทำให้การเสื่อมสภาพลดลง โดยการใช้ EC ช่วยปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มเร่งได้ดีกว่า EDCNSL และการใช้ปริมาณ 10 phr ช่วยปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มเร่งดีกว่าการใช้ปริมาณ 5 phr

3. ประสิทธิภาพของ CNSL ดัดแปรในการต้านการเกิดออกซิเดชัน

อย่างที่เดิม EC มีค่าคงเหลือหลังการบ่มเร่งของความแข็งแรงดิ่งใกล้เคียงกับอย่างที่เดิม AO และ Wingstay® L อย่างไรก็ตามอย่างที่เดิม EC สามารถเกิดการเชื่อมโยงบริเวณพันธะไม่อิ่มตัวของน้ำมันได้ ทำให้ยังมีความสามารถในการยึดตัวลดลง ส่งผลให้มีค่าคงเหลือหลังการบ่มเร่งของมอดูลัสที่ 100% สูงกว่าและค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดต่ำกว่าอย่างที่เดิม AO และ Wingstay® L ส่วนอย่างที่เดิมทั้ง EC และ Wingstay® L สามารถปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มเร่งได้ดีที่สุด

จากผลการวิจัย CNSL ดัดแปรสามารถใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นสำหรับยางธรรมชาติและสามารถใช้ทดแทนน้ำมันอะโรมาติกได้ ส่วนการใช้งานเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชัน พบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติหลังการบ่มเร่งของยางได้ แต่ประสิทธิภาพไม่ดีเทียบเท่าสารต้านออกซิเดชันที่ใช้เชิงพาณิชย์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสมบัติหลังการบ่มเร่งของอย่างที่เดิม EC เปรียบเทียบกับอย่างที่เดิม Wingstay® L (ไม่มีการเติมน้ำมัน) เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันอย่างชัดเจน
2. ควรทดสอบหาปริมาณหมู่เอพอกซีที่เกิดขึ้นหรือวิเคราะห์โครงสร้างที่แน่นอนของน้ำมัน EC และ EDCNSL ที่เตรียมได้ จากการทดลองทดสอบด้วยค่าไอโอดีนซึ่งไม่เพียงพอต่อการยืนยันปริมาณหมู่เอพอกซีที่เกิดขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเปิดวงของหมู่เอพอกซี
3. ในการดัดแปร CNSL ด้วยปฏิกิริยาเอพอกซิเดชัน ควรทำการทดลองขนาดเล็ก เนื่องจากน้ำมันเอพอกซีได้ที่เตรียมได้ มีหมู่เอพอกซีเกิดขึ้นต่ำ ปริมาณพันธะคู่เหลืออยู่มาก (ค่าไอโอดีนสูง) จากงานวิจัยอื่นพบว่าทำการทดลองโดยใช้น้ำมันตัวอย่างน้อยกว่า 20 กรัม ทำให้การเกิดปฏิกิริยามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
4. ศึกษาการเตรียม EC ที่ได้จากสารมาตรฐานคาร์ดานอลและคาร์ดานอลจาก DCNSL รวมทั้งประสิทธิภาพในการต้านการเกิดออกซิเดชัน
5. ศึกษาผลของชนิดยาง เช่น ยางไนไตรล์ (NBR) ยางคลอโรพรีน (CR) เป็นต้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ CNSL ดัดแปรเป็นน้ำมันหล่อลื่นและสารต้านการเกิดออกซิเดชันสำหรับยางที่มีขี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2558. การผลิตยางธรรมชาติของประเทศต่างๆ. [Online]. Available : http://www.rubberthai.com/statistic/stat_index.htm
- [2] สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2558. ปริมาณการใช้ยางธรรมชาติในประเทศแยกตามประเภทผลิตภัณฑ์. [Online]. Available : http://www.rubberthai.com/statistic/stat_index.htm
- [3] MTEC. 2553. สารระงับวัฏวิทยาศาสตร์ในผลิตภัณฑ์ : ยางประหยัดน้ำมัน. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-05-29-09-39-49/80->
- [4] LANXESS. 2555. นวัตกรรม “ยางรถยนต์สีเขียว Green Tires” กับอุตสาหกรรมยานยนต์ไทย. [Online]. Available : <https://ttmemedia.wordpress.com/2012/03/09/>
- [5] Blackcircles. 2015. Guide to EU Tyre Labelling. [Online]. Available : <http://www.blackcircles.com/general/tyre-labelling/tyre-label>
- [6] Continental. 2013. Continental focuses on green tyres. [Online]. Available : <https://www.tyresdublin.ie/articles/continental-focuses-green-tyres>
- [7] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2557. ตลาดผลิตภัณฑ์ยางโลกปัจจุบัน การเปลี่ยนแปลง และความจำเป็นในการปรับตัว. [Online]. Available : https://www.nstda.or.th/nac2014/download/presentation/CO-113-02/2_K_Chayapong.pdf
- [8] ปลูกษตร. 2555. มะม่วงหิมพานต์ สรรพคุณ และการปลูกมะม่วงหิมพานต์. [Online]. Available : <http://puechkaset.com/fruit/>
- [9] Energy Saving. 2555. เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์...พลังงาน+เทคโนโลยี. [Online]. Available : <http://www.energysavingmedia.com/news/page.php?a=10&n=106&cno=2870>
- [10] กัทธิยา เอื้อสว่างพร. 2558. “การใช้น้ำมันพืชและน้ำมันพืชตัดแปรเป็นสารเติมแต่งชีวภาพสำหรับยางธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [11] จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์. 2552. ความรู้ใหม่เกี่ยวกับยางธรรมชาติ จากโครงสร้างโมเลกุลถึงการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : เทคโนโลยี คอมมิวนิเคชันส์.
- [12] พงษ์ธร แซ่อู่. 2558. ชนิดของยางและการใช้งาน. [Online]. Available : <http://www.rubbercenter.org/files/technologys.pdf>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2548. **สารเคมียาง**. ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [14] Wijk J.V., Deventer N.V., Harmzen E., Meuldijk J. and Klumperman B. 2014. "Formation of Hybrid Poly (Styrene-co-Maleic Anhydride) Silica Microcapsules." *Journal of Materials Chemistry B*. 2 : 4826-4835.
- [15] George W. 2004. **Handbook of plasticizers**. Toronto : Transcontinental Printing Inc.
- [16] อรุษา สรวารี. 2546. **สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1**. กรุงเทพฯ ฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] Gächter R and Müller H. 1990. **Plastics Additives Handbook**. New York : Hanser Publishers.
- [18] วีระพงษ์เม็ตมะม่วงหิมพานต์. 2558. **ข้อมูลเกี่ยวกับมะม่วงหิมพานต์**. [Online]. Available : http://www.cashewthai.com/?name=a_momente
- [19] ชาคริต ทองอุไร, สุธรรม สุขมณี และสรวิศ จิตรบรรเจิดกุล. 2541. **การสกัดน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยตัวทำละลาย**. [Online]. Available : <http://kb.psu.ac.th/psukb/handle/2553/5174>
- [20] Kompas. 2015. **Cashew Nut Shell Liquid (CNSL)**. [Online]. Available : <http://in.kompass.com/p/cashew-nut-shell-liquid-cnsl/5afc04f3-c74b-461e-aeb4-c1fab57bb37f/>
- [21] Tyman J.H.P. and Bruce I.E. 2003. "Synthesis and Characterization of Polyethoxylate Surfactants Derived from Phenolic Lipids." *Journal of Surfactants and Detergents*. 6(4) : 291-297.
- [22] มโน ลีมวรพันธุ์. 2543. "ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาการเชื่อมสภาพของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [23] Tyman J.H.P. 1979. "Non-Isoprenoid Long Chain Phenols." *Chemical Society Reviews*. 8(4) : 499-537.
- [24] Harvey M.T. and Caplan S. 1940. "Cashew Nut Shell Liquid." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 32(10) : 1306-1310.
- [25] Senesel. 2012. **CNSL**. [Online]. Available : http://www.senesel.pl/en/applications/cnsl_applications
- [26] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. 2558. **ปฏิกิริยาการดัดแปรโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์**. เอกสารประกอบการสอน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] Cooney T. 2009. “Epoxidised Resins from Natural Renewable Resources.” Bachelor of Engineering (Mechanical Engineering), University of Southern Queensland.
- [28] Cooney T.I., Cardona F. and Tran-Cong T. 2011. “Kinetics of in situ Epoxidation of Hemp Oil Under Heterogeneous Reaction Conditions: an Overview with Preliminary Results.” *In The 1st International Postgraduate Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing.* Queensland University of Technology, April 27-29, Brisbane, Australia. pp. 106-111.
