

การศึกษาการเพิ่มสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม

STUDY OF IMPROVING MECHANICAL PROPERTIES OF  
RECLAIMED RUBBERS



สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ปีการศึกษา 2559

# STUDY OF IMPROVING MECHANICAL PROPERTIES OF RECLAIMED RUBBERS



A COOPERATIVE EDUCATION SUBMITTED IN PARTIAL  
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2016

สหกิจศึกษา	การศึกษาการเพิ่มสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม	
	Study of Improving Mechanical Properties of Reclaimed Rubbers	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศวดี บัณฑิตย์	รหัสนักศึกษา 56050577
	นางสาววิภาวดี บดีพงษ์	รหัสนักศึกษา 56050602
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ กรรมการ	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สหกิจศึกษา	การศึกษาการเพิ่มสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม Study of Improving Mechanical Properties of Reclaimed Rubbers			
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศวดี บัณจิตย์	รหัสนักศึกษา	56050577	
	นางสาววิภาวดี บดีพงษ์	รหัสนักศึกษา	56050602	
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)			
ภาควิชา	เคมี			
คณะ	วิทยาศาสตร์			
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)			
ปีการศึกษา	2559			
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด			

### บทคัดย่อ

การรีเคลม เป็นหนึ่งในวิธีการเปลี่ยนยางของเสียให้เป็นวัตถุดิบใหม่ได้ โดยผ่านกระบวนการตีวัลคาไนเซชัน (Devulcanization) สามารถใช้ลดปริมาณขยะยางและแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันมีความต้องการยางรีเคลมความแข็งแรงสูงที่มีคุณภาพสูงเทียบเท่ามาตรฐานต่างประเทศ ดังนั้นงานวิจัยสหกิจศึกษานี้จึงทำวิจัยร่วมกับบริษัท ยูเนี่ยนพัฒนกิจ จำกัด เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ได้แก่ ผลของขนาดอนุภาคผงยางรถยนต์ (GRT) ที่เป็นวัตถุดิบ ในช่วง 16-20, 20-26, 26-30 และ 30-40 mesh และผลของปริมาณกำมะถัน 0-4 phr นอกจากนี้ยังศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สารเติมแต่งทรานส์พอลิออกทีนาเมอร์ (TOR) 0-10 phr เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางรีเคลม ทำการผสมตัวอย่างโดยใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง และขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ทำการทดสอบความหนืดมูนนี้ ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยา จากการทดลองพบว่ายางรีเคลมจาก GRT ช่วง 20-26 mesh มีค่าความแข็งแรงตึงสูงกว่ายางรีเคลมจาก GRT ช่วงขนาดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามมอดูลัสของยาง ความแข็งกต และร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางรีเคลมไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญ ในการศึกษาผลของปริมาณกำมะถัน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันส่งผลให้ค่าความแข็งแรงตึง และความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางรีเคลม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง การใช้ TOR พบว่าส่งผลให้ค่าความแข็งแรงตึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่ามอดูลัสของยาง และความแข็งกต มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ไม่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยาง TOR ทำหน้าที่คล้ายสารช่วยกระบวนการผลิต โดยการเพิ่ม TOR ในปริมาณ 5-10 phr ทำให้ความหนืดของยางลดลง

คำสำคัญ : กระบวนการตีวัลคาไนเซชัน, ขยะยาง, ยางรีเคลม, ผงยางรถยนต์, ทรานส์พอลิออกทีนาเมอร์ (TOR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Study of Improving Mechanical Properties of Reclaimed Rubbers		
Students	Miss Yodsawadee Bundit	Student ID	56050577
	Miss Wipawadee Bodeepong	Student ID	56050602
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2016		
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud		

### Abstract

Reclaiming process is one of the most important methods to transform rubber wastes into raw rubber materials again by devulcanization process. Using reclaimed rubbers can help reducing rubber wastes and solving environmental problems. High strength and high quality reclaimed rubbers towards ISO standards have been in demands. Therefore, this cooperative study with the Union Commercial Development Co., Ltd. was carried out. Factors affecting rubber properties were studied including sizes of ground rubber tire (GRT) (16-20, 20-26, 26-30 and 30-40 mesh) and sulfur loading (0-4 phr). Moreover, feasibility study of adding trans-polyoctenamer (TOR) (0-10 phr) to improve reclaimed rubber properties was also investigated. Rubber compounds were mixed by using a two-roll mill and shaped into sheet samples by a compression molding machine. Each sample was tested for Mooney viscosity, cure characteristics, mechanical properties and morphology. It was found that reclaimed rubbers prepared from 20-26 mesh GRT showed the highest tensile strength compared to those prepared from other sizes GRT. However, rubber modulus, hardness and %elongation at break were insignificantly different. By studying the sulfur loading, it was found that tensile strength and crosslink density were increased as increasing sulfur loading. However, %elongation at break was found in the opposite trend. By adding TOR, tensile strength and %elongation at break of reclaimed rubbers were slightly improved. However, rubber modulus and hardness of reclaimed rubbers were insignificantly different. Moreover, cure characteristics of reclaimed rubbers were unaffected. By increasing TOR loading (5-10 phr), Mooney viscosity was lower since TOR might act as processing aids.

**Keywords :** Devulcanization, Rubber waste, Reclaimed rubber, Ground rubber tire powder, Trans-polyoctenamer (TOR)

## กิตติกรรมประกาศ

การทำสหกิจศึกษานี้จะสำเร็จลุล่วงมิได้ถ้าหากขาดความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่คณะผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาสหกิจศึกษาเป็นอย่างสูง ที่ดูแลเอาใจใส่ให้คำปรึกษา พร้อมทั้งให้การช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ของสหกิจศึกษานี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภาวรัตน์ รักชลธิ์ และ ผศ.ดร.ภัทธวุธ มนต์วิเศษ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบสหกิจศึกษา ตลอดจนให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยและแก้ไขปรับปรุงรูปแบบให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่าน ที่ให้ความรู้ และให้คำแนะนำ

ขอขอบพระคุณ บริษัท ยูเนี่ยนพัฒนาจิก จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทำสหกิจศึกษา และดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณบุญหาญ อุ่อดมยิ่ง กรรมการบริหาร บริษัท ยูเนี่ยนพัฒนาจิก จำกัด, คุณอามีตะห์ ไพรพฤกษ์, คุณนิตยา อยู่สุขสวัสดิ์, คุณธัญญารัตน์ ศรียานะ, คุณวัชรระ ผกาอบ, คุณมณฑิยา เนียมสวัสดิ์ และพนักงานบริษัท ยูเนี่ยนพัฒนาจิก จำกัด ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนดูแล การทำสหกิจศึกษาและดำเนินงานวิจัยให้ผ่านลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวก และให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ รวมทั้งช่วยแก้ปัญหาตลอดการดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณ คุณขวัญใจ พูลสวัสดิ์ ผู้ช่วยวิจัย ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาในการทำวิจัย ให้ผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจจนสหกิจศึกษานี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ยศวดี บัณฑิตย์

วิภาวดี บดีพงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญรูป .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฐ
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ฅม
<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>5</b>
2.1 ยางรีเคลม (Reclaimed rubber) .....	5
2.2 ประเภทของยางรีเคลม .....	5
2.3 กระบวนการผลิตยางรีเคลม (Reclaiming process) .....	6
2.3.1 กระบวนการทางเคมี (Chemical process) .....	6
2.3.2 กระบวนการอัลตราโซนิก (Ultrasonic process) .....	6
2.3.3 กระบวนการไมโครเวฟ (Microwave process) .....	7
2.3.4 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological process) .....	7
2.4 การพัฒนากระบวนการรีเคลมในปัจจุบัน .....	8
2.4.1 กระบวนการทางชีววิทยาสำหรับการรีเคลมยาง .....	8
2.4.2 การทำยางรีเคลมโดยกระบวนการดีลิงค์ (De-link process) .....	8
2.4.3 กระบวนการรีเคลมยางโดยใช้สารรีเคลมจำพวกไดซัลไฟด์ .....	8
2.4.3.1 กลไกการรีเคลม .....	9
2.5 วัตถุดิบ .....	10
2.5.1 พยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) .....	11
2.5.1.1 การบดเชิงกล (Mechanical grinding) .....	11
2.5.1.2 การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding) .....	12
2.5.2 ขนาดอนุภาคของพยางรถยนต์ .....	12
2.5.2.1 การวิเคราะห์โดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis) .....	12
2.6 สารเติมแต่งสำหรับยาง (Additives for rubber) .....	13
2.6.1 สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agents หรือ Curing agents) .....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.1.1 ระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization system) .....	14
2.6.1.2 ระบบเชื่อมโยงด้วยสารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน (Sulfur donor vulcanization system) .....	18
2.6.1.3 ระบบเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization system) .....	18
2.6.2 สารตัวเติม (Fillers) .....	18
2.6.3 สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids) .....	19
2.6.4 ทรานส์พอลิโอคทีนาเมอร์ (Trans-polyoctenamer, TOR) .....	19
2.6.4.1 เกรด และสมบัติของ Vestenamer <sup>®</sup> .....	19
2.6.4.2 การสังเคราะห์ Vestenamer <sup>®</sup> .....	21
2.6.4.3 การใช้งาน Vestenamer <sup>®</sup> .....	21
2.6.5 สารกลุ่มอื่น ๆ (Miscellaneous ingredients).....	22
2.7 สารรีเคลม (Reclaiming agents) .....	23
2.8 การผสมยาง (Rubber compounding) .....	24
2.8.1 เครื่องผสมยางแบบกะ (Batch mixer) .....	24
2.8.1.1 เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง .....	24
2.8.1.2 เครื่องผสมระบบปิดแบบบันบูรี (Banbury internal mixer) .....	24
2.8.1.3 เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ (Intermix internal mixer) .....	25
2.8.1.4 เครื่องผสมระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้ (Variable intermeshing clearance internal mixer) .....	26
2.8.1.5 เครื่องนวดยางหรือนืดเดอร์ (Kneader) .....	26
2.8.2 เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (Continuous mixer) .....	27
2.9 ขั้นตอนการผสมยาง (Mixing step) .....	27
2.9.1 เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง .....	28
2.9.1.1 เครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น (Oscillating disc rheometer, ODR) .....	28
2.9.1.2 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer, MDR) .....	29
2.10 การขึ้นรูปยาง (Forming rubber) .....	30
2.10.1 การใช้แม่พิมพ์ (Molding) .....	31
2.10.1.1 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์กดอัด (Compression molding) .....	31

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10.1.2 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด (Transfer molding) .....	32
2.10.1.3 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบฉีด (Injection molding)	33
2.10.2 การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดผ่านตายโดยใช้เครื่องอัดรีด .....	34
2.10.3 การขึ้นรูปด้วยเครื่องคาเลนเดอร์ .....	34
2.11 การทดสอบ .....	35
2.11.1 การทดสอบคุณภาพยางดิบ .....	35
2.11.2 การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต .....	35
2.11.3 การทดสอบสมบัติของยางเชื่อมโยง .....	35
2.12 ข้อดีและข้อเสียของยางรีเคลม .....	35
2.12.1 ข้อดีของยางรีเคลม .....	35
2.12.2 ข้อเสียของยางรีเคลม .....	35
2.13 สมบัติและประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ยางรีเคลม .....	36
2.13.1 เมื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยาง .....	36
2.13.2 เมื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids).....	36
2.13.3 ลักษณะเด่นของผลิตภัณฑ์ .....	36
2.14 มาตรฐานยางรีเคลม .....	36
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	40
3.1 วัตถุดิบ และสารเคมี .....	41
3.2 เครื่องมือที่ใช้ .....	41
3.3 ขั้นตอนการผสมยางรีเคลม.....	41
3.3.1 การศึกษาผลของขนาดวัตถุดิบ GRT ที่มีต่อสมบัติของยางรีเคลม .....	41
3.3.1.1 ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh .....	41
3.3.1.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดอื่น ๆ โดยเปลี่ยน GRT เป็นขนาด 20-26, 26-30 และ 30-40 mesh	43
3.3.2 การศึกษาปริมาณกำมะถันที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลม.....	43
3.3.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมที่มีการใช้สารเติมแต่ง TOR .....	44
3.4 การร่อนขนาด GRT .....	44
3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล .....	44
3.5.1 การทดสอบแรงดึง .....	44
3.5.2 การทดสอบความแข็งแรงกดแบบคูโรมิเตอร์ .....	46
3.6 การทดสอบสมมูลฐานวิทยา .....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 การทดสอบอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร .....	46
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล .....</b>	<b>47</b>
4.1 การศึกษาผลของขนาดวัตถุบวม GRT ขนาด 16-20, 20-26, 26-30 และ 30-40 mesh ที่มีต่อสมบัติของยางรีเคลม .....	47
4.2 การศึกษาปริมาณกำมะถันที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลม .....	56
4.3 การศึกษาการใช้สารเติมแต่ง TOR เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม...	61
4.4 การวิเคราะห์หัตถ์นุ่นวัตถุบวม .....	68
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>70</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	70
<b>เอกสารอ้างอิง .....</b>	<b>71</b>
<b>ภาคผนวก .....</b>	<b>78</b>
ภาคผนวก ก .....	79
ภาคผนวก ข .....	91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของยางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (ก) ยางดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน, (ข) ยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน และ (ค) ยางที่ผ่านกระบวนการตีวัลคาไนเซชัน .....	2
1.2 รูปตัวอย่างยางรีเคลมและผลิตภัณฑ์จากยางรีเคลม .....	3
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยาง (ก) ก่อนการรีเคลม และ (ข) หลังการรีเคลม .....	5
2.2 ยางรีเคลมชนิดต่าง ๆ .....	6
2.3 การตีวัลคาไนเซชันโดยวิธีทางเคมี .....	6
2.4 การตีวัลคาไนเซชันโดยวิธีอัลตราโซนิก .....	7
2.5 การตีวัลคาไนเซชันโดยวิธีไมโครเวฟ .....	7
2.6 การตีวัลคาไนเซชันโดยวิธีทางชีวภาพ .....	8
2.7 กลไกการรีเคลมยาง .....	10
2.8 ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของยางรถยนต์ .....	10
2.9 วัตถุประสงค์ในการผลิตยางรีเคลม (ก) ยางรถยนต์ และ (ข) ถุงมือยาง .....	11
2.10 ผงยางรถยนต์ .....	12
2.11 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยงแบบไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง และใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง .....	15
2.12 โครงสร้างกลุ่มซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides) .....	16
2.13 โครงสร้างกลุ่มไทอะโซล (Thiazole) .....	17
2.14 โครงสร้างกลุ่มสารป้องกันยางเสื่อม .....	18
2.15 โครงสร้างกลุ่มเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) .....	18
2.16 Trans-polyoctenamer (TOR) .....	19
2.17 สมบัติโดยรวมของ Vestenamer <sup>®</sup> .....	20
2.18 กลไกการสังเคราะห์ Vestenamer <sup>®</sup> .....	21
2.19 การทำปฏิกิริยาระหว่าง Polyoctenamer (poly(1-octenylene), PCOE) และ polynorbornene (poly(1,3-cyclopentylenevinylene), PNB) .....	22
2.20 โครงสร้างของสารรีเคลม (ก) ไตเอริลไดซัลไฟด์ และ (ข) ไดฟีนิลไดซัลไฟด์ .....	24
2.21 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง .....	24
2.22 เครื่องผสมระบบปิดแบบบูรี .....	25
2.23 เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ .....	25
2.24 เครื่องผสมยางระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้ .....	26
2.25 เครื่องนวดยางหรือนิดเดอร์ .....	26
2.26 เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง .....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 ขั้นตอนการผสมยาง .....	28
2.28 การทำงานของเครื่องวัดการไหลแบบจานแก้ว .....	29
2.29 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแก้ว .....	29
2.30 การทำงานเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน .....	30
2.31 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) .....	30
2.32 การทำงานแม่พิมพ์กดอัด .....	31
2.33 (ก) แม่พิมพ์ และ (ข) เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก .....	32
2.34 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด .....	33
2.35 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบฉีด .....	33
2.36 เครื่องอัดรีด .....	34
2.37 เครื่องคาเลนเดอร์ .....	34
3.1 ตัวอย่างกราฟความหนืดมูนนี่ .....	42
3.2 ตัวอย่างเส้นกราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางผสมสูตร แสดงเวลาการเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$ ) และเวลาก่อนการเชื่อมโยง (Scorch time, $t_{s2}$ ) .....	43
3.3 ขึ้นตัวอย่างทดสอบรูปดัมเบลล์ .....	45
4.1 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ .....	48
4.2 ความหนืดมูนนี่ ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ .....	49
4.3 ความแข็งแรงดึง ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ .....	50
4.4 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ .....	50
4.5 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 200% ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ .....	51
4.6 ความแข็งกด ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ .....	51
4.7 ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ .....	52
4.8 แบบจำลองผลของการรีเคลม (ก) GRT ขนาดใหญ่ และ (ข) GRT ขนาดอนุภาคเล็ก ....	52
4.9 อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ .....	53
4.10 ภาพถ่ายพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT (ก) ขนาด 16-20 mesh และ (ข) 30-40 mesh	53
4.11 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ (OM) แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT (ก) ขนาด 16-20 mesh และ (ข) 30-40 mesh (กำลังขยาย 10 เท่า) .....	54
4.12 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh (กำลังขยาย 500 เท่า) .....	54
4.13 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh (กำลังขยาย 500 เท่า) .....	54
4.14 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh ที่ใช้ปริมาณกำมะถันต่างกัน .....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ความแข็งแรงดึงของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณ กำมะถันที่แตกต่างกัน .....	57
4.16 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ ปริมาณกำมะถันที่แตกต่างกัน .....	58
4.17 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถันที่แตกต่างกัน .....	58
4.18 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 200% ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถันที่แตกต่างกัน .....	59
4.19 ความแข็งกดของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถันที่ แตกต่างกัน .....	59
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นในเชื่อมโยง (Crosslink density) ของ ยางกับสมบัติเชิงกลบางประการของยาง .....	60
4.21 อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถันที่แตกต่างกัน .....	60
4.22 ปฏิกริยาการเชื่อมโยงยางด้วยกำมะถัน.....	61
4.23 โครงสร้างของ TOR .....	62
4.24 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับปริมาณ TOR ที่ 5-10 phr .....	63
4.25 ความหนืดมูบนี้ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับปริมาณ TOR ที่ 5-10 phr .....	64
4.26 ความแข็งแรงดึงของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับปริมาณ TOR ที่ 5-10 phr .....	65
4.27 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับ ปริมาณ TOR ที่ 5-10 phr .....	65
4.28 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับปริมาณ TOR ที่ 5-10 phr .....	66
4.29 ความแข็งกดของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับปริมาณ TOR ที่ 5-10 phr .....	66
4.30 อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับปริมาณ TOR ที่ 5 และ 10 phr .....	67
4.31 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยไม่มีการใช้ TOR (กำลังขยาย 500 เท่า) .....	67
4.32 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่มีการใช้ TOR loading 5 phr (กำลังขยาย 500 เท่า) .....	68

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่มีการใช้ TOR loading 10 phr (กำลังขยาย 500 เท่า) .....	68
ก.1 ขั้นตอนการวิจัยตอนที่ 3 .....	80
ก.2 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh (กำลังขยาย 300 เท่า) .....	81
ก.3 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh (กำลังขยาย 300 เท่า) .....	81
ก.4 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh (กำลังขยาย 300 เท่า) .....	82
ก.5 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh (กำลังขยาย 300 เท่า) .....	82
ก.6 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh (กำลังขยาย 500 เท่า) .....	83
ก.7 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh (กำลังขยาย 500 เท่า) .....	83
ก.8 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh (กำลังขยาย 1000 เท่า) .....	84
ก.9 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh (กำลังขยาย 1000 เท่า) .....	84
ก.10 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh (กำลังขยาย 1000 เท่า) .....	85
ก.11 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh (กำลังขยาย 1000 เท่า) .....	85
ก.12 ภาพ OM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh (กำลังขยาย 10 เท่า) .....	86
ก.13 ภาพ OM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh (กำลังขยาย 10 เท่า) .....	86
ก.14 ภาพ OM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh (กำลังขยาย 20 เท่า) .....	87
ก.15 ภาพ OM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh (กำลังขยาย 20 เท่า) .....	87
ก.16 ภาพ OM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh (กำลังขยาย 20 เท่า) .....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.17 ภาพ OM แสดงลักษณะพื้นผิวของรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh (กำลังขยาย 20 เท่า) .....	88
ก.18 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ไม่ใส่ TOR (กำลังขยาย 300 เท่า) .....	89
ก.19 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่ TOR 5 phr (กำลังขยาย 300 เท่า) .....	89
ก.20 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่ 10 phr (กำลังขยาย 300 เท่า) .....	90
ก.21 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ไม่ใส่ TOR (กำลังขยาย 1000 เท่า) .....	90
ก.22 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่ TOR 5 phr (กำลังขยาย 1000 เท่า) .....	91
ก.23 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่ TOR 10 phr (กำลังขยาย 1000 เท่า) .....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางเปรียบเทียบขนาดอนุภาคหน่วยเมช (Mesh) .....	13
2.2 เปรียบเทียบปริมาณกำมะถันและสารเร่งที่ใช้ในระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันแบบ ต่าง ๆ .....	15
2.3 ตารางเปรียบเทียบสมบัติของ Vestenamer <sup>®</sup> .....	20
2.4 หน้าที่ของสารเคมีต่าง ๆ .....	23
2.5 สมบัติขั้นต่ำของยางรีเคลมแต่ละประเภทตามมาตรฐาน ISO/CD 19846 .....	36
2.6 ตัวอย่างของสมบัติขั้นต่ำของยางรีเคลมประเทศอินเดีย.....	37
3.1 ส่วนผสมของยางรีเคลมที่ใช้ในตอนๆ 3.3.1.....	41
3.2 ส่วนผสมของยางรีเคลมที่ใช้ในตอนๆ 3.3.2.....	43
3.3 ส่วนผสมของยางรีเคลมที่ใช้ในตอนๆ 3.3.3.....	44
4.1 ลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20, 20-26, 26-30 และ 30-40 mesh .....	48
4.2 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางรีเคลมที่ปริมาณกำมะถันแตกต่างกัน .....	57
4.3 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางรีเคลมที่ใส่ TOR ที่แตกต่างกัน.....	63
4.4 ราคาต้นทุนวัตถุดิบของยางรีเคลมในแต่ละสูตร .....	69
4.5 การเปรียบเทียบต้นทุนที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลมแต่ละสูตรกับยางธรรมชาติ .....	70
ข.1 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT 16-20 mesh .....	92
ข.2 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT 20-26 mesh .....	92
ข.3 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT 26-30 mesh .....	93
ข.4 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT 30-40 mesh .....	93
ข.5 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ไม่ใส่ TOR .....	93
ข.6 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ปริมาณ TOR 5 phr .....	94
ข.7 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ปริมาณ TOR 6 phr .....	94
ข.8 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ปริมาณ TOR 7 phr .....	95
ข.9 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ปริมาณ TOR 8 phr .....	95
ข.10 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ปริมาณ TOR 9 phr ...	96
ข.11 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ปริมาณ TOR 10 phr	96
ข.12 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถัน 0 phr .....	97
ข.13 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถัน 1 phr .....	97
ข.14 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถัน 2 phr .....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.15 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถัน 3 phr .....	98
ข.16 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถัน 4 phr .....	98
ข.17 มาตรฐานการร่อนยางของบริษัท ยูเนียนพัฒนาจิก จำกัด .....	98
ข.18 ผลการร่อน GRT ขนาด 16-20 mesh .....	99
ข.19 ผลการร่อน GRT ขนาด 20-26 mesh .....	99
ข.20 ผลการร่อน GRT ขนาด 26-30 mesh .....	99
ข.21 ผลการร่อน GRT ขนาด 30-40 mesh .....	100
ข.22 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ไม่ใส่สารเคมี .....	100
ข.23 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่สารเคมี .....	100
ข.24 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh ที่ไม่ใส่สารเคมี .....	101
ข.25 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh ที่ใส่สารเคมี .....	101
ข.26 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh ที่ไม่ใส่สารเคมี .....	101
ข.27 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh ที่ใส่สารเคมี .....	101
ข.28 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh ที่ไม่ใส่สารเคมี .....	102
ข.29 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh ที่ใส่สารเคมี .....	102
ข.30 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่กำมะถัน 0 phr .....	102
ข.31 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่กำมะถัน 1 phr .....	102
ข.32 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่กำมะถัน 2 phr .....	103
ข.33 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่กำมะถัน 3 phr .....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.34 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่กำมะถัน 4 phr .....	103
ข.35 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ไม่ใส่ TOR และสารเคมี .....	103
ข.36 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ไม่ใส่ TOR แต่ใส่สารเคมี .....	104
ข.37 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ใส่ TOR 5 phr แต่ไม่ใส่สารเคมี .....	104
ข.38 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ใส่ TOR 5 phr และใส่สารเคมี .....	104
ข.39 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ใส่ TOR 10 phr แต่ไม่ใส่สารเคมี .....	104
ข.40 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ใส่ TOR 10 phr และใส่สารเคมี .....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
MDR	เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer)
CRI	ดัชนีอัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index)
$t_{C90}$	เวลาเชื่อมโยง (Cure time)
$t_{s2}$	เวลาสกอร์ช (Scorch time)
$M_{HF}$	ค่าแรงบิดสูงสุดคงที่ (Plateau torque)
$T_b$	ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)
$E_b$	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)
M100	มอดูลัสของยางที่ความเค้น 100 % (100 % Modulus)
M200	มอดูลัสของยางที่ความเค้น 200 % (200 % Modulus)
HS	ความแข็งกด (Hardness)
GRT	ผงบดจากยางรถยนต์ (Ground rubber tire)
ML 1+4 (100°C)	M หมายถึง Mooney L หมายถึง จานหมุนขนาดใหญ่ (ถ้าใช้จานหมุนขนาดเล็กให้ใช้อักษร S) 1 หมายถึง ระยะเวลาที่ใช้ในการอุ่นยางก่อนทดสอบ เป็นนาที 4 หมายถึง เวลาที่ใช้ในการทดสอบ เป็นนาที 100°C หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ
MV	ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)
CV	ระบบการเชื่อมโยงแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization)
EV	ระบบการเชื่อมโยงแบบมีประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization)
Semi-EV	ระบบการเชื่อมโยงแบบมีกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficient vulcanization)
ZnO	สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Zinc Oxide)
DPG	สารเร่งปฏิกิริยา (Diphenyl guanidine)
MBT	สารเร่งปฏิกิริยา (Mercaptobenzothiazole๗
$CaCO_3$	แคลเซียมคาร์บอเนต
TOR	Trans-polyoctenamer
PT	เครื่องตียาง (Plasticizing mill)
PR	เครื่องนวดยาง (Pre-refiner mill)
SN	เครื่องกรองยาง (Strainer)
FR	เครื่องรีดยาง (Finishing Roll)
Std error	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะทางเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่เกี่ยวข้องห้ามมิให้ตัดแปะหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

# บทที่ 1

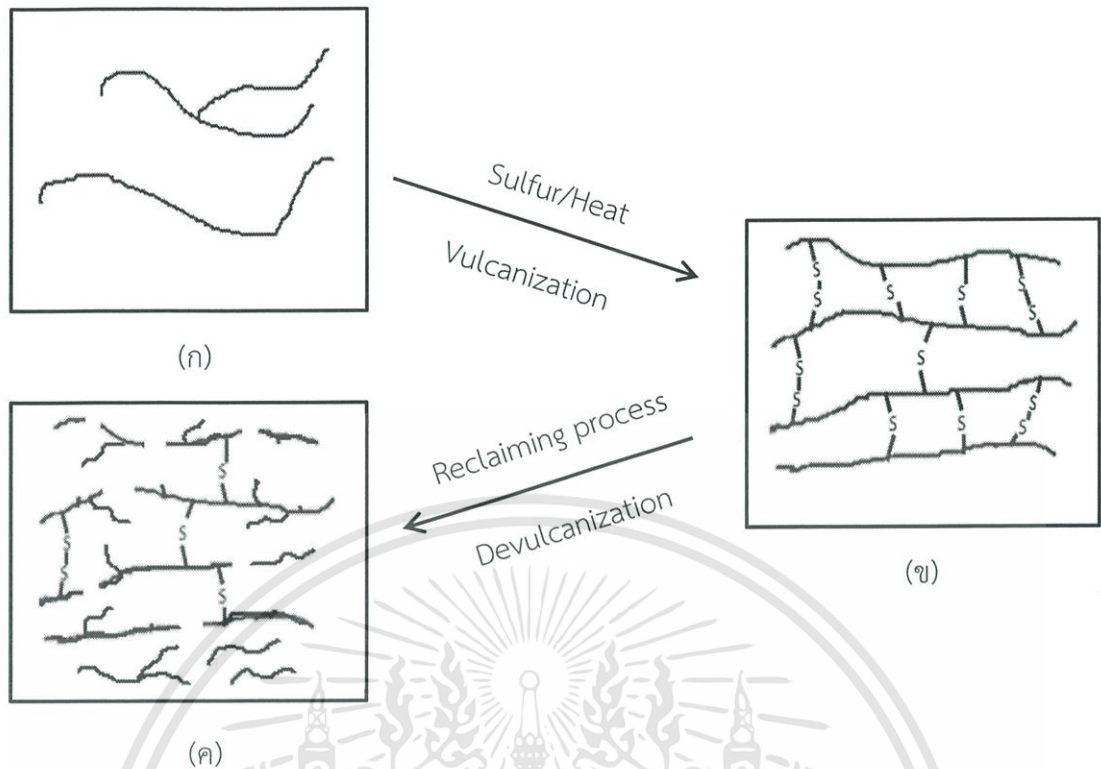
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันจำนวนประชากรโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ยางจึงมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งปริมาณการใช้ยางส่วนใหญ่มาจากอุตสาหกรรมยางล้อและชิ้นส่วนยานยนต์ ทั้งยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ จึงส่งผลให้ในแต่ละปีมียางรถยนต์ที่ใช้แล้วประมาณ 1.7 ล้านตัน [1] ที่ถูกทิ้งในที่ต่าง ๆ มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุง ซึ่งเป็นพาหะโรคร้ายไข้เจ็บต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นไข้มาลาเรีย ชิเกาและไข้เลือดออกโดยเฉพาะในพื้นที่เขตร้อนชื้น การกำจัดยางรถยนต์ที่ใช้แล้วเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก จึงนิยมนำยางมาผ่านกระบวนการรีไซเคิล (Recycling process) เนื่องจากยางที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์จะเกิดการเชื่อมโยงหลังจากผ่านความร้อน เมื่อเย็นตัวลงจะแข็งตัว มีความแข็งแรง ทนความร้อน และความดัน ไม่อ่อนตัว เปลี่ยนรูปร่างไม่ได้ โดยโมเลกุลจะเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงตาข่าย 3 มิติ (3D Network) จับกันแน่นผ่านปฏิกิริยาคัลคาไนเซชัน (Vulcanization) จึงไม่สามารถนำผลิตภัณฑ์ยางไปหลอมหรือขึ้นรูปใหม่ได้เหมือนพลาสติก [2]

การใช้ประโยชน์จากยางที่ใช้แล้ว สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การนำไปแปรรูปเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์อื่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมบางประเภท การนำไปผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) และหากต้องการนำผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ในรูปของยางตั้งต้น จำเป็นต้องทำลายพันธะเชื่อมโยงโมเลกุลยางก่อน กระบวนการดังกล่าว คือ กระบวนการดีวัลคาไนเซชัน (Devulcanization) และยางที่ผ่านการดีวัลคาไนเซชันเรียกว่า ยางรีเคลม (Reclaimed rubber) [3] โดยการนำยางมาผ่านกระบวนการกำจัดกำมะถัน (Desulfurization) ส่งผลให้โมเลกุลของยางที่มีการเชื่อมโยงแตกออก สามารถนำไปผสมสารเคมี และขึ้นรูปใหม่ได้ ดังรูปที่ 1.1 ยางรีเคลมที่ถูกนำมาวัลคาไนซ์ใหม่จะมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่า และความยืดหยุ่นที่ต่ำกว่ายางใหม่ จึงไม่สามารถนำยางรีเคลมมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์แทนที่การใช้ยางใหม่ทั้งหมดได้ การใช้งานจึงนิยมนำยางรีเคลมมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องทนสภาวะการใช้งานสูงมาก เพื่อลดต้นทุน หรือนำไปผสมยางใหม่ เพื่อให้ยางยังคงสมบัติความยืดหยุ่น และสมบัติเชิงกลที่ดี อีกทั้งยังสามารถลดปริมาณของสารเติมแต่ง (Additives) ต่าง ๆ ให้น้อยลงได้ เช่น ปริมาณของสารเร่ง (Accelerators) สารเชื่อมโยง (Curing agents) สารกระตุ้น (Activators) สารตัวเติม (Fillers) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของยางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (ก) ยางดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน (ข) ยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน และ (ค) ยางที่ผ่านกระบวนการดีวัลคาไนเซชัน

ยางรีไซเคิลเป็นยางที่ผ่านการเติมสารเติมแต่งที่ใช้ในการขึ้นรูปมาแล้ว สมบัติเชิงกลต่ำ ยางรีไซเคิลจึงจัดอยู่ในกลุ่มยางที่ใช้เพิ่มเนื้อ ลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids) โดยยางรีไซเคิลสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ในการผลิตชิ้นส่วนยางราคาถูก ใช้ผสมในส่วนที่เป็นโครงยาง (Carcass) ของยางไบแอส (Bias) ในอุตสาหกรรมยางล้อ ใช้เป็นองค์ประกอบในยางรถยนต์นั่งส่วนบุคคล นอกจากนั้นยังถูกนำไปทำเส้นรองเท้า ท่อ สายพานลำเลียง และเสื่อรองนั่ง ฯลฯ

จากการแข่งขันที่เพิ่มสูงขึ้น และความต้องการยางรีไซเคิลทั่วโลกมีสูงถึงประมาณร้อยละ 5 ของความต้องการการใช้ยาง หรือกว่า 5 ล้านตันต่อปี [4] จึงทำให้บริษัทต่าง ๆ มีแรงกระตุ้นในการเข้ามามีส่วนร่วมในอุตสาหกรรมนี้ รวมถึงพัฒนาสมบัติของยางรีไซเคิลให้สูงมากขึ้น และผ่านการทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ เช่น การทดสอบแรงดึงสำหรับยางวัลคาไนซ์ และเทอร์โมพลาสติก-อีลาสโตเมอร์ (ASTM D412) การวัดค่าความหนืดมูนนี่ (ASTM D1646) การวัดความแข็งกด (ASTM 2240) เพื่อสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมากขึ้น [5]

บริษัท ยูเนี่ยนพัฒนาจิก จำกัด (UNION COMMERCIAL DEVELOPMENT CO., LTD.) เป็นหนึ่งในบริษัทผู้ผลิตยางรีไซเคิลชั้นนำของประเทศไทย เพื่อจำหน่ายยางรีไซเคิลภายในประเทศ และส่งออกต่างประเทศ จึงต้องการพัฒนาสมบัติยางรีไซเคิลที่ผลิตได้ให้เป็นที่ยอมรับ ตรงตามความต้องการ มีสมบัติที่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังมีความประสงค์ที่จะพัฒนาสมบัติยางรีไซเคิลของบริษัทให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยเฉพาะความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งเป็นสมบัติขั้นต่ำในการแบ่งเกณฑ์มาตรฐานต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน โดยเฉพาะตลาดต่างประเทศที่มีแนวโน้มที่จะมีไม่ว่างกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดมาตรฐานยางรีเคลม เช่น มาตรฐานสากล (International standardization and organization : ISO) [6] มาตรฐานอินเดีย (Indian standard) [7] เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มสมบัติของยางรีเคลม โดยเฉพาะสมบัติเชิงกล เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันและการส่งออกของยางรีเคลม โดยเน้นการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม เช่น ผลของขนาดผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire : GRT) ที่เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตยางรีเคลม และผลของปริมาณกำมะถัน นอกจากนี้ยังศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติของยางรีเคลมโดยการใช้สารเติมแต่ง ได้แก่ ทรานส์พอลิโอคเตนเมอร์ (Trans-polyoctenamer, TOR)



รูปที่ 1.2 รูปตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ผลิตยางรีเคลม [8-11]

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของยางรีเคลม โดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ผลของขนาดอนุภาคผงยางรถยนต์ (GRT) และปริมาณกำมะถัน
- ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมโดยการใช้สารเติมแต่ง TOR

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ผสมยางคอมปาวด์ด้วยสูตรต่าง ๆ โดยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll-mill) และทำการขึ้นรูปตัวอย่างโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression molding)
- 3) ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของยางตัวอย่าง ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- o ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)
    - เวลาสกอร์ช (Scorch time,  $t_{s2}$ )
    - เวลาเชื่อมโยง (Cure time,  $t_{c90}$ )
    - ค่าแรงบิดสูงสุด (Plateau torque,  $M_{HF}$ )
    - ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque,  $M_L$ )
    - อัตราการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI)
  - o สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)
    - ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)
    - ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)
    - โมดูลัสยาง (Rubber modulus,  $M_{100}$ ,  $M_{200}$ )
    - ความแข็งกด (Hardness)
  - o ทดสอบสัณฐานวิทยา (Scanning electron microscopy, Optical microscope)
  - o ทดสอบอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร (Volume swell ratio)
- 4) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติยางรีเคลม โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอน คือ
- 4.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมที่เตรียมจาก GRT ที่แตกต่างกันคือขนาด 16-20, 20-26, 26-30 และ 30-40 mesh
  - 4.2 การศึกษาปริมาณกำมะถัน (Sulfur) ที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลม (0-4 phr)
  - 4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมที่มีการใช้ปริมาณสารเติมแต่ง ได้แก่ TOR ที่แตกต่างกัน (5-10 phr)
- 5) ศึกษาต้นทุนที่ใช้ในการผลิต และสรุปผลการทดลอง