- [29] พงษ์ธร แซ่ฮุ่ย และ ชาคริต สิริสิงห. 2550. **กระบวนการผลิตและทดสอบยาง.** ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [30] อิทธิพล แจ่มชัด. 2557. **เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีการยาง.** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [31] SpecialChem. 2017. **Antioxidants for Adhesives.** [Online]. Available : <http://adhesives.specialchem.com/selection-guide/antioxidants-for-adhesives/basics-on-degradation>
- [32] Nocil Limited. 2010. **Antioxidants & Antidegradants.** [Online]. Available : <http://www.nocil.com/Downloadfile/ETechnicalNote-Antioxidants-Dec2010.pdf>
- [33] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์.** กรุงเทพฯ : บุ๊คเน็ต.
- [34] เศรษฐกร พรหมศิริ. 2553. “การพัฒนาสารเติมแต่งไฮบริดสำหรับป้องกันการเสื่อมสภาพยางจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และปิโตรเลียมแวกซ์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [35] Menon A.R.R., Pillai C.K.S. and Nando G.B. 1999. “Cure Characteristics and Physicomechanical Properties of Natural Rubber Modified with Phosphorylated Cashew Nut Shell Liquid Prepolymer—A Comparison with Aromatic Oil.” *Journal of Applied Polymer Science.* 73(5) : 813–818.
- [36] Arayaprane 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(4) : 2696-2702.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] Greco A., Brunetti D., Renna G., Mele G. and Maffezzoli A. 2010. “Plasticizer for Poly(vinyl chloride) from Cardanol as a Renewable Resource Material.” *Polymer Degradation and Stability*. 95(11) : 2169-2174.
- [38] Goud V.V., Patwardhan A.V., Dinda S. and Pradhan N.C. 2007. “Kinetics of Epoxidation of Jatropha Oil with Peroxyacetic and Peroxyformic Acid Catalysed by Acidic Ion Exchange Resin.” *Chemical Engineering Science*. 62(15) : 4065–4076.
- [39] Mungroo R., Pradhan N.C., Goud V.V. and Dalai A.K. 2008. “Epoxidation of Canola Oil with Hydrogen Peroxide Catalyzed by Acidic Ion Exchange Resin.” *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 85(9) : 887–896.
- [40] Fiser S.S., Janković M. and Borota O. 2012. “Epoxidation of Castor Oil with Peracetic Acid formed in situ in the Presence of an Ion Exchange Resin.” *Chemical Engineering and Processing*. 62 : 106–113.
- [41] American Oil Chemists' Society. 1998. **Iodine Value of Fats and Oils, Cyclohexane Method : AOCS Cd 1b-87**. Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society. 5th ed.
- [42] International Organization for Standardization. 2009. **Animal and Vegetable Fats and Oils-Determination of Acid Value and Acidity : ISO 660**. 3rd ed.
- [43] American Standard for Testing and Materials. 1998. **Standard Test Method for Rubber Property—Vulcanization Using Rotorless Cure Meters : ASTM D5289**. Annual Book of ASTM Standards. 9 (09.01) : 810-815.
- [44] American Standard for Testing and Materials. 1998. **Standard Test Methods for Rubber—Viscosity, Stress Relaxation and Pre-Vulcanization Characteristics (Mooney Viscometer) : ASTM D1646**. Annual Book of ASTM Standards. 9 (09.01) : 314-323.
- [45] American Standard for Testing and Materials. 1998. **Standard Test Method for Rubber Property—Effect of Liquids : ASTM D471**. Annual Book of ASTM Standards. 9 (09.01) : 86-96.
- [46] International Organization for Standardization. 1988. **Plastics—Determination of Migration of Plasticizers : ISO 177**. 2nd ed.
- [47] American Standard for Testing and Materials. 1998. **Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness : ASTM D2240**. Annual Book of ASTM Standards. 9 (09.01) : 389-392.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [48] American Standard for Testing and Materials. 1998. **Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastics Elastomers—Tension : ASTM D412.** Annual Book of ASTM Standards. 9 (09.01) : 41-53.
- [49] American Standard for Testing and Materials. 1998. **Standard Test Method for Rubber—Deterioration in an Air Oven : ASTM D573.** Annual Book of ASTM Standards. 9 (09.01) : 108-112.
- [50] American Standard for Testing and Materials. 1998. **Standard Test Methods for Rubber Property—Compression Set : ASTM D395.** Annual Book of ASTM Standards. 9 (09.01) : 36-40.
- [51] Apple Rubber. 2014. **Investigating the Compression Set of Rubber Compounds.** [Online]. Available : <http://www.applerubber.com/hot-topics-for-engineers/investigating-the-compression-set-of-rubber-compounds/>
- [52] British Standards. 1988. **Physical Testing of Rubber. Determination of Abrasion Resistance : BS 903-A9.** Replaced By : BS ISO 4649:2002.
- [53] Qualitest. 2015. **Akron Abrasion Tester.** [Online]. Available : <http://www.worldoftest.com/akron-abrasion-tester>
- [54] Tychopoulos V. and Tyman J.H.P. 1990. “Long Chain Phenols-Thermal and Oxidation Deterioration of Phenolic Lipids from the Cashew (*Anacardium Occidentale*) Nut Shell.” *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 52(1) : 71-83.
- [55] Chuayjuljit S., Rattanametangkool P. and Potiyaraj P. 2007. “Preparation of Cardanol-Formaldehyde Resins from Cashew Nut Shell Liquid for the Reinforcement of Natural Rubber.” *Journal of Applied Polymer Science.* 104(3) : 1997-2002.
- [56] Liu Z., Chen J., Knothe G., Nie X. and Jiang J. 2016. “Synthesis of Epoxidized Cardanol and Its Antioxidative Properties for Vegetable Oils and Biodiesel.” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering.* 4(3) : 901-906.
- [57] Akinhanmi T.F., Atasi V.N. and Akintokun P.O. 2008. “Chemical Composition and Physicochemical Properties of Cashew Nut (*Anacardium Occidentale*) Oil and Cashew Nut Shell Liquid.” *Journal of Agricultural, Food and Environmental Sciences.* 2(1) : 1-10.
- [58] Rodrigues F.H.A., Souza J.R.R., França F.C.F., Ricardo N.M.P.S. and Feitosa J.P.A. 2006. “Thermal Oligomerisation of Cardanol.” *e-Polymers.* 6 : 1027-1040.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [59] Ohkatsu Y., Matsuura T. and Yamato M. 2003. "A Phenolic Antioxidant Trapping Both Alkyl and Peroxy Radicals." *Polymer Degradation and Stability*. 81(1) : 151-156.
- [60] Rodrigues F.H.A., Feitosa J.P.A., Ricardo N.M.P.S., França F.C.F. and Carioca J.O.B. 2006. "Antioxidant Activity of Cashew Nut Shell Liquid (CNSL) Derivatives on the Thermal Oxidation of Synthetic Cis-1,4-Polyisoprene." *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 17(2) : 265-271.
- [61] ดารณี เจริญสุข. 2552. "น้ำมันทดแทนน้ำมันที่มีสาร PAHs สูง." *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ยาง*. 3(2) : 30.
- [62] John Burke. 1984. **Solubility Parameters: Theory and Application**. [Online]. Available : <http://cool.conservation-us.org/byauth/burke/solpar/solpar2.html>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การหาปริมาณคาร์บอนอลใน CNSL และ DCNSL ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