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของยางรีเคลม
- 2) สามารถปรับปรุงสมบัติของยางรีเคลมได้โดยการใช้สารเติมแต่ง ได้แก่ TOR
- 3) สามารถนำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาอุตสาหกรรมยางรีเคลมในประเทศ และเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากยางรีเคลม
- 4) ช่วยอุตสาหกรรมลดต้นทุนการผลิต โดยการใช้ยางรีเคลมคุณภาพสูงแทนการใช้ยางใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ยางรีเคลม (Reclaimed rubber)

ยางรีเคลมคือ ยางที่ได้จากการนำยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ซึ่งมีโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3D Network) มาทำการแปรรูปให้สามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตได้อีกครั้ง โดยการบดยางวัตถุดิบให้มีขนาดเล็ก แล้วใช้กระบวนการต่าง ๆ เช่น กระบวนการความร้อนร่วมเคมี (Thermo-chemical reclaiming process) ทำให้พันธะเชื่อมโยงภายในโครงสร้างโมเลกุลของยาง คือ พันธะระหว่างอะตอมกำมะถัน (S-S bonds) แตกตัวจากกัน ทำให้โครงสร้างโมเลกุลยางเปลี่ยนกลับเป็นสายโซ่ตรงหรือสายโซ่กิ่ง ซึ่งส่งผลให้ยางสามารถไหลได้ และสามารถใช้เป็นยางดิบในกระบวนการผลิตภัณฑ์ยางได้ใหม่ โดยอาจใช้ทดแทนยางวัตถุดิบบางส่วน หรือทดแทนทั้งหมด [12]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยาง (ก) ก่อนการรีเคลม และ (ข) หลังการรีเคลม [3]

### 2.2 ประเภทของยางรีเคลม

ยางรีเคลมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังต่อไปนี้ [13]

#### 1. Whole tire reclaims

ยางรีเคลมประเภทนี้ เป็นยางรีเคลมที่ผลิตจากส่วนที่เป็นยางล้อทั้งหมด ซึ่งมีองค์ประกอบของเนื้อยางร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก และอีกร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยเขม่าดำ สารตัวเติม และสารทำให้หนึบ โดยยางรีเคลมชนิดนี้มีปริมาณมากที่สุด เมื่อเทียบกับยางรีเคลมประเภทอื่น

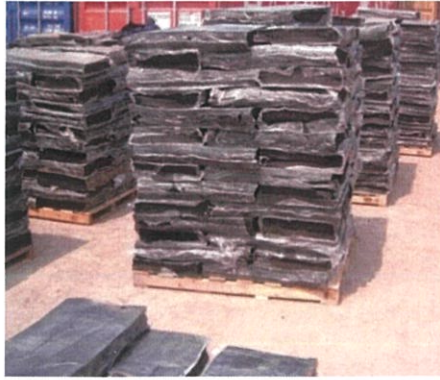
#### 2. Minimum staining reclaims

ยางรีเคลมประเภทนี้ เป็นยางรีเคลมที่มีความปนเปื้อนน้อยกว่า Whole tire reclaims เนื่องจากกระบวนการผลิตมีการคัดเลือกยางที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์สูง

#### 3. Drab and colored reclaims

ยางรีเคลมประเภทนี้ เป็นยางรีเคลมที่มีสีน้ำตาลอมเหลือง ผลิตจากเศษยางที่ผสมสารตัวเติมสีไม่ดำ โดยกระบวนการย่อย (Digester process)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



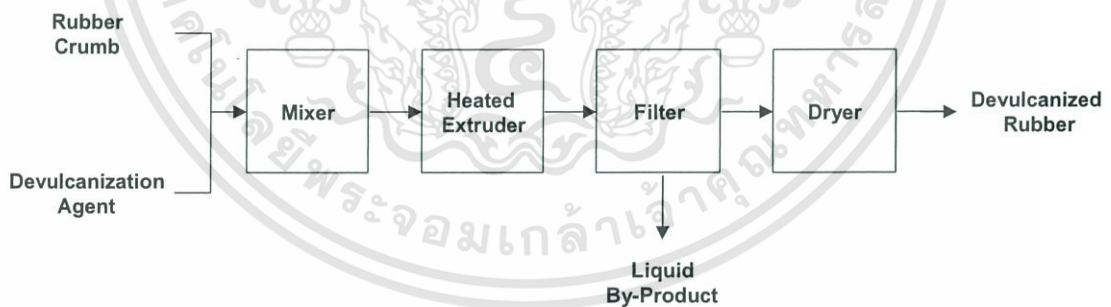
รูปที่ 2.2 ยางรีเคลมชนิดต่าง ๆ [14]

## 2.3 กระบวนการผลิตยางรีเคลม (Reclaiming process)

กระบวนการผลิตยางรีเคลม เป็นกระบวนการนำยางวัลคาไนซ์ (Vulcanized rubbers) มาผ่านกระบวนการดีวัลคาไนเซชันได้เป็นยางดีวัลคาไนซ์ (Devulcanized rubbers) หรือยางรีเคลม สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อน ทางเคมี หรือทางกล เพื่อสามารถผสมหรือกลับเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนเซชันได้อีกครั้ง โดยมีหลักการเบื้องต้นคือ การแตกหรือทำลายพันธะเคมีภายใน เช่น C-C, S-S สามารถแบ่งได้เป็น [15]

### 2.3.1 กระบวนการทางเคมี (Chemical process)

กระบวนการผลิตยางรีเคลมประเภทนี้ เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีในการดีวัลคาไนเซชันยาง ภายใต้อุณหภูมิ และความดันที่เหมาะสม ส่งผลให้พันธะภายในแตกตัว โดยส่วนใหญ่ กระบวนการนี้เป็นปฏิกิริยาแบบกะ (Batch process)

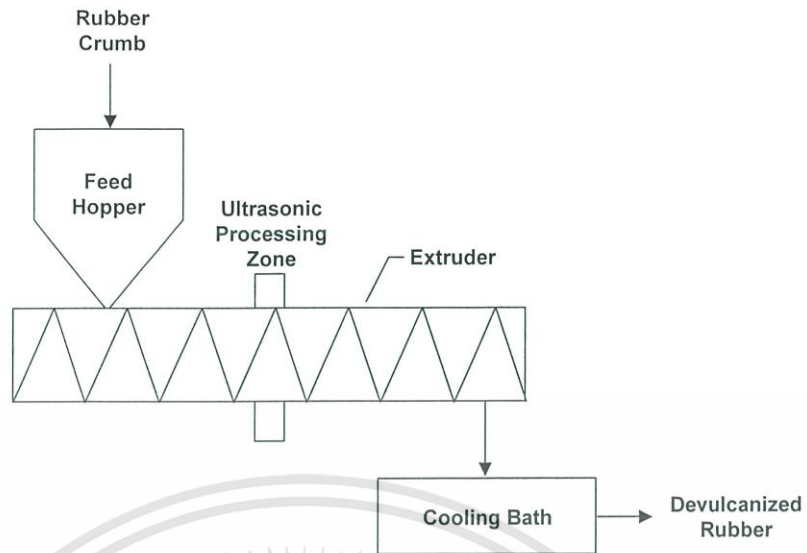


รูปที่ 2.3 การดีวัลคาไนเซชันโดยวิธีทางเคมี [15]

### 2.3.2 กระบวนการอัลตราโซนิก (Ultrasonic process)

กระบวนการผลิตยางรีเคลมประเภทนี้ เป็นกระบวนการที่เริ่มจากการเติมผงยางลงในฮอปเปอร์ (Hopper) ซึ่งมีกลไกในการพลิกชิ้นยางเข้าออก ทำให้เกิดความร้อน และทำให้ยางนิ่มลง ก่อนส่งเข้าสู่เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอน (Extruder) จากนั้นยางดังกล่าวจะได้รับพลังงานจากคลื่นอัลตราโซนิก โดยกระบวนการนี้เป็นปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องหรือแบบกะ

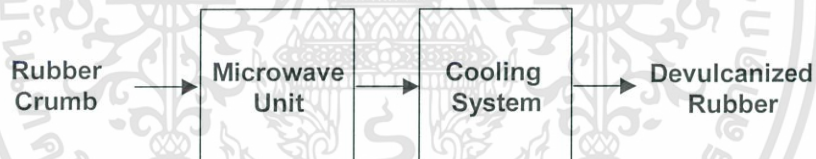
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การดีวัลคาไนเซชันโดยวิธีอัลตราโซนิก [15]

### 2.3.3 กระบวนการไมโครเวฟ (Microwave process)

กระบวนการผลิตยางรีเคลมประเภทนี้ เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟในการดีวัลคาไนเซชันยาง ซึ่งยางที่ใช้กระบวนการนี้ เป็นยางที่มีขี้สูง

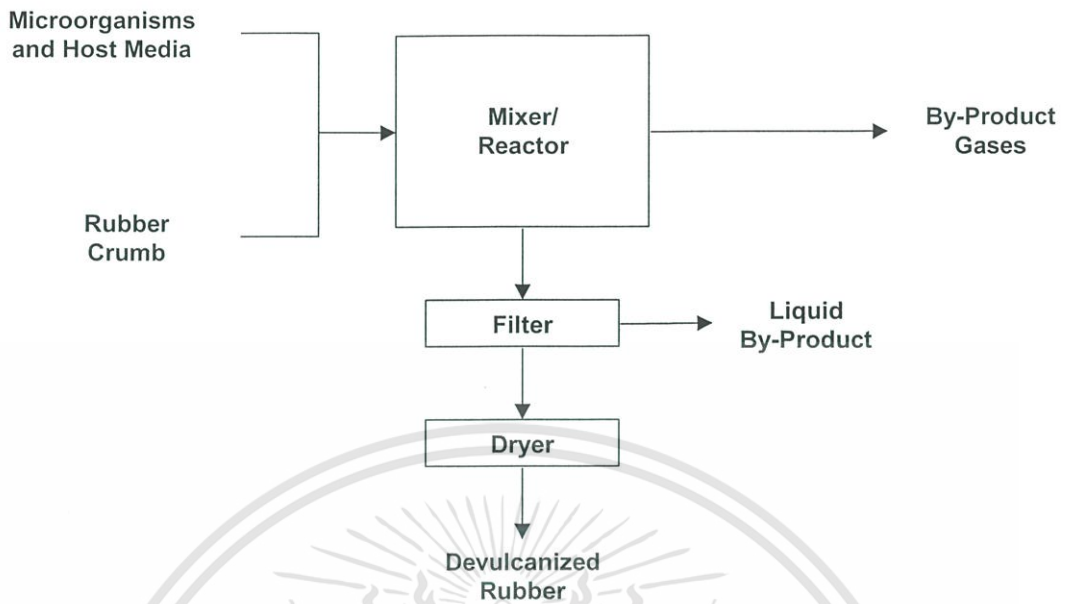


รูปที่ 2.5 การดีวัลคาไนเซชันโดยวิธีไมโครเวฟ [15]

### 2.3.4 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological process)

กระบวนการผลิตยางรีเคลมประเภทนี้ เป็นกระบวนการที่นำเชื้อจุลินทรีย์มาใช้ในการดีวัลคาไนเซชันยาง ภายใต้อุณหภูมิ และความดันที่เหมาะสม ส่วนใหญ่ใช้เวลาประมาณ 10-100 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การดีวัลคาไนเซชันโดยวิธีทางชีวภาพ [15]

## 2.4 การพัฒนากระบวนการรีเคลมในปัจจุบัน

### 2.4.1 กระบวนการทางชีววิทยาสำหรับการรีเคลมยาง

กระบวนการทางชีววิทยาสำหรับการรีเคลมยาง เป็นการนำยางวัลคาไนซ์ใส่ในสารแขวนลอยที่มีเชื้อจุลินทรีย์ *Chemolithiotrope* ขนาดไมโครเมตร ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่าย และมีความน่าสนใจ อาจจะได้ยางรีเคลมที่มีคุณภาพสูง นำไปสู่การใช้ยางรีไซเคิลในร้อยละที่มากขึ้น ผงยางถูกทดสอบกับเชื้อจุลินทรีย์หลายชนิดในถังปฏิกรณ์ในห้องปฏิบัติการ [16]

### 2.4.2 การทำยางรีเคลมโดยกระบวนการดีลิงค์ (De-link process)

การทำยางรีเคลมโดยกระบวนการดีลิงค์ เริ่มจากการนำผงยางมาเติมสารเคมีที่มีชื่อทางการค้าว่า ดีลิงค์ (De-link<sup>®</sup>) แล้วผสมในเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งหรือเครื่องแบนบิวรี (Banbury) ที่อุณหภูมิ 80-90°C ทำให้เกิดการดีวัลคาไนซ์ ซึ่งสารดีลิงค์สามารถใช้ในการดีวัลคาไนซ์ได้ทั้งเศษยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ โดยในปี ค.ศ. 1997 Kohler และคณะ ได้ทำการศึกษาการนำยางดีวัลคาไนซ์ (ผงยางผสมสารดีลิงค์) มาผสมกับยางธรรมชาติหรือยางสไตรีนบิวตะไดอิน ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 100°C แล้วเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติหรือยางสไตรีนบิวตะไดอินที่ไม่ผสมยางดีวัลคาไนซ์ พบว่าสมบัติของยางธรรมชาติหรือยางสไตรีนบิวตะไดอินที่ผสมกับยางดีวัลคาไนซ์ มีค่าความแข็งแรงดึง และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ใกล้เคียงกับยางที่ไม่ผสมยางดีวัลคาไนซ์ [16]

### 2.4.3 กระบวนการรีเคลมยางโดยใช้สารรีเคลมจำพวกไดซัลไฟด์

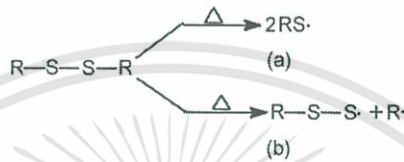
กระบวนการการดีวัลคาไนซ์ยางโดยใช้สารจำพวกไดซัลไฟด์ เป็นการนำยางเก่ามาบดในเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง และใส่สารจำพวกไดซัลไฟด์ลงไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบหลักของวิธีนี้ คือ ไดออลโลลไดซัลไฟด์ องค์ประกอบย่อย คือ ไดซัลไฟด์อื่น ๆ โมโนซัลไฟด์ พอลิซัลไฟด์ และสารประกอบไทออล ขอบเขตของการรีเคลมกำหนดโดยการวัดปริมาณ สารละลาย มวลโมเลกุลของสารที่ละลาย และความหนืดมูนี้ [17]

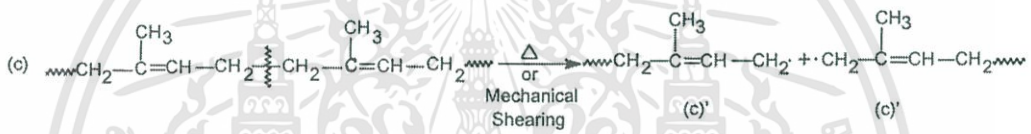
2.4.3.1 กลไกการรีเคลม

- ขั้นที่ 1 ให้ความร้อนเพื่อสลายพันธะก้ำะถันของสารรีเคลมไดซัลไฟด์
- ขั้นที่ 2 ให้ความร้อนหรือแรงเฉือนเชิงกลเพื่อทำลายสายโซ่พอลิเมอร์ให้สั้นลง
- ขั้นที่ 3 ให้ความร้อนเพื่อทำลายพันธะของก้ำะถัน
- ขั้นที่ 4 เกิดปฏิกิริยาคู่ขนานระหว่างสารรีเคลมไดซัลไฟด์กับสายโซ่พอลิเมอร์ที่สั้นลง

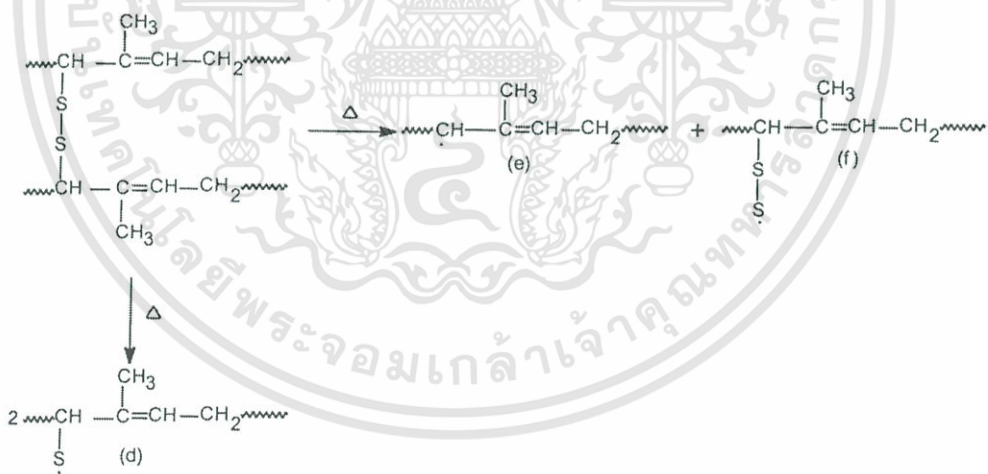
Step 1: thermal decomposition of the disulfide reclaiming agent



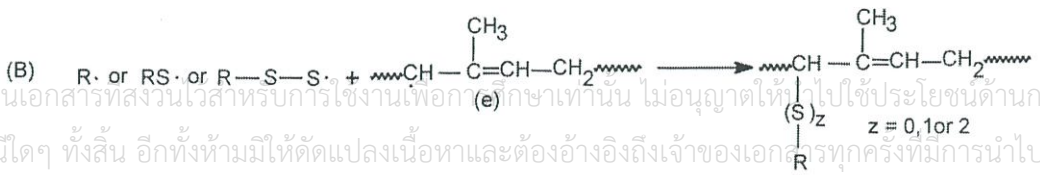
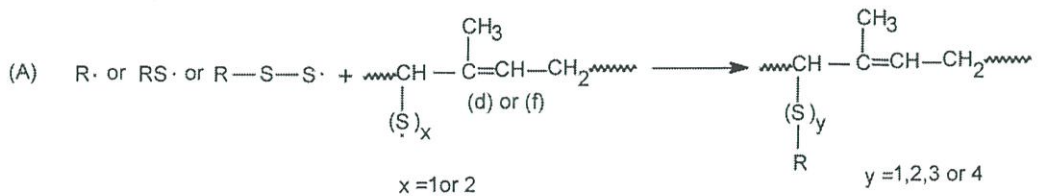
Step 2: depolymerization



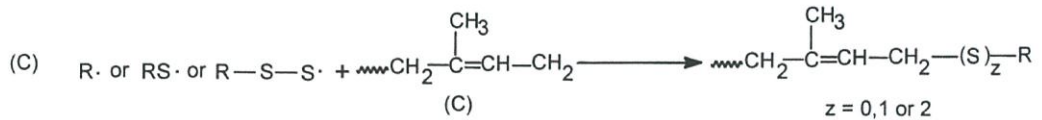
Step 3: thermal scission of sulfur crosslinks



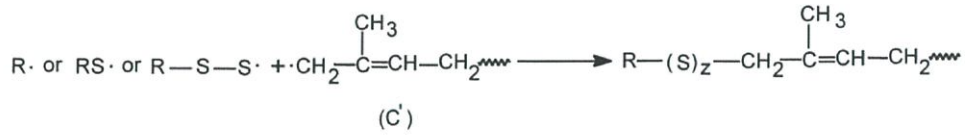
Step 4: radical coupling reaction



เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



or



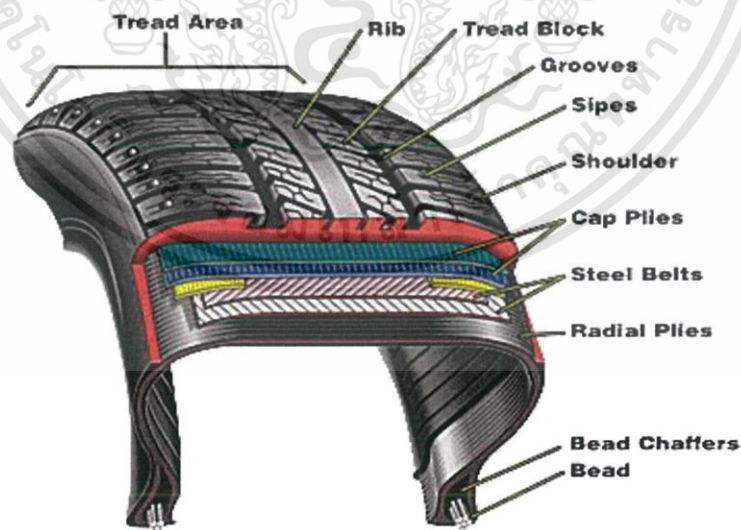
รูปที่ 2.7 กลไกการรีเคลมยาง [17]

## 2.5 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลม

ผลิตภัณฑ์ยางรีเคลมมีหลายชนิด หลายเกรด แตกต่างกันตามวัตถุดิบที่นำมาผลิต เช่น ส่งผลให้สมบัติของผลิตภัณฑ์ และการนำไปใช้แตกต่างกันที่ปริมาณเนื้อยาง (%Rubber content) ปริมาณเขม่าดำ (Carbon black) ฯลฯ โดยการผลิตรยางรีเคลมส่วนใหญ่ใช้วัตถุดิบจาก [12]

1. ผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตไม่ได้มาตรฐานหรือใช้งานไม่ได้แล้ว เช่น ยางรองพื้น รองเท้า ยางจุก ขวดนม ถูยางรั้ว ถูมือยางเสีย หนังสือยางวง ฯลฯ
2. ผลิตภัณฑ์ยางที่ผ่านการใช้งานแล้ว เช่น ยางรถยนต์ ยางรถบรรทุกที่ใช้หมดดอกแล้ว ถูมือแพทย์ ยางโน ฯลฯ

โดยยางรถยนต์ มีส่วนประกอบ ดังนี้ หน้ายางหรือเทรด (Tread) ยางด้านข้างหรือแก้มยาง (Sidewall) พลายหรือชั้นผ้าใบ (Ply หรือ Carcass) เบลท์หรือเข็มขัดยางรถยนต์ (Belt) บีดหรือขอบยาง (Bead) ยางชั้นใน (Inner liner)



รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของยางรถยนต์ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้ายาง อาจเรียกว่าดอกยาง เป็นชั้นนอกสุดของยางรถยนต์ที่สัมผัสกับพื้นถนนโดยตรง นิยมใช้ยางผสมระหว่างยางเอสปีอาร์ ยางธรรมชาติ และยางปีอาร์ เป็นองค์ประกอบของหน้ายาง โดยมีส่วนประกอบที่มียางธรรมชาติมากที่สุด เมื่อเทียบกับส่วนประกอบอื่น ๆ ของยางรถยนต์ ในอุตสาหกรรมจึงนิยมนำส่วนประกอบนี้มาใช้ในกระบวนการผลิตยางรีเคลม

3. ยางตาย (Over cure rubber) ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่ทำการผสม และนวดยาง คือ ยางที่จะสุกก่อน หากนำไปผ่านการขึ้นรูปในขั้นตอนต่อไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีปัญหาด้านคุณภาพ

4. ครีบบาง (Flash) หรือยางส่วนเกินจากกระบวนการผลิต ในขั้นตอนการขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์

5. ยางเม็ด ผงยางหรือยางผ่านการบดให้เป็นชิ้นเล็ก



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.9 วัสดุคืบในการผลิตยางรีเคลม (ก) ยางรถยนต์ และ (ข) ถุงมือยาง [19-20]

### 2.5.1 ผงยางรถยนต์ (GRT)

ผงยางเป็นวัสดุคืบที่ได้ระหว่างกระบวนการผลิตยางรีเคลม โดยผงยางที่ทำการผลิตส่วนใหญ่จะได้จากยางรถยนต์เสื่อมสภาพแล้ว และของเสียในกระบวนการผลิต

ผงยางหรือยางคริมม์ (Crumb rubbers) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำยางวัลคาไนซ์ผ่านกระบวนการบดโดยใช้เครื่องมือเชิงกลต่าง ๆ เช่น เครื่องแกรนูลเลเตอร์ (Granulator) เครื่องบดผงหรือพัลเวไรเซอร์ (Pulverizer) เครื่องบดหัวค้อน (Hammer mill) เครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ทั้งนี้การบดสามารถทำได้ทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่ำ โดยการบดยางสามารถทำได้ 2 วิธี คือ [21]

#### 2.5.1.1 การบดเชิงกล (Mechanical grinding)

การบดยางประเภทนี้ เป็นกระบวนการเปลี่ยนยางรถยนต์ให้เป็นผงยางรถยนต์ โดยการบดยางรถยนต์ให้เป็นผงที่อุณหภูมิห้อง กระบวนการบดแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน

**ขั้นที่หนึ่ง** การตัด (Shredding) ยางรถยนต์จะถูกตัดแยกออกตามองค์ประกอบของยาง จากนั้นจะตัดให้มีขนาดประมาณ 50x50 ตารางมิลลิเมตร ที่เรียกว่าเศษยางรถยนต์ และเศษยางเหล่านี้จะถูกบดให้มีขนาดน้อยกว่า 25 มิลลิเมตร ส่วนโลหะที่ผสมอยู่ในเศษยางถูกแยกออกโดยสายพานแม่เหล็กขณะลำเลียงเศษยางเข้าสู่ขั้นตอนการทำเม็ด

**ขั้นที่สอง** การแยก (Separation) ยางรถยนต์ที่ถูกตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ จะมีเส้นใยปริมาณมาก ซึ่งต้องแยกออก ถ้าไม่แยกออกจะมีการปนเปื้อนอยู่ในผงยางรถยนต์ ทำให้ผงยางรถยนต์เกิดพันธะที่ไม่ต้องการกับสารเหล่านั้นในระหว่างการนำไปใช้งาน

แม้ว่ากรรมวิธีทั้งสอง อีกทั้งที่นิยมใช้กันแต่สิ่งนี้และสิ่งอื่น ๆ ของเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่สาม การทำเม็ด (Granulation) ตัดเศษยางให้มีขนาด 6 มิลลิเมตร ด้วยใบมีดหมุนที่ออกแบบพิเศษ ส่วนโลหะ และเส้นใยที่เหลืออยู่จะถูกแยกออกอีกครั้ง โดยสายพานแม่เหล็ก และ Cyclonic fluff separator ตามลำดับ จากนั้นเศษยางรถยนต์จะถูกส่งเข้าสู่เครื่องตัดเม็ดเพื่อตัดให้มีขนาดประมาณ 1.7 มิลลิเมตร

### 2.5.1.2 การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding)

การบดยางประเภทนี้ เป็นกระบวนการบดยางรถยนต์โดยการนำเศษยางรถยนต์แช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ  $-195^{\circ}\text{C}$  จากนั้นบดด้วย Hammer mill และทำการแยกโลหะกับเส้นใยออกไปพร้อม ๆ กันด้วย ผงยางรถยนต์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีขนาดสม่ำเสมอมากกว่าผงยางรถยนต์ที่ได้จากการบดที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.10 ผงยางรถยนต์ [21]

โดยทั่วไปการบดที่อุณหภูมิต่ำจะเหมาะกับการผลิตผงยางที่มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ ผงยางที่ได้จะมีรูปร่างที่ไม่ระเบียบ และมีพื้นผิวขรุขระ หากต้องการผงยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง จำเป็นต้องนำไปผ่านการบดซ้ำหลาย ๆ รอบ ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ส่วนการบดที่อุณหภูมิต่ำนั้นเป็นวิธีการบดที่มีต้นทุนสูงเพราะต้องใช้ไนโตรเจนเหลวปริมาณมาก วิธีนี้เหมาะสำหรับการใช้การผลิตผงยางที่มีอนุภาคขนาดเล็กเท่านั้น ผงยางที่ได้จากการบดด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ ปัจจุบันได้มีการนำผงยางที่ได้จากการรีไซเคิลประยุกต์ใช้งานในหลากหลายรูปแบบ เช่น การนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยาง การนำไปใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในพลาสติก การนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางรีเคลม และยางเทอร์โมพลาสติก รวมถึงการนำไปประยุกต์ในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา

### 2.5.2 ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์

ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ มีขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ ซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอยู่หลายวิธี เช่น เทคนิคการเลี้ยวเบนแสง เทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และรูพรุนของอนุภาคด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ รวมถึงการร่อนผ่านตะแกรง เป็นต้น [22-23]

#### 2.5.2.1 การวิเคราะห์โดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis)

วิธีการวิเคราะห์ลักษณะนี้ เป็นวิธีการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของแข็งหรือความละเอียด (Fineness) โดยการร่อนของแข็งที่ทราบน้ำหนักผ่านชุดตะแกรงทดสอบ (Test sieves) ซึ่งมีค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่อง (Sieve) ขนาดต่าง ๆ กัน ซึ่งจัดเรียงตะแกรงตามลำดับช่องที่ต้องการ ตะแกรงเหล่านี้อาจติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหว [24]

Mesh เป็นค่าที่ใช้วัดขนาดอนุภาคของผงที่ลอดผ่านรูบนตะแกรง (ความกว้างของช่องตะแกรง) ซึ่งเป็นหน่วยประมาณจำนวนรูต่อพื้นที่ตะแกรง 1 ตารางนิ้ว ยิ่งค่า Mesh สูง ขนาดรูยิ่งเล็กลง หมายความว่าขนาดผงที่ผ่านมีขนาดผงเล็ก ถ้าขนาด Mesh น้อย ขนาดรูจะมีขนาดใหญ่ขึ้น หมายความว่าขนาดผงที่ผ่านมีขนาดผงใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบขนาดอนุภาคหน่วยเมช (Mesh) [25]

Mesh number	Microns	Millimeters
20	841	0.841
30	595	0.595
40	420	0.420
50	297	0.297
70	210	0.210
100	149	0.149
200	74	0.074
325	44	0.044
400	37	0.037

ของแข็งที่มีขนาดใหญ่เกินขนาด (Oversize) จะค้างอยู่บนตะแกรง ส่วนของแข็งที่เล็กเกินขนาด (Undersize) จะลอดผ่านช่องตะแกรงไปได้ การใช้เครื่องมือช่วยให้ตะแกรงเคลื่อนไหวหรือสั่น (Sieve shaker) จะช่วยให้การร่อนมีประสิทธิภาพดีขึ้น และใช้เวลาอันน้อยลง แต่จะต้องไม่ใช้ตัวอย่างมากเกินไปในการทดลองครั้งหนึ่ง ๆ เพราะอาจทำให้ของแข็งไปอุดตามช่อง หรืออาจทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต รวมถึงต้องไม่ให้ของแข็งรวมตัวเป็นก้อน และมีความชื้น [25-26]

## 2.6 สารเติมแต่งสำหรับยาง (Additives for rubber)

สารเติมแต่งสำหรับยาง หมายถึง สารเคมีต่าง ๆ ที่ผสมลงไปนยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามที่ต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีจะนำไปใช้งานได้เมื่อสารเคมีเหล่านี้ได้ทำปฏิกิริยากับยางแล้ว โดยสามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางไม่คงรูป (Green compounds หรือ Uncured compounds) ส่วนยางที่ทำปฏิกิริยากับยางแล้ว เรียกว่า ยางคงรูป (Vulcanized rubbers หรือ Cured rubbers)

จุดประสงค์ของการเติมสารเคมีลงไปในยางเพื่อทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ได้แก่

1. เพื่อให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น เช่น ในขั้นตอนการผสมยางกับสารเคมี และการขึ้นรูปยาง เป็นต้น

2. เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตรงตามความต้องการ

3. เพื่อลดต้นทุนในการผลิต เนื่องจากสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) บางชนิดมีราคาถูกกว่ายางมาก จึงเติมลงไปเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเนาไปเซปรีเซชันดานการค้ำ  
ไม่ว่ากรณใด ๆ ทังสิน อักทังห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคมีที่ใช้สำหรับการผลิตวัสดุสำเร็จรูปยางหรือผลิตภัณฑ์ยาง แบ่งตามลักษณะการใช้งาน ได้ดังนี้ [27-30]

## 2.6.1 สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agents หรือ Curing agents)

สารทำให้ยางคงรูป คือ สารเคมีสำหรับผสมในยางเพื่อทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติ ตรงตำแหน่งที่วงไวต่อปฏิกิริยา เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้น ทำให้ยางอยู่ในสถานะที่ยืดหยุ่นได้สูง หรืออาจใช้คำว่า “คงรูป” หรือตามโรงงานเรียกว่า “ยางสุก” โดยถือว่าเป็นสารเคมีที่สำคัญที่สุดในการทำผลิตภัณฑ์ยาง ระบบการคงรูปใช้สารเคมีแบ่งออกเป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ ได้แก่

### 2.6.1.1 ระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur Vulcanization System)

ระบบเชื่อมโยงประเภทนี้ เป็นระบบที่นิยมที่สุดสำหรับยางส่วนใหญ่ที่ไม่อิมตัว มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลสูง (High-diene) เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางไอโซพรีน (IR) ยางสไตรีน-บิวตะไดอิน (SBR) ฯลฯ จึงวงไวต่อการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur, S) เนื่องจากกำมะถันมีราคาถูก ละลายได้ดีในยาง โดยใช้ร่วมกับสารเร่ง (Accelerators) และสารกระตุ้น (Activators) ได้แก่ กรดสเตียริก และซิงค์ออกไซด์ (Stearic acid/ZnO)

#### 1. กำมะถัน (Sulfur)

กำมะถันสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้ดีกับยางที่ไม่อิมตัว มีพันธะคู่ และมีอะตอมของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งอะลิลิก (Allylic hydrogen) หรือตำแหน่งคาร์บอนที่ถัดจากพันธะคู่ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่วงไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ยางที่มี Allylic hydrogen มากก็จะเชื่อมโยงด้วยกำมะถันได้วงไวกว่ายางที่มี Allylic hydrogens น้อย โดยในปัจจุบันใช้กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยงในอุตสาหกรรมสามารถจำแนกได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

1.1 ระบบการเชื่อมโยงแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization, CV) เป็นระบบการเชื่อมโยงกำมะถันที่ใช้ทั่วไปแบบเดิมคือ ใช้กำมะถันปริมาณมาก และใช้สารเร่งปริมาณน้อย ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงกำมะถันหลายอะตอม หรือพอลิซัลไฟดิก (Polysulfidic linkage) ซึ่งพันธะระหว่างอะตอมของกำมะถัน (S-S bond) เป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง สามารถถูกทำลายได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนหรือแรงกระทำ

1.2 ระบบการเชื่อมโยงแบบมีประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization, EV) เป็นระบบการเชื่อมโยงที่ใช้กำมะถันปริมาณน้อย และใช้สารเร่งปริมาณมาก หรือใช้สารเร่งชนิดให้กำมะถัน (Sulfur-donor accelerators) ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบกำมะถันอะตอมเดี่ยวหรือโมโนซัลไฟดิก (Monosulfidic linkage) จำนวนมาก ซึ่งพันธะระหว่างอะตอมของกำมะถันกับคาร์บอน (C-S bond) เป็นพันธะที่แข็งแรง และมีความเสถียรสูง ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงหรือรูปร่างถาวรต่ำ และมีความเสถียรภาพทางความร้อนสูง

1.3 ระบบการเชื่อมโยงแบบมีกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficient vulcanization, Semi-EV) ระบบนี้จะใช้ปริมาณกำมะถันต่อสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอยู่ระหว่างทั้งสองระบบคือ CV และ EV ทำให้ได้ยางที่มีสมบัติหลังจากการเชื่อมโยงและต้นทุนการผลิตอยู่ระหว่างกลางของสองระบบแรก

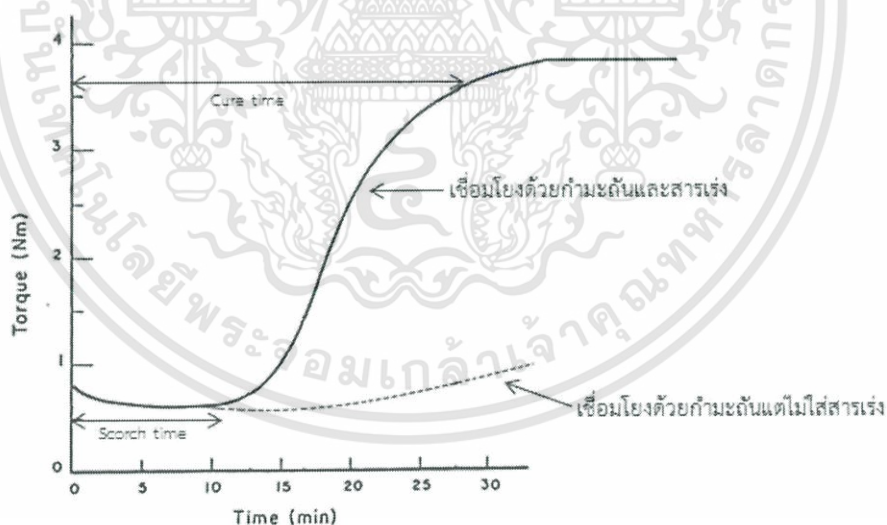
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบปริมาณกำมะถัน และสารเร่งที่ใช้ในระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันแบบต่าง ๆ [28]

ระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน	ปริมาณกำมะถัน (phr)	ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (phr)	ชนิดของพันธะเชื่อมโยง
แบบดั้งเดิม (CV)	1.5 - 3.5	0.4 - 1.0	พอลิซัลไฟดิก
แบบกึ่งประสิทธิภาพหรือเซมิอีวี (Semi-EV)	0.5 - 1.5	1.0 - 2.5	พอลิซัลไฟดิกผสมกับโมโนซัลไฟดิก
แบบมีประสิทธิภาพหรืออีวี (EV)	0 - 0.5	2.5 - 6.0	โมโนซัลไฟดิก

## 2. สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง คือ สารที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Crosslinking rate) เร็วขึ้น ทำให้เวลาเชื่อมโยง (Cure time) เร็วขึ้น การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กำมะถันปริมาณน้อยลง ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน เพราะปฏิกิริยาระหว่างกำมะถัน และยางจะเกิดขึ้นได้ช้ามากแม้อุณหภูมิสูง ๆ



รูปที่ 2.11 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยงแบบ ไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง และใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

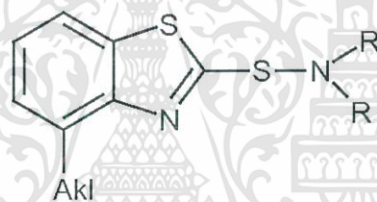
## 2.1 ชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง

การใช้งานสารเร่งในอุตสาหกรรมยาง อาจใช้สารเร่งมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าจะเป็นสารเร่งหลักหรือ “สารเร่งปฐมภูมิ” (Primary accelerators) ส่วนสารเร่งที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่าเป็น “สารเร่งทุติยภูมิ” (Secondary accelerators) หรือคิกเกอร์ (Kickers) โดยสารเร่งทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาเสริมกันที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์ซินเนยจิสติก” (Synergistic effects) ทำให้ได้อัตราการเชื่อมโยงที่มากกว่าสารเร่งแต่ละชนิดรวมกัน สารเร่งปฏิกิริยาแบ่งได้หลายชนิด เช่น

### 2.1.1 สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides)

สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ เป็นสารเร่งชนิด Delay-action accelerators หรือเริ่มเกิดการเชื่อมโยง (Scorch) ช้าเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ทำให้มีเวลาเพียงพอในการเชื่อมโยง นิยมใช้กับยางที่ต้องใช้เวลาผสมหรือขึ้นรูปนาน เนื่องจากหมู่อัลคิล (R) ในโครงสร้างเป็นหมู่ใหญ่ (Bulky) ให้โปรตอน ( $H^+$ ) ช่วยหน่วงให้จุดเริ่มการเชื่อมโยงช้า ให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง หรือเวลาสกอร์ช (Scorch time) นาน ซัลเฟนาไมด์ชนิดที่นิยม ได้แก่

- CBS (N-cyclohexyl benzothiazole-2-sulfenamide)
- TBBS (N-tert-butyl-2-benzothiazolesulfenamide)



รูปที่ 2.12 โครงสร้างกลุ่มซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides) [32]

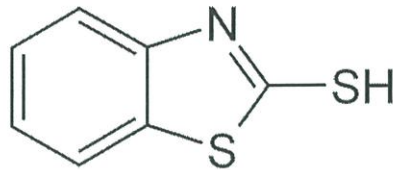
### 2.1.2 สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มไทเอโซล (Thiazoles)

สารเร่งปฏิกิริยาไทเอโซลเป็นสารเร่งที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม เนื่องจากราคาไม่แพง และยังทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วอีกด้วย ไทเอโซลที่นิยมใช้ ได้แก่

- MBT (2-Mercaptobenzothiazole)
- MBTS (Mercaptobenzothiazole disulfide)

สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ใช้ได้กับยางแทบทุกประเภท ทำให้ยางมีอัตราเร็วในการเชื่อมโยงปานกลาง และยางเชื่อมโยงที่ได้ก็จะมีสมบัติเชิงกลที่ดี และมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพสูง โดย MBT ทำให้ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้เร็วกว่า MBTS เพราะ MBTS ต้องแตกตัวด้วยความร้อนเป็น MBT ก่อนจึงจะสามารถเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้ ดังนั้น MBTS จึงทำให้ยางมีความปลอดภัยในการขึ้นรูปสูงกว่า แต่ยางจะมีอัตราการเชื่อมโยงที่สูงกว่าคือ MBT ซึ่งทั้ง MBT และ MBTS เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ว่าการใช้สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้เพียงอย่างเดียวอาจให้ยางเชื่อมโยงที่ได้มีความหนาแน่นในการเชื่อมโยงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 โครงสร้างกลุ่มไทอะโซล (Thiazoles) [33]

## 2.2 ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการเลือกสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง

- เวลาที่จะต้องให้ยางผสมสูตรเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) ขึ้นกับเวลาที่ต้องการใช้ในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง ถ้าต้องใช้เวลานานในการขึ้นรูปควรใช้กลุ่มที่มี Scorch time นาน เช่น Delayed-action accelerator ถ้าใช้เวลาสั้นในการขึ้นรูปควรใช้กลุ่มตัวเร่งเร็วยิ่งยวด (Ultra accelerator)

- อัตราเร็วของการเชื่อมโยงหลังเวลาเริ่มเชื่อมโยง หรือดัชนีอัตราเร็วเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI)

- องศาการเชื่อมโยง และชนิดของพันธะเชื่อมโยงที่เกิด

- ปัจจัยอื่น ๆ เช่น เสถียรภาพของสารผสมสูตรก่อนเชื่อมโยง ความยากง่ายในการเกิดบลูม (Blooming)

## 2.3 หลักในการใช้งานสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง

- เนื่องจากสารเร่งใช้ในปริมาณน้อย โดยมากเป็นผงของแข็ง จึงควรหลีกเลี่ยงการสูญเสียสารเร่งขณะผสม อาจใช้งานในรูปของเม็ดหรือมาสเตอร์แบตช์ (Masterbatch) หรือใส่ไปพร้อมกับวัสดุนำพาอื่น ๆ (Carrier materials)

- ในการผสมหรือคอมปาวด์ยาง ควรใส่สารเร่งลำดับหลัง เพื่อหลีกเลี่ยงการเชื่อมโยงก่อนเวลา และยังคงการสูญเสียกลายเป็นไอของสารเร่ง

- การใส่สารเร่งปริมาณมากเกินไป อาจทำให้ความสามารถในการละลายของสารเร่ง และกัมมะถันเกินจุดอิ่มตัว ส่งผลให้เกิดการบลูม หรือการแพร่ออกของสารเร่ง และกัมมะถันมาสะสมที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ยาง

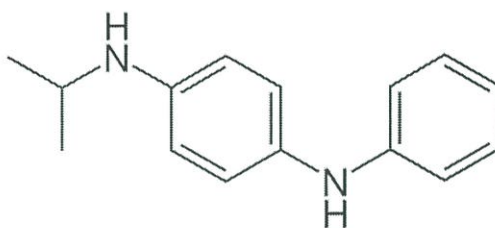
## 3. สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอีกทีหนึ่ง สารกระตุ้นที่นิยมมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับกรดสเตียริก (ZnO/Stearic acid) เนื่องจากมีราคาไม่แพง และประสิทธิภาพสูงในการทำงาน

## 4. สารป้องกันยางเสื่อม (Antidegradants)

สารป้องกันยางเสื่อม เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางทั่วไป โดยเฉพาะยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ จะมีพันธะคู่อยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นยางจึงมีสภาพที่อ่อนแอต่อการถูกปัจจัยต่าง ๆ เช่น โอโซน แสงแดด และออกซิเจน จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างของสารในกลุ่มป้องกันยางเสื่อมสภาพ ได้แก่ N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylene diamine (IPPD), 2,6-Di-tert-Butyl-p-cresol (BHT) เป็น

เอกสารต้น เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



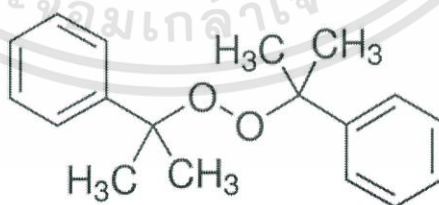
รูปที่ 2.14 โครงสร้างกลุ่มสารป้องกันยางเสื่อม [34]

### 2.6.1.2 ระบบเชื่อมโยงด้วยสารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน (Sulfur donor vulcanization system)

ระบบเชื่อมโยงประเภทนี้ เป็นการใช้สารที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ และสลายให้กำมะถันที่อุณหภูมิของการคงรูป สารกลุ่มนี้ ได้แก่ Tetramethyl thiuram disulfide (TMTD), Dimorpholine disulfide หรือ Dithiodimorpholine (DTDM), Dipentamethylene thiuram tetrasulfide (DPTT) โดยสารประกอบพวกนี้เป็นสารเชื่อมโยง มีข้อดีคือ ลดปัญหาการเกิดการบลูม และเนื่องจากปฏิกิริยาจะไม่เกิดจนกว่ากำมะถันจะสลายตัวออกมา ดังนั้นจึงลดปัญหาการเกิดยางตาย สารพวกนี้ยังก่อให้เกิดพันธะเคมีแบบ Monosulfidic เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากความร้อนได้ดีมาก

### 2.6.1.3 ระบบเชื่อมโยงด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization system)

ระบบเชื่อมโยงประเภทนี้ เกิดจากการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free radicals) เมื่อให้ความร้อนสูงขณะเชื่อมโยง อนุมูลอิสระบนสายโซ่มาเจอกัน เกิดเป็นพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C-C bonds) เชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ ซึ่งมีพลังงานพันธะสูง มีความเสถียรต่อความร้อน และแรงกระทำ ระบบการเชื่อมโยงนี้สามารถใช้ได้ทั้งยางที่อิมตัว และไม่อิมตัว นิยมใช้โดยเฉพาะยางอิมตัวที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยง แต่ระบบนี้ต้องทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อมโยง (Post cure) ซึ่งเสียเวลา และเพิ่มต้นทุนการผลิต สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่นิยมมากที่สุดคือ Dicumyl peroxide (DCP)



รูปที่ 2.15 โครงสร้างกลุ่มเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) [35]

## 2.6.2 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมเป็นสารที่ผสมกับยางเพื่อช่วยเสริมแรง (Reinforcement) ให้ผลิตภัณฑ์ยาง หรือ ช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงจะเรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcing fillers) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ได้แก่ ผงเขม่าดำ (Carbon black) เกรดต่าง ๆ ไม่ว่าจะกรมใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเม็ดดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผงเขม่าขาวหรือซิลิกา เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (Inert fillers or Non-reinforcing fillers) แต่นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (Clay) แแบ่ง แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

### 2.6.3 สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารกลุ่มนี้ทำหน้าที่เฉพาะตัวต่าง ๆ กัน เช่น สารที่ช่วยให้ยางนึ่มในกระบวนการบดผสม ได้แก่ พกน้ำมัน (Oils) และสารเคมีที่ย่อยยาง (Peptizer) เช่น Pepton 22 สารบางตัวช่วยควบคุมไม่ให้ยางมีความหยุ่นตัว (Nerve) สูงมากเกินไปเพราะจะทำให้สารเคมีที่เป็นผงเข้าเนื้ออย่างได้ยากในระหว่างการบดผสม เพราะยางจะพันลูกกลิ้งยาก สารจำพวกนี้ ได้แก่ Factice เป็นต้น

### 2.6.4 ทรานส์พอลิโอคเตนเมอร์ (Trans-polyoctenamer, TOR)



รูปที่ 2.16 Trans-polyoctenamer (TOR) [36]

Trans-polyoctenamer (TOR) หรือชื่อทางการค้า คือ Vestenamer<sup>®</sup> เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึก ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่ง (Additive) ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนของแข็งที่มีความเป็นผลึก (Crystallinity) จุดหลอมเหลวต่ำ (<60°C) เมื่อหลอมแล้ว มีความหนืดต่ำ (Mooney viscosity <10) ที่สำคัญคือมีพันธะคู่ทุก ๆ 8 อะตอมคาร์บอน สามารถใช้เป็นสารเพิ่มการทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ผ่านปฏิกิริยาที่ตำแหน่งไฮโดรเจนอะลาติกที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาผ่านอนุมูลอิสระ (Free radicals) ขณะขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางส่งเสริมให้สมบัติเชิงกลของยางดีขึ้น [37-40]

#### 2.6.4.1 เกรด และสมบัติของ Vestenamer<sup>®</sup> มี 2 เกรด ได้แก่

Vestenamer<sup>®</sup> ที่นิยมใช้ มี 2 เกรด ได้แก่ Vestenamer<sup>®</sup> 6213 และ Vestenamer<sup>®</sup> 8012 โดยสมบัติของ Vestenamer<sup>®</sup> สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 และตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Property	Method	Unit	Value
Molecular weight, Mw	GPC	-	90,000
Glas transition temperature, Tg	ISO 6721	°C	-65
Crystallinity at 23 °C	DSC (2nd heating)	%	-30
Melting point	DSC (2nd heating)	°C	54
Thermal degradation	TGA	°C	275
Cis/trans ratio of double bonds	IR	%	20:80
Mooney viscosity ML (1+4) 100 °C	DIN 53 523	-	<10
Viscosity number J/23 °C	ISO 1628-1	ml/g	120
Ash content	DIN 53 568, part 1	%	max 0.1
Volatile substances (1h/105 °C)	DIN 53 526 ISO 248	%	max 0.5
Density	DIN 53 479 A	g/cm <sup>3</sup>	0.91
Melt viscosity MVR 190/2.16	ISO 1133	m <sup>3</sup> /10 min	18
Melt viscosity MVR 190/5	ISO 1133	m <sup>3</sup> /10 min	50
Melt viscosity MVR 230/2.16	ISO 1133	m <sup>3</sup> /10 min	28
Melt viscosity MVR 230/5	ISO 1133	m <sup>3</sup> /10 min	78
Stress at yield	ISO 527	MPa	7.5
Strain at yield	ISO 527	%	25
Stress at break	ISO 527	MPa	8.5
Strain at break	ISO 527	%	400
CHARPY impact strength -20 °C	ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	N
Tensile strength 23°C	ISO 8256	kJ/m <sup>2</sup>	164
Tensile strength 0 °C	ISO 8256	kJ/m <sup>2</sup>	190
Tensile strength -20 °C	ISO 8256	kJ/m <sup>2</sup>	240
IZOD notched impact strength 23 °C	ISO 180/1 A	kJ/m <sup>2</sup>	N
IZOD notched impact strength 0 °C	ISO 180/1 A	kJ/m <sup>2</sup>	22
IZOD notched impact strength -20 °C	ISO 180/1 A	kJ/m <sup>2</sup>	19

N = no break

รูปที่ 2.17 สมบัติโดยรวมของ Vestenamer<sup>®</sup> [36]

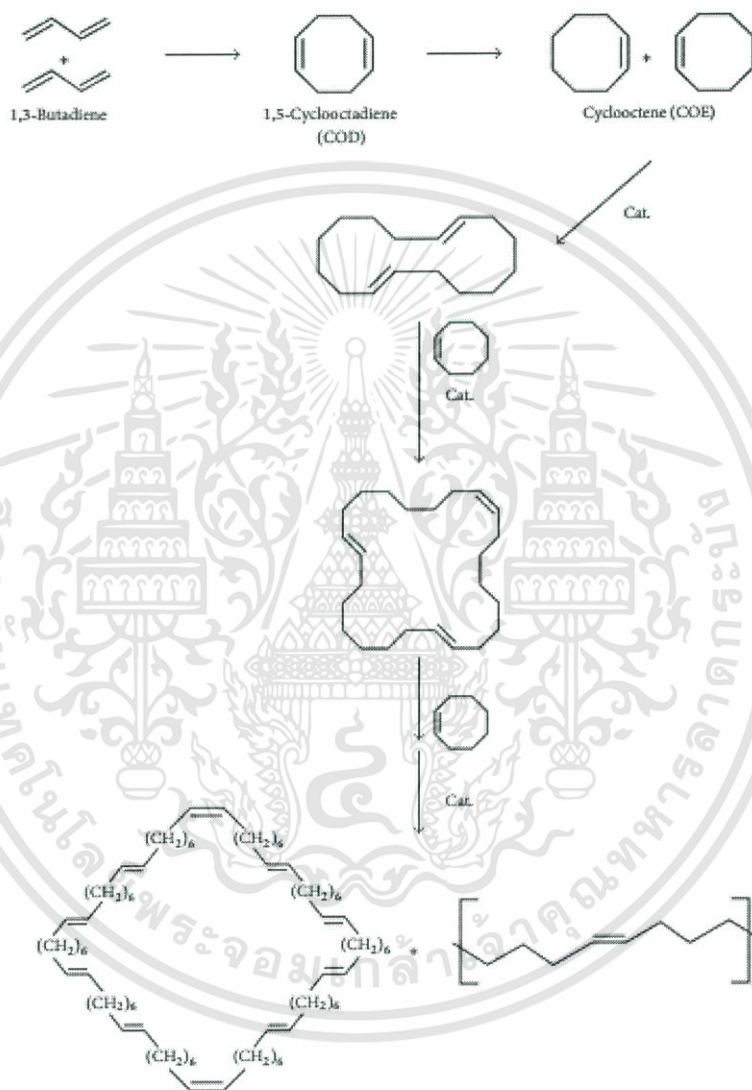
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบสมบัติของ Vestenamer [41]

สมบัติ	Vestenamer <sup>®</sup> 6213	Vestenamer <sup>®</sup> 8012
น้ำหนักมวลดโดยน้ำหนัก	75000	95000
จุดหลอมเหลว	< 36°C	54 ± 4°C
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว	-75°C	-65°C
ความเป็นผลึก ที่ 23 °C	10%	30%
อัตราส่วนความเป็น cis/trans	40:60	20:80
ความถ่วงจำเพาะ ที่ 20 °C	0.89	0.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.4.2 การสังเคราะห์ Vestenamer®

ในการสังเคราะห์ เริ่มจากการเปิดวง Metathesis polymerization ของ 1,5-Cyclooctadiene ที่มาจาก Monomer คือ 1,3- Butadiene ได้เป็น Cyclooctene ซึ่งเป็นสารตัวกลาง โดย Cyclooctene polymerized ต่อได้เป็น trans-polyoctenamer (TOR) ได้ทั้งโมเลกุลเชิงเส้น (Linear) และโมเลกุลที่เป็นวง (Cyclic macromolecules) โดย cis/trans ratio เป็นสิ่งที่บอกถึงองค์ความเป็นผลึก ถ้าปริมาณของ trans เพิ่มขึ้น ความเป็นผลึกก็จะมากขึ้น ส่งผลให้จุดหลอมเหลวสูงขึ้น [42]

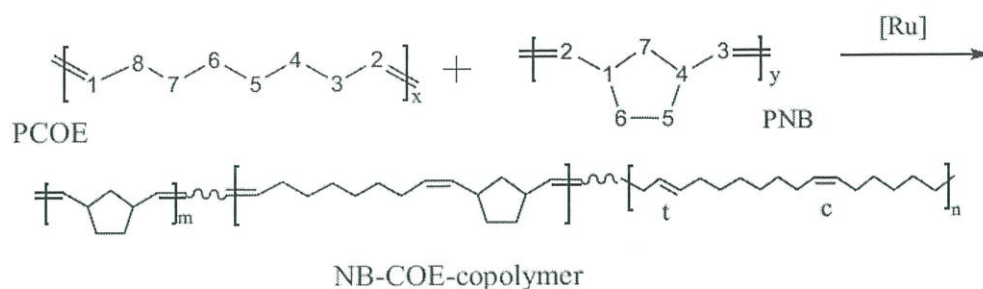


รูปที่ 2.18 กลไกการสังเคราะห์ Vestenamer® [42]

### 2.6.4.3 การใช้งาน Vestenamer®

Vestenamer® สามารถผสมกับยางเสียเพื่อใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น ถนนข้ามทางรถไฟ วัสดุผิวพื้น เป็นต้น โดย Vestenamer® ทำหน้าที่เป็นสารช่วยยึด (Binder) ให้อนุภาคของยางจับกัน เนื่องจากอนุภาคของยางเสียมิขนาดเล็กลง ส่งผลให้ยึดติดกันไม่ค่อยดี รวมถึงทำหน้าที่เป็นช่วยเอกสารให้สารตัวเติมต่าง ๆ กระจายตัวได้ดี สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง และสารช่วยให้กระบวนการผลิตดีค่าไม่ว่าขึ้น [43-45] ดังนั้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการทำปฏิกิริยาของ Vestenamer<sup>®</sup> กับพอลิเมอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การทำปฏิกิริยาระหว่าง Polyoctenamer (Poly(1-octenylene), PCOE) และ Polynorbornene (Poly(1,3-cyclopentylenevinylene), PNB) [46]

### 2.6.5 สารกลุ่มอื่น ๆ (Miscellaneous ingredients)

สารกลุ่มนี้โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องใช้ในการออกสูตร แต่ในบางกรณีที่ต้องการให้ยางมีสมบัติพิเศษ บางประการจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีบางตัวเข้าช่วย

- สารหน่วง (Retarders) จะใช้เมื่อต้องการชะลอไม่ให้อย่างที่กำลังบดผสมคงรูปเสียก่อน หรือที่เรียกว่า ยางตาย ตัวอย่างของสารหน่วง ได้แก่ Benzoic acid หรือ Salicylic acid เป็นต้น
- สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents) ใช้สำหรับการทำให้อย่างฟูในการทำยางพองน้ำ ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ ได้แก่ Sodium bicarbonate หรือ Dinitrosopentamethylene tetramine เป็นต้น
- สารทำให้เกิดสี (Pigments) อาจเป็นสีอินทรีย์ เช่น Cadmium sulfide (ให้สีแดงเข้ม ส้ม และเหลือง) Chromium oxide (ให้สีเขียวขุ่น) และ Titanium dioxide (ให้ยางมีสีขาว มีความสว่าง หรือช่วยให้ยางสีต่าง ๆ มีสีที่สดขึ้น) ส่วนสีที่เป็นสีอินทรีย์จะให้สีสด ทนต่อความร้อนได้ดีกว่าสีอินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 หน้าที่ของสารเคมีต่าง ๆ [27-28]

สารเคมี	สมบัติ
สารเชื่อมโยง (Curing agents)	เปลี่ยนโครงสร้างยางจากสายโซ่ตรงเป็นสายโซ่กิ่ง
สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accerators)	ช่วยสารเชื่อมโยงให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยลดเวลาในการเชื่อมโยง
สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators)	ช่วยสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ
สารตัวเติม (Fillers)	ลดต้นทุน และช่วยเสริมแรง (ขึ้นกับชนิดของสารตัวเติมนั้น ๆ)
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antigradants)	ป้องกันยางเสื่อมสภาพ อันเนื่องมาจากออกซิเจนและโอโซน
สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids)	ช่วยในการผสม และขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ง่ายขึ้น
สารหล่อลื่น (Lubricants)	ช่วยหล่อลื่น และลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ
พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers)	สารเพิ่มความนิ่ม ช่วยทำให้ยางนิ่ม และลดความแข็ง
สารหน่วง (Retarders)	ป้องกันไม่ให้อยางเชื่อมโยงก่อนเวลาอันควร (Scorch) หรือยางตาย

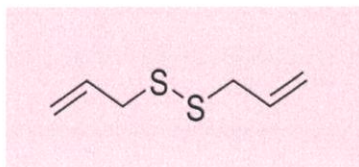
## 2.7 สารรีเคลม (Reclaiming agents)

สารรีเคลม คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่ตัดการเชื่อมโยงสายโซ่กัมมันต์ในเนื้อยาง ทำให้ยางเปลี่ยนจากโครงสร้างร่างแหสามมิติหรือเทอร์โมเซต เป็นสายโซ่ตรงหรือเทอร์โมพลาสติก เพื่อนำยางที่ผ่านการตัดสายโซ่แล้วไปทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่อีกครั้ง สารรีเคลมที่ใช้มีหลายชนิด ตัวอย่างเช่น Dixylene disulfide หรืออีกชื่อหนึ่งคือ Diaryl disulfide (DADS) ทำหน้าที่เป็นสารรีเคลมในการผลิตยางรีเคลม ซึ่งสามารถตัดการเชื่อมโยงของยางได้ทั้งยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ [47]

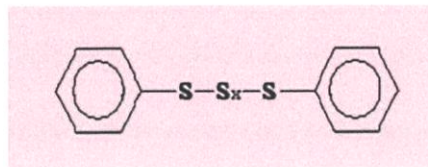
ข้อดีของ Dixylene disulfide คือ ทำการตัดการเชื่อมโยงได้รวดเร็วมาก และทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ประหยัดพลังงาน และเวลาในกระบวนการผลิต ซึ่งมีสมบัติ ดังนี้

ลักษณะ	: เป็นของเหลว
สี	: น้ำตาลเข้ม
กลิ่น	: ลักษณะเฉพาะตัว
อันตรายของการระเบิด	: ไม่เป็นอันตรายจากการระเบิด
ความสามารถในการผสมกับน้ำ	: ไม่ผสมกับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.20 โครงสร้างของสารรีเคลม (ก) ไทเอริลไดซัลไฟด์ และ (ข) ไดฟีนิลไดซัลไฟด์ [47]

## 2.8 การผสมยาง (Rubber Compounding)

### 2.8.1 เครื่องผสมยางแบบกะ (Batch mixer)

#### 2.8.1.1 เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง

เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้งเป็นเครื่องผสมระบบเปิด ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก เรียงตัวในแนวขนานกัน หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วต่างกัน ทำให้เกิดแรงเฉือนที่จำเป็นต่อการบดผสมยางกับสารเคมียาง ในการผสมยางกับสารเคมียางจะใส่ยางลงช่องระหว่างลูกกลิ้ง ยางจะถูกรีดออกมาเป็นแผ่นรอบลูกกลิ้งด้านหน้า จากนั้นจึงเติมสารเคมียางลงไป โดยผู้ผสมต้องทำการกรีดยางแผ่นและพับไปมาในขณะที่เติม ซึ่งยางที่ถูกตัดพับจะถูกใส่กลับไปยังช่องระหว่างลูกกลิ้ง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะช่วยให้สารเคมีต่าง ๆ กระจายตัวเข้ากับเนื้อยางได้ดี เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้งใช้ผสมยางในปริมาณไม่มาก เนื่องจากต้องใช้ความชำนาญ และกำลังคนในการผสม



รูปที่ 2.21 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง [48]

#### 2.8.1.2 เครื่องผสมระบบปิดแบบบูรี (Banbury internal mixer)

โดยทั่วไปเครื่องผสมระบบปิดมีองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ ห้องผสม (Chamber) ตัวบดผสมหรือโรเตอร์ (Rotor) แท่งกดหรือแรม (Ram) และระบบหล่อเย็น (Cooling system) เครื่องผสมระบบปิดให้ประสิทธิภาพ และความเร็วในการผสมมากกว่าการใช้เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง เพราะสารเคมีไม่ฟุ้งกระจายระหว่างการผสม ลดการสูญเสียสารเคมีขณะผสม และลด

การผิดพลาด เนื่องจากการใช้แรงงานคนในการผสมสามารถผสมยางกับสารเคมีได้ในปริมาณสูง เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูเชิงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ลบออกแต่ไหนไปใช้ประโยชน์ทางการค้า 50-100 กิโลกรัม ลักษณะของโรเตอร์ของเครื่องผสมระบบนี้จะมีรีซีมการหมุนของโรเตอร์ทั้งสองไม่ ไม่ว่าจะเป็นใครๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

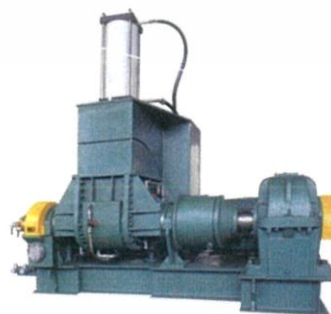
คาบเกี่ยวกัน หรือที่เรียกว่า “Non-interlocking หรือ Non-intermeshing” ซึ่งหมุนด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกันขึ้นกับรุ่นของเครื่อง การทำงานของเครื่องผสมเพื่อให้เกิดการผสมคลุกเคล้าของยางกับสารเคมี ส่วนใหญ่จะมาจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างปีกของโรเตอร์กับผนังของห้องผสมยาง และสารเคมีจะถูกบีบผนวดยกกัน ในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิของห้องผสมอย่างเหมาะสม ทำให้สารเคมีต่าง ๆ กระจายตัวในยางได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.22 เครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรี [48]

### 2.8.1.3 เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ (Intermix internal mixer)

เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์มีองค์ประกอบสำคัญเหมือนกับเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรี แต่ลักษณะของโรเตอร์ของเครื่องผสมระบบนี้จะมีรัศมีการหมุนของโรเตอร์ทั้งสองคาบเกี่ยวกัน หรือที่เรียกว่า “Intermeshing” และหมุนด้วยอัตราเร็วที่เท่ากัน แรงเฉือนจะเกิดขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่างปีกของโรเตอร์ยาง และสารเคมีจะถูกบีบผนวดยกกันให้เป็นเนื้อเดียวกัน ในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิของห้องผสม และโรเตอร์ได้ดีกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรี จึงมีประสิทธิภาพการผสมที่สูงมาก สารตัวเติมสามารถแตกตัว และกระจายตัวในยางได้ดี แต่อย่างไรก็ตามโรเตอร์แบบ “Intermeshing” นี้ มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ทำให้ยางคอมพาวด์ที่ได้จากการผสมในแต่ละครั้งมีปริมาณค่อนข้างน้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2.23 เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ [48] ให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.8.1.4 เครื่องผสมระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้ (Variable intermeshing clearance internal mixer)

เครื่องผสมแบบนี้มีโรเตอร์เหมือนเครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ แต่ผู้ผสมสามารถปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างโรเตอร์ทั้งสองระหว่างการผสมได้ เช่น ในช่วงแรกของการผสมตั้งระยะห่างระหว่างโรเตอร์ไว้ให้มาก จะทำให้ป้อนยาง และสารเคมีเข้าไปในเครื่องได้ง่าย จากนั้นปรับลดระยะห่างระหว่างโรเตอร์เพื่อให้มีแรงเฉือนสูงขึ้น จะทำให้สารตัวเติมแตกตัวได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.24 เครื่องผสมยางระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้ [48]

#### 2.8.1.5 เครื่องนวดยาง หรือนีดเตอร์ (Kneader)

เครื่องนวดยาง หรือนีดเตอร์เป็นเครื่องผสมระบบปิดชนิดอื่น ๆ ที่มีการจำหน่ายในเชิงการค้า และมีการผลิตในประเทศแถบเอเชีย แม้ว่าเครื่องนวดยางจะมีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรี แต่รูปแบบของโรเตอร์แตกต่างจากโรเตอร์ของเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก ทำให้ประสิทธิภาพในการผสมต่ำกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก อย่างไรก็ตามเครื่องนวดยางมีราคาต่ำกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก จึงเป็นที่นิยมสำหรับผู้ประกอบการไทยปัจจุบัน



รูปที่ 2.25 เครื่องนวดยางหรือนีดเตอร์ [48]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8.2 เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (Continuous mixer)

เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง ได้แก่ เครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw mixer) เครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw mixer) ตัวเครื่องสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณใหญ่ ๆ ได้แก่

1. บริเวณที่ป้อนสาร (Feed zone) ซึ่งจะประกอบด้วยถังป้อนสารที่มีลักษณะคล้ายกรวย (Hopper)
2. บริเวณที่เกิดการผสม (Compression zone) คล้ายห้องผสมในเครื่องผสมระบบปิด
3. บริเวณที่ปล่อยยางออกจากเครื่อง (Metering zone)

ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น อัตรากำลังการผลิตซึ่งขึ้นอยู่กับโดยตรงกับอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าไปในเครื่อง การเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบจะทำให้ระยะเวลาที่ยางคอมพาวด์อยู่ในเครื่องผสมสั้นลง ทำให้ประสิทธิภาพในการผสมลดลง ยางคอมพาวด์ที่ได้จะมีระดับการกระจายตัว และการแตกตัวของสารตัวเติมที่ต่ำลง ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.26 เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง [49]

การผสมยางกับสารเคมียางเข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องผสมซึ่งอาจจะเป็นเครื่องผสมระบบปิดหรือระบบเปิด การผสมยางนี้ก็เป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากถ้าสารเคมีที่เติมลงไปในยางกระจายตัว (Distribution) หรือแตกตัว (Dispersion) ได้ไม่ดี จะส่งผลโดยตรงต่อความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการใช้กระบวนการผสมที่แตกต่างกัน เช่น การใช้เครื่องผสมคนละชนิดกัน การใช้สภาวะการผสมที่แตกต่างกันหรือแม้แต่การจัดลำดับการเติมสารเคมีลงไปเครื่องผสมที่แตกต่างกัน ย่อมจะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติที่แตกต่างกันด้วยแม้ว่าจะเป็นยางสูตรเดียวกัน

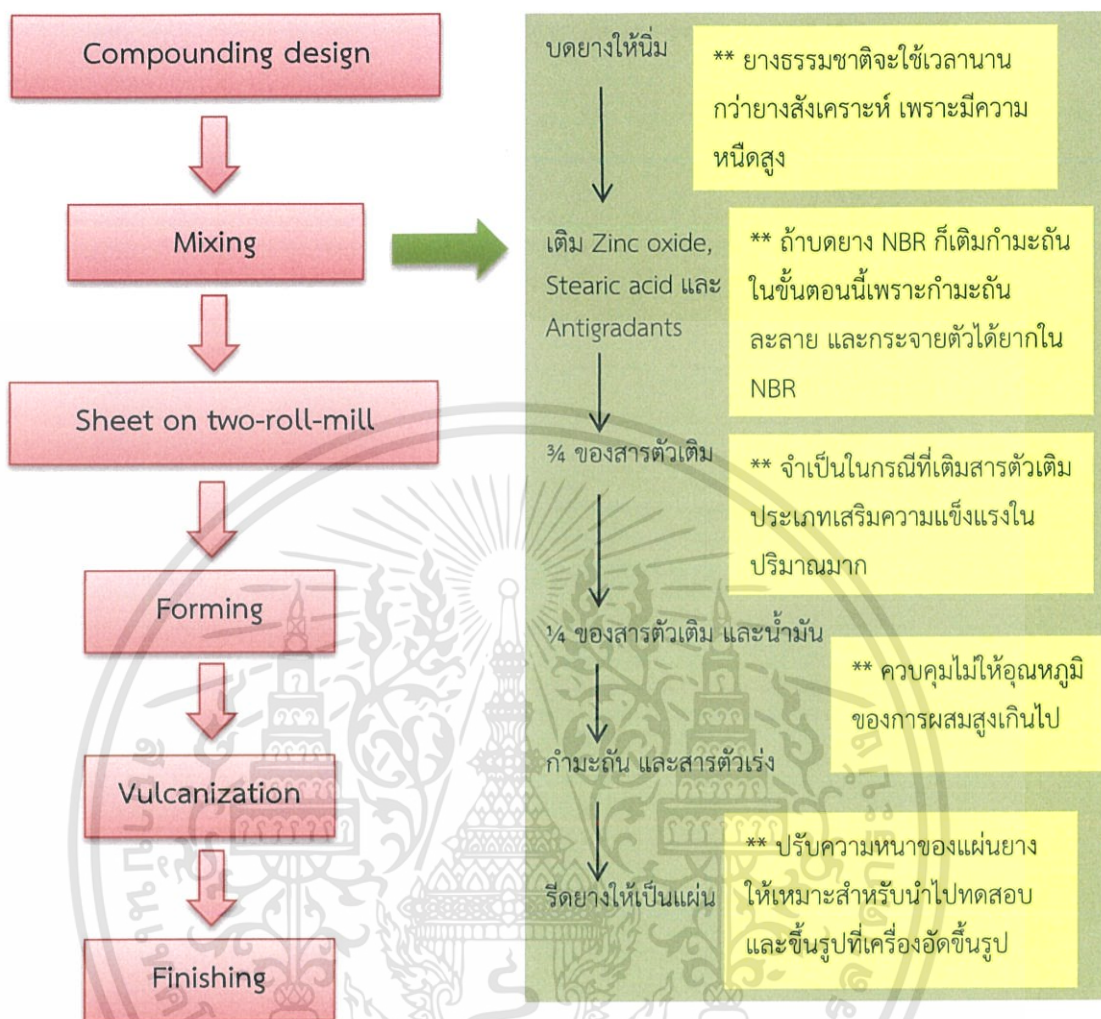
## 2.9 ขั้นตอนการผสมยาง (Mixing step)

หลักการโดยทั่วไปคือ เริ่มจากการผสมสารเคมีต้องทำอย่างให้นิ่ม หลังจากนั้นการบดยางให้นิ่มก็จะเติมสารตัวเติมที่กระจายในเนื้อยางได้ยากก่อน เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (Stearic acid) ฟงเขม่าดำ ฯลฯ เนื่องจากช่วงแรกอุณหภูมิในการบดต่ำ และยางมีความหนืดสูง แรงกระทำเชิงกลมาก จากนั้นเติมสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงชนิดอื่น ๆ และน้ำมันลงไป โดยสารที่ควรเติมลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้าย คือ สารตัวเร่ง ก้ำมะถัน และสารป้องกันยางตาย (Retarders) ซึ่งยางที่ได้หลังจากที่ผสมสารเคมีต่าง ๆ แล้ว เรียกว่า ยางผสมสูตรหรือยางคอมปาวด์ (Rubber compound) [50-51]



รูปที่ 2.27 ขั้นตอนการผสมยาง [27]

### 2.9.1 เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง

ตัวอย่างยางผสมสูตรในทุก ๆ ประเภทของการผสมจะถูกทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงเพื่อทดสอบสมบัติของยางที่ผลิต และความสม่ำเสมอในการผสม เนื่องจากในกระบวนการผลิตยางคอมปาวด์จะถูกให้ความร้อนในแม่พิมพ์ (Mold) ให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ยาง ถ้าการให้เวลา และความร้อนที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์หรือมากเกินไป (Under-cure หรือ Over-cure) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้งานยางด้อยลง เช่น สึกเร็ว ยางกรอบแตกง่าย ฯลฯ สามารถแบ่งเครื่องวัดการเชื่อมโยงยางออกเป็น 2 ชนิด คือ [52]