เตรียมสารละลายมาตรฐานคาร์บอนอล โดยชั่งคาร์บอนอลประมาณ 1 กรัม ละลายในเฮกเซน และปรับปริมาตรเป็น 100 cm³

ชั่งคาร์บอนอล 1.0141 g ปรับปริมาตรเป็น 100 cm³

$$\text{สารละลายคาร์บอนอลมีความเข้มข้น } \frac{1.0141 \text{ g}}{100 \text{ cm}^3} = 10.141 \text{ mg/cm}^3$$

จากนั้นเจือจางให้ได้สารละลายเข้มข้น 0.1, 0.5 และ 1 mg/cm³

- ความเข้มข้น 0.1 mg/cm³

สารละลายคาร์บอนอลความเข้มข้น 10.141 mg/cm³ ปริมาตร 1 cm³ เจือจางด้วยเฮกเซน 100 cm³ จะมีความเข้มข้น $\frac{10.141 \text{ mg} \times 1 \text{ cm}^3}{\text{cm}^3 \times 100 \text{ cm}^3} = 0.1014 \text{ mg/cm}^3$

- ความเข้มข้น 0.5 mg/cm³

สารละลายคาร์บอนอลความเข้มข้น 10.141 mg/cm³ ปริมาตร 5 cm³ เจือจางด้วยเฮกเซน 100 cm³ จะมีความเข้มข้น $\frac{10.141 \text{ mg} \times 5 \text{ cm}^3}{\text{cm}^3 \times 100 \text{ cm}^3} = 0.5071 \text{ mg/cm}^3$

- ความเข้มข้น 1 mg/cm³

สารละลายคาร์บอนอลความเข้มข้น 10.141 mg/cm³ ปริมาตร 10 cm³ เจือจางด้วยเฮกเซน 100 cm³ จะมีความเข้มข้น $\frac{10.141 \text{ mg} \times 10 \text{ cm}^3}{\text{cm}^3 \times 100 \text{ cm}^3} = 1.0141 \text{ mg/cm}^3$