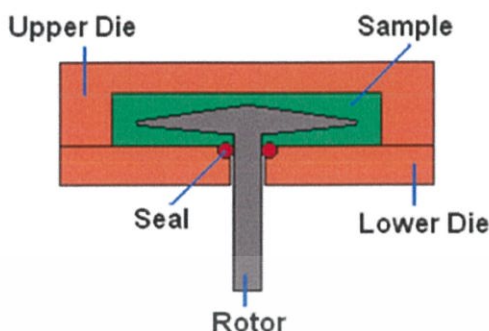
#### 2.9.1.1 เครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น (Oscillating disc rheometer, ODR)

เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานสั่น เป็นเครื่องที่สามารถวัดการเชื่อมโยงยางได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาสภาวะการเชื่อมโยงที่เหมาะสม หาเวลาที่ใช้

ในกระบวนการผลิตยาง ลักษณะการคงรูปของยาง หลักการทำงานคือ การตรวจวัดความแข็งของยาง โดยการวัดการเปลี่ยนแรงหมุน (Torque) ของจานรูปโคนครึ่งวงกลม (Biconical disc) หมุนสั้นอยู่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ตัวเครื่อง ODR ประกอบด้วยโรเตอร์ที่เคลื่อนที่แบบแกว่งอยู่ในช่องว่างระหว่างด้านบน และด้านล่าง โดยทำมุม 1, 3 หรือ 5 องศา ผลที่ได้จะเป็นเส้นกราฟการคงรูป แสดงค่าแรงบิดต่ำสุด แรงบิดสูงสุด ระยะเวลาสกอรัช และระยะเวลาคงรูป [53]



รูปที่ 2.28 การทำงานของเครื่องวัดการไหลแบบจานแกว่ง [53]



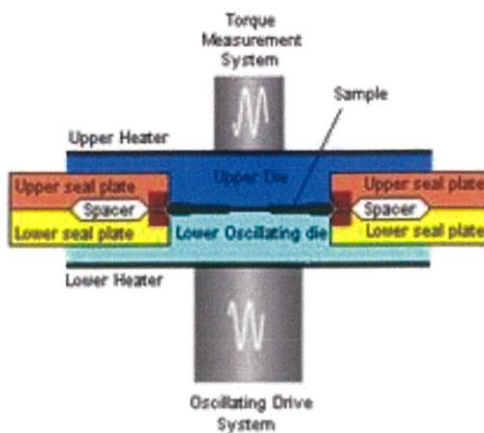
รูปที่ 2.29 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง [54]

### 2.9.1.2 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer,

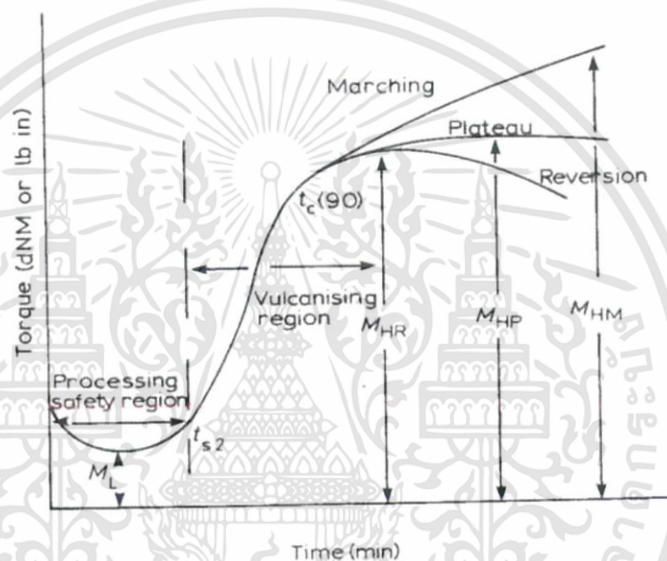
MDR)

เครื่องรีโอมิเตอร์แบบไม่มีจานหมุน เป็นเครื่องวัดการเชื่อมโยงยางชนิดใหม่ที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เนื่องจากใช้ตัวอย่างเล็ก และบางกว่า เป็นผลให้การเชื่อมโยงได้เร็วกว่า ไม่มีข้อผิดพลาดของการทดสอบเนื่องจากแรงเสียดทานของจานหมุน ซึ่งให้ข้อมูลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำกว่า และให้ข้อมูลมากกว่า เช่น ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $E''$ ) อัตราการเชื่อมโยง (Cure rate) และ Phase angles หลักการทำงานคือ จานด้านล่าง (Lower die) จะหมุนสั้นไปมาทำมุม  $\pm 1,3$  หรือ 5 องศา ที่ความถี่ 1.7 เฮิรตซ์ จานด้านบนจะอยู่กับที่ และวัดแรงบิด (Torque) ผลการทดสอบการเชื่อมโยงสามารถแสดงดังรูปกราฟแรงบิด และเวลา ซึ่งเรียกว่า กราฟเชื่อมโยง (Cure curve)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 การทำงานเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน [53]



รูปที่ 2.31 กราฟการเชื่อมโยง [54]

## 2.10 การขึ้นรูปยาง (Forming rubber)

หลังจากการผสมยางกับสารเคมีให้เข้ากันได้ดีแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการนำยางคอมพาวด์ที่ได้มาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่าง ๆ ตามต้องการ ก่อนที่จะนำไปคงรูปต่อไป หรือในบางกรณี การขึ้นรูป และการคงรูปอาจจะเกิดขึ้นได้ในขั้นตอนเดียวกันได้ เช่นกรณีที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ โดยทั่วไปการขึ้นรูปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เทคนิคใหญ่ ๆ ได้แก่ [55-56]

1. การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ (Molding)
2. การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดผ่านตายโดยใช้เครื่องเอ็กชทรูด (Extruder)
3. การขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเ็นเดอร์ (Calendering)

สำหรับเทคนิคที่ 1 การขึ้นรูป และคงรูปเกิดได้พร้อมกันในขั้นตอนเดียวกัน แต่เทคนิคที่ 2 และ 3 การขึ้นรูปกับการคงรูปจะแยกขั้นตอนกันอย่างชัดเจน

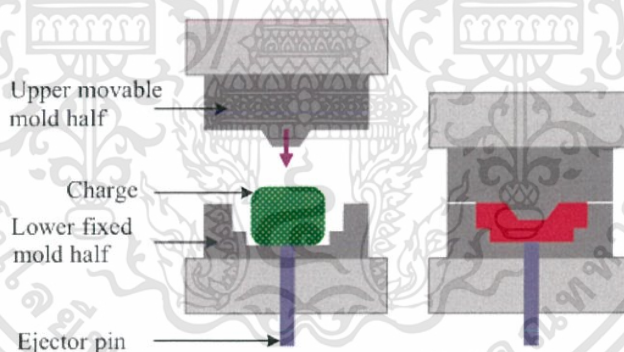
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.1 การใช้แม่พิมพ์

การใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูปเป็นวิธีการที่ทำให้ยางเกิดเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์พร้อม ๆ กับการเกิดปฏิกิริยายางคงรูปโดยความร้อน และแรงอัด แม่พิมพ์ที่ใช้จะก่อให้เกิดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แม่พิมพ์แบบต่าง ๆ คือ แบบอัด (Compression) แบบกึ่งฉีด (Transfer) และแบบฉีด (Injection)

#### 2.10.1.1 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์กดอัด (Compression molding)

การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัดเป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบอื่น เพราะเป็นวิธีที่ง่าย และเครื่องจักรที่ใช้มีราคาไม่สูงมากนัก เครื่องจักรที่ใช้ ได้แก่ เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (Hydraulic press) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกดอัด (Platen) จำนวน 2 แผ่น หรือมากกว่า 2 แผ่น ขึ้นกับการออกแบบ โดยแผ่นกดอัดจะเลื่อนขึ้นลงด้วยระบบไฮดรอลิกเพื่ออัด และส่งผ่านแรงดันไปสู่แม่พิมพ์ที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นกดอัด เครื่องจะสามารถตั้งอุณหภูมิ และควบคุมความร้อนให้คงที่ระหว่างการผลิต ในส่วนของแม่พิมพ์แบบกดอัดนี้ ประกอบด้วยแม่พิมพ์ 2 ส่วน คือ แม่พิมพ์ส่วนบน (Lid) และแม่พิมพ์ส่วนล่าง (Base) โดยแม่พิมพ์ส่วนล่างจะมีช่องเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เรียกว่า เบ้าพิมพ์ (Cavity) สำหรับใส่ยางคอมพาวด์ที่จะขึ้นรูป จากนั้นนำแม่พิมพ์ส่วนบนมาปิดทับ โดยมีสลัก (Pin) ที่ติดอยู่กับแม่พิมพ์ส่วนบนจะช่วยล็อกไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวระนาบขณะที่ได้รับแรงกดอัด เมื่อให้แรงดันแก่แม่พิมพ์ ยางคอมพาวด์จะถูกบังคับให้ไหลจนเต็มเบ้าพิมพ์ และความร้อนจากแม่พิมพ์จะทำให้ยางเกิดการคงรูป ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ เช่น ยางล้อ ยางโอริง ยางรองแท่นเครื่อง พื้นรองเท้า ฯลฯ



รูปที่ 2.32 การทำงานแม่พิมพ์กดอัด [57]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.33 (ก) แม่พิมพ์ [58] และ (ข) เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก [56]

### 2.10.1.2 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด (Transfer molding)

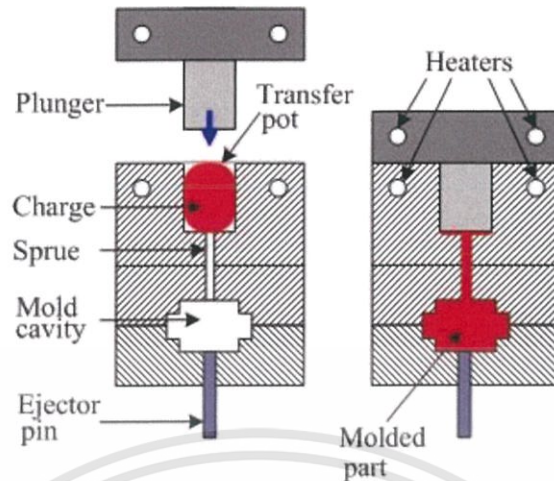
การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดเป็นวิธีที่ใช้กันน้อยมากในปัจจุบัน แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่

1. แม่พิมพ์ส่วนบน ซึ่งออกแบบมาให้มีลักษณะคล้ายแท่งกด
2. แม่พิมพ์ส่วนล่าง เป็นส่วนเข้าพิมพ์ที่มีรูปร่างต่าง ๆ ตามต้องการ
3. แม่พิมพ์ส่วนตรงกลาง เป็นส่วนที่มีแอ่งหรือช่องว่างสำหรับใส่ยางคอมพาวด์ เรียกว่า “Pot” และที่บริเวณด้านล่างของ Pot จะมีหัวฉีด (Injection nozzle) เพื่อเป็นช่องให้ยางไหลลงไปสู่

เข้าพิมพ์ส่วนล่าง

การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้เริ่มจากให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ จากนั้นนำยางคอมพาวด์ใส่ลงไปในช่องใส่ยางของแม่พิมพ์ส่วนตรงกลาง ต่อมาปิดแม่พิมพ์ และแท่งกด (Ram) ของแม่พิมพ์ส่วนบนจะดันยางให้ไหลผ่านหัวฉีดเข้าสู่เข้าพิมพ์จนเต็ม เทคนิคนี้มีข้อดีคือสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนเกินกว่าที่จะใช้แม่พิมพ์แบบกดอัดได้ แต่ก็มีข้อเสียหลักที่สำคัญคือ ต้องเสียเวลานานในการขึ้นรูปแต่ละครั้ง เนื่องจากหลังการขึ้นรูป ต้องนำแม่พิมพ์ส่วนตรงกลางมาทำความสะอาดโดยกำจัดเศษยางคงรูป (Scrap) ที่ติดอยู่บริเวณหัวฉีดหรือบริเวณฐานของช่องใส่ยางออกให้หมดก่อนที่จะทำการขึ้นรูปครั้งต่อไปได้

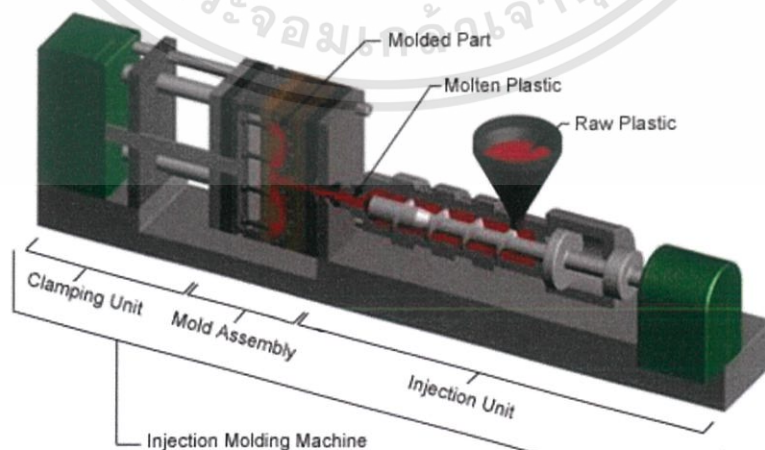
## Transfer Molding



รูปที่ 2.34 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด [59]

### 2.10.1.3 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบฉีด (Injection molding)

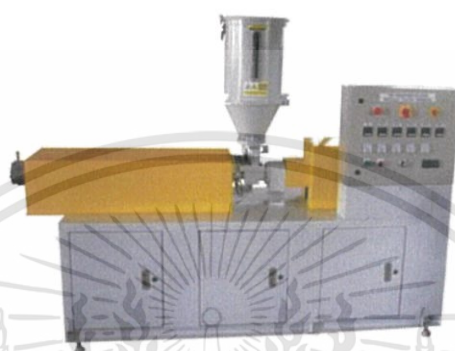
การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบฉีดเป็นการพัฒนามาจาก 2 แบบแรก วิธีนี้มีอัตราเร็วในการผลิตสูง และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดที่ถูกต้องมากกว่าการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอื่น ๆ จึงเหมาะกับการผลิตชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อน เครื่องฉีดยังมีทั้งแบบเกลียวทวนอน (Screw type injection molding machine) หรือแบบผสมระหว่างเกลียวทวนอนกับแท่งกด (Plunger screw injection molding machine) หลักการคือต้องทำให้ยางนืดและไหลได้ก่อนที่จะฉีดเข้าสู่วัสดุพิมพ์ โดยเกลียวทวนอน จะหมุนทำให้ยางถูกป้อนเข้าสู่บาริลของเครื่องฉีดอย่างต่อเนื่อง (ตั้งค่าอุณหภูมิของบาริลเพื่อให้ยางนืด) ยางจะไหลไปทางด้านหน้าของเกลียวทวนอน เมื่อมีปริมาณ และอุณหภูมิสูงเพียงพอแล้ว เกลียวทวนอนก็จะหยุดหมุน และถูกดันไปข้างหน้าเพื่อฉีดเข้าสู่วัสดุพิมพ์ที่ร้อน หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาการจับตัวและแม่พิมพ์จะเปิดออก ทำการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และทำการปิดแม่พิมพ์ หลังจากนั้นเกลียวทวนอนจะเริ่มหมุนพร้อมทั้งเคลื่อนตัวไปทางด้านหลังให้ยางคอมพาวด์ชุดใหม่ไหลลงมาสำหรับการฉีดในรอบถัดไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.35 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบฉีด [60]  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหาและข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.2 การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดผ่านตายโดยใช้เครื่องอัดรีด

การขึ้นรูปด้วยการอัดผ่านตาย (Die) นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างของภาพตัดขวางเหมือนกัน ตลอดแนวความยาว เช่น ท่อยาง ยางหุ้มสายเคเบิล ยางขอบกระจก ยางรัดของ เป็นต้น เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยทั่วไปเรียกว่า เครื่องอัดรีด ทั้งนี้เครื่องเอ็กสทรูเดชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องเอ็กสทรูเดชันที่อาศัยแรงอัดจากแรม และเครื่องเอ็กสทรูเดชันที่อาศัยแรงอัดจากการหมุนของเกลียวหนอน (Screw extruder) ซึ่งชนิดหลังนี้เป็นเครื่องเอ็กสทรูเดชันชนิดที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน สำหรับยางที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จะเรียกว่า เอ็กสทรูเดต (Extrudate)



รูปที่ 2.36 เครื่องอัดรีด [61]

### 2.10.3 การขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเลนเดอร์

การขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเลนเดอร์ นิยมใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นเรียบที่มีความหนาและความกว้างสม่ำเสมอ หรือเพื่อการฉาบยางบาง ๆ ลงบนผ้าหรือแผ่นใยลวด (Coating) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ เช่น สายพานลำเลียง ยางแผ่นปูพื้น ยางแผ่นปูบ่อน้ำ เป็นต้น เครื่องคาลเลนเดอร์ประกอบด้วยลูกกลิ้งที่ทำจากเหล็กหล่ออย่างดีตั้งแต่ 2 ถึง 4 ลูกวางเรียงตัวกันในลักษณะต่าง ๆ ผิวหน้าขัดเรียบ ด้านในของลูกกลิ้งมีลักษณะกลวงเพื่อติดตั้งระบบทำความร้อน และหล่อเย็น ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งสามารถปรับให้กว้าง หรือแคบได้ตามต้องการ โดยทั่วไปแล้วมักใช้เครื่องคาลเลนเดอร์ที่มี 3 ลูกกลิ้งสำหรับรีดยางให้เป็นแผ่นเรียบ ลูกกลิ้งทั้ง 3 ลูก จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากัน หรือต่างกันเล็กน้อย ลูกกลิ้งลูกกลางเคลื่อนที่ไม่ได้ แต่ลูกกลิ้งลูกบน และลูกล่างสามารถปรับให้เคลื่อนที่เพื่อให้เกิดช่องว่างลูกกลิ้งตามต้องการได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการรูปที่ 2.37 เครื่องคาลเลนเดอร์ [62] ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 การทดสอบ

### 2.11.1 การทดสอบคุณภาพยางดิบ

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางส่วนใหญ่ ถ้าเป็นยางธรรมชาติจะมีการทดสอบสิ่งเจือปน ความชื้น และสารประกอบบางอย่าง เช่น ไนโตรเจน ผงเถ้า ฯลฯ ความอ่อนตัว และดัชนีความอ่อนตัวของยาง (Plasticity and plasticity retention index) ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ส่วนยางสังเคราะห์มักทดสอบค่าความหนืดมูนนี่เป็นหลัก

### 2.11.2 การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต

สมบัติที่จำเป็น ได้แก่ ความนิ่มหรือความแข็งของยางซึ่งแสดงในรูปของค่าความหนืดมูนนี่ erner ที่ต้องการศึกษาการไหล (Rheology) ก็ต้องใช้เครื่อง Capillary rheometer ในการศึกษา ลักษณะการคงรูปของยางที่จะวัดโดยใช้เครื่อง Oscillating disc rheometer (ODR) หรือ Moving die rheometer (MDR) เป็นต้น

### 2.11.3 การทดสอบสมบัติของยางเชื่อมโยง

สมบัติพื้นฐานของยางคงรูปต้องทดสอบ ได้แก่ สมบัติการดึงยาง (Tensile properties) เช่น ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัส และร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ความแข็งกด (Hardness) การหักงอ (Flex cracking) การล้าตัว (Fatigue) การต้านทานโอโซน (Ozone resistance) การเด้งตัว (Rebound resilience) ความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion resilience) การยุบตัว (Compression set) การเกิดความร้อนสะสม (Heat build-up) เป็นต้น [63]

## 2.12 ข้อดี และข้อเสียของยางรีเคลม

### 2.12.1 ข้อดีของยางรีเคลม

- ราคาถูก และราคาค่อนข้างคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงมาก เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ หรือยางสังเคราะห์
- ลดการใช้สารเคมีในสูตรยาง เนื่องจากยังมีสารเคมีเหลืออยู่ในยาง
- สามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต เนื่องจากวัตถุดิบในกระบวนการผลิตมีน้ำมันผสมอยู่ ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายกว่า
- มีความยืดหยุ่นต่ำกว่ายางดิบทั่วไป ทำให้เกิดการหดตัวหรือการบวมตัวต่ำ ในพวกผลิตภัณฑ์ยางอัดรีด ในระหว่างกระบวนการผลิต และช่วยเพิ่มอัตราเร็วลูกกลิ้งรีด และการอัดรีด
- ใช้พลังงานในการผสม และขึ้นรูปน้อยกว่า เนื่องจากมีความหนืดน้อยกว่า
- ช่วยลดของเสียระหว่างการผลิต และผลิตภัณฑ์ที่ด้อยคุณภาพ โดยนำของเสียมาแปรรูปเป็นยางรีเคลม

### 2.12.2 ข้อเสียของยางรีเคลม

- สมบัติของยางรีเคลมแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน ต้องปรับสูตร และระวังในการใช้งาน
- สมบัติเชิงกลด้อยกว่ายางใหม่มาก เช่น Tensile strength, %Elongation at break และ Tear strength เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งไม่เหมาะสมกับ  
ผลิตภัณฑ์ที่เน้นความสวยงาม  
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งยังมีหมัดดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มักมีกลิ่นไม่พึงประสงค์

## 2.13 สมบัติ และประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ยางรีเคลม

### 2.13.1 เมื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยาง

- ราคาถูกเมื่อเทียบกับยางชนิดอื่น
- ราคาค่อนข้างคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงมาก
- ลดการใช้สารเคมีในสูตรยาง

### 2.13.2 เมื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต

- ยางรีเคลมมีความยืดหยุ่นต่ำกว่า ทำให้เกิดการหดตัวหรือการบวมตัวต่ำในผลิตภัณฑ์ยางอัดรีด ในระหว่างกระบวนการผลิต

- ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยกระบวนการผลิต ส่งผลให้เพิ่มอัตราเร็วลูกกลิ้งรีด และการอัดรีด
- ช่วยไม่ให้เกิดฟองกักในแผ่นอัดรีด
- ความหนืดที่น้อยกว่าทำให้ใช้พลังงานที่น้อยกว่าในการผสม และขึ้นรูป
- ช่วยลดของเสียระหว่างการผลิต และผลิตภัณฑ์ด้วยคุณภาพ

### 2.13.3 ลักษณะเด่นของผลิตภัณฑ์

- ลดต้นทุนผลิตภัณฑ์
- ช่วยลดปริมาณของเสียจากผลิตภัณฑ์ด้วยคุณภาพ

## 2.14 มาตรฐานของยางรีเคลม

ปัจจุบันได้มีการกำหนดมาตรฐานระดับนานาชาติ ในการจำแนกประเภทและกำหนดสมบัติขั้นต่ำของยางรีเคลมที่ผลิตจากยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และยางบิวทิล (Butyl rubber, IIR) (ISO/CD 19846) โดยยางรีเคลมในแต่ละชนิดถูกแบ่งเป็น 3 เกรด แต่ละเกรดจะมีความแตกต่างกันตามความหนืดมูนิ ความแข็งแรงสูงสุดขั้นต่ำ และปริมาณเนื้อยาง แสดงดังตารางที่ 2.5 ตัวอย่างสมบัติขั้นต่ำของยางรีเคลมต่างประเทศ เช่น ประเทศอินเดีย แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 สมบัติขั้นต่ำของยางรีเคลมแต่ละประเภทตามมาตรฐาน ISO/CD 19846 [6]

Type of Rubber	Mooney viscosity ML(1+4)@100°C		Tensile strength		Rubber hydrocarbon content		Acetone extract	
	Code	MV	Code	TS MPa	Code	RHC %	Code	AE %
Natural Rubber Class 1	MVA	$MV \leq 25$	TA	$TS \geq 12.0$	RH1	$RHC > 60$	AE1	$AE \leq 12$
	MVB	$25.0 < MV \leq 35.0$	TB	$9.0 \leq TS < 12.0$	RH2	$50.0 < RHC \leq 60$	AE2	$12 < AE \leq 16.6$
	MVC	$35.0 < MV \leq 50.0$	TC	$6.0 \leq TS < 9.0$	RH3	$40.0 < RHC \leq 50$	AE3	$16.6 < AE \leq 20.0$
IIR Class 2	MVD	$50.0 < MV \leq 65.0$	TD	$4.0 \leq TS < 6.0$	RH4	$RHC < 40$	AE4	$AE > 20$
	MVE	$65.0 < MV \leq 80.0$	TE	$TS < 4.0$	—	—	—	—
	MVF	$MV > 80.0$	—	—	—	—	—	—

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ในการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตล่วงหน้าไว้ได้ ระเบียบด้วยกรมการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างของสมบัติขั้นต่ำของยางรีเคลมประเทศอินเดีย [7]

Chemical Index		
		HIGH TENSILE
		RTRR-55
Test Name	Test Method	Content
Ash Content (%)	ASTM D297-18	4-7
Carbon Black (%)	ASTM E1131	28 ± 3
Acetone Extract (%)	ASTM D297-18	14 ± 2
RHC (%)	ASTM E1131	48 Min
Physical Index		
Test Name	Test Method	Content
Specific Gravity (gm/cc)	ASTM D297-18	1.13 ± 0.02
Tensile Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	ASTM D412	75 Min.
Elongation At Break (%)	ASTM D412	250 Min.
Mooney Viscosity (ml)	ASTM D1646	25-55
Hardness (Shore A)	ASTM 2240	59 ± 3

## 2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D. De และคณะ [64] ศึกษากระบวนการรีเคลมเชิงกลของยางรถยนต์ โดยใช้ Tetramethylthiuramdisulfide (TMTD) เป็นสารรีเคลม (Reclaiming agent) ผ่านการตีวัลคาไนเซชัน โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน มีผลต่อการเกิดเจลและความหนาแน่นในการเชื่อมโยง รวมทั้งปริมาณ TMTD ที่แตกต่างกัน มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม พบว่า TMTD 2.75 phr เป็นเวลา 40 นาที เป็นสภาวะที่ดีที่สุด ทำให้ยางรีเคลมมีสมบัติเชิงกลต่าง ๆ และความเป็นเนื้อเดียวกันดีที่สุด

กนกพร คูศิริวานิชกร และคณะ [65] ศึกษาสมบัติของยางรีเคลมชนิดใหม่ที่ผลิตจากกระบวนการเชิงกลร่วมเคมี (Chemical-mechanical process) โดยทำการผสมสูตรยางด้วยเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง พบว่า ถ้ามีปริมาณของกำมะถันมากขึ้น จะทำให้มีมอดูลัสของยางเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดก่อนที่จะลดลง ปริมาณ Mercaptobenzothiazole disulfide (MBTS) ไม่ส่งผลต่อสมบัติการเชื่อมโยงมากนัก และการเพิ่มสัดส่วนยางรีเคลมทดแทนยางธรรมชาติมากขึ้น จะทำให้ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง แต่มอดูลัสของยาง และเวลาในการเชื่อมโยงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ชิตติไชยัตต์ สายวารีย์ [66] ศึกษากรีเคลมเศษขุ่นมือยางธรรมชาติ ด้วยวิธีเชิงกลร่วมเคมี (Mechano-chemical process) โดยการบดขุ่นมือยางร่วมกับสารรีเคลมบนเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ศึกษาอิทธิพลของชนิด และปริมาณสารรีเคลม 4 ชนิด คือ 2-Mercaptobenzothiazole (MBT), Tetramethylthiuramdisulfide (TMTD), Dibenzothiazyl disulfide (MBTS) พบว่า ยางรีเคลมที่เตรียมได้มีค่ามอดูลัสต่ำกว่ากรณีที่ไม่ใช้สารรีเคลม การเพิ่มปริมาณสารรีเคลมจะทำให้ส่วนของสายโซ่โมเลกุลยางที่สามารถละลายในโทลูอีน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ศึกษาระยะเวลา และอุณหภูมิการบดผสม พบว่าเมื่อเพิ่ม

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิการบดผสม ทำให้ค่าความหนืดมูนนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มระยะเวลาในการผสม ทำให้ค่าความหนืดมูนนี้ และปริมาณเจลของยางรีเคลมมีแนวโน้มลดลง ยางรีเคลมที่ใช้สารรีเคลมแต่ละชนิดจะให้ค่าความหนืดมูนนี้ต่ำสุดแตกต่างกัน พบว่ายางรีเคลมที่ใช้ MBTS เป็นสารรีเคลมมีเงาเจนต์ ที่ให้สมบัติที่ดีที่สุด

ระพีพันธ์ แดงตันกี [67] ศึกษาการนำยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมาบดเป็นผงขนาด 20, 26 และ 40 mesh แล้วจึงนำมาผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มแบบลูกกลิ้งหล่อเย็น เพื่อทำการศึกษากลไกของสารช่วยยึดเกาะ และสมบัติเชิงกล พบว่าอัตราส่วนผงยางต่อกรดสเตียริก 1:4 จะทำให้กรดสเตียริกเคลือบอยู่บนผิวของผงยางมากที่สุด ส่วนผลของขนาดอนุภาคของผงยางไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญ

K. Min และ H. Jeong [68] ศึกษาผลของการผสมยางมะตอยเกรดเป่า (Air blown asphalt, ABA) กับ TOR ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อ ABA ลดลง และ TOR เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติทางความร้อน และค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ค่าความจุความร้อนที่เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Heat capacity change at  $T_g$ ,  $DC_p$ ) มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมวลโมเลกุลของ ABA ที่ต่ำลง ทำให้สายโซ่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น สามารถละลายใน TOR ได้มากขึ้น และส่งผลให้สมบัติเชิงกลแบบไดนามิก ค่าความเป็นอิลาสติก (Elasticity), โมดูลัสสูงชัน และลดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ ABA (Temperature susceptibility of ABA)

H. Liu และคณะ [69] ศึกษาสมบัติการไหลของผงยางที่ผสมยางมะตอย (Crumb rubber modified asphalt, CRMA) ที่เติมสารเติมแต่ง คือ TOR โดยเติม TOR แตกต่างกัน คือ 0% และ 4.5% โดยน้ำหนักของผงยาง และเติมผงยางที่แตกต่างกันคือ 15%, 20% และ 25% โดยน้ำหนักของยางมะตอย พบว่า TOR เพิ่มขึ้น และ CRMA ลดลง ทำให้ค่าการนิ่มตัว (Softening point) เพิ่มขึ้น ความหนืดลดลง ส่งผลให้สมบัติการไหลดีขึ้น เพิ่มความสามารถในการทำงาน และความเข้ากันได้ในการผสมดีขึ้น

K. Puga และ R. Williams [70] ศึกษาประสิทธิภาพการทำยางมะตอยผสมคอนกรีต (asphalt rubber) โดยผสม TOR ที่อุณหภูมิต่ำ โดย TOR ทำหน้าที่เป็นตัวผสม (Binder) ทำให้ยางผสมเข้ากับคอนกรีตได้ดีขึ้น และมีเสถียรภาพในการเก็บรักษา ซึ่งทำให้ค่า Fracture toughness เพิ่มขึ้น และลดการเหนียวติด

M. Hu และคณะ [71] ศึกษาผลของแบคทีเรียชนิด *Gordonia amicalisa* ในกระบวนการตีวัลคาไนเซชันของยางพอลิไอโซพรีน (Polyisoprene rubber) และยางสไตรีนบิวตะไดอิน (Styrene butadiene rubber) ที่มีความสามารถในการเหนียวนำการผลิตเอโนไซม์ของแบคทีเรียที่ใช้ในการสลายพันธะเชื่อมโยงของกำมะถันแตกต่างกัน พบว่าในยางสไตรีนบิวตะไดอิน หลังผ่านการตีวัลคาไนเซชันมีปริมาณกำมะถันลดลง ทำให้ทราบว่าแบคทีเรียสามารถเปลี่ยนพันธะเชื่อมขวางของกำมะถัน ไปอยู่ในรูปของซัลฟอกไซด์, ซัลโฟน, ซัลโฟเนต และซัลเฟตได้ ส่วนยางไอโซพรีนไม่พบการลดลงของกำมะถัน แสดงให้เห็นว่า ชนิดของแบคทีเรียมีความเฉพาะกับชนิดของยาง

S. Ghorai และคณะ [72] ศึกษากระบวนการตีวัลคาไนเซชันในยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยวิธีเชิงกลร่วมเคมี โดยนำยางวัลคาไนซ์มาบดผสมกับ Bis(3-Triethoxysilyl propyl) Tetrasulfide (TESPT) และน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งเป็นสารที่ใช้ทำปฏิกิริยาตีวัลคาไนซ์ โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งในระยะเวลาการผสม และปริมาณ TESPT ที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อไม่ต่างกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหน้าและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการเกิดเจล, ความหนาแน่นในการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกล พบว่า TESPT 6 ml ใช้เวลาตีวัลคาไนซ์ 40 นาที เป็นสภาวะที่ดีที่สุด ส่งผลให้ยางรีคอมมีสมบัติเชิงกลต่าง ๆ และเป็นเนื้อเดียวกันที่ดีที่สุด

### สรุปการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- ถ้ามีปริมาณของกำมะถันมากขึ้น ส่งผลให้มอดูลัสของยางเพิ่มสูงขึ้น แต่ร้อยละการยืด-ณ จุดขาด และความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดก่อนที่จะลดลง และการเพิ่มสัดส่วนยางรีคอมในยางธรรมชาติมากขึ้น จะทำให้ความแข็งแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง แต่มอดูลัสของยาง และเวลาในการเชื่อมโยงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น
- การใช้ปริมาณ TMTD เป็นสารรีคอมในปริมาณที่แตกต่างกัน มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางรีคอม
- ยางรีคอมที่ใช้สารรีคอมมีค่านูนต่ำกว่าไม่ใช้สารรีคอม และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบดผสม ทำให้ค่าความหนืดมูนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น รวมถึงยางรีคอมที่ใช้ MBTS เป็นสารรีคอมจะให้สมบัติดีที่สุด
- การปรับปรุงผิวของผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้วโดยผ่านการเคลือบด้วยกรดสเตียริกในอัตราส่วนผงยางต่อกรดสเตียริกเท่ากับ 1:4 จะทำให้สเตียริกเคลือบอยู่บนผิวของผงยางได้มากที่สุด ส่วนผลของขนาดอนุภาคของผงยางส่งผลต่อสมบัติเชิงกลไม่มากนัก
- เมื่อ ABA ลดลง และ TOR เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติทางความร้อน และค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ค่าความจุความร้อนที่เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (The heat capacity change at  $T_g$ ,  $DC_p$ ) มีแนวโน้มลดลง
- TOR เพิ่มขึ้น และ CRMA ลดลง ส่งผลให้ค่าการนึ่มตัวเพิ่มขึ้น ความหนืดลดลง เพิ่มความสามารถในการทำงาน และความเข้ากันได้ในการผสมดีขึ้น
- TOR ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (Binder) ซึ่งส่งผลให้ค่า Fracture toughness เพิ่มขึ้น และลดการเหนียวติด
- ยางสไตรีนบิวตะไดอีน หลังผ่านการตีวัลคาไนซ์มีปริมาณกำมะถันลดลง ส่วนยางไอโซพรีนไม่พบการลดลงของกำมะถัน แสดงให้เห็นว่า ชนิดของแบคทีเรียมีความเฉพาะกับชนิดของยาง
- ปริมาณ TESPT ที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อค่าการเกิดเจล ความหนาแน่นในการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลของยางรีคอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ จะทำการทดลองแบ่งเป็น

ตอนที่ 1 การศึกษาผลของขนาดวัตถุดิบอนุภาคผงยางรถยนต์ (GRT) ที่มีต่อสมบัติของยางรีเคลม

ตอนที่ 2 การศึกษาผลของปริมาณกำมะถัน มีต่อสมบัติของยางรีเคลม

ตอนที่ 3 การศึกษาการใช้สารเติมแต่ง TOR เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม

### 3.1 วัตถุดิบ และสารเคมี

1. ยางรีเคลมที่เตรียมจากขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ (GRT) ขนาด 16-20, 20-26, 26-30 และ 30-40 mesh จากบริษัท ยูเนียนพัฒนา จำกัด
2. สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า จากบริษัท พีที. ซิสาเดน รายา เคมีคอล จำกัด
3. สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เกรดการค้า จากบริษัท จักรवाल เคมี จำกัด
4. สารเชื่อมโยง กำมะถัน (Sulfur) เกรดการค้า จากบริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด
5. สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง MBT เกรดการค้า จากบริษัท ท็อปไฟท์ จำกัด
6. สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง DPG เกรดการค้า จากบริษัท ซัลนิเวลด์ เคมีเคิล จำกัด
7. สารเติมแต่ง Trans-polyoctenamer (TOR) จากห้างหุ้นส่วนจำกัด กิจไพบุลย์เคมี
8. โทลูอีน (Toluene) เกรดการค้า จากบริษัท แลป ซิสเทม จำกัด
9. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N<sub>2</sub>) จากบริษัท ลินดา (ไทยแลนด์) พับบลิค จำกัด

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) : รุ่น SK-6, บริษัท ยงพง แมชชีนรี่ จำกัด
2. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) : รุ่น HT-8752, บริษัท สิทธิพร แอชไซซิเอท จำกัด
3. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer, MDR) : รุ่น GT-M2000, บริษัท สิทธิพร แอชไซซิเอท จำกัด
4. เครื่องอัดแบบ (Compression molding machine) : รุ่น 25-12H, บริษัท แคลเซิร์ฟ (ไทยแลนด์) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine) : รุ่น TCS-2000, บริษัท สิทธิพร แอชโซซิเอท จำกัด
6. เครื่องตัดตัวอย่าง ให้เป็นรูปดัมเบลล์ : รุ่น KS-5010, บริษัท จินัน กาสอน เทสดีง จำกัด
7. เครื่องวัดความแข็ง (Hardness) : รุ่น GS-719N, บริษัท เจทีซี ทูล จำกัด
8. เครื่องวัดความหนา (Micrometer) : รุ่น LP-10-C Thickness gauge, บริษัท พีเอ็นซี ทูลลิง จำกัด
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) : รุ่น EVO<sup>®</sup> MA 10 บริษัท คาร์ล ไชซ์ จำกัด
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Optical microscope, OM) : รุ่น VT 300, บริษัท เบอเทอร์-ชายน อินสทรูเมนต์ จำกัด
11. ปีกเกอร์
12. เครื่องชั่งละเอียดดิจิทัลความละเอียด 0.0001 กรัม
13. กระบอกใส่ไนโตรเจนเหลว (Dewar)
14. คีม
15. ปืนวัดอุณหภูมิดิจิทัล
16. ตะแกรงร่อนยาง

### 3.3 ขั้นตอนการผสมยางรีเคลม

#### 3.3.1 การศึกษาผลของขนาดวัตถุดิบ GRT ที่มีต่อสมบัติของยางรีเคลม

##### 3.3.1.1 ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh

1. เตรียมวัตถุดิบในอัตราส่วนที่กำหนด ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของยางรีเคลมที่ใช้ในตอนๆที่ 3.3.1

ส่วนประกอบ	ส่วนโดยน้ำหนัก, phr
ยางรีเคลม (เตรียมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ)	100
Stearic acid	2
ZnO	5
MBT	0.5
DPG	0.2
Sulfur	3

2. นำยางรีเคลม 800 กรัม มาทำการบดย่อย จนได้ขี้ผึ้ง ด้วยเครื่องผสมแบบสอง

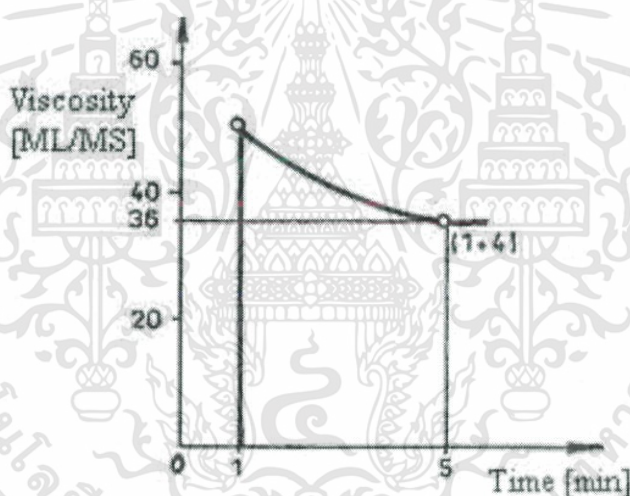
ลูกกลิ้ง เป็นเวลาประมาณ 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3. ผสมยางรีเคลมกับ Stearic acid และ Zinc oxide เป็นเวลาประมาณ 1 นาที

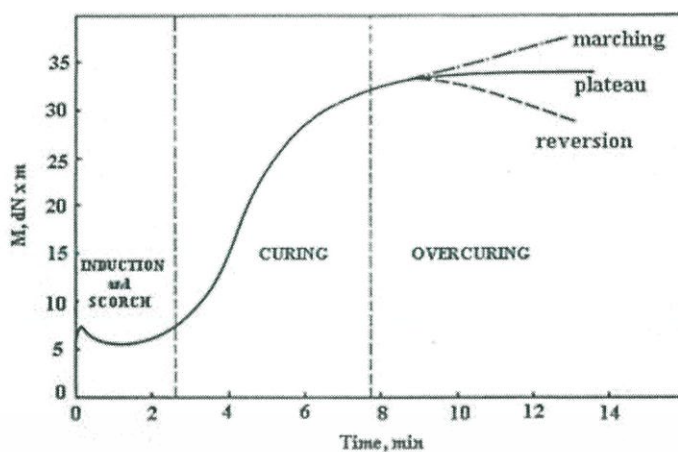
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผสมยางรีไซเคิลกับสารเร่งปฏิกิริยา และกำมะถัน เป็นเวลาประมาณ 5 นาที
5. รีดยางให้เป็นแผ่น โดยให้ความหนาที่เหมาะสม จากนั้นตัดยางให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2x2 นิ้ว จำนวน 2 แผ่น นำไปทดสอบความหนืด ด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ที่สภาวะ ML (1+4) 100°C เพื่อทดสอบคุณภาพ ดังรูปที่ 3.1
6. รีดยางให้เป็นแผ่น โดยให้ความหนาที่เหมาะสม จากนั้นตัดยางให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2x2 นิ้ว แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง ด้วยเครื่อง MDR เพื่อหาค่าเวลาการเชื่อมโยง ( $t_{c(90)}$ ) ซึ่งเป็นเวลาที่ยางเกิดการเชื่อมโยงที่ดีที่สุด และหาค่าเวลาก่อนเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช ( $t_{s2}$ ) ซึ่งเป็นเวลาที่กำมะถันเริ่มทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 142°C ตามลำดับ ได้กราฟการเชื่อมโยง ดังรูปที่ 3.2
7. ตัดยางผสมสูตรที่ได้ประมาณ 6x6 นิ้ว ใส่แม่พิมพ์ แล้วนำเข้าเครื่องอัดแบบ เพื่อทำการอัดเป็นแผ่น และเชื่อมโยงยาง
8. ตัดตัวอย่างยางเป็นรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D 412 นำมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างกราฟความหนืดมูนนี่ [73]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเส้นกราฟเชื่อมโยงของยางผสมสูตร แสดงเวลาการเชื่อมโยง ( $t_{c90}$ ) และเวลาก่อนการเชื่อมโยง ( $t_{s2}$ ) [53]

โดยที่

- $M_L$  คือ ค่าแรงบิดต่ำสุด
- $M_{HF}$  คือ ค่าแรงบิดสูงสุด
- $t_{s2}$  คือ เวลาเริ่มเชื่อมโยง เป็นเวลาที่ค่าแรงบิดเพิ่มสูงขึ้น 2 ปอนด์ต่อนิ้ว (in-lb) หรือ 2 นิวตันเมตร (N.m)
- $t_{c90}$  คือ เวลาเชื่อมโยง ( $t_{c90}$ ) ที่ได้จากเส้นกราฟเชื่อมโยงดังรูปที่ 3.2 โดยใช้เวลาเพิ่มเป็น  $t_{c90} \times 1.2$  สำหรับเวลานานขึ้นในการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่พิมพ์ และภายในชิ้นงานยาง

3.3.1.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดอื่น ๆ โดยเปลี่ยน GRT เป็นขนาด 20-26, 26-30 และ 30-40 mesh

ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.1.1

3.3.2 การศึกษาปริมาณกำมะถันที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลม

1. เตรียมวัตถุดิบในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของยางรีเคลมที่ใช้ในตอนๆ 3.3.2

ส่วนประกอบ	ส่วนโดยน้ำหนัก, phr
ยางรีเคลมจาก GRT 16-20 mesh	100
Stearic acid	2
ZnO	5
MBT	0.5
DPG	0.2
Sulfur*	0, 1, 2, 3, 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการผสมยางตามขั้นตอน ในหัวข้อ 3.3.1.1 ตั้งแต่ข้อ 2-4 และ 6-8 โดยใช้ปริมาณ กำมะถันดังตารางที่ 3.2

### 3.3.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมที่มีการใช้สารเติมแต่ง TOR

1. นำยางรีเคลม 2000 กรัม มาบดย่อยจนยางนิ่ม ด้วยเครื่องผสมระบบเปิด เป็นเวลาประมาณ 2 นาที จากนั้นวัดอุณหภูมิของยางให้ได้ประมาณ  $54 \pm 4^{\circ}\text{C}$

2. นำ TOR ปริมาณดังตารางที่ 3.3 มาใส่ จากนั้นบดย่อยจนได้เป็นเนื้อเดียวกัน

3. รีดยางให้เป็นแผ่น โดยให้มีความหนาที่เหมาะสม จากนั้นตัดยางให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด ประมาณ  $2 \times 2$  นิ้ว จำนวน 2 แผ่น นำไปทดสอบความหนืด ด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ที่สภาวะ ML (1+4)  $100^{\circ}\text{C}$

4. เตรียมวัตถุดิบในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของยางรีเคลมที่ใช้ในตอนที่ 3.3.3

ส่วนประกอบ	ส่วนโดยน้ำหนัก, phr
ยางรีเคลมจาก GRT 16-20 mesh ผสม TOR (0 และ 5-10 phr)	100
Stearic acid	2
ZnO	5
MBT	0.5
DPG	0.2
Sulfur	3

5. ทำการผสมยางตามขั้นตอน ในหัวข้อ 3.3.1.1

## 3.4 การร่อนขนาด GRT

ขั้นตอนการทดสอบ [26]

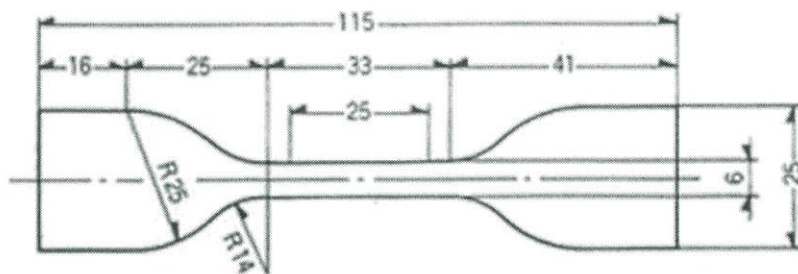
1. ทำความสะอาดตะแกรง
2. จัดชุดตะแกรง พร้อมชั่งน้ำหนักตะแกรง
3. ชั่งน้ำหนักผงยาง และใส่ตะแกรงชั้นบนสุด
4. นำตะแกรงติดตั้งเข้ากับเครื่องเขย่า และทำการเขย่าเป็นเวลา 10 นาที
5. ชั่งน้ำหนักรวมกับตะแกรง

## 3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

### 3.5.1 การทดสอบแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 412 [74]

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับครูโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์โดยเด็ดขาด  
 1. ใช้แม่พิมพ์มีด และเครื่องตัดชิ้นงานตัวอย่างแผ่นยางที่เชื่อมโยงเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbell) ที่มีความยาวแกว้ (Gauge length) 25 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้น ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชิ้นตัวอย่างทดสอบรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D 412 [75]

2. ทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยใช้ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้ขนาด 5 kN และใช้อัตราเร็วในการดึง 500 mm/min เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง ดังสมการที่ 3.1 ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ดังสมการที่ 3.2 และค่ามอดุลัสของยางที่ระยะยืด 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 3.3 [76]

- ความแข็งแรงดึง

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $P$  = แรงดึงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน  
 $A_0$  = พื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงาน

- ร้อยละการยืด ณ จุดขาด

$$\%Elongation = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\Delta L$  = ความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป  
 $L_0$  = ความยาวเดิมของชิ้นงาน

- ค่ามอดุลัสของยางที่ระยะยืด 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\sigma$  = ความเค้น (Stress) ที่ระยะยืด 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์

$\epsilon$  = ความเครียด (Strain) ที่ระยะยืด 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 การทดสอบความแข็งแรงกดแบบดูโรมิเตอร์

มาตรฐานทดสอบ ASTM D 2240 [77]

1. นำแผ่นยางที่ไปทดสอบความแข็งแรงกด ด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ชอร์เอ (Shore A durometer) อ่านค่าหลังจากกดภายใน 1 วินาที ตัวอย่างต้องหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร
2. ทำการทดสอบอย่างน้อย 10 ตำแหน่งที่ไม่ซ้ำกันต่อ 1 ตัวอย่าง

### 3.6 การทดสอบสัณฐานวิทยา

- นำชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร มาแช่ในไนโตรเจนเหลว เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่เย็นอยู่ เก็บชิ้นงานที่หักได้ไว้ในเดซิเคเตอร์ จากนั้นนำชิ้นงานพื้นที่ภาคตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำ และนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

- นำชิ้นงานยางรีเคลม มาศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง OM

### 3.7 การทดสอบอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร

นำชิ้นตัวอย่างยางที่เตรียมได้ มาทดสอบอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D 2765 [78] โดยการตัดชิ้นตัวอย่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร และความยาว 15 มิลลิเมตร แล้วนำมาชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง หลังจากนั้นนำไปแช่ในโทลูอีน เกรดสำหรับวิเคราะห์ ที่บรรจุในภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิด เป็นเวลา 70 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง หลังจากแช่โทลูอีนที่ผิวตัวอย่างออกจนแห้งแล้วนำมาคำนวณตั้งดังสมการที่ 3.4

$$Q = 1 + (d_1/d_2)(w_2/w_1) - d_1/d_2 \quad (3.4)$$

กำหนดให้

Q : อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร (Volume Swell Ratio)

w<sub>1</sub> : น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (g)

w<sub>2</sub> : น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างหลังการบวมตัว (g)

d<sub>1</sub> : ความหนาแน่นของยาง (0.950 g/mL)

d<sub>2</sub> : ความหนาแน่นของโทลูอีน (0.875 g/mL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การนำเสนอผลการทดลองของงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ

- ตอนที่ 1 การศึกษาผลของขนาดวัตถุบดผงยางรถยนต์ (GRT) ที่มีต่อสมบัติของยางรีเคลม
- ตอนที่ 2 การศึกษาปริมาณกำมะถันที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลม
- ตอนที่ 3 การศึกษาการใช้สารเติมแต่ง Trans-polyoctenamer (TOR) เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม

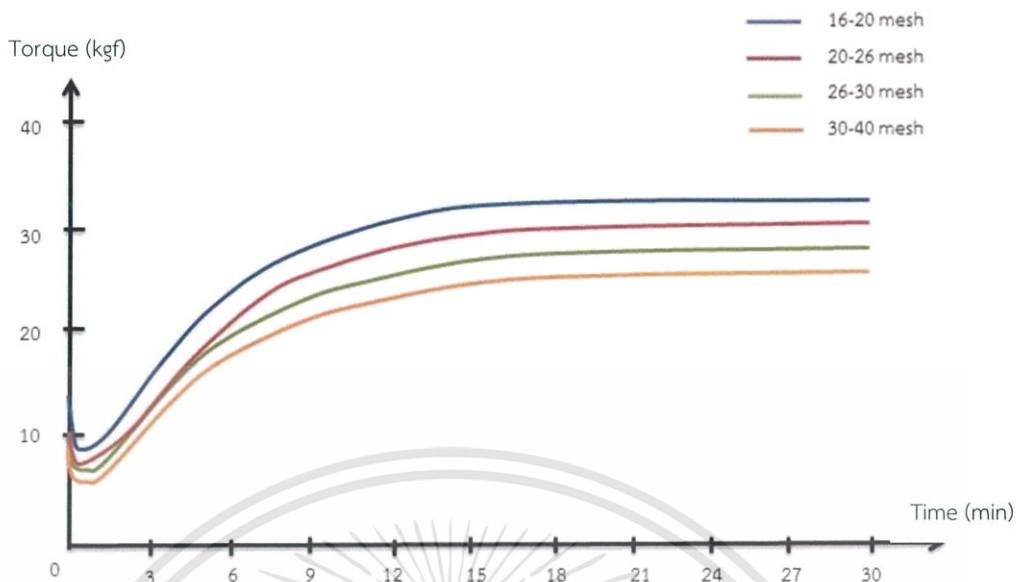
โดยทำการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) ทดสอบอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร (Volume swelling ratio) สมบัติเชิงกลของยาง ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) โมดูลัสของยางที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ (Rubber modulus, M100) โมดูลัสของยางที่ระยะยืด 200 เปอร์เซ็นต์ (Rubber modulus, M200) ความแข็งกด (Hardness-Shore A) และศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM)

#### 4.1 การศึกษาผลของขนาดวัตถุบด GRT ขนาด 16-20, 20-26, 26-30 และ 30-40 mesh ที่มีต่อสมบัติของยางรีเคลม

ปัจจุบันมีขยะจากยางรถยนต์เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ จึงนิยมนำยางเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ จากที่กล่าวข้างต้น หนึ่งในทางเลือกการนำยางกลับมาใช้ใหม่คือ การนำไปผ่านการบด (Grinding) และนำมาทำเป็นยางรีเคลม ส่งผลให้ขนาดอนุภาคของวัตถุบดเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติของยางรีเคลม เนื่องจากกระบวนการรีเคลมทางเคมี เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีเข้ามาทำปฏิกิริยาดิวลคาโนเซชัน พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา (Surface chemistry) จึงส่งผลต่อกระบวนการรีเคลม ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้ GRT ที่มีขนาดต่างกันในการเตรียมยางรีเคลม ได้แก่ 16-20, 20-26, 26-30 และ 30-40 mesh

จากกราฟเชื่อมโยง รูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 พบว่า ยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ใช้เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time,  $t_{s2}$ ) และเวลาเชื่อมโยง (Cure time,  $t_{c90}$ ) สั้นกว่า โดยมีอัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) และค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum modulus,  $M_{HF}$ ) สูงกว่า ยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh เนื่องจากยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh เตรียมจากผงยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารรีเคลมมากกว่า ทำให้เกิดปฏิกิริยาตัดพันธะเชื่อมโยงภายในเนื้อยางที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้มากกว่า นอกจากนี้ขนาดอนุภาคใหญ่ เกิดการรีเคลมแค่ผิวนอก เนื่องจากภายในยังมีก้อนของแข็งทำให้เนื้อยางสามารถทำปฏิกิริยากับกำมะถันได้น้อยกว่า และยังส่งผลให้ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) มีค่าสูงกว่า ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

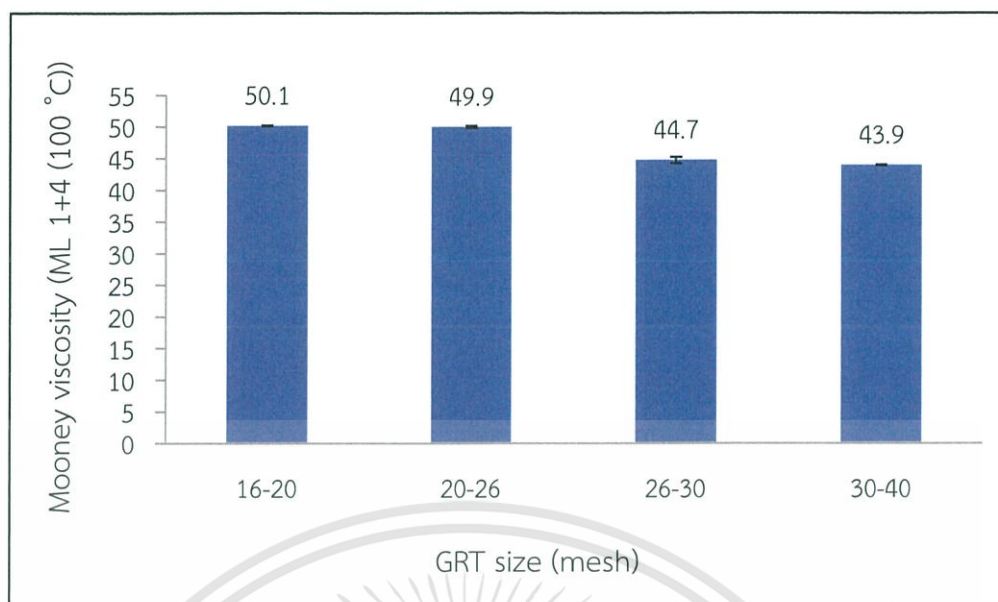


รูปที่ 4.1 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ

ตารางที่ 4.1 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20, 20-26, 26-30 และ 30-40 mesh

Properties	16-20 mesh	20-26 mesh	26-30 mesh	30-40 mesh
Scorch time, $t_{s2}$ (sec)	1.89	1.91	1.92	2.01
Cure time, $t_{c90}$ (sec)	11.35	11.67	12.89	13.28
$M_L$ (kgf.cm)	9.01	7.52	6.80	5.92
$M_{HF}$ (kgf.cm)	33.08	29.48	26.83	24.56
Cure rate index, CRI ( $s^{-1}$ )	10.57	10.25	9.12	8.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



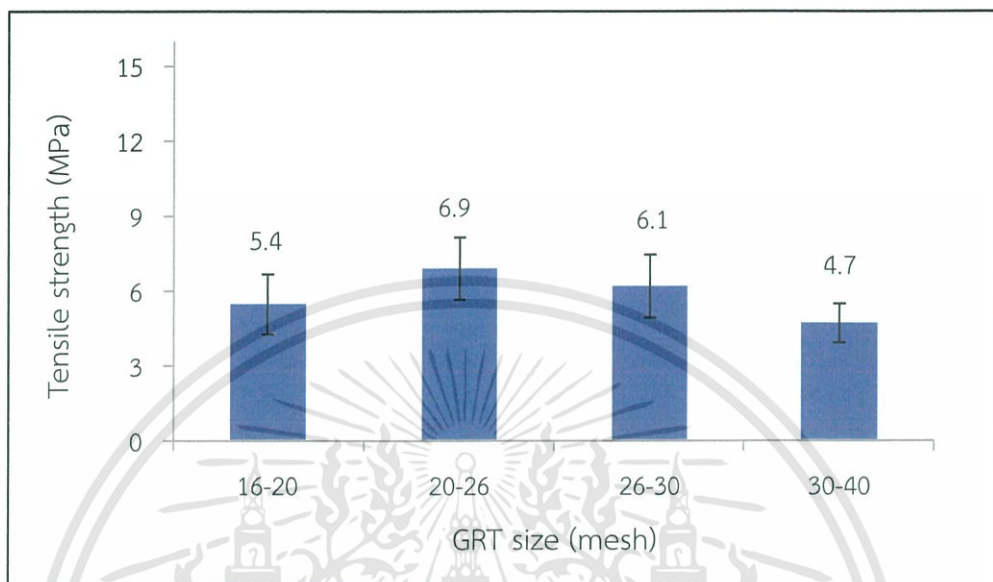
รูปที่ 4.2 ความหนืดมูนนี่ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ

GRT ที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตยางรีเคลมได้มาจากวิธีการร่อนผ่านตะแกรงโดยบริษัทมีการกำหนดมาตรฐานแต่ละช่วงขนาด ดังตารางที่ ข.17 ในภาคผนวก ข ซึ่งในแต่ละช่วงมีขนาด GRT ที่หลากหลาย

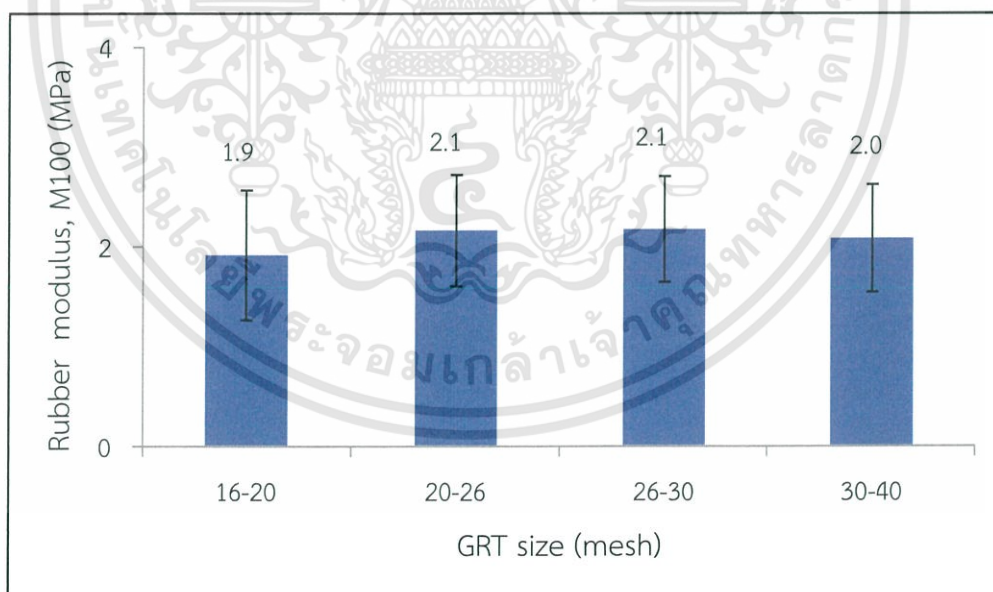
จากผลการทดลองการศึกษาลงของขนาด GRT พบว่า GRT ขนาด 20-26 mesh มีค่าความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.3) มีค่าสูงกว่ายางรีเคลมขนาด 16-20, 26-30 และ 30-40 mesh แต่ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 200% ความแข็งกดของยางรีเคลม และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.4-4.7 ตามลำดับ) มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก GRT ที่ใช้มีขนาดใกล้เคียงกัน และการร่อนแยกขนาดด้วยตะแกรง พบว่าการปะปนของ GRT ขนาดอื่น ๆ ด้วย โดยกระบวนการรีเคลมเป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมี สภาวะอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพในการรีเคลมเกิดได้สูงสุด โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารรีเคลม ทั้งนี้เป็นเพราะว่า GRT ในช่วง 16-20 mesh มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ใหญ่อยู่มากเมื่อเทียบกับขนาดอื่น ๆ อนุภาค GRT ที่มีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดกระบวนการรีเคลมแค่ผิวนอก โดยภายในของอนุภาคยังไม่ถูกรีเคลม พบเม็ดยางที่เป็นก้อนของแข็งหลังจากกระบวนการรีเคลมแล้ว เกิดเป็นจุดบกพร่อง (Defects) ทำให้ความสามารถในการรับแรงจึงลดน้อยลง และ GRT ในช่วง 30-40 mesh มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่เล็กอยู่มากเมื่อเทียบกับขนาดอื่น ๆ ทำให้ความสามารถที่สารรีเคลมจะแทรกเข้าไปภายในอนุภาคก่อนยางได้ดี อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคที่เล็ก ผ่านการเตรียมผงยางโดยกระบวนการบด (Grinding) มากกว่าสายโซ่ในเนื้อยางถูกตัดมากกว่าจากกระบวนการบดย่อย (Mastication) ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง ส่งผลให้สายโซ่ของยางสั้น การเกี่ยวพันกันของสายโซ่ลดลง เมื่อนำมาเตรียมเป็นยางรีเคลม จึงทำให้สมบัติเชิงกลส่วนการรับแรง ได้แก่ ความแข็งแรงดึงมีค่าลดน้อยลง และเนื้อยางมีความนิ่มมากกว่า (ค่ามอดูลัสของยางและความแข็งกดที่ได้ต่ำกว่า) แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 แบบจำลองผลของการรีเคลมยางขนาดอนุภาคใหญ่ (ก) และขนาดอนุภาคเล็ก (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 แสดงอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร พบว่าอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าความหนาแน่นในการเชื่อมโยงยางใกล้เคียงกัน อาจเนื่องจากช่วงขนาด GRT ที่ศึกษา (16-40 mesh) ไม่แตกต่างกันมาก เช่นเดียวกับที่อธิบายในสมบัติเชิงกล

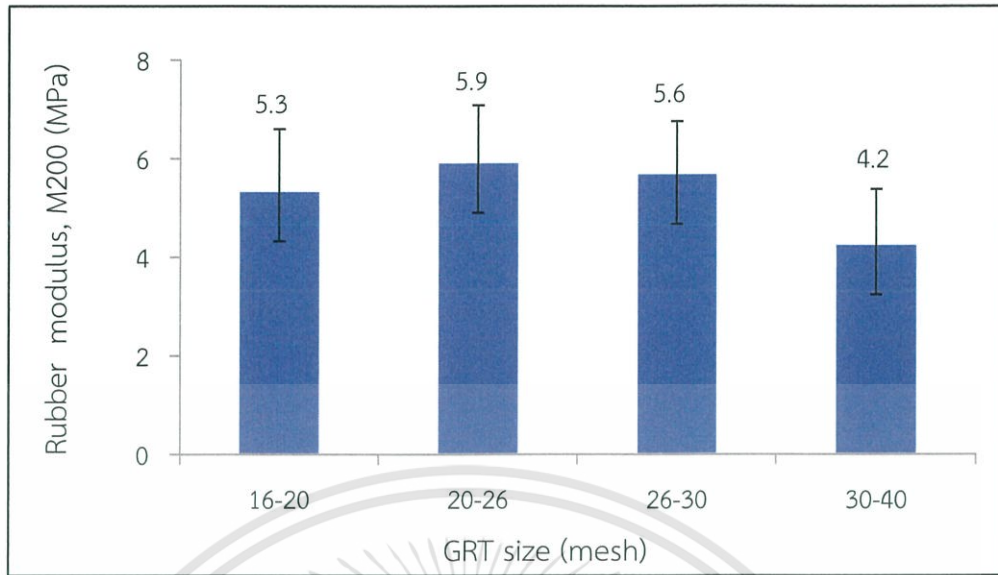


รูปที่ 4.3 ความแข็งแรงดึงของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ

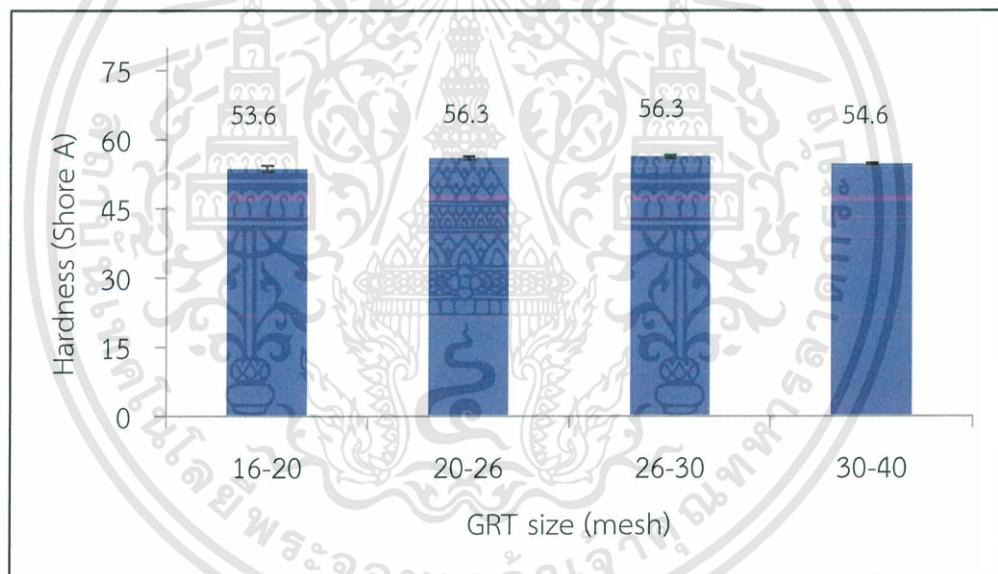


รูปที่ 4.4 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

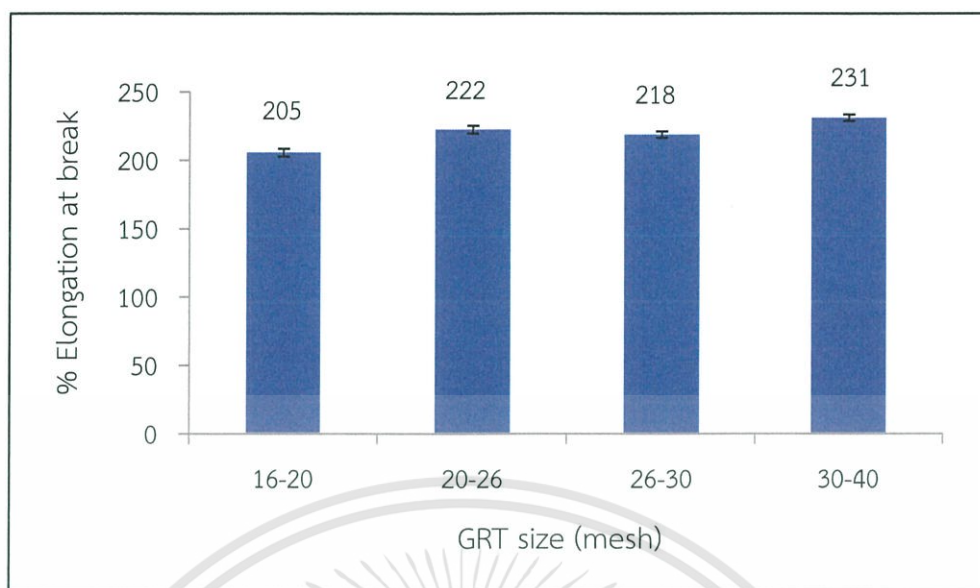


รูปที่ 4.5 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 200% ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ

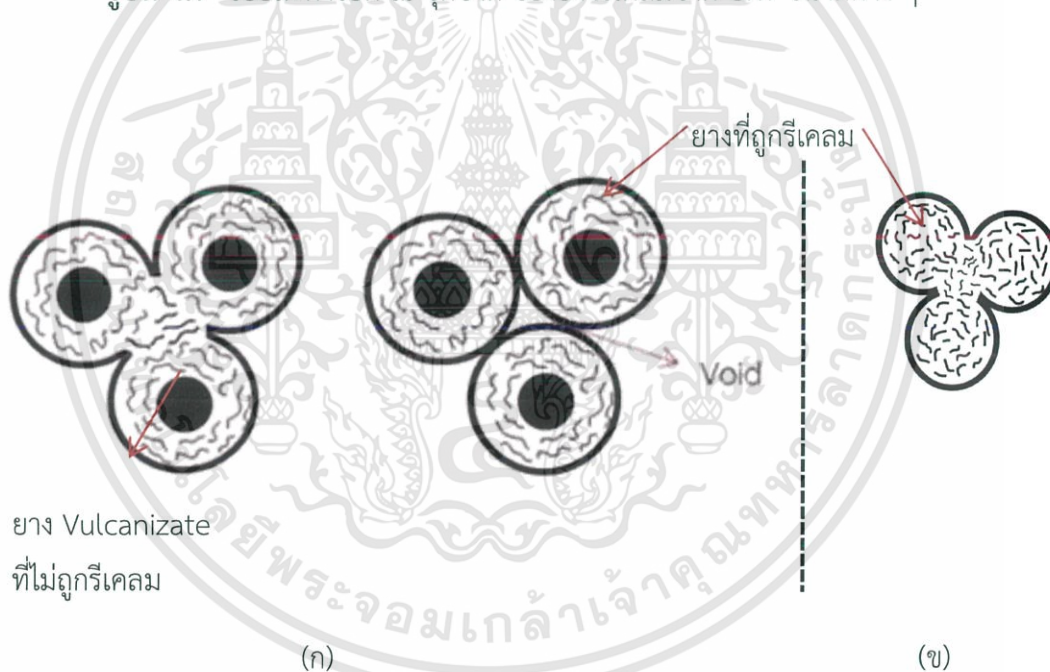


รูปที่ 4.6 ความแข็งกด ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

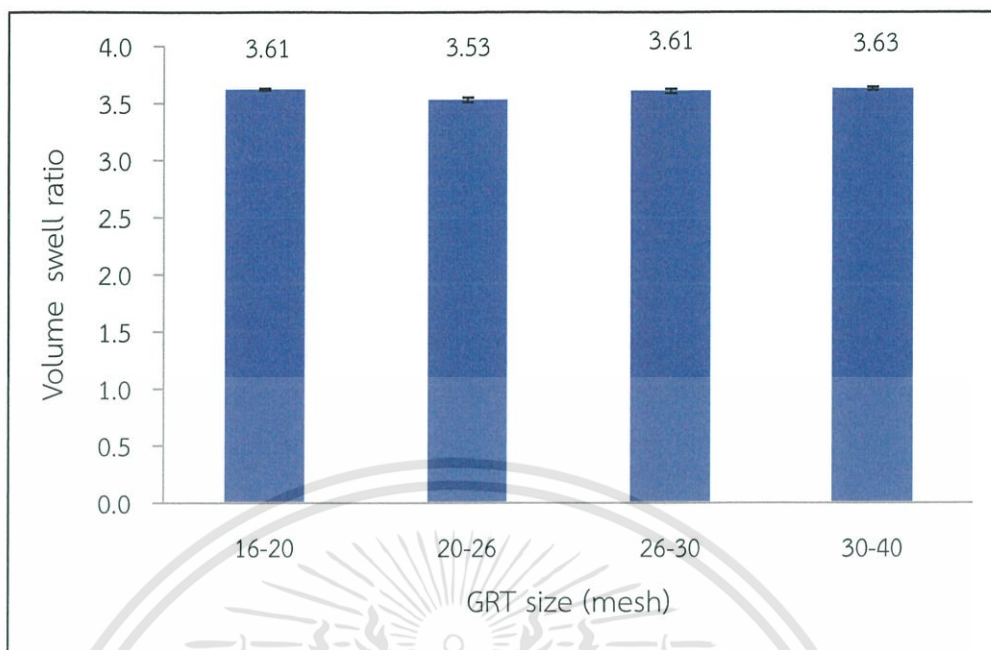


รูปที่ 4.7 ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ



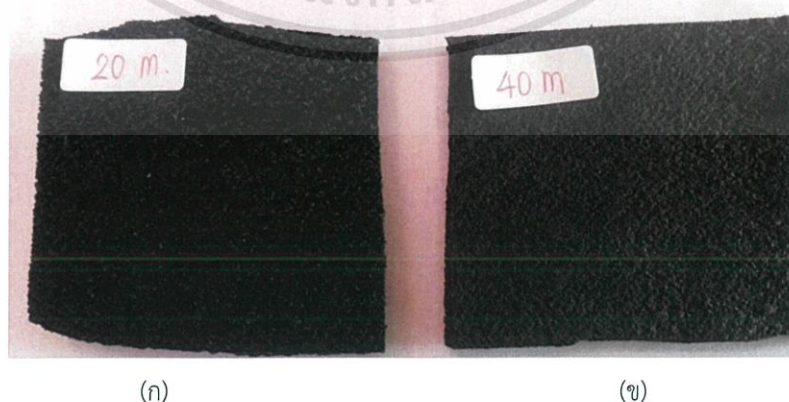
รูปที่ 4.8 แบบจำลองผลของการรีเคลม (ก) GRT ขนาดอนุภาคใหญ่ และ (ข) GRT ขนาดอนุภาคเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ