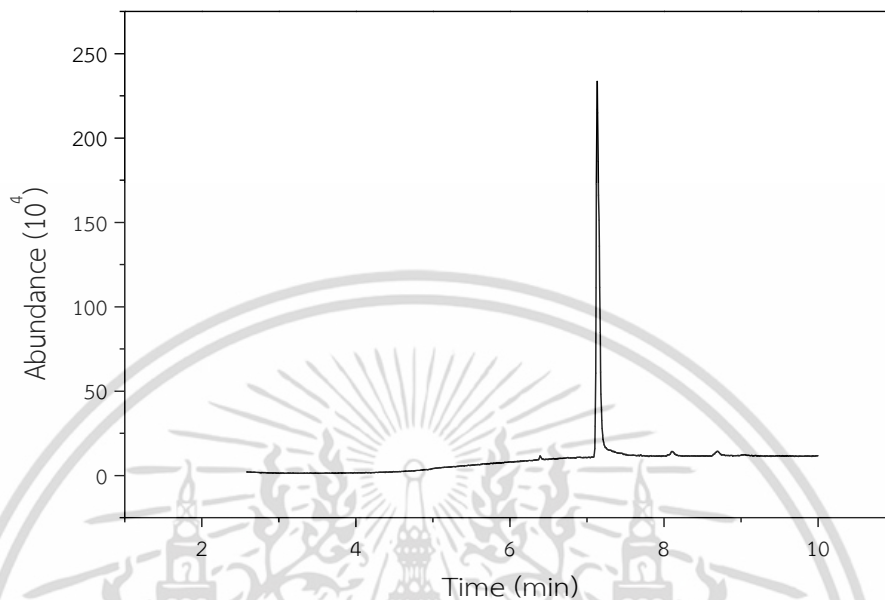
เตรียมสารละลายน้ำมันตัวอย่าง ได้แก่ CNSL และ DCNSL ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสภาวะต่าง ๆ โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 0.02 กรัม ละลายในเฮกเซนและปรับปริมาตรเป็น 100 cm³ ดังตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 ความเข้มข้นของน้ำมันตัวอย่างที่เตรียมได้

ชนิดน้ำมัน	น้ำหนักที่ชั่งมา (g)	ความเข้มข้น (mg/cm ³)
CNSL	0.0211	0.211
DCNSL1	0.0228	0.228
DCNSL2	0.0257	0.257
DCNSL3	0.0261	0.261
DCNSL4	0.0218	0.218

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์สารมาตรฐานคาร์ดานอลและน้ำมันตัวอย่างด้วยเทคนิค GC-MS ได้โครมาโทแกรม ดังรูปที่ ก-1 โดยมีพีคเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 7.1 นาที พื้นที่ใต้พีคของสารมาตรฐานคาร์ดานอลความเข้มข้นต่าง ๆ และน้ำมันตัวอย่าง แสดงในตารางที่ ก-2



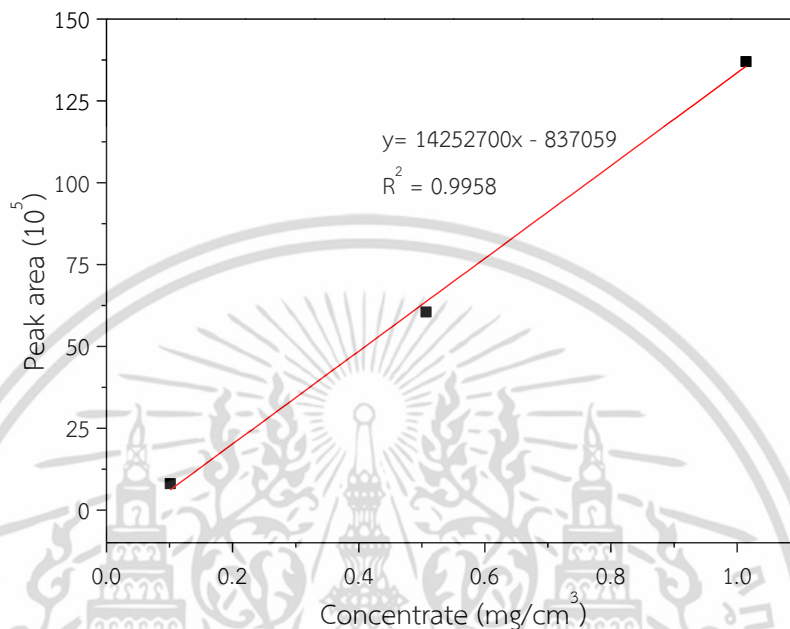
รูปที่ ก-1 โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานคาร์ดานอล 0.5 mg/cm³

ตารางที่ ก-2 พื้นที่ใต้พีคของสารมาตรฐานคาร์ดานอลความเข้มข้นต่าง ๆ และน้ำมันตัวอย่าง

ชนิดน้ำมัน	พื้นที่ใต้พีค	พื้นที่ใต้พีคเฉลี่ย
C (0.1014 mg/cm ³)	808,518	800,795
	793,073	
C (0.5071 mg/cm ³)	5,994,981	6,043,712
	6,092,444	
C (1.0141 mg/cm ³)	13,569,738	13,700,744
	13,971,751	
CNSL	512,934	504,960
	496,986	
DCNSL1 (140°C 30 min)	944,403	942,945
	941,488	
DCNSL2 (160°C 30 min)	4,597,159	4,578,060
	4,558,961	
DCNSL3 (140°C 60 min)	1,498,395	1,486,655
	1,474,916	
DCNSL4 (160°C 60 min)	1,067,467	1,059,870
	1,052,273	

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับพื้นที่ใต้พีคเฉลี่ยของสารมาตรฐานคาร์ดานอล ได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ ก-2 ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปริมาณคาร์ดานอลได้ หาความเข้มข้น (x) ของ CNSL และ DCNSL โดยการแทนค่าพื้นที่ใต้พีคเฉลี่ย (y) ลงในสมการที่ได้จากกราฟมาตรฐาน ผลการคำนวณปริมาณคาร์ดานอลในน้ำมันตัวอย่าง แสดงในตารางที่ ก-3