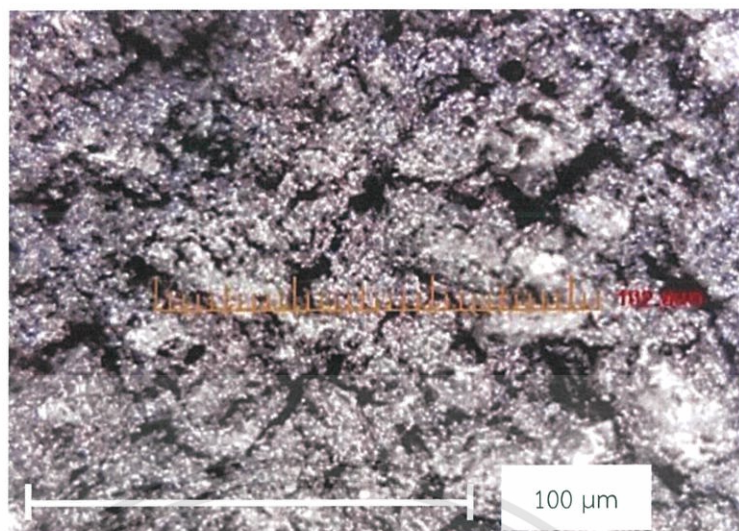
จากรูปที่ 4.10 เมื่อสังเกตภาพถ่ายแสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลม พบว่ายางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh มีพื้นที่ผิวที่เรียบเนียนกว่ายางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh เนื่องจากยางรีเคลมจาก GRT 30-40 mesh มีขนาดเล็กกว่า จึงทำให้พื้นผิวมีความละเอียดสูงกว่า ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าขนาดอนุภาคใหญ่ (16-20 mesh) มีก้อนของแข็งที่ไม่ถูกปฏิกิริยาดีวีลคาโนเซชัน และจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของยางรีเคลม ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ พบว่ายางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh มีความเรียบของพื้นผิวมากกว่ายางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh เนื่องจากยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh มีขนาดเล็กกว่า จึงมีความละเอียดที่พื้นผิวมากกว่า ทำให้พื้นผิวมีความเรียบมากกว่ายางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh



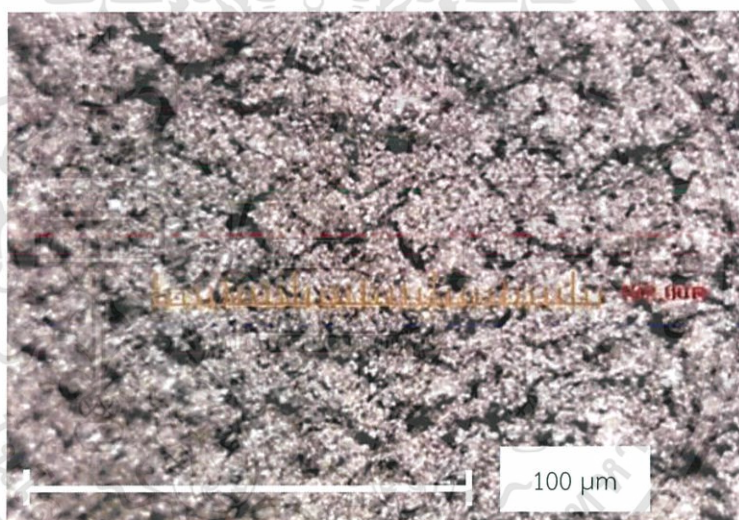
(ก)

(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT (ก) ขนาด 16-20 mesh และ (ข) 30-40 mesh  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



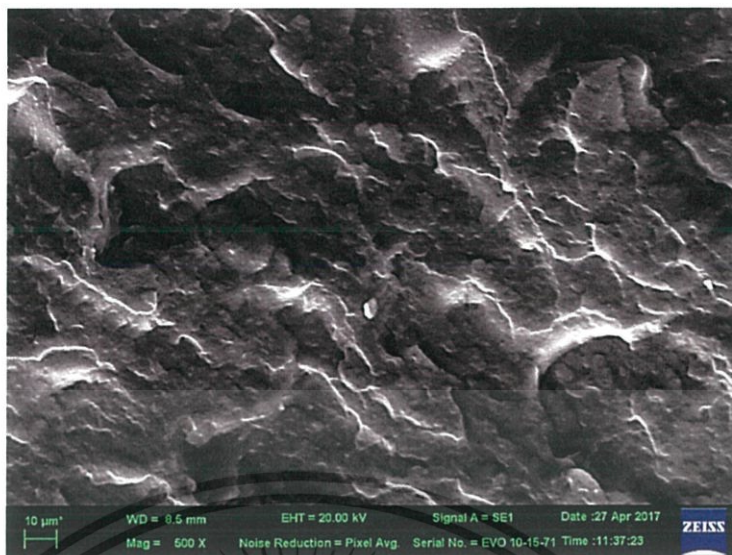
(ก)



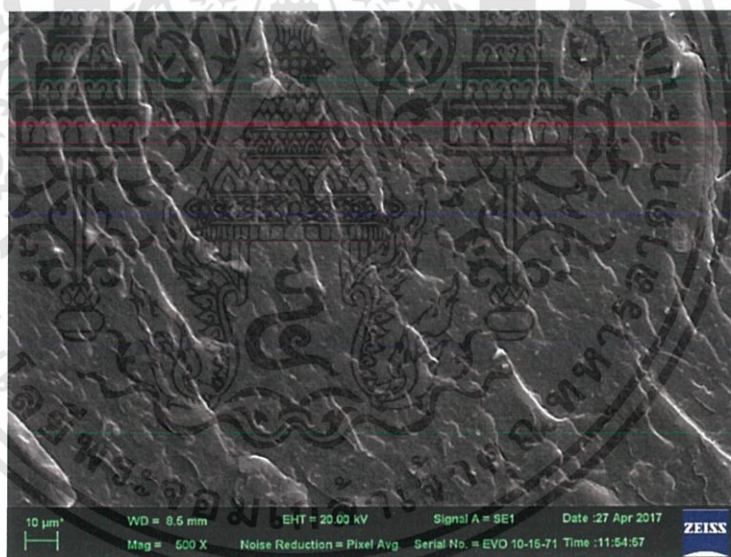
(ข)

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ (OM) แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT (ก) ขนาด 16-20 mesh และ (ข) 30-40 mesh (กำลังขยาย 10 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh (กำลังขยาย 500 เท่า)



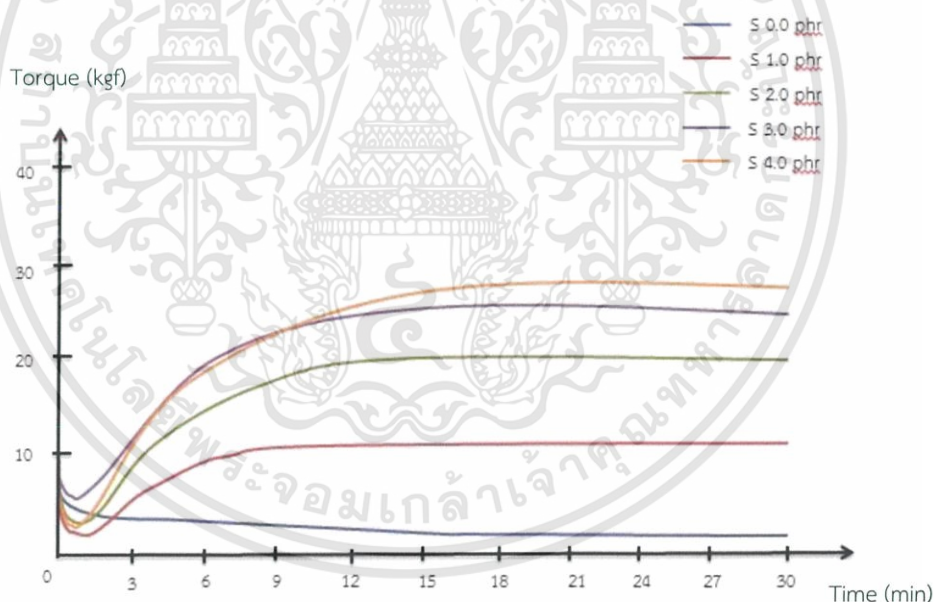
รูปที่ 4.13 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh (กำลังขยาย 500 เท่า)

การเลือกใช้ยางรีเคลมแต่ละขนาดมีความแตกต่างกันคือ ยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh คำนึงถึงการรับแรงเป็นสำคัญ แต่ยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh คำนึงถึงพื้นผิวผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสวยงาม อย่างไรก็ตามการเตรียม GRT 30-40 mesh มีขนาดอนุภาคที่เล็ก ส่งผลให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า เนื่องจากผ่านการบดนานกว่า โดยในทางอุตสาหกรรมควรเลือกใช้ยางรีเคลมจาก GRT 20-26 mesh เนื่องจากให้ความสำคัญกับสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงดึง ซึ่งเป็นสมบัติขั้นต่ำในการแบ่งเกณฑ์มาตรฐานต่าง ๆ

## 4.2 การศึกษาปริมาณกำมะถันที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลม

จากที่กล่าวข้างต้น การใช้ประโยชน์จากยาง จำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเชื่อมโยง เพื่อทำให้ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่ตรงให้เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ มีเสถียรภาพของรูปร่างและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยยางรีเคลมเป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจากยางที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว ยังคงมีสารเชื่อมโยงตกค้างอยู่จำนวนหนึ่ง และหากมีการเติมสารเชื่อมโยงมากเกินไป ส่งผลให้ความหนาแน่นในเชื่อมโยงสูงเกินไป จนทำให้ยางแข็งแต่เปราะ (แสดงได้ดังรูปที่ 4.16) หรืออาจเกิดการบวมของสารเชื่อมโยงได้

ในงานวิจัยตอนนี้เป็นการศึกษาปริมาณกำมะถันที่เหมาะสมในยางรีเคลม (0-4 phr) โดยใช้ยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh เนื่องจากเป็นขนาดของ GRT ที่บริษัท ยูเนี่ยนพัฒนา จำกัด มีมากที่สุด โดยทำการศึกษาแนวเปรียบเทียบกับยางรีเคลมที่ใช้ปริมาณกำมะถันแตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.14 พบว่ายางรีเคลมที่ไม่ใส่กำมะถัน (0 phr) ไม่ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงบิด แสดงให้เห็นว่ากำมะถันที่ตกค้างอยู่ในยางรีเคลม มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาเชื่อมโยง และเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน (1-4 phr) ส่งผลให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงลดลง และทำให้เกิดการเชื่อมโยง มีความแข็งและมอดูลัสที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่าแรงบิดสูงสุด เป็นผลเนื่องมาจากยางมีความหนาแน่นในการเชื่อมโยงที่สูงขึ้น



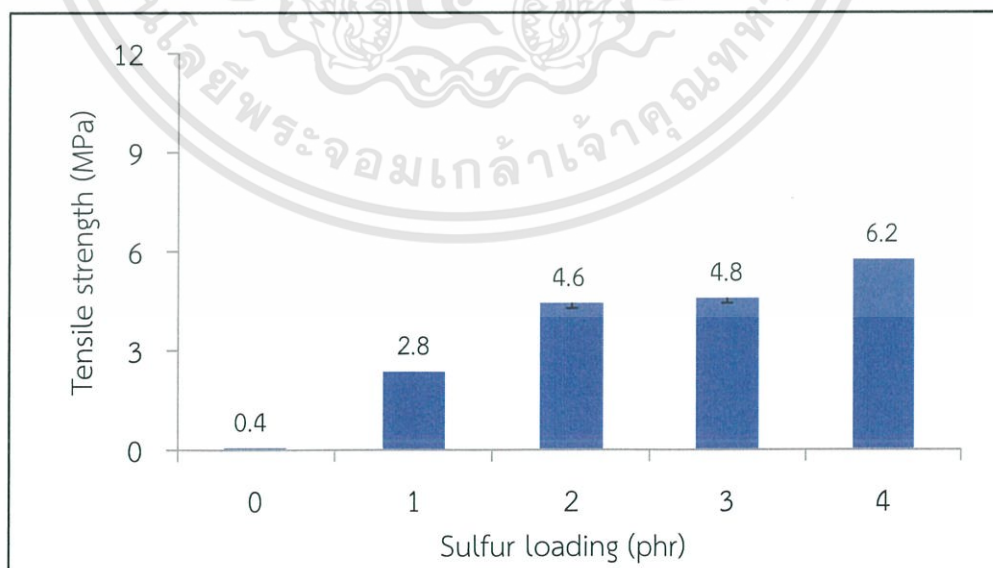
รูปที่ 4.14 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh ที่ใช้ปริมาณกำมะถันต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางรีเคลมที่ปริมาณกำมะถันแตกต่างกัน

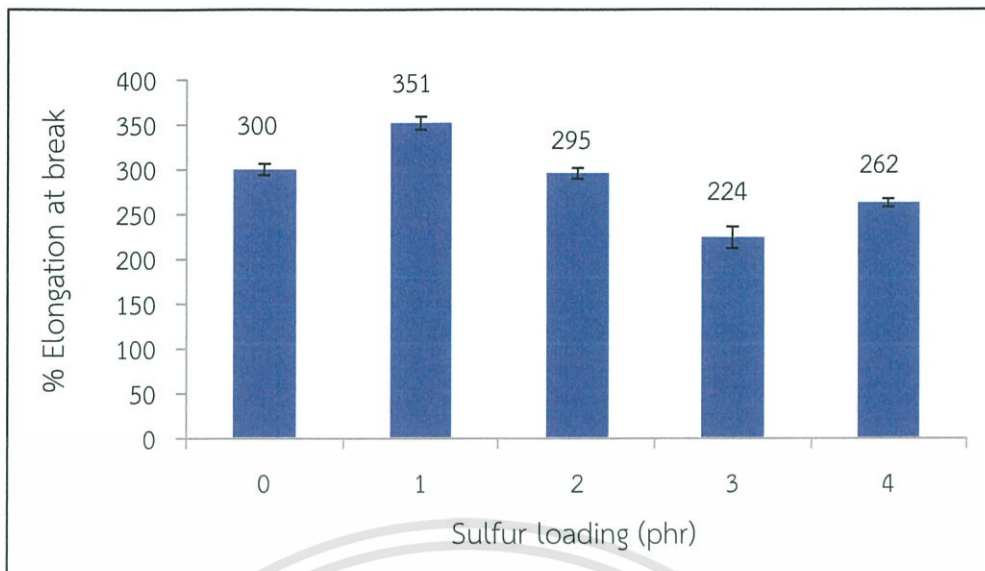
Properties	Sulfur loading (phr)				
	0	1	2	3	4
Scorch time, $t_{s2}$ (min)	n/a	2.36	1.51	1.36	1.27
Cure time, $t_{c90}$ (min)	n/a	7.34	10.01	11.19	12.24
$M_{HF}$ (kgf.cm)	n/a	11.52	20.80	26.57	27.43
Cure rate index, CRI ( $s^{-1}$ )	n/a	17.36	11.47	9.98	8.96

จากรูปที่ 4.15 พบว่าความแข็งแรงดึงของยางรีเคลม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกำมะถันที่เพิ่มขึ้นจาก 0-4 phr ขณะที่ร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณกำมะถันที่เพิ่มขึ้น แสดงได้ ดังรูปที่ 4.16 โดยค่ามอดุลัสที่ร้อยละยืด 100% ค่ามอดุลัสที่ร้อยละยืด 200% รวมถึงค่าความแข็งแรง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกำมะถันที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.17-4.19 ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.20 กล่าวคือ สมบัติเชิงกลของยางสัมพันธ์กับความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยาง หรือปริมาณกำมะถัน จะเห็นได้ว่าสมบัติบางประการของยาง เช่น ค่ามอดุลัส และความแข็งแรง จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลบางประการโดยเฉพาะสมบัติที่เกิดการแตกหัก (Fracture properties) เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ฯลฯ จะเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นในการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดจุดหนึ่ง (Optimum point) จากนั้นสมบัติเหล่านี้จะลดลง และจากรูปที่ 4.21 พบว่าอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรที่ปริมาณกำมะถัน 4 phr มีอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับปริมาณ 1, 2, และ 3 phr แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นในการเชื่อมโยงที่สูง ซึ่งเกิดจากการที่กำมะถันทำปฏิกิริยาลดคาโนเซชันกับยาง ดังรูปที่ 4.22 ดังนั้นเมื่อปริมาณกำมะถันมาก ทำให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงมากขึ้นด้วย

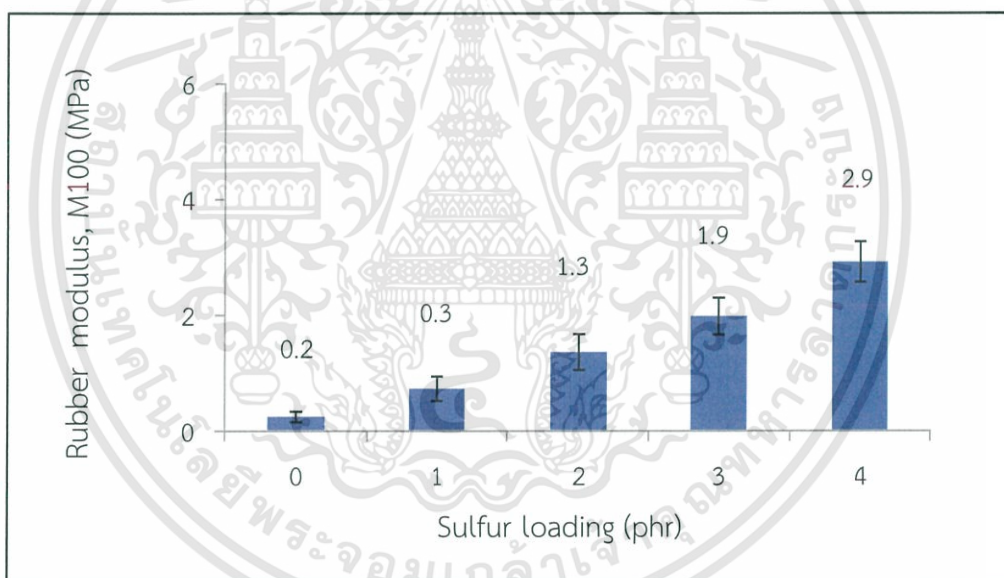


รูปที่ 4.15 ความแข็งแรงดึงของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถันที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงพาณิชย์เท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

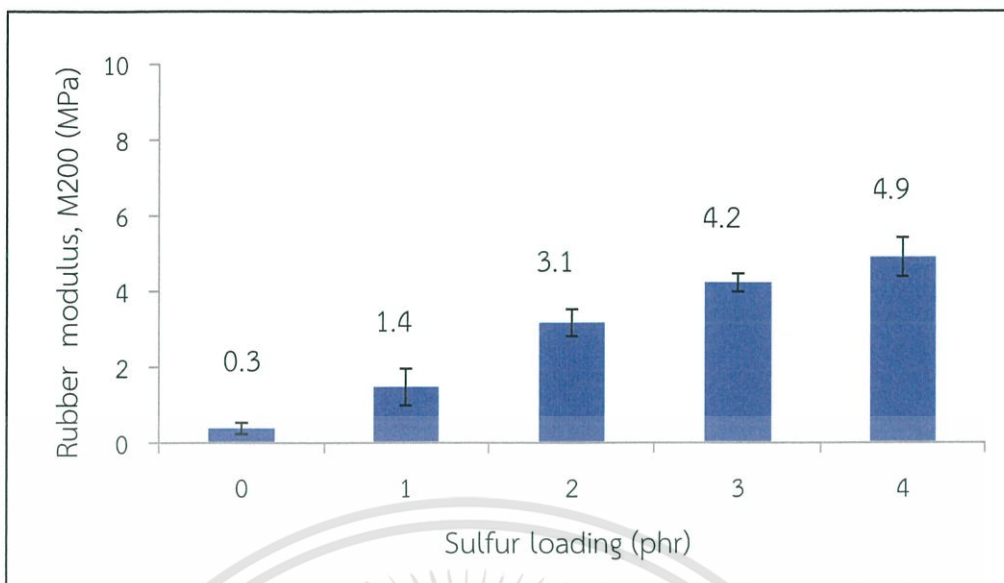


รูปที่ 4.16 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถันที่แตกต่างกัน

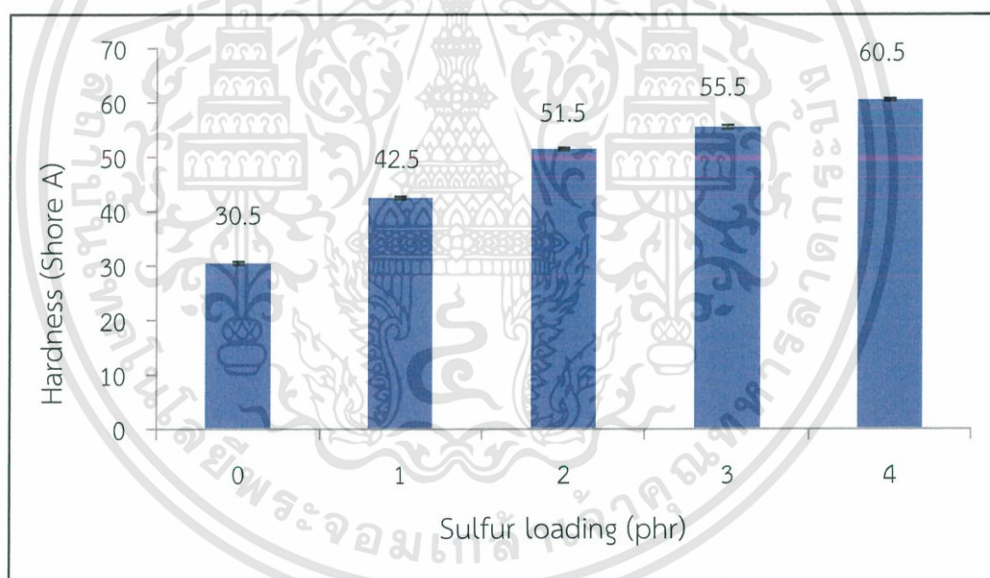


รูปที่ 4.17 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถันที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

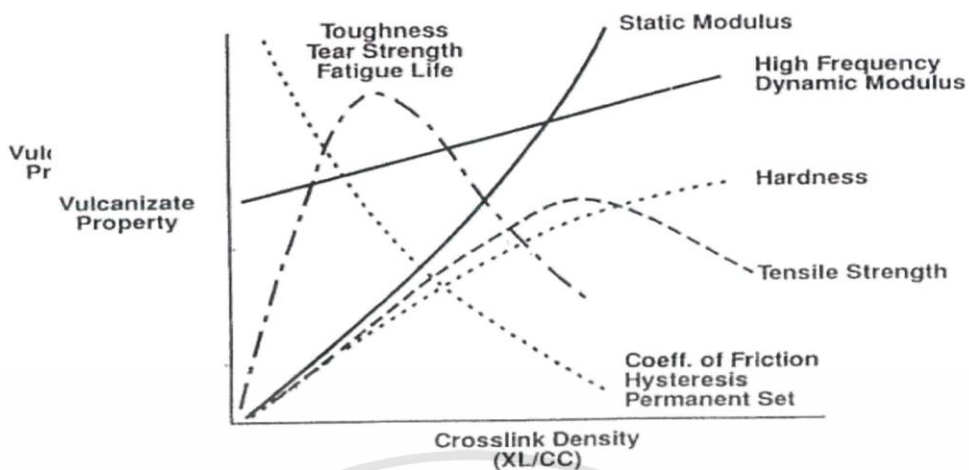


รูปที่ 4.18 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 200% ของยางรีเคิลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถันที่แตกต่างกัน

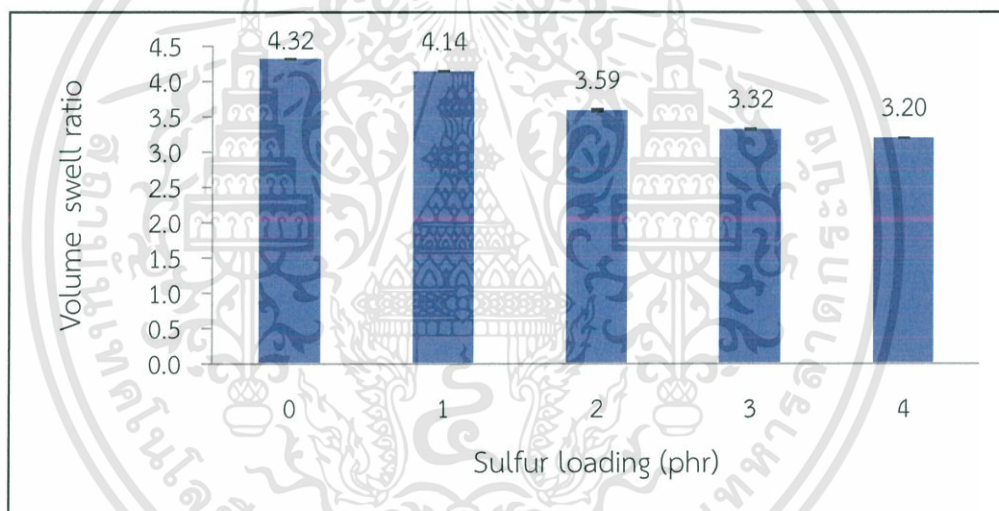


รูปที่ 4.19 ความแข็งกด ของยางรีเคิลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถันที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

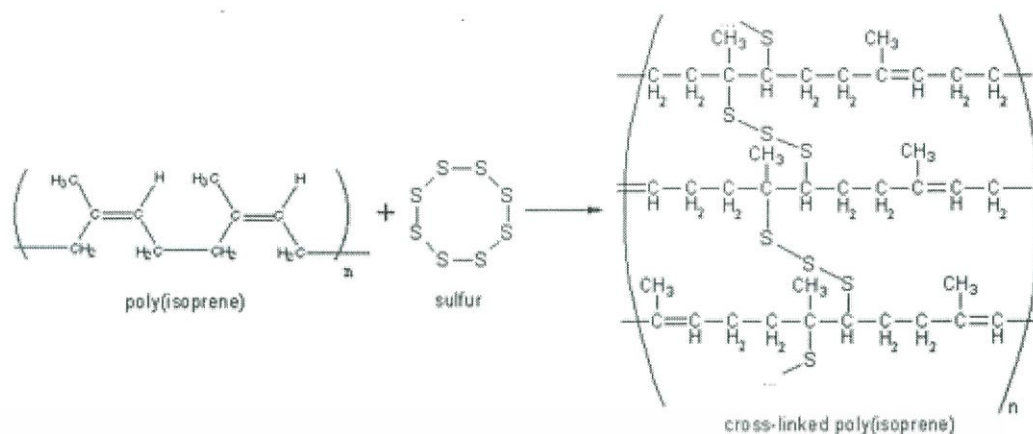


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นในเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางกับสมบัติเชิงกลบางประการของยาง [79]



รูปที่ 4.21 อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถันที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



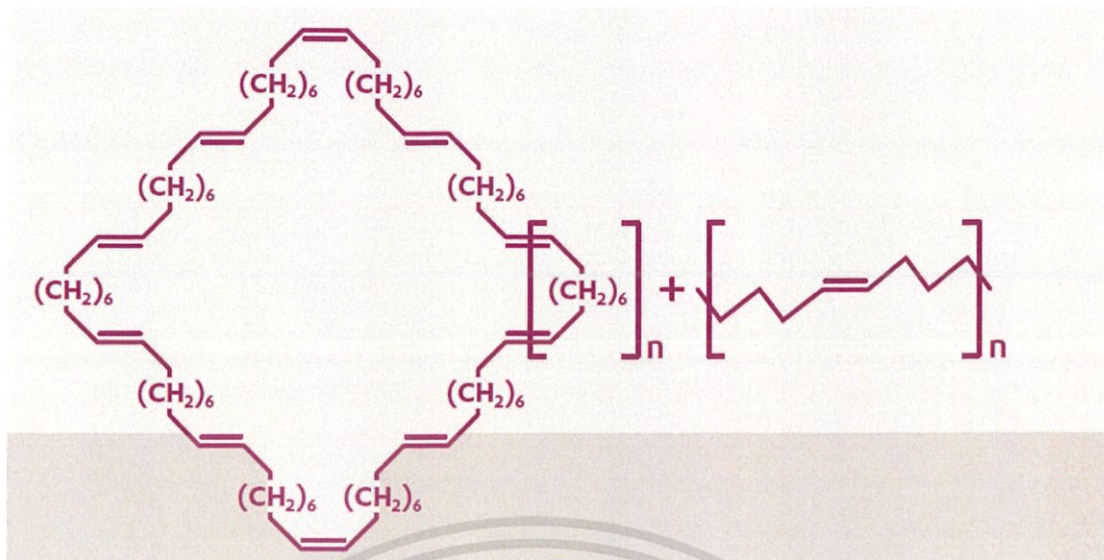
รูปที่ 4.22 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยางด้วยกำมะถัน [80]

ในงานวิจัยตอนนี้เป็นการศึกษาปริมาณกำมะถันที่เหมาะสมในยางรีเคลม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน (1-4 phr) ส่งผลให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงลดลง และเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงมากขึ้น ส่งผลให้มีความแข็งแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มอดูลัสและความแข็งเพิ่มสูงขึ้น ตามลำดับ ทั้งนี้ถ้าเกินจุดที่เหมาะสม อาจทำให้สมบัติดังกล่าวด้อยลงได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกนกพร คูศิริวานิชกร และคณะ ที่พบว่า ปริมาณของกำมะถันมากขึ้น ส่งผลให้มอดูลัสของยางเพิ่มสูงขึ้น แต่ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดก่อนที่จะลดลง [65]

#### 4.3 การศึกษาการใช้สารเติมแต่ง TOR เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม

จากที่กล่าวข้างต้น ยางรีเคลมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วมาผ่านกระบวนการตีวัลคาไนซ์ขึ้น เพื่อนำกลับมาเป็นวัตถุดิบใหม่อีกครั้ง ซึ่งผลของการตีวัลคาไนซ์เป็นการตัดพันธะ S-S อีกทั้งยังเป็นการตัดสายโซ่โมเลกุลยางให้สั้นลง จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ด้อยกว่ายางใหม่ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการตีวัลคาไนซ์ และในปัจจุบันยังไม่สามารถเทียบเท่ามาตรฐานได้ [6-7] จึงได้ทำการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เช่น เขม่าดำ, ผลึกเซลลูโลสขนาดนาโน (Cellulose nanocrystal), สารผสมระหว่างรำข้าวกับฟีนอลเรซิน (Rice bran carbon), สารตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic fillers), กรดฟอสฟอริก (Polyphosphoric acid) และ TOR เป็นต้น [81-85] โดยมีหลายงานวิจัยที่ทำการศึกษาคือการใช้สารเติมแต่ง TOR ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลดังกล่าว [42-46] เนื่องจากในโครงสร้างของ TOR มีพันธะคู่ทุก ๆ 8 อะตอมคาร์บอน ดังรูปที่ 4.23 ทำให้มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงมีความสนใจในการนำ TOR มาทำหน้าที่เป็นสารช่วยให้เกิดปฏิกิริยาต่อสายโซ่ และปฏิกิริยาเชื่อมโยงสายโซ่ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ TOR ยังมีจุดหลอมเหลวต่ำ (< 60°C) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย และเมื่อหลอมแล้ว จะมีความหนืดต่ำ ส่งผลให้เป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตที่ดีอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

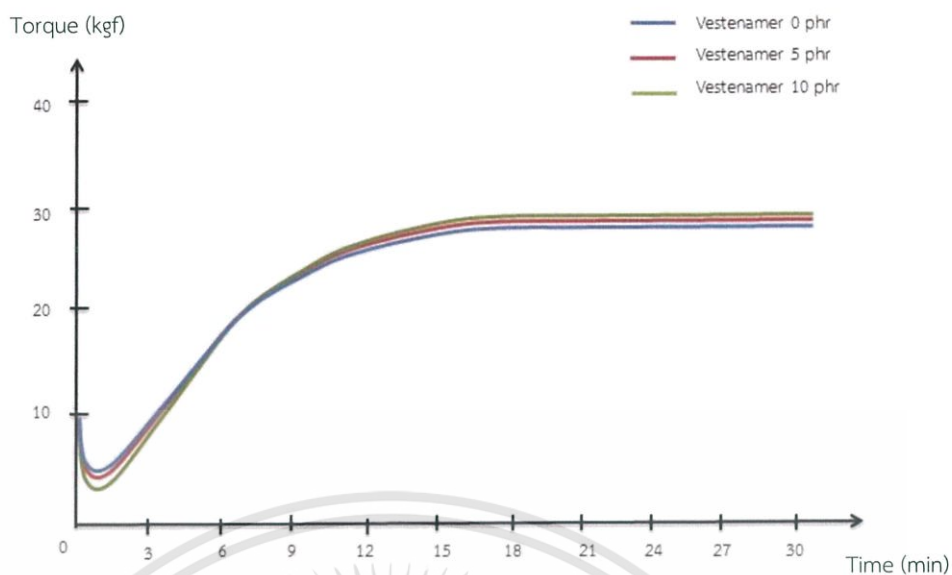


รูปที่ 4.23 โครงสร้างของ TOR [36]

ในการวิจัยตอนนี้ จึงได้ทำการศึกษาผลของการใช้ปริมาณ TOR ได้แก่ 5-10 phr ที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลมที่เตรียมได้ โดยเลือกใช้ยางวัตถุดิบ คือ GRT ขนาด 16-20 mesh จากรูปที่ 4.24 และตารางที่ 4.3 พบว่า การใช้ปริมาณ TOR ที่แตกต่างกัน ให้ลักษณะการเชื่อมโยงของยางรีเคลมที่เตรียมได้ ได้แก่ เวลาเริ่มเชื่อมโยง เวลาเชื่อมโยง อัตราเร็วการเชื่อมโยง และค่าแรงบิดสูงสุด ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องจากในยางรีเคลมมีโครงสร้างยางที่มีพันธะคู่จำนวนมาก การเพิ่มสารที่มีพันธะคู่ 5-10 phr จึงไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะการเชื่อมโยงสำหรับค่าแรงบิดต่ำสุด ( $M_L$ ) มีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการใช้ปริมาณสาร TOR ที่มากขึ้น เนื่องจาก TOR มีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อนำมาใช้ผสมในกระบวนการผลิตยางรีเคลม ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว คล้ายสารหล่อลื่น ซึ่งเป็นสารช่วยในกระบวนการผลิต ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติของ TOR ที่กล่าวข้างต้น [37] และสอดคล้องกับงานวิจัยของ H. Liu คณะ ที่พบว่า TOR เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืดลดลง เพิ่มความสามารถในการทำงาน และความเข้ากันได้ในการผสมดีขึ้น [69]

สถานะที่ใช้วัดความหนืดมูนีที่  $100^\circ\text{C}$  ซึ่ง TOR เปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว อย่างไรก็ตามอุณหภูมิดังกล่าวยังไม่ถึง  $150^\circ\text{C}$  ส่งผลให้กัมมันต์ยังไม่ทำงาน จึงยังไม่เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ นอกจากนี้ TOR มีโมเลกุลเล็ก และความหนืดต่ำกว่ายางรีเคลม การเพิ่ม TOR แทรก ระหว่างสายโซ่ ทำหน้าที่ช่วยลดความหนืดของยางคอมพาวด์ ทำให้ยางไหลได้ง่ายยิ่งขึ้น สามารถเห็นได้จากค่าความหนืดมูนีที่ลดลง เมื่อปริมาณ TOR มากขึ้น ดังรูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

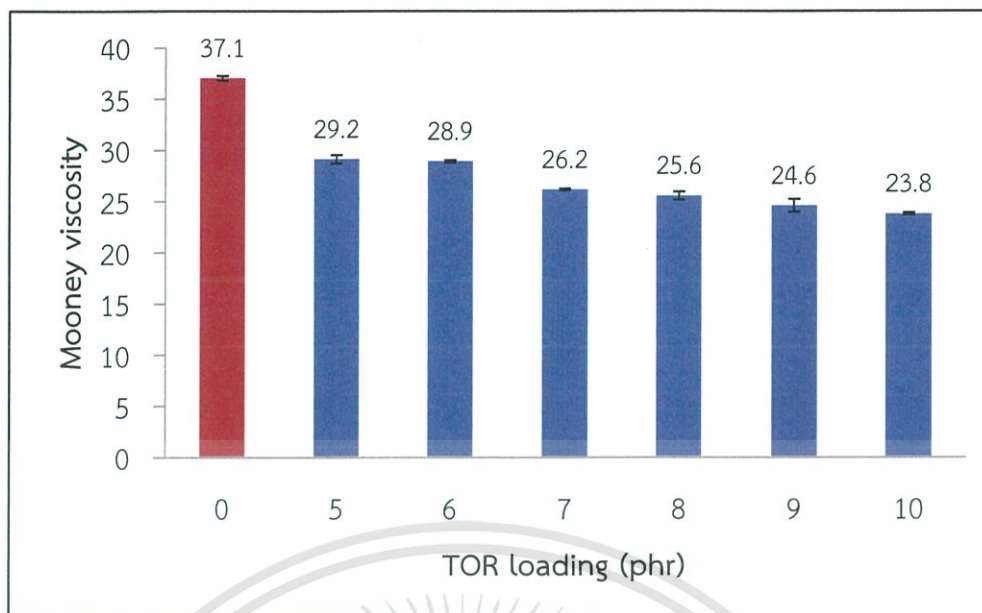


รูปที่ 4.24 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับปริมาณ TOR ที่ 5-10 phr