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานคาร์ดานอล

ตารางที่ ก-3 ปริมาณคาร์ดานอลในน้ำมันตัวอย่าง

ชนิดน้ำมัน	ปริมาณคาร์ดานอล (%)
CNSL	14
DCNSL1 (140°C 30 min)	22
DCNSL2 (160°C 30 min)	73
DCNSL3 (140°C 60 min)	27
DCNSL4 (160°C 60 min)	25

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณคาร์บอนอลใน CNSL

จากสมการ $y = 14,252,700x - 837,059$

$$\text{ความเข้มข้น CNSL (x)} = \frac{504,960 + 837,059}{14,252,700} = 0.0942 \text{ mg/cm}^3$$

สารละลาย CNSL 1 μL มีความเข้มข้น 0.0942 mg/cm^3

$$\begin{aligned} \text{สารละลาย CNSL 1 } \mu\text{L} \text{ มีคาร์บอนอล} &= \frac{0.0942 \text{ mg/cm}^3 \times 1 \mu\text{L} \times 1 \text{ cm}^3 \times 1 \text{ g}}{1 \mu\text{L} \times 1000 \mu\text{L} \times 1000 \text{ mg}} \\ &= 9.42 \times 10^{-8} \text{ g} \end{aligned}$$

ชั่ง CNSL มา 0.658 g ปรับปริมาตรเป็น 100 mL

$$\begin{aligned} \text{สารละลาย CNSL 100 mL มีคาร์บอนอล} &= \frac{9.42 \times 10^{-8} \text{ g} \times 100 \text{ mL} \times 1000 \mu\text{L}}{1 \mu\text{L} \times 1 \text{ mL}} \\ &= 0.0942 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น CNSL มีปริมาณคาร์บอนอล} \frac{0.0942 \text{ g} \times 100}{0.658 \text{ g}} = 14\%$$

ภาคผนวก ข

การทดสอบสมบัติของยาง

ตารางที่ ข-1 แรงบิดสุดท้ายที่ใช้ในการผสมยาง ร้อยละการบวมตัว ความหนืดมูนิ และ การแพร่ ออกของน้ำมัน

ชนิดน้ำมัน	แรงบิดสุดท้าย (Nm)	ร้อยละการบวมตัว	ความหนืดมูนิ	การแพร่ออกของน้ำมัน (กรัม)
NO	132.6	163 ± 1	51.8 ± 0.1	0.0501 ± 0.0019
WO5	117.3	176 ± 2	44.7 ± 0.2	0.0632 ± 0.0031
AO5	119.0	180 ± 0	38.8 ± 0.2	0.0584 ± 0.0021
CNSL5	117.7	190 ± 1	35.0 ± 0.1	0.0585 ± 0.0025
C5	116.7	194 ± 2	36.1 ± 0.1	0.0564 ± 0.0028
DCNSL5	113.0	193 ± 3	34.4 ± 0.2	0.0584 ± 0.0029
EC5	116.7	221 ± 2	36.6 ± 0.3	0.0525 ± 0.0020
EDCNSL5	114.5	201 ± 1	34.2 ± 0.3	0.0537 ± 0.0033
WO10	112.9	183 ± 1	39.3 ± 0.2	0.0764 ± 0.0031
AO10	112.5	185 ± 2	32.2 ± 0.4	0.0609 ± 0.0029
CNSL10	112.5	219 ± 1	30.9 ± 0.4	0.0623 ± 0.0032
C10	109.9	206 ± 1	31.2 ± 0.2	0.0623 ± 0.0023
DCNSL10	107.3	210 ± 2	31.0 ± 0.2	0.0614 ± 0.0025
EC10	110.1	231 ± 2	30.1 ± 0.4	0.0621 ± 0.0024
EDCNSL10	109.7	208 ± 1	31.4 ± 0.4	0.0612 ± 0.0029

หมายเหตุ ตัวเลขด้านหลังชนิดน้ำมันระบุปริมาณน้ำมันที่ใช้ (5 และ 10 phr)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ความแข็งกดยางก่อนการบ่มเร่ง หลังการบ่มเร่ง และร้อยละการบ่มเร่ง

ชนิดน้ำมัน	ความแข็งกดยาง		
	ก่อนการบ่มเร่ง (Shore A)	หลังการบ่มเร่ง (Shore A)	ร้อยละการบ่มเร่ง
NO	73.2 ± 1.4	-	-
WO5	68.9 ± 0.8	-	-
AO5	67.7 ± 1.0	68.7 ± 1.4	101.5 ± 2.4
CNSL5	65.4 ± 0.5	-	-
C5	68.0 ± 1.3	-	-
DCNSL5	67.6 ± 1.0	-	-
EC5	66.5 ± 1.4	72.3 ± 1.5	108.7 ± 1.3
EDCNSL5	71.2 ± 1.0	-	-
WO10	68.4 ± 1.2	-	-
AO10	67.2 ± 0.8	-	-
CNSL10	56.8 ± 1.0	-	-
C10	64.2 ± 0.9	-	-
DCNSL10	63.0 ± 0.9	-	-
EC10	63.2 ± 0.8	-	-
EDCNSL10	70.4 ± 1.5	-	-
AOW5	65.0 ± 0.8	67.2 ± 1.3	102.0 ± 1.9
ECW5	63.5 ± 1.1	71.2 ± 1.4	104.2 ± 1.5

หมายเหตุ ตัวเลขด้านหลังชนิดน้ำมันระบุปริมาณน้ำมันที่ใช้ (5 และ 10 phr)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ความแข็งแรงดึงของยางก่อนการบ่มเร่ง หลังการบ่มเร่ง และร้อยละคงเหลือหลังการบ่มเร่ง

ชนิดน้ำมัน	ความแข็งแรงดึง		
	ก่อนการบ่มเร่ง (MPa)	หลังการบ่มเร่ง (MPa)	ร้อยละคงเหลือหลัง การบ่มเร่ง
NO	27.6 ± 0.6	2.0 ± 0.2	7.3 ± 0.9
WO5	26.5 ± 0.4	2.1 ± 0.1	7.8 ± 0.4
AO5	26.2 ± 0.5	2.3 ± 0.1	8.9 ± 0.2
CNSL5	25.3 ± 0.6	2.2 ± 0.1	8.9 ± 0.2
C5	26.3 ± 0.5	3.6 ± 0.1	13.8 ± 0.4
DCNSL5	26.9 ± 0.3	3.4 ± 0.1	12.8 ± 0.4
EC5	25.6 ± 0.6	5.1 ± 0.1	19.7 ± 0.8
EDCNSL5	27.8 ± 0.4	3.9 ± 0.1	14.1 ± 0.4
WO10	25.9 ± 0.4	2.2 ± 0.2	8.6 ± 0.6
AO10	26.0 ± 0.4	2.8 ± 0.1	10.7 ± 0.5
CNSL10	23.2 ± 0.4	1.9 ± 0.1	8.4 ± 0.1
C10	24.9 ± 0.8	4.1 ± 0.2	16.5 ± 0.5
DCNSL10	24.5 ± 0.2	4.2 ± 0.2	16.9 ± 0.6
EC10	22.4 ± 0.6	5.6 ± 0.1	25.1 ± 0.9
EDCNSL10	25.6 ± 0.9	3.8 ± 0.1	14.7 ± 0.7
AOW5	26.0 ± 0.6	6.0 ± 0.1	23.1 ± 0.7
ECW5	25.1 ± 0.3	6.4 ± 0.1	25.6 ± 0.5

หมายเหตุ ตัวเลขด้านหลังชนิดน้ำมันระบุปริมาณน้ำมันที่ใช้ (5 และ 10 phr)

ตารางที่ ข-4 มอดูลัสที่ 100% ของยางก่อนการบ่มเร่ง หลังการบ่มเร่ง และร้อยละการบ่มเร่ง

ชนิดน้ำมัน	มอดูลัสที่ 100%		
	ก่อนการบ่มเร่ง (MPa)	หลังการบ่มเร่ง (MPa)	ร้อยละการบ่มเร่ง
NO	2.35 ± 0.04	0.0	0.0
WO5	1.85 ± 0.03	0.0	0.0
AO5	1.77 ± 0.05	0.0	0.0
CNSL5	1.80 ± 0.04	0.0	0.0
C5	1.81 ± 0.07	2.8 ± 0.1	156.2 ± 4.7
DCNSL5	1.91 ± 0.04	2.7 ± 0.2	143.8 ± 12.7
EC5	1.73 ± 0.08	3.7 ± 0.2	212.1 ± 15.8
EDCNSL5	2.23 ± 0.05	3.3 ± 0.1	146.3 ± 8.8
WO10	1.82 ± 0.02	0.0	0.0
AO10	1.76 ± 0.04	0.0	0.0
CNSL10	1.34 ± 0.05	0.0	0.0
C10	1.42 ± 0.03	3.6 ± 0.2	249.6 ± 16.6
DCNSL10	1.45 ± 0.02	3.6 ± 0.1	245.5 ± 13.6
EC10	1.30 ± 0.06	4.0 ± 0.1	311.0 ± 14.8
EDCNSL10	1.74 ± 0.09	2.5 ± 0.1	141.2 ± 6.5
AOW5	1.73 ± 0.03	2.6 ± 0.1	148.5 ± 5.1
ECW5	1.53 ± 0.04	2.9 ± 0.1	187.0 ± 8.4

หมายเหตุ ตัวเลขด้านหลังชนิดน้ำมันระบุปริมาณน้ำมันที่ใช้ (5 และ 10 phr)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางก่อนการบ่มแรง หลังการบ่มแรง และร้อยละคงเหลือหลังการบ่มแรง

ชนิดน้ำมัน	ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด		
	ก่อนการบ่มแรง	หลังการบ่มแรง	ร้อยละคงเหลือหลังการบ่มแรง
NO	599 ± 12	7.0 ± 1.0	1.2 ± 0.2
WO5	642 ± 8	10.1 ± 4.3	1.6 ± 0.7
AO5	630 ± 7	14.8 ± 1.5	2.3 ± 0.2
CNSL5	717 ± 20	81.4 ± 9.4	11.4 ± 1.1
C5	654 ± 13	135.5 ± 8.1	20.7 ± 1.1
DCNSL5	665 ± 15	131.7 ± 8.8	19.8 ± 1.2
EC5	663 ± 18	142.8 ± 10.4	21.6 ± 2.0
EDCNSL5	624 ± 4	127.4 ± 8.0	20.4 ± 1.3
WO10	616 ± 6	3.4 ± 1.0	0.5 ± 0.2
AO10	623 ± 11	18.8 ± 2.3	3.0 ± 0.4
CNSL10	781 ± 12	86.4 ± 3.3	11.1 ± 0.4
C10	716 ± 14	107.4 ± 3.8	15.0 ± 0.6
DCNSL10	713 ± 12	116.0 ± 5.9	16.3 ± 0.9
EC10	731 ± 13	140.3 ± 10.5	19.2 ± 1.3
EDCNSL10	672 ± 17	181.2 ± 7.8	27.0 ± 1.2
AOW5	746 ± 6	235.8 ± 4.1	31.6 ± 0.4
ECW5	804 ± 18	237.4 ± 6.2	29.6 ± 1.2

หมายเหตุ ตัวเลขด้านหลังชนิดน้ำมันระบุปริมาณน้ำมันที่ใช้ (5 และ 10 phr)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