ตารางที่ 4.3 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางรีเคลมที่ใส่ TOR ที่แตกต่างกัน

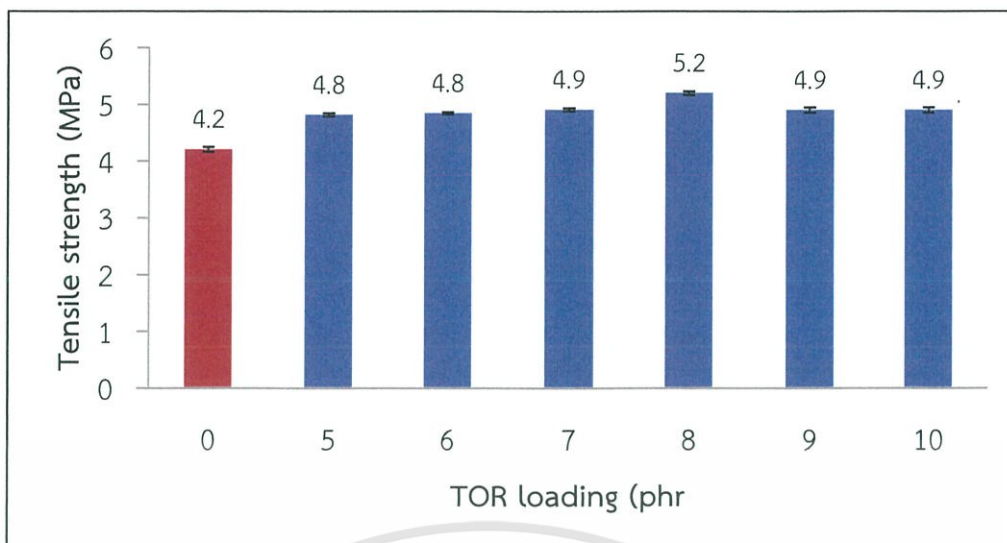
Properties	TOR loading (phr)						
	0	5	6	7	8	9	10
Scorch time, $t_{s2}$ (min)	1.33	1.33	1.36	1.38	1.44	1.48	1.52
Cure time, $t_{c90}$ (min)	11.09	12.00	12.06	12.10	12.16	12.20	12.24
$M_L$ (kgf.cm)	5.66	4.81	4.78	4.54	4.39	4.18	4.02
$M_{HF}$ (kgf.cm)	28.07	28.11	28.24	28.53	28.71	28.87	28.94
Cure rate index, CRI ( $s^{-1}$ )	10.25	9.37	9.35	9.33	9.33	9.33	9.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

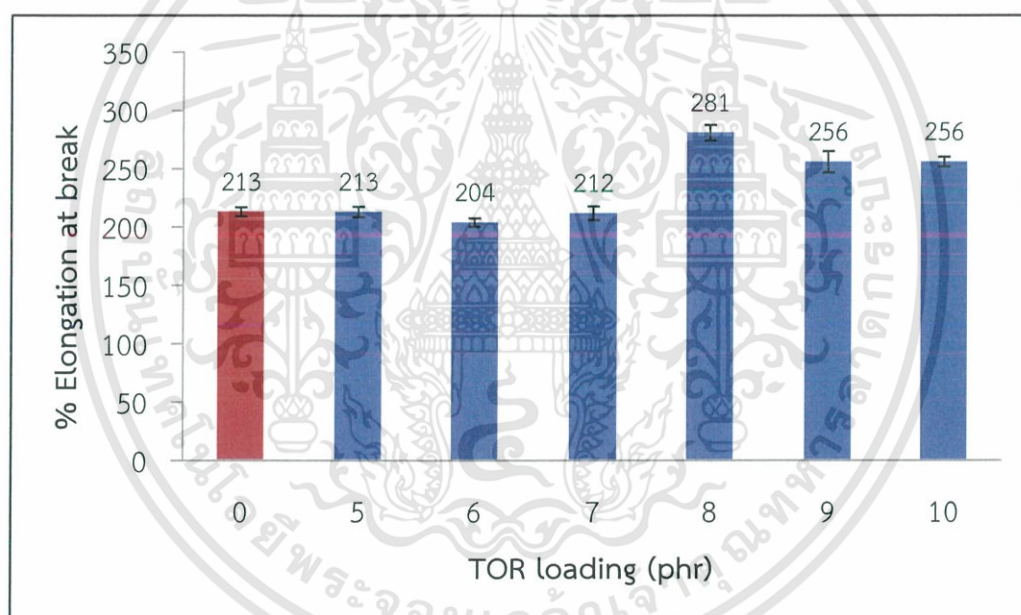


รูปที่ 4.25 ความหนืดมูนนี่ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับปริมาณ TOR ที่ 5-10 phr

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกล พบว่า การใช้ TOR (5-10 phr) ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (รูปที่ 4.26, 4.27) เนื่องจาก TOR มีพันธะคู่จำนวนมาก ทำให้มี Allylic hydrogen ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาผ่านอนุมูลอิสระ (Free radicals) ขณะขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อย่างมาก ส่งผลให้ยางมีความหนาแน่นในการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยที่กล่าวข้างต้น [42-46] อย่างไรก็ตาม ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 % และความแข็งกต มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 4.28, 4.29) โดยยางรีเคลมมีตำแหน่ง Allylic hydrogen มาก การเพิ่ม TOR (5-10 phr) เป็นปริมาณที่น้อยเกินไปในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยหลักในการเกิดโครงสร้างร่างแหสามมิติขึ้นกับปริมาณสารเชื่อมโยง (กำมะถัน) โดยในแต่ละสูตรใช้ปริมาณที่เท่ากัน (3 phr) ดังนั้นการใช้ TOR จึงไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม

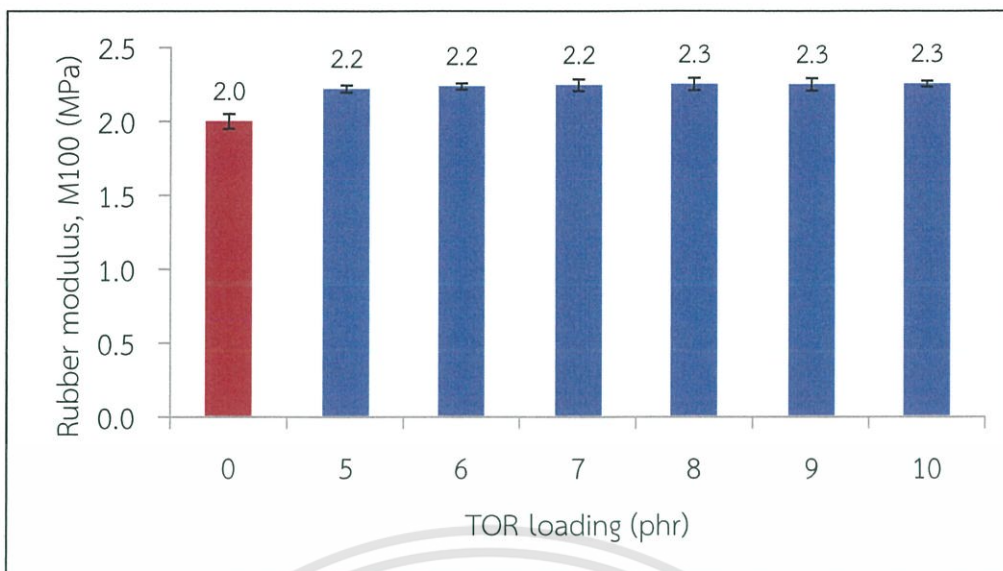


รูปที่ 4.26 ความแข็งแรงดึงของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับปริมาณ TOR ที่ 5-10 phr

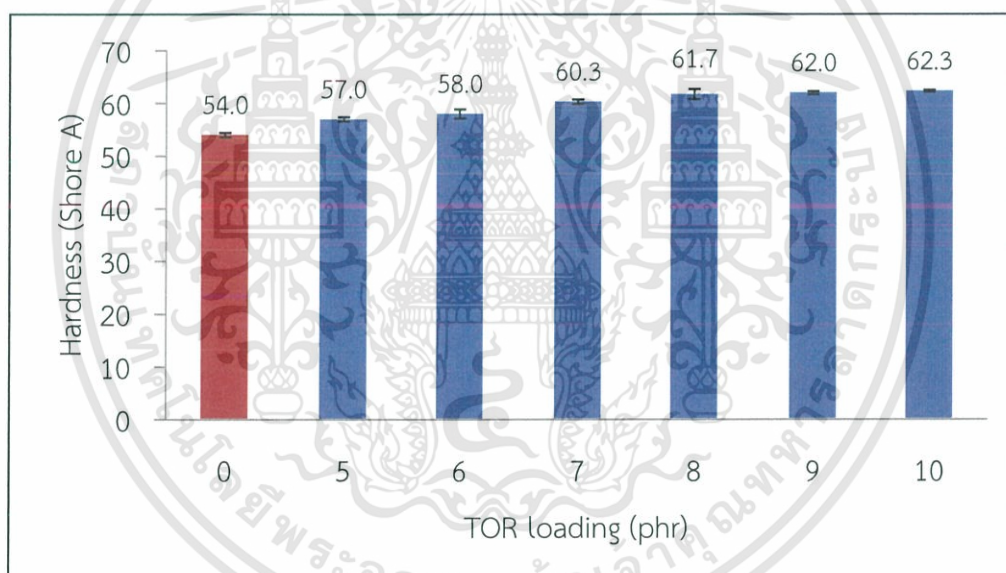


รูปที่ 4.27 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางรีเคลมที่จาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับปริมาณ TOR ที่ 5-10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



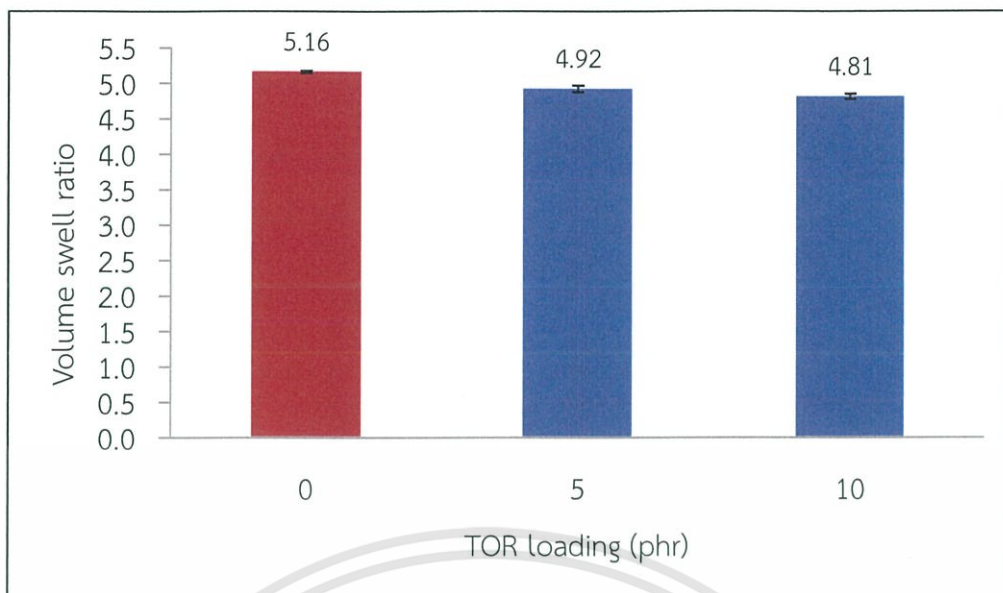
รูปที่ 4.28 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับปริมาณ TOR ที่ 5-10 phr



รูปที่ 4.29 ความแข็งกดของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับปริมาณ TOR ที่ 5-10 phr

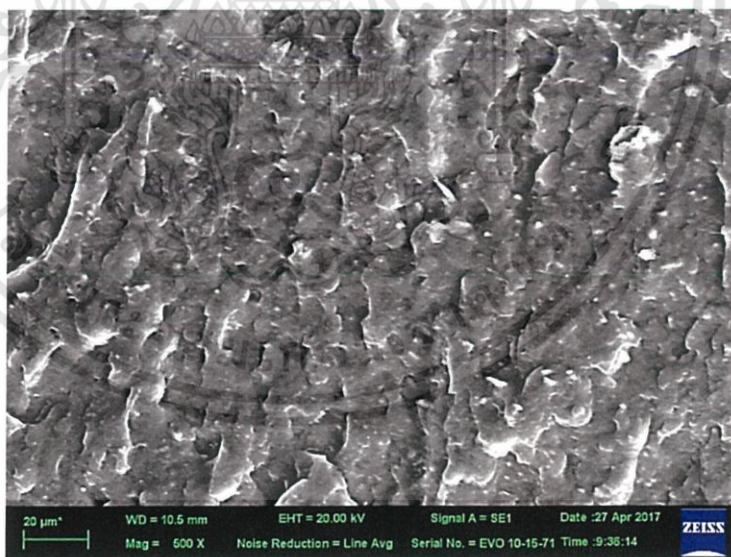
เพื่อยืนยันผลการทดสอบ ในงานวิจัยตอนนี้ยังทำการทดสอบผลของอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร พบว่าอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลม มีค่าไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญเมื่อใช้ปริมาณ TOR ที่ 5 และ 10 phr ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



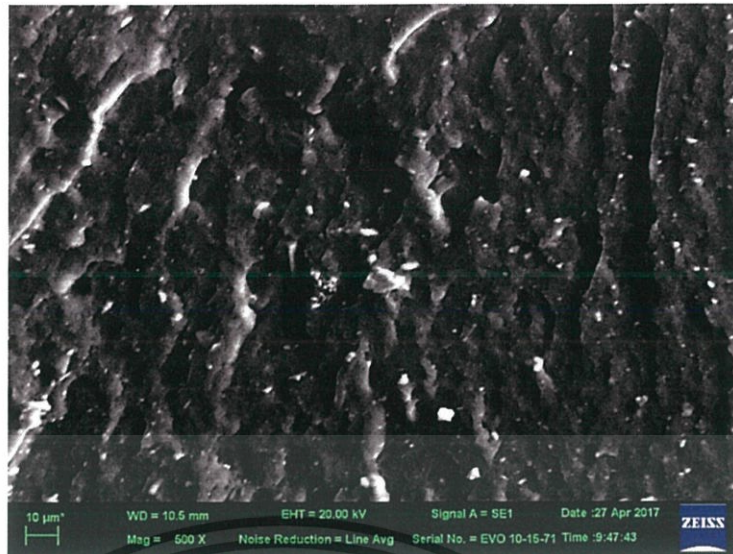
รูปที่ 4.30 อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh กับ ปริมาณ TOR ที่ 5-10 phr

จากรูปที่ 4.31-4.33 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของยางรีเคลมด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของยางแต่ละสูตรที่มีการใส่สารเติมแต่ง พบว่าการใส่ TOR ไม่ทำให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยามีการเปลี่ยนแปลง

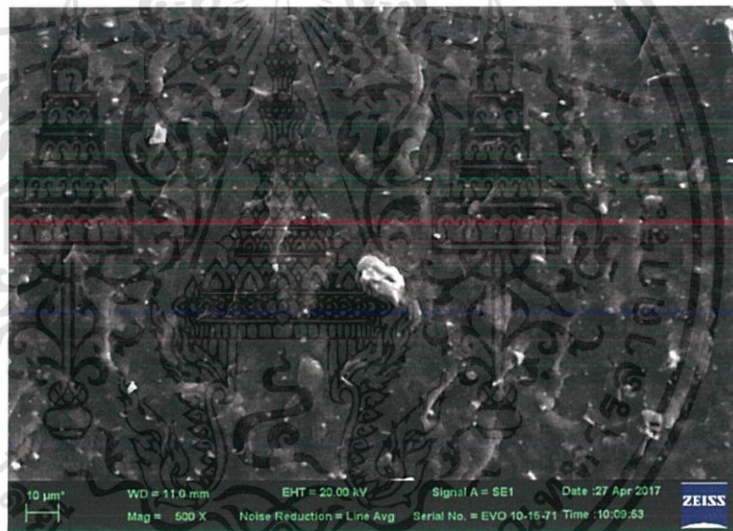


รูปที่ 4.31 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยไม่มีการใช้ TOR (กำลังขยาย 500 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่มีการใช้ TOR loading 5 phr (กำลังขยาย 500 เท่า)



รูปที่ 4.33 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่มีการใช้ TOR loading 10 phr (กำลังขยาย 500 เท่า)

ในงานวิจัยตอนนี้ ทำการศึกษาผลของการใช้ TOR ที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลม พบว่า การใช้ TOR ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่ามอดูลัสของยาง และความแข็งกด มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ไม่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง แต่ทำให้ความหนืดของยางลดลง ทำหน้าที่คล้ายสารช่วยกระบวนการผลิต และไม่ส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา อีกทั้งการใช้สารเติมแต่งในปริมาณที่มากขึ้น มีผลต่อค่าใช้จ่ายต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ

การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบของยางรีเคลมในสหกิจศึกษานี้ เพื่อศึกษาต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลมแต่ละสูตร เพื่อทำการเปรียบเทียบกับราคายางธรรมชาติ (NR) ซึ่งใช้ในการลดต้นทุนการผลิต

จากตารางที่ 4.5 พบว่ายางรีเคลมจาก GRT ขนาดต่าง ๆ มีราคาถูกกว่ายางธรรมชาติมาก แต่ในส่วนของยางรีเคลมผสม TOR มีราคาที่สูง และเมื่อเทียบกับสมบัติเชิงกลที่ได้ ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่เหมาะที่จะนำยางรีเคลมผสม TOR มาใช้ในกระบวนการผลิต โดยการใช้ยางรีเคลมมาทดแทนยางธรรมชาติ หรือนำมาผสมนั้น สามารถลดต้นทุนการผลิตทั้งในส่วนของเนื้อยาง และสารเติมแต่ง เนื่องจากยางรีเคลมจาก GRT ยังคงมีสารเติมแต่ง และสารอื่น ๆ หลงเหลืออยู่ ส่งผลให้ในการขึ้นรูปยางรีเคลมใช้ปริมาณสารเติมแตงน้อยกว่ายางธรรมชาติ นอกจากนี้การนำยางรีเคลมมาใช้ประโยชน์เป็นการลดปริมาณขยะยาง และเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง

ตารางที่ 4.4 ราคาต้นทุนวัตถุดิบของยางรีเคลมในแต่ละสูตร

วัตถุดิบและสารเคมี	ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ (phr)	ราคาวัตถุดิบ (บาท/กิโลกรัม)
ยางรีเคลมจาก GRT (16-20 mesh)	100	18
ยางรีเคลมจาก GRT (20-26 mesh)	100	23
ยางรีเคลมจาก GRT (26-30 mesh)	100	28
ยางรีเคลมจาก GRT (30-40 mesh)	100	33
ZnO	5	87
Stearic acid	2	37.5
MBT	0.5	92
DPG	0.2	220
กำมะถัน	3	12
Trans-polyoctenamer (TOR)	5-10	460

หมายเหตุ ราคาต้นทุนวัตถุดิบ ณ เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบต้นทุนที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลมแต่ละสูตรกับยางธรรมชาติ

ราคายางรีเคลมในแต่ละสูตร	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ค่าใช้จ่ายที่ลดลง เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ (%)
Natural rubber (NR)*	71.15	-
ยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh	24.04	66.21
ยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh	29.04	59.38
ยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh	34.04	52.16
ยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh	39.04	54.87
ยางรีเคลมผสม TOR 5 phr	47.04	33.89
ยางรีเคลมผสม TOR 10 phr	70.04	1.56
ยางรีเคลมผสมกำมะถัน 3 phr	24.04	66.21
ยางรีเคลมผสมกำมะถัน 4 phr	24.05	66.20

หมายเหตุ \*ราคายางแผ่นรมควันชั้นสาม ณ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สหกิจศึกษานี้เป็นการศึกษาการเพิ่มสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม โดยเน้นศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของยางรีเคลม ได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกลต่าง ๆ อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร และสัญญาณวิทยา มีปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ยางรีเคลมที่เตรียมจากขนาด GRT ที่แตกต่างกัน (16-20, 20-26, 26-30 และ 30-40 mesh) และปริมาณกำมะถันที่แตกต่างกัน (0-4 phr) รวมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สารเติมแต่ง Trans-polyoctenamer (TOR) (5-10 phr) ในการปรับปรุงสมบัติของยางรีเคลม

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

- ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ที่แตกต่างกันคือขนาด 16-20, 20-26, 26-30 และ 30-40 mesh พบว่ายางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าเมื่อเทียบกับยางรีเคลมจาก GRT ขนาดอื่น ๆ แต่ค่ามอดูลัสของยาง ความแข็งกด และและค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

- ยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh มีค่าความแข็งแรงดึง เท่ากับ 6.9 MPa ซึ่งผ่านมาตรฐาน ISO/CD 19846 เกรด C [6]

- ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยปริมาณกำมะถันที่แตกต่างกัน คือ 0-4 phr พบว่าปริมาณกำมะถันส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง ซึ่งค่าความแข็งแรงดึง ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางรีเคลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละการยืด ณ จุด-ขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณกำมะถันที่เพิ่มขึ้น

- ผลการศึกษาค่าความเป็นไปได้การใช้ TOR ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม พบว่าการใช้ TOR ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่ามอดูลัสของยาง และความแข็งกด มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ไม่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง แต่ทำให้ความหนืดของยางลดลง โดย TOR ทำหน้าที่คล้ายสารช่วยกระบวนการผลิต และไม่ส่งผลต่อลักษณะทางสัญญาณวิทยา

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาวัตถุดิบอื่น ๆ มาใช้ในกระบวนการผลิตยางรีเคลม เช่น ถูมือยาง [66]
2. ควรทดสอบสมบัติบางประการของยางรีเคลมเพิ่มเติม เช่น ค่าความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ค่าการเสียรูปถาวร (Compression set) เป็นต้น เพราะสมบัติเหล่านี้มีความจำเป็นต่อการพิจารณาสมบัติยางรีเคลม ก่อนนำไปใช้งาน
3. ควรศึกษาสารเติมแต่งชนิดอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของยางรีเคลม เช่น Poly(ethylene-co-vinyl acetate) และ Tetra benzyl thiuram disulfide [86-87]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัท คอนติเนนทัลแพลตฟอร์ม จำกัด. 2560. สถานการณ์ปัจจุบันของขยะยางรถยนต์. [Online]. Available: <http://continental-platform.com/th/eco-friendly-rubber-recycling>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 ธ.ค. 59.
- [2] บริษัท เรืองรัตน์ อินเตอร์ พลาสติก จำกัด. 2559. การขึ้นรูปพลาสติก. [Online]. Available: <http://www.ruengrat.com>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 ธ.ค. 59.
- [3] พงษ์ธร แซ่อู่ย. 2552. เทคโนโลยีการรีไซเคิลยาง. [Online]. Available: <http://www.rubbercenter.org/informationcenter/file/magazine9.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 ธ.ค. 59.
- [4] ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย. 2558. ยางรีเคลม. [Online]. Available: <http://www.Onartgroup.com/Article/0326.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 ธ.ค. 59.
- [5] บริษัท ยูเนียนพัฒนกิจ จำกัด. 2560. Reclaimed Rubber Specification. [Online]. Available: [http://ucdrubber.com/products\\_reclaim\\_thai.php](http://ucdrubber.com/products_reclaim_thai.php). เข้าถึงเมื่อวันที่ 16 ธ.ค. 59.
- [6] International Organization for Standardization (ISO). 2015. Reclaimed rubber Coding and classification system: ISO/CD 19846.
- [7] Rolexreclaim. 2017. Whole Tyre Reclaim Rubber. [Online]. Available: <http://www.Spotchemi.eu/techspec/08156.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 30 ธ.ค. 59.
- [8] บริษัท บางกอก ไทร์ เทรดิง จำกัด. 2555. ยางรถยนต์เก่า. [Online]. Available: <http://bangkoktiretrading.blogspot.com/2012/08/btt.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 16 ธ.ค. 59.
- [9] ระบบจัดการความรู้ การยางแห่งประเทศไทย. 2560. ผลิตภัณฑ์ยาง. [Online]. Available: [http://www.thaitechno.net/uploadedimages/c1/Product\\_38520\\_237194247\\_fullsize.jpg](http://www.thaitechno.net/uploadedimages/c1/Product_38520_237194247_fullsize.jpg). เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 ธ.ค. 59.
- [10] Recyclechina. 2555. Nature latex scraps. [Online]. Available: <http://www.recyclechina.com/leads/details66176.htm>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 18 ธ.ค. 59.
- [11] Takaroonsin. 2555. ยางวง. [Online]. Available: <https://takaroonsin.co.th/product/ProductDetail/1544>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 18 ธ.ค. 59.
- [12] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2553. ยางรีเคลม. [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/ยางรีเคลม>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 ม.ค. 60.
- [13] P. Nelson and K. Sunil. 2003. Studies on the Utilisation of Rubber Reclaim in Elastomers. [Online]. Available: [http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/3559/9/09\\_chapter%201.pdf](http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/3559/9/09_chapter%201.pdf). เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 ม.ค. 60.
- [14] Alibaba. 2559. ยางรีเคลม. [Online]. Available: [http://i01.i.aliimg.com/img/pb/246/437/538/538437246\\_906.jpg](http://i01.i.aliimg.com/img/pb/246/437/538/538437246_906.jpg). เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 ม.ค. 60.
- [15] M. Leary. 2003. Evaluation of Waste Tire Devulcanization Technologies. [Online]. Available: <http://www.ciwmb.ca.gov/Publications/Tires/62204008.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 ม.ค. 60.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] ชนกนันท์ ธีระพงษ์. 2551. การพัฒนากระบวนการรีเคลมในปัจจุบัน [Online]. Available: <http://www.vcharkarn.com/blog/35534/5399>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 3 ม.ค. 60.
- [17] B. Adhikari, D. De and S. Maiti. 2000. Reclamation and recycling of waste Rubber. Progress in Polymer Science: 909-948.
- [18] บริษัท ไทยเร็นท์อีโก้คาร์ จำกัด. 2555. โครงสร้างพื้นฐานของยางรถยนต์. [Online]. Available: <http://static1velaeasyreadyplanet.com/www.thairentecocar.com/images/edior.jpg>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 3 ม.ค. 60.
- [19] Blogspot. 2559. ยางรถยนต์. [Online]. Available: [http://4.bp.blogspot.com/-pU\\_KFOQSD7/8C6sYLUFL4g/s1600/Reuse07.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-pU_KFOQSD7/8C6sYLUFL4g/s1600/Reuse07.jpg) เข้าถึงเมื่อวันที่ 3 ม.ค. 60.
- [20] วิชาการคอม. 2555. ถู่มือยาง. [Online]. Available: [http://www.vcharkarn.com/userfiles/74451/4\(146\).jpg](http://www.vcharkarn.com/userfiles/74451/4(146).jpg). เข้าถึงเมื่อวันที่ 30 ธ.ค. 59.
- [21] บริษัท คอนติเนนตัล แพลทฟอร์ม (ไทยแลนด์) จำกัด. 2559. ผงยาง. [Online]. Available: [http://continental-platform.com/wpcontent/uploads/sbr\\_rubber\\_powder\\_mesh\\_30.jpg](http://continental-platform.com/wpcontent/uploads/sbr_rubber_powder_mesh_30.jpg). เข้าถึงเมื่อวันที่ 3 ม.ค. 60.
- [22] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2559. เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะของวัสดุ. [Online]. Available: [https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/files/presentation/Technique for PC.pdf](https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/files/presentation/Technique%20for%20PC.pdf). เข้าถึงเมื่อวันที่ 3 ม.ค. 60.
- [23] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2557. ขนาดอนุภาค. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/6050/particle-size>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 ม.ค. 60.
- [24] นิธิยา รัตนานนท์. 2557. Sieve analysis. [Online]. Available: <http://www.Foodnetworksolution.com/wiki/word/1303/sieve-analysis>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 ม.ค. 60.
- [25] พงศธร บุญรอด. 2551. เมชคืออะไร. [Online]. Available: <http://www.vicharkarn.com/vcafe/151528>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 ม.ค. 60.
- [26] ร้านเคมีภัณฑ์. 2556. mesh คืออะไร. [Online]. Available: <https://contentchemipan.net/home/index.php/634>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 ม.ค. 60.
- [27] ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย. 2552. กระบวนการผลิตยาง. [Online]. Available: <http://www.rubbercenter.org/files/process.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 6 ม.ค. 60.
- [28] อธิพิณ แจ้งชัด. 2554. เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชาเทคโนโลยียาง. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [29] ภัณชิตา ภูมิมะเปียบ. 2554. สารเคมีสำหรับยาง. [Online]. Available: <http://www.dss.go.th/images/st-article/pep-8-2556-afr.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 6 ม.ค. 60.
- [30] VICTORIA HOTEL. 2559. สารเติมแต่งของยาง. [Online]. Available: [http://www.hotelvictorialyon.com/wp-content/uploads/2014/05/1403034330-lastic\\_rawmaterial\\_for\\_film\\_raffia\\_yarn.jpg](http://www.hotelvictorialyon.com/wp-content/uploads/2014/05/1403034330-lastic_rawmaterial_for_film_raffia_yarn.jpg). เข้าถึงเมื่อวันที่ 6 ม.ค. 60.
- [31] Wikimedia Commons. 2016. Cure curve. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cure curve.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cure_curve.svg) Plastic raw material for film raffia yarn.jpg. เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 ม.ค. 60.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [32] MK Nanotechnology. 2016. **Sulfenamides**. [Online]. Available: <http://www.suggestkeywords.com/c3VsZmVuYW1pZGU>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 6 ม.ค. 60.
- [33] Wikimedia Commons. 2016. **Mercaptobenzothiazole**. [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2-Mercaptobenzothiazole.png>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 6 ม.ค. 60.
- [34] Wikimedia Commons. 2016. **N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylenediamine**. [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylenediamine.svg>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 6 ม.ค. 60.
- [35] SIGMA ALDRICH. 2016. **Dicumyl peroxide**. [Online]. Available: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/329541?lang=en&region=TH>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 6 ม.ค. 60.
- [36] Evonic Industries. 2016. **Rubber additive with unique properties-VESTENAMER**. [Online]. Available: <http://www.vestenamer.com/sites/lists/PP-HP/VESTENAMER-8012-EN.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 ม.ค. 60.
- [37] R. Amme. 2004. **Ground Tire Rubber and Trans-Polyoctenamers Asphalt Binder Additives**. [Online]. Available: <http://www.petersenasphaltconference.org/download/2004/24Amme.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 ม.ค. 60.
- [38] Evonic Industries. 2016. **The Rubber Additive with Unique Properties**. [Online]. Available: <http://www.struktol.com/pdfs/Vestenamer%208012-Evonik.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 ม.ค. 60.
- [39] Evonic Industries. 2015. **Vestenamer**. [Online]. Available: <http://www.suministro.com.mx/pdfs/publicaciones/vestenamer.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 มี.ค. 60.
- [40] M. Solaimanian, D. Anderson and D. Hunter. 2013. **Evaluation of vestenamer reactive modifier in crumb rubber asphalt**. [Online]. Available: [http://www.dot7.state.pa.us/BPR\\_PDF\\_FILES/Documents/Research/Complete%20Projects/Design/.pdf](http://www.dot7.state.pa.us/BPR_PDF_FILES/Documents/Research/Complete%20Projects/Design/.pdf). เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 มี.ค. 60.
- [41] Chemicals Notification and Assessment. **Cyclooctene Homopolymer**. 2000. [Online]. Available: [https://www.nicnas.gov.au/data/assets/pdf\\_file/0020/9524/PLC121\\_FR.pdf](https://www.nicnas.gov.au/data/assets/pdf_file/0020/9524/PLC121_FR.pdf). เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 มี.ค. 60.
- [42] A. David, A. Anderson and B. Bernie. 2004. **Modification of rubberized asphalt with polyoctenamer**. [Online]. Available: <http://www.petersenasphaltconference.org/download/2004/23Anderson.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 มี.ค. 60.
- [43] K. Nieve and N. Puga. 2013. **Rheology and performance evaluation of Polyoctenamer as Asphalt Rubber modifier in Hot Mix Asphalt**. Civil Engineering Materials. Science. Iowa State University. : 28-82.
- [44] Evonic Industries. 2016. **Recycling of GTR with VESTENAMER**. [Online]. Available: [http://www.vestenamer.de/VI-VESTENAMER-Waste-Rubber\\_Recycling.pdf](http://www.vestenamer.de/VI-VESTENAMER-Waste-Rubber_Recycling.pdf). เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 มี.ค. 60.

- [45] C. Nah, S. Han, B. Jo, W. Kim, and Y. Chang. 2001. Influences of transPolyoctylene Rubber on the Physical Properties and Phase Morphology of Natural Rubber/Acrylonitrile-Butadiene Rubber Blends. *Journal of Applied Polymer Science* 86 : 125-134.
- [46] A. Georgiy, I. Yulia, L. Maria, B. Liya, D. Arkadiy, Sh. Eugene and V. Yaroslav. 2017. Peculiarities of crystallization in the multiblock copolymers of norbornene and cyclooctene. *European Polymer Journal* 86 : 143-153.
- [47] บริษัท ไทยรับเบอร์ ซอร์ซซิ่ง จำกัด. 2559. โครงสร้างของสารรีคอม. [Online]. Available: <http://www.thairubbersourcing.com/wp-content/uploads/2013/02/s-s.jpg>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 ม.ค. 60.
- [48] Rubber Intelligence Unit. 2556. เทคโนโลยีการผสมยาง [Online]. Available: <http://rubber.oie.go.th/Article.aspx?aid=3403>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 ม.ค. 60.
- [49] บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด. 2557. เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง. [Online]. Available: <http://www.chareontut.com/Default.aspx?lang=th&pageid=8>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 60.
- [50] ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย. 2554. เทคโนโลยีการคงรูปยาง. [Online]. Available: <http://www.rubbercenter.org/files/rtec/vulcanization-RTEC.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 60.
- [51] SL Rubber Industry Co., Ltd. 2543. การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ยาง. [Online]. Available: <http://www.slrubber.net/NP-21415.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 60.
- [52] ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย. 2554. เครื่องมือและอุปกรณ์. [Online]. Available: <http://www.rubbercenter.org/index.php/service/testing-facilities>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 60.
- [53] Nawi. 2556. Rubber compounding basics. [Online]. Available: <https://rubbertech.wordpress.com/category/technical-notes>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 60.
- [54] EKTRON TECH. 2014. Oscillating Disc Rheometer. [Online]. Available: <https://www.ektrontek.com/oscillating-disc-rheometer-ekt-100h.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 60.
- [55] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2554. เครื่องจักรประเภทต่าง ๆ. [Online]. Available: <http://rubber.oie.go.th/box/Article/21041/1.เครื่องจักรประเภทต่างๆ.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 60.
- [56] สถาบันพลาสติก. 2554. เทคโนโลยีการขึ้นรูปยาง. [Online]. Available: <http://rubber.oie.go.th/box/Article/3404/forming34041.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 60.
- [57] Sunstech. 2558. Compression molding of polymers. [Online]. Available: [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=compression molding of polymers](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=compression+molding+of+polymers). เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 60.
- [58] ห้างหุ้นส่วนจำกัด บุญราช เพรส แอนด์ โค. 2553. แม่พิมพ์. [Online]. Available: <http://www.xny3cahbv0b9a1a8ipa5duc.com/images/p3.jpg>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 60.