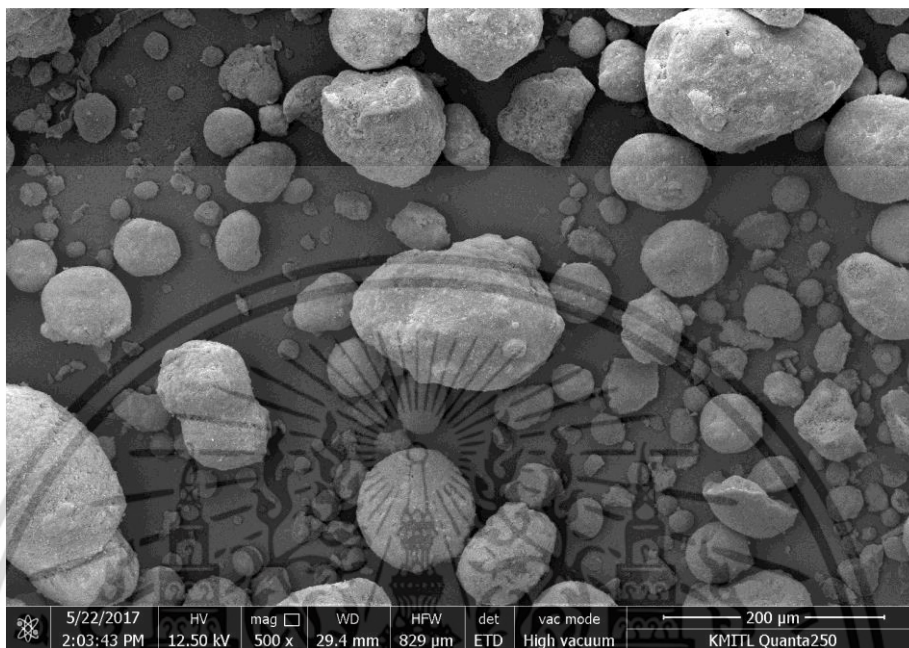
ตารางที่ ข-6 มอดุลัสที่ 300% ของยางก่อนการบ่มเร่ง และการยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัด

ชนิดน้ำมัน	มอดุลัสที่ 300% (MPa)	การยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัด (%)
NO	8.65 ± 0.2	58.1 ± 0.9
WO5	6.45 ± 0.2	58.9 ± 0.9
AO5	6.58 ± 0.2	58.6 ± 0.4
CNSL5	5.52 ± 0.2	57.4 ± 0.6
C5	6.33 ± 0.1	57.9 ± 0.9
DCNSL5	6.39 ± 0.1	57.3 ± 0.4
EC5	6.37 ± 0.1	56.5 ± 0.5
EDCNSL5	7.64 ± 0.1	58.2 ± 0.9
WO10	6.69 ± 0.1	60.5 ± 0.9
AO10	6.78 ± 0.1	59.2 ± 0.3
CNSL10	3.59 ± 0.1	57.3 ± 0.9
C10	4.62 ± 0.1	58.0 ± 0.7
DCNSL10	4.52 ± 0.1	57.7 ± 0.7
EC10	4.10 ± 0.1	56.2 ± 0.5
EDCNSL10	5.23 ± 0.1	57.9 ± 0.9
AOW5	5.33 ± 0.1	57.3 ± 0.9
ECW5	4.30 ± 0.2	55.6 ± 0.3

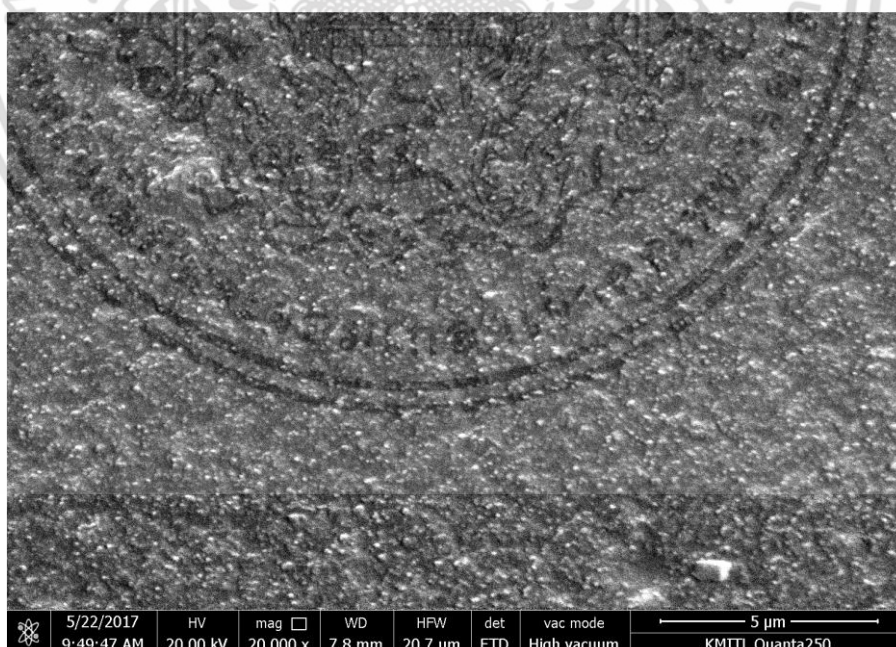
หมายเหตุ ตัวเลขด้านหลังชนิดน้ำมันระบุปริมาณน้ำมันที่ใช้ (5 และ 10 phr)

ภาคผนวก ค

สัณฐานวิทยา

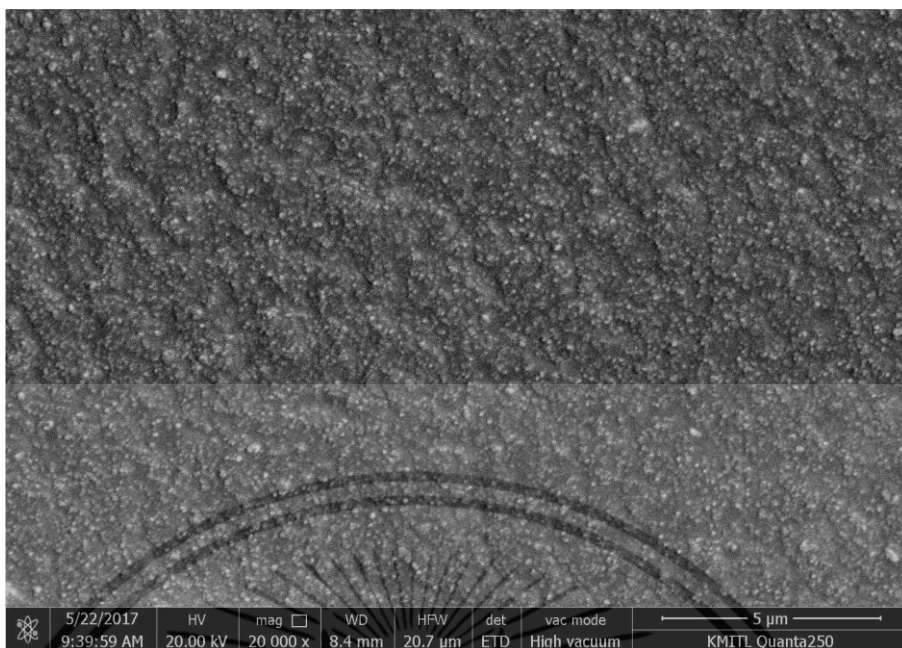


รูปที่ ค-1 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของซิลิกา ที่กำลังขยาย 500 เท่า

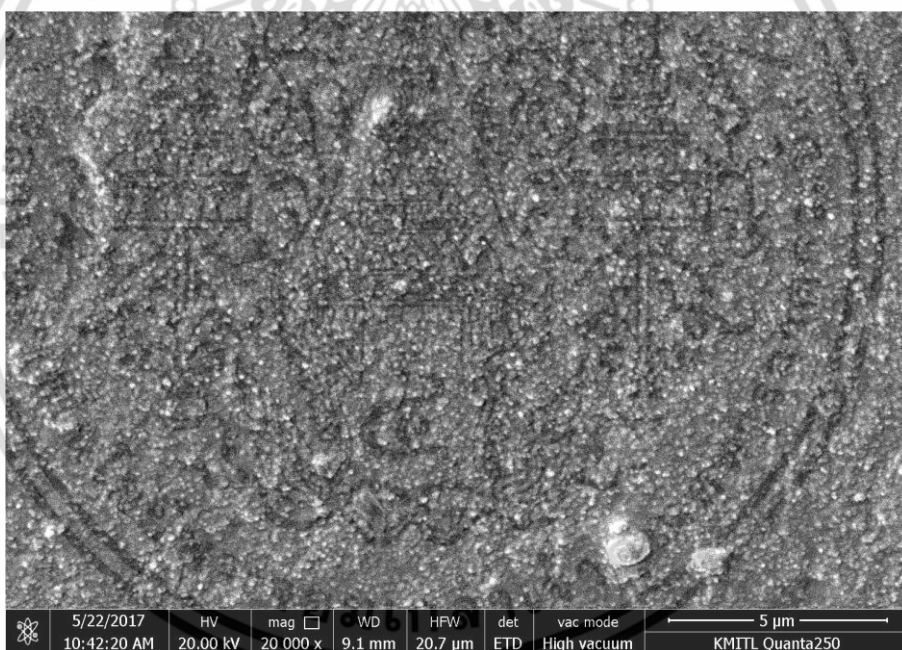


(a) WO 5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

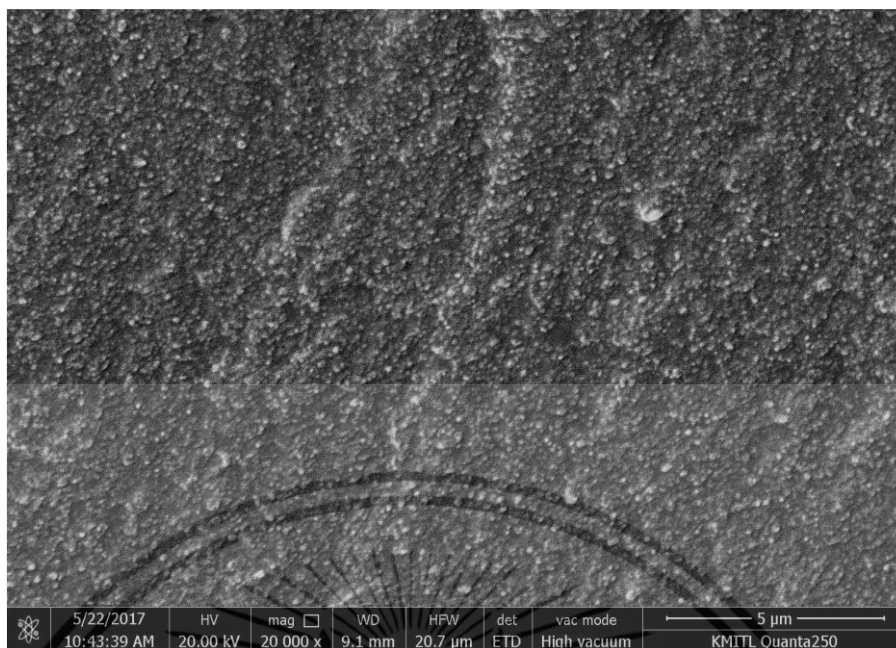


(b) WO 10 phr



(c) CNSL 5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) CNSL 10 phr

รูปที่ ค-2 SEM แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของยางที่เติมน้ำมัน WO และ CNSL ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ค่าตัวแปรการละลาย (δ)

ตารางที่ ง-1 ค่าตัวแปรการละลาย (δ) ของยางธรรมชาติและน้ำมันชนิดต่าง ๆ

สาร	ค่าตัวแปรการละลาย (cal/cm^3) ^{1/2}
ยางธรรมชาติ	8.3 [61]
น้ำมันพาราฟิน	7.2 [61]
น้ำมันอะโรมาติก	8.0 [61]
โทลูอีน	8.9 [62]
คาร์บอนอล	9.4 [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวสุพรรณางค์ รักษาวงศ์
วัน เดือน ปีเกิด	6 กุมภาพันธ์ 2535
ที่อยู่ปัจจุบัน	39 หมู่ที่.12 ต.นาแวง อ.ฉวาง จ.นครศรีธรรมราช 80260
ประวัติการศึกษา	2556 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรตเฉลี่ย 3.59 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	1. ทุนอุดหนุนการศึกษาและทุนค่าครองชีพในระดับปริญญาโท คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2. ทุนนำเสนอผลงานทางวิชาการแบบโปสเตอร์ ในงานประชุมวิชาการโพลิ- เมอร์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 6 (PCT-6)
ผลงานทางวิชาการ	Raksawong S. and Jangchud I. 2016. “New Bioadditives from Modified Cashew Nut Shell Liquid (CNSL) for Natural Rubber.” <i>The Proceeding of International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)</i> . Pathumwan Princess Hotel, June 30-July 1, Bangkok, Thailand. pp. 283-287.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้