- [59] West Coast Gasket Company. 2007. **Transfer Molding**. [Online]. Available: <http://www.westcoastgasket.com/transfer-molding.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 ม.ค. 60.
- [60] Custom Part Net. 2017. **Injection Molding**. [Online]. Available: <http://www.Custompartnet.com/wu/InjectionMolding>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 ม.ค. 60.
- [61] บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด. 2557. **เครื่องอัดรีด**. [Online]. Available: <http://www.Chareontut.com/upload/images/Image/Single%20Screw%20Extruder.jpg>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 60.
- [62] Rubber Intelligence Unit. 2556. **เครื่องคาเลนเดอร์**. [Online]. Available: <http://rubber.oie.go.th/box/images/11.jpg>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 60.
- [63] อธิพิณ แจ่มชัด. 2554. **การทดลองที่ 1 การผสมและเชื่อมโยงยาง : อธิพิณของสารตัวเติม**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [64] D. De, A. Das, B. Dey, S. Depnath and B. Roy. 2006. Reclaiming of ground rubber tire (GRT) by a novel reclaiming agent. *European Polymer Journal* 42(2) : 917-927.
- [65] กนกพร คูศิริวานิชกร, นพรัตน์ ถาวรสิน และสุธาสินี สัตถ์วงศ์. 2552. **ยางรีเคลมจากกระบวนการเชิงกล-เคมีชนิดใหม่: ลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกล**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [66] ชิตีไชยัตนะ สายวารี. 2552. **รีเคลมเศษถุงมือยางธรรมชาติ**. [Online]. Available: [http://www.scisoc.or.th/stt/34/sec\\_e/paper/STT34\\_E\\_E0004.pdf](http://www.scisoc.or.th/stt/34/sec_e/paper/STT34_E_E0004.pdf). เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ธ.ค. 60.
- [67] ระพีพันธ์ แดงตันกี. 2552. **การผลิตฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีนผสมยางรถยนต์ที่ใช้แล้วเพื่อใช้เป็นฟิล์มห่อหุ้มกันรอยขีดข่วน**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [68] K. Min and H. Jeong. 2013. Characterization of air-blown asphalt/trans-polyoctenamer rubber blends. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 19 : 645-649.
- [69] H. Liu, Z. Chen, W. Wang, H. Wang and P. Hao. 2014. Investigation of the rheological modification mechanism of crumb rubber modified asphalt (CRMA) containing TOR additive. *Construction and Building Materials* 67 : 225-233.
- [70] K. Puga and R. Williams. 2016. Low temperature performance of laboratory produced asphalt rubber (AR) mixes containing polyoctenamer. *Construction and Building Materials* 67 : 1046-1053.
- [71] M. Hu, S. Zhao, C. Li, B. Wang, Y. Fu and Y. Wang. 2016. Biodesulfurization of vulcanized rubber by enzymes induced from *Gordonia amicalisa*. *Polymer Degradation and Stability* 128 : 8-14.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [72] S. Ghorai, S. Bhunia, M. Roy and D. De. 2016. Mechanochemical devulcanization of natural rubber vulcanizate by dual function disulfide chemicals. *Polymer Degradation and Stability* 129 : 34-36.
- [73] T. Yliopisto. 2016. Mooney. [Online]. Available: [https://www.tut.fi/ms/muo/vert/9\\_test\\_methods/rubber\\_compounds\\_viscosity\\_and\\_sorch.htm](https://www.tut.fi/ms/muo/vert/9_test_methods/rubber_compounds_viscosity_and_sorch.htm). เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 ม.ค. 60.
- [74] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2016. Standard Test Method for Tensile Strength Properties of Rubber and Elastomers: D412-16.
- [75] N. Baba, A. Suhaimi, M. Amin and M. Mohd. 2015. Testing dumbbell shape. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/283955082\\_fig11\\_Testing-dumbbell-shape-a-ASTM-D-412-type-C-and-b-hybrid-GFRP](https://www.researchgate.net/figure/283955082_fig11_Testing-dumbbell-shape-a-ASTM-D-412-type-C-and-b-hybrid-GFRP). เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 ม.ค. 60.
- [76] S. Hashemi, D. Dieter and W. Callister. 2560. การทดสอบแรงดึง. [Online]. Available: <http://www.cmerc.engratu.ac.th/document/Lab%205%20Tensile%test.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 ม.ค. 60.
- [77] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2005. Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness: D2240-05.
- [78] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2006. Standard Test Methods for Determination of Gel Content and Swell Ratio of Crosslinked Polymer: D2765-11.
- [79] Tampere University of Technology. 2016. Selected physical properties of polymeric materials. [Online]. Available: [https://www.tut.fi/ms/muo/vert/4\\_rubber\\_physics/images/physical\\_properties\\_clip\\_image080.jpg](https://www.tut.fi/ms/muo/vert/4_rubber_physics/images/physical_properties_clip_image080.jpg). เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 ม.ค. 60.
- [80] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2557. วัลคาไนเซชัน. [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/วัลคาไนเซชัน>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 มี.ค. 60.
- [81] X. He, X Shi, M. Hoch and C. Gogelein. 2016. Mechanical properties of carbon black filled hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber for packer compounds. *Polymer Testing* 53 : 257-266.
- [82] H. Kargarzadeh, R. Sheltami, I. Ahmad, I. Abdullah and A. Dufresne. 2015. Cellulose nanocrystal reinforced liquid natural rubber toughened unsaturated polyester: Effects of filler content and surface treatment on its morphological, thermal, mechanical, and viscoelastic properties. *Polymer* 71 : 51-59.
- [83] M. Li, Y. Zhang and R. Cho. 2014. Mechanical, thermal and friction properties of ricebran carbon/nitrile rubber composites: Influence of particle size and loading. *Materials and Design* 63 : 565-574.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [84] J. Wang, C. Ji, Y. Yan, D. Zhao and L. Shi. 2015. Mechanical and ceramifiable properties of silicone rubber filled with different inorganic fillers. *Polymer Degradation and Stability* 121 : 149-156.
- [85] G. Yadollahia, H. Sabbagh. 2011. Improving the performance of Crumb Rubber bitumen by means of PolyPhosphoric Acid (PPA) and vestenamer additives. *Construction and Building Materials* 25 : 3108–3116.
- [86] S. Ramarad, C. Ratnam, M. Khalid and L. Chuah. 2014. Improving the properties of reclaimed waste tire rubber by blending with poly(ethylene-co-vinyl acetate) and electron beam irradiation. *Applied Polymer Science* 132 : 11-18
- [87] K. Mandal, A. Najib and C. Subhas. 2012. Reclaiming Of Ground Rubber Tire By Safe Multifunctional Rubber Additives: Tetra Benzy Thiuram Disulfide. *Rubber Chemistry and Technology* 85 : 629-644.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

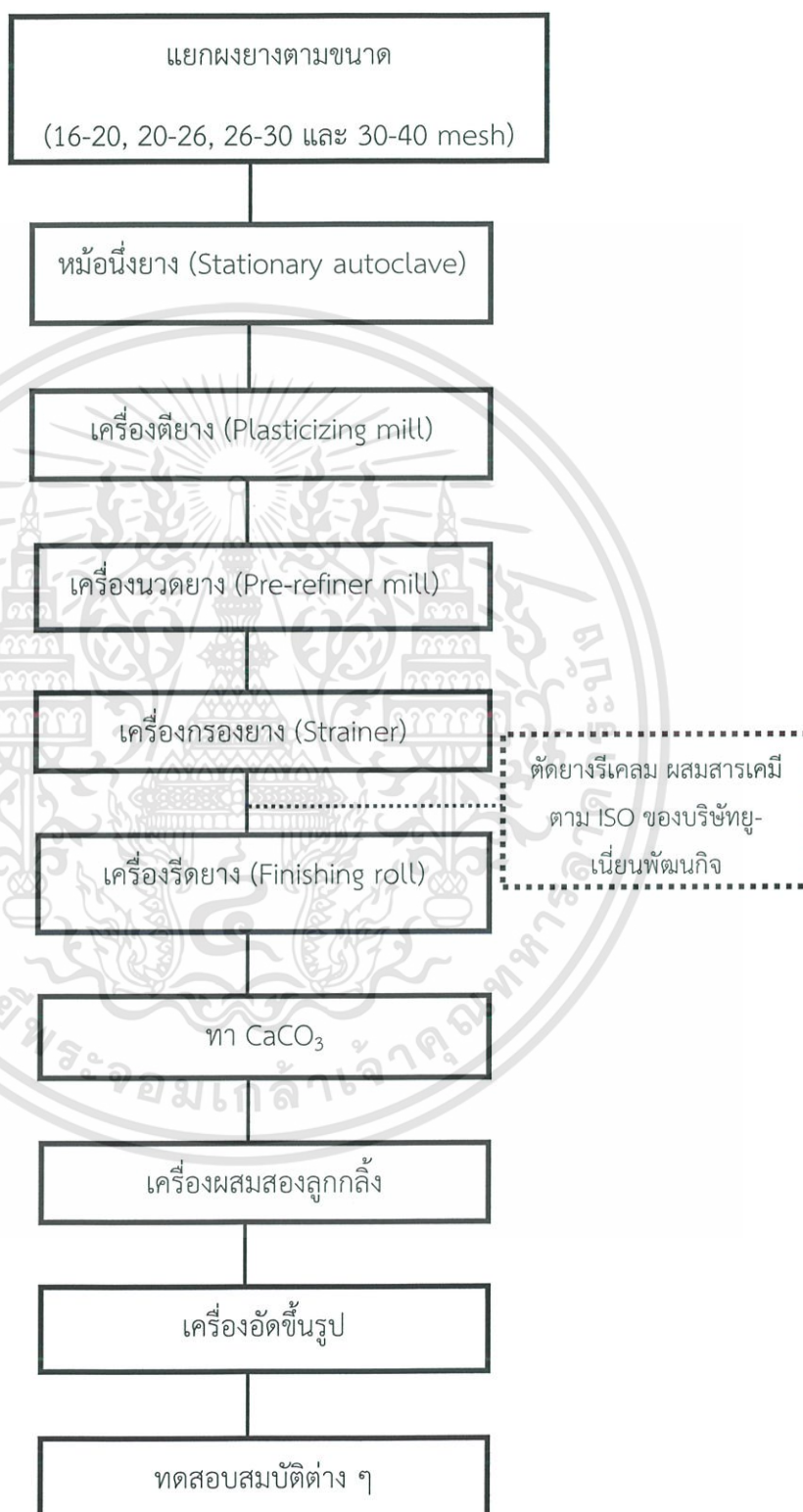
## ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

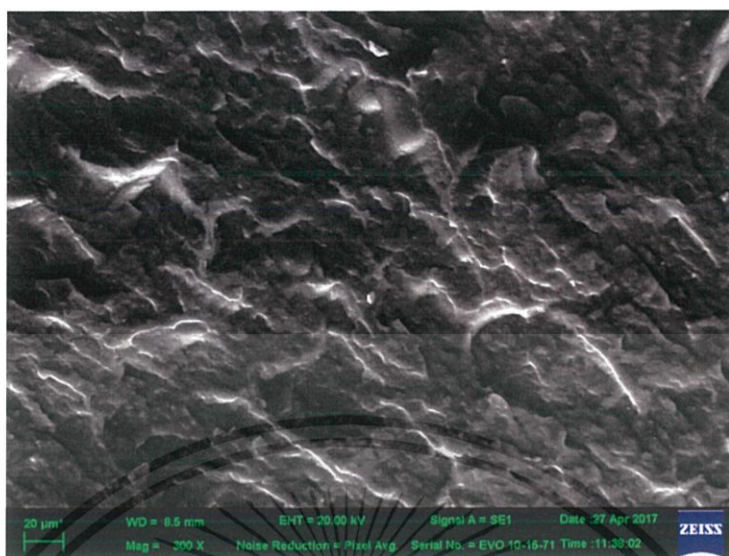
## ภาคผนวก ก

แผนภาพแสดงขั้นตอนงานวิจัยในโครงการพิเศษในบทที่ 3

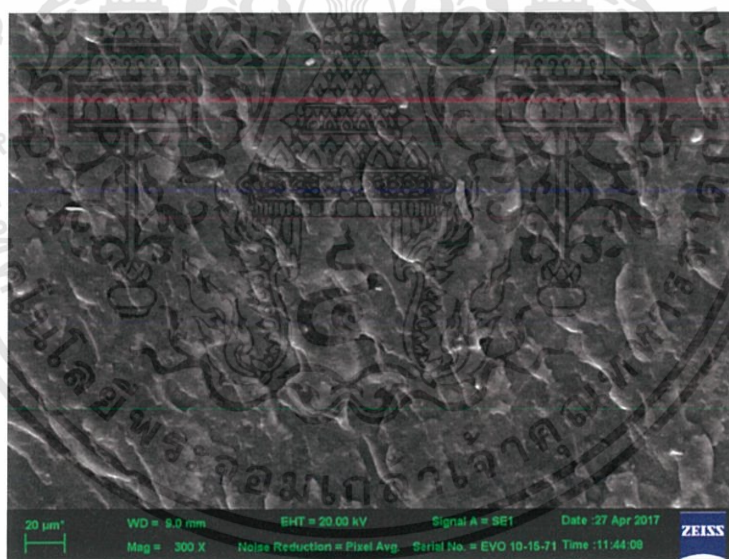


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ ก.1 ขั้นตอนการวิจัยตอนที่ 3  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาสัณฐานวิทยา (Scanning electron microscope, SEM)

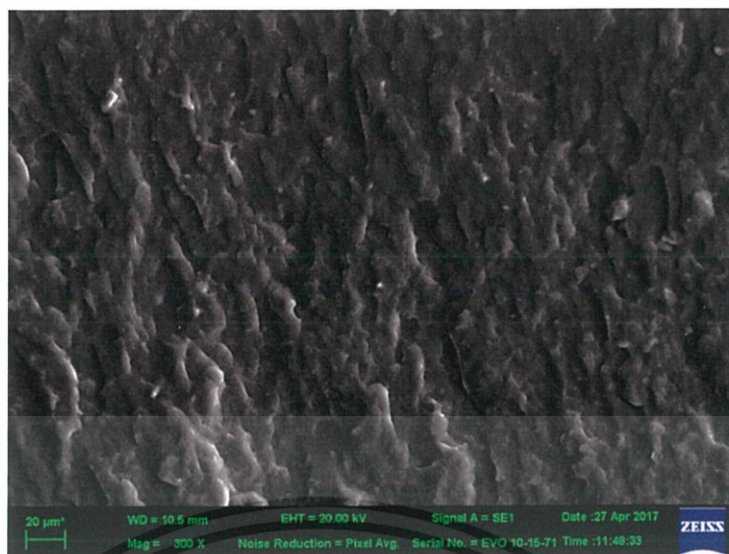


รูปที่ ก.2 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh (กำลังขยาย 300 เท่า)

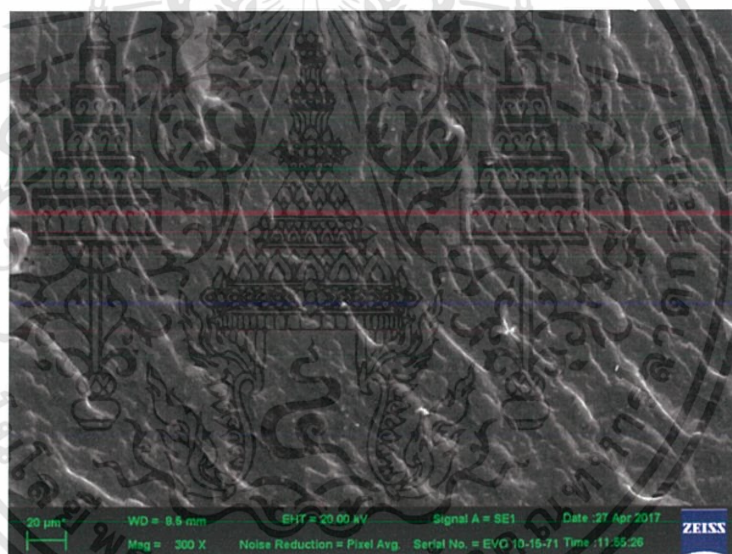


รูปที่ ก.3 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh (กำลังขยาย 300 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

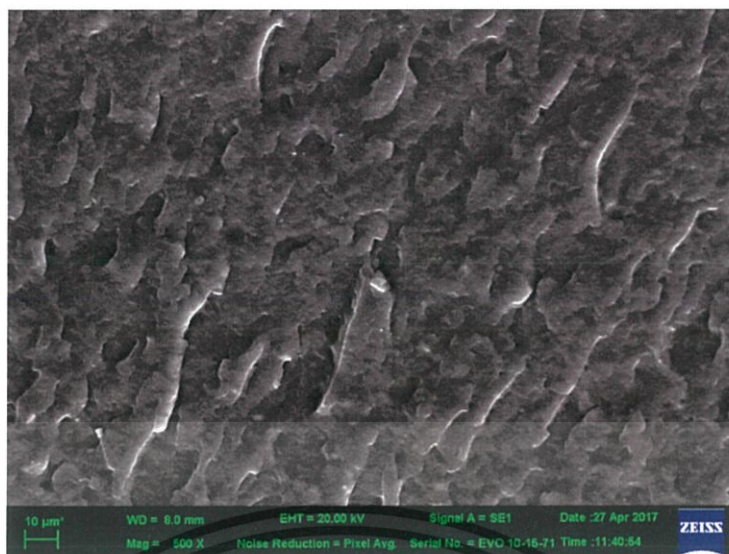


รูปที่ ก.4 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh (กำลังขยาย 300 เท่า)

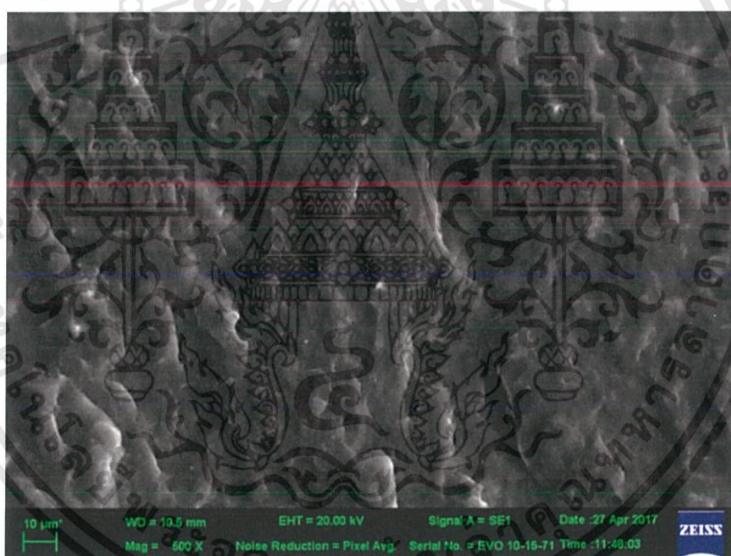


รูปที่ ก.5 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh (กำลังขยาย 300 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

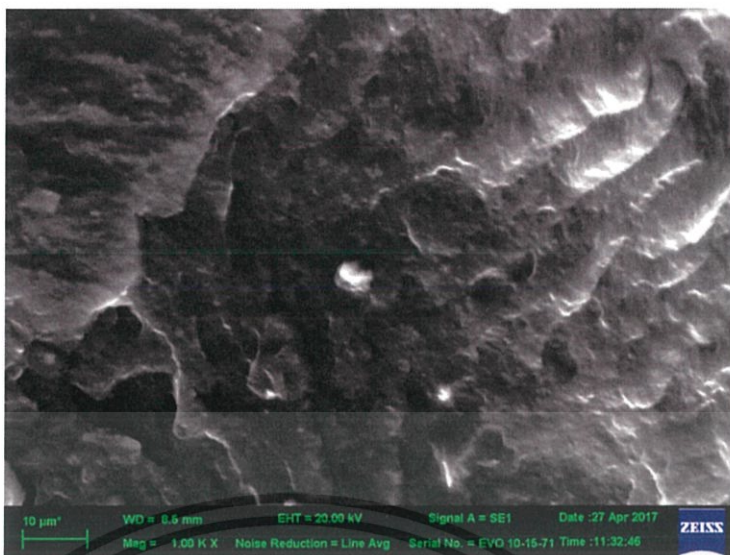


รูปที่ ก.6 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh (กำลังขยาย500 เท่า)

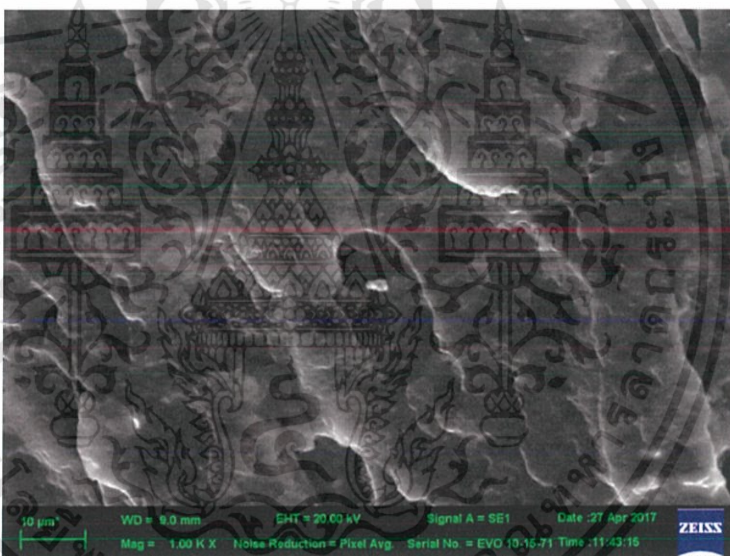


รูปที่ ก.7 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh (กำลังขยาย 500 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

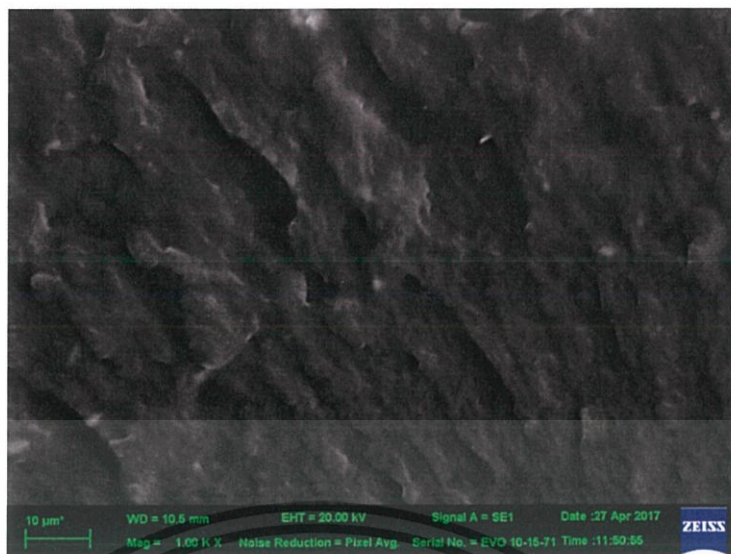


รูปที่ ก.8 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวขรุขระเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh (กำลังขยาย 1000 เท่า)



รูปที่ ก.9 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวขรุขระเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh (กำลังขยาย 1000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

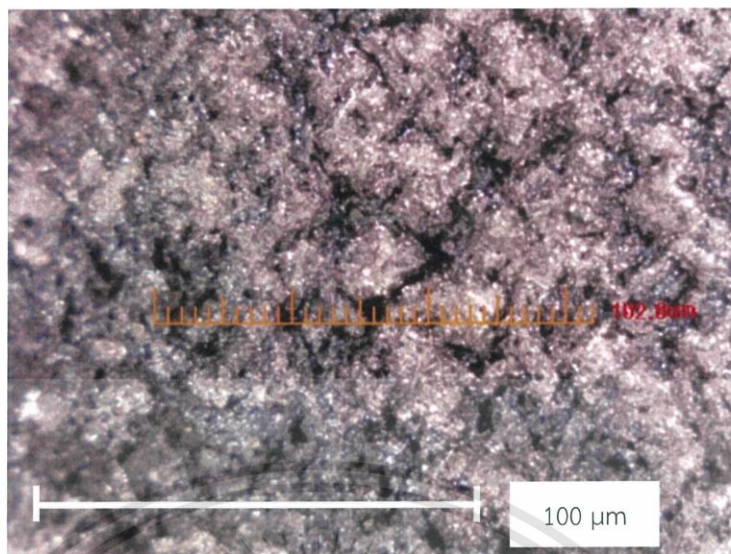


รูปที่ ก.10 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh (กำลังขยาย 1000 เท่า)

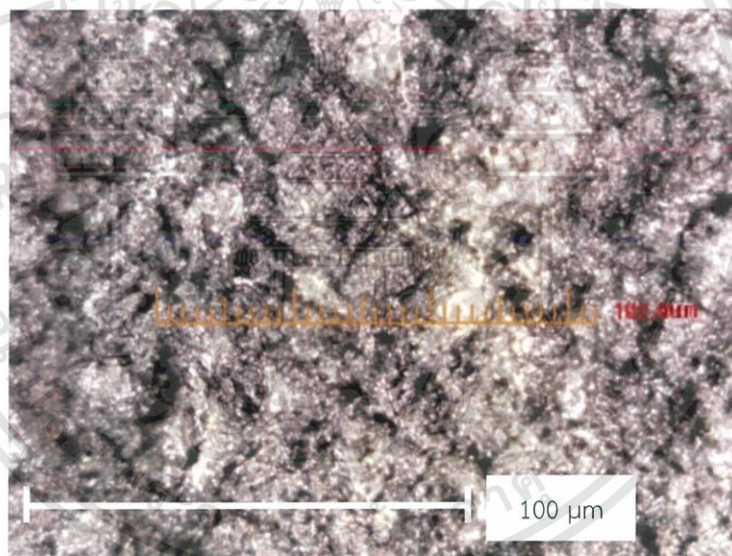


รูปที่ ก.11 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh (กำลังขยาย 1000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

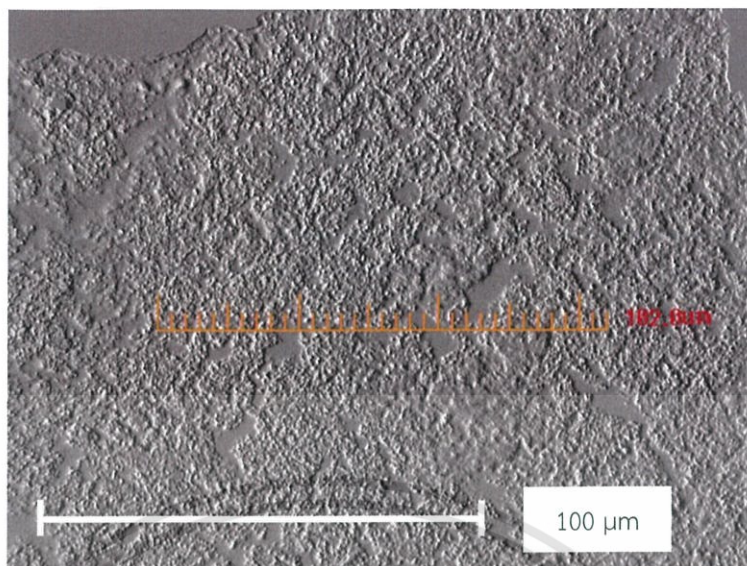


รูปที่ ก.12 ภาพ OM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh (กำลังขยาย 10 เท่า)

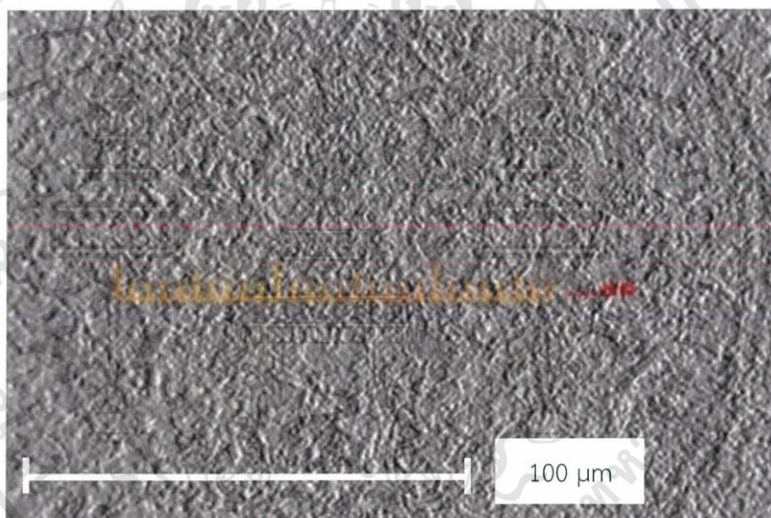


รูปที่ ก.13 ภาพ OM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh (กำลังขยาย 10 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

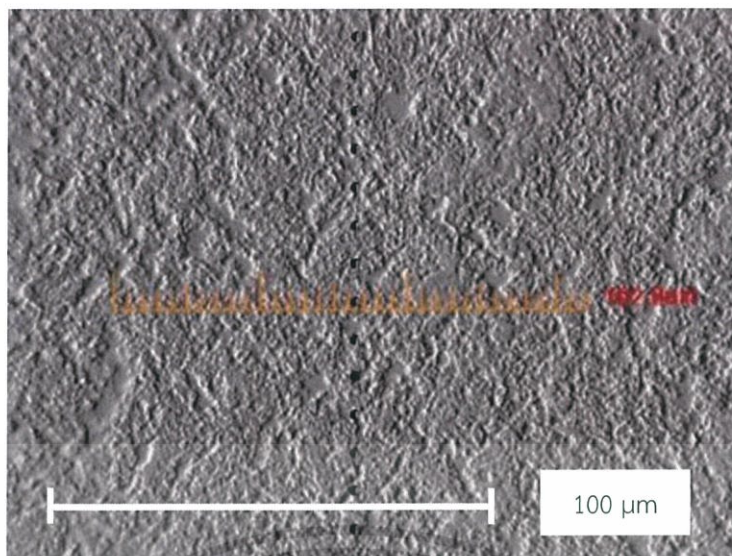


รูปที่ ก.14 ภาพ OM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh (กำลังขยาย 20 เท่า)

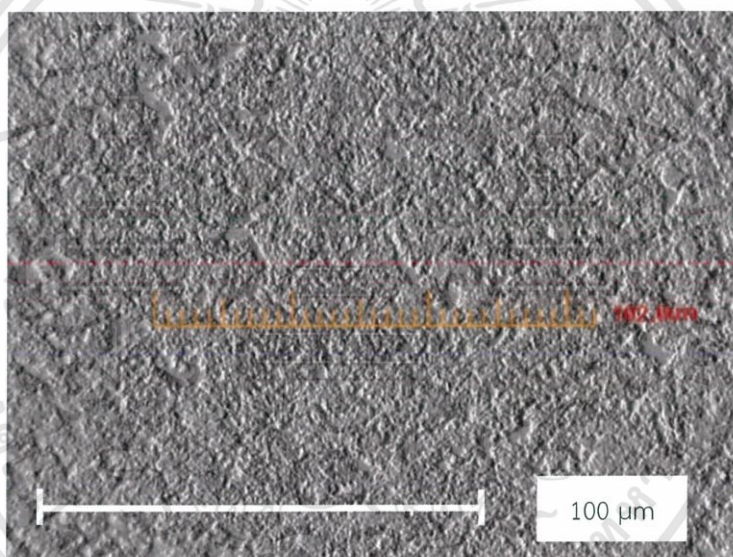


รูปที่ ก.15 ภาพ OM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh (กำลังขยาย 20 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

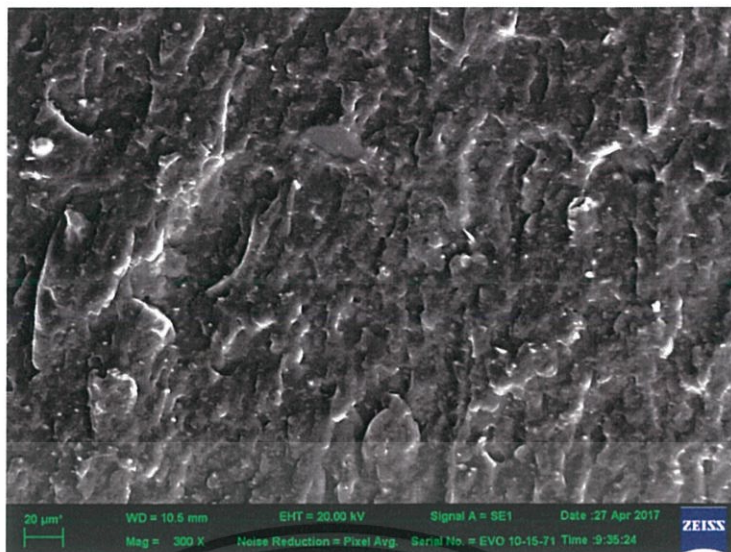


รูปที่ ก.16 ภาพ OM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh (กำลังขยาย 20 เท่า)

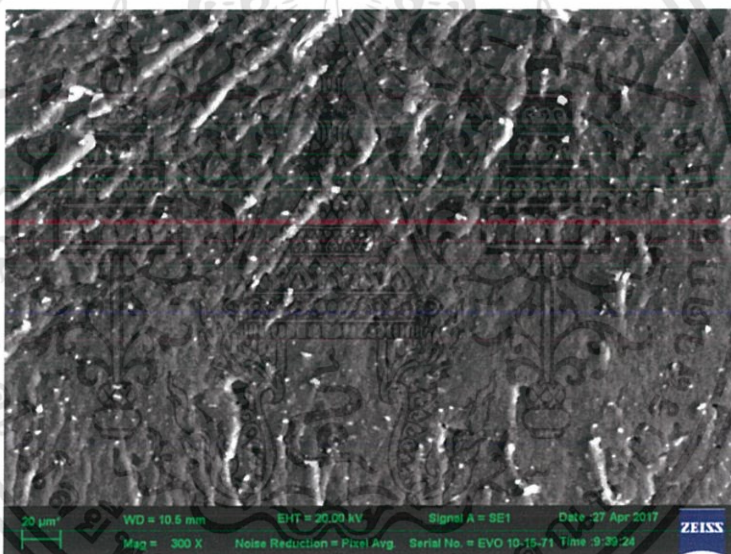


รูปที่ ก.17 ภาพ OM แสดงลักษณะพื้นผิวยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh (กำลังขยาย 20 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

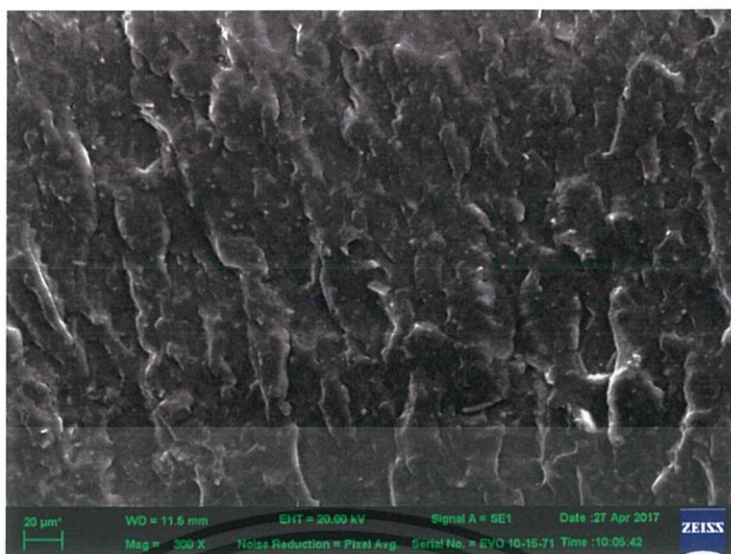


รูปที่ ก.18 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ไม่ใส่ TOR (กำลังขยาย 300 เท่า)

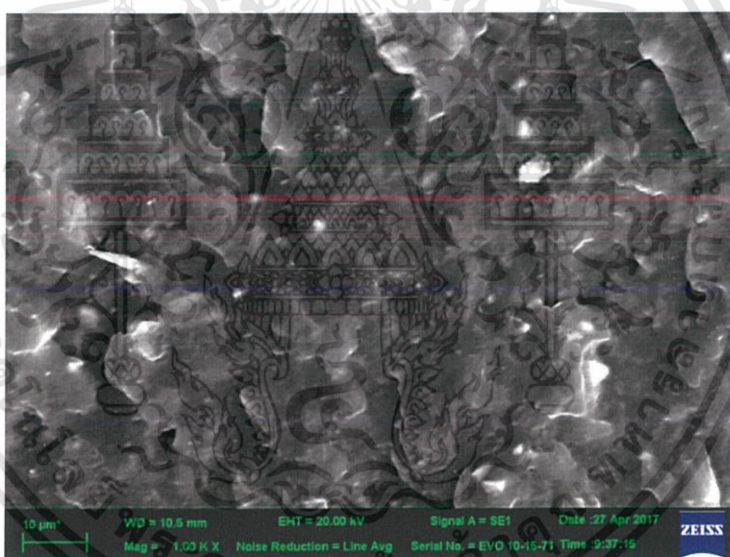


รูปที่ ก.19 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่ TOR 5 phr (กำลังขยาย 300 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

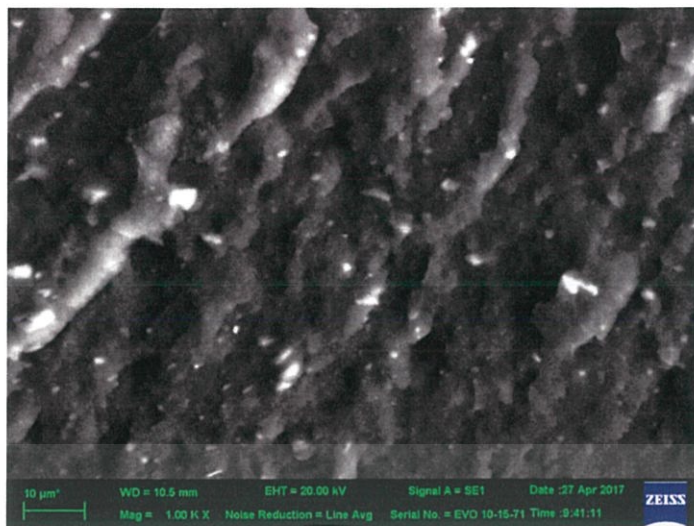


รูปที่ ก.20 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่ TOR 10 phr (กำลังขยาย 300 เท่า)

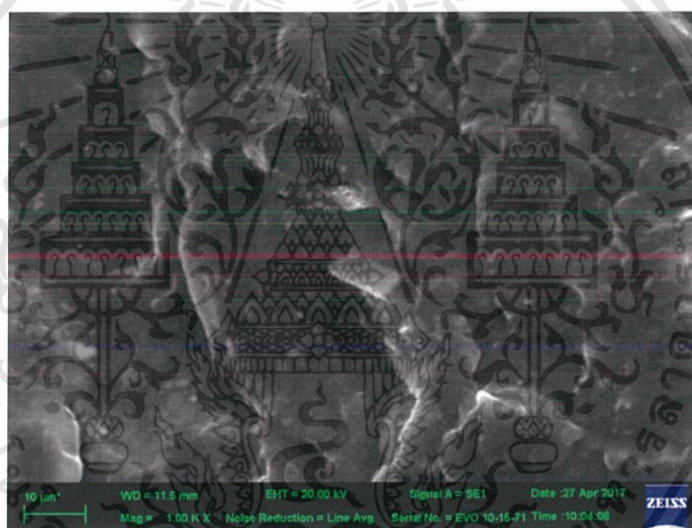


รูปที่ ก.21 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ที่ไม่ใส่ TOR (กำลังขยาย 1000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.22 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่ TOR 5 phr (กำลังขยาย 1000 เท่า)



รูปที่ ก.23 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่ TOR 10 phr (กำลังขยาย 1000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ตารางแสดงข้อมูล

ตารางที่ ข.1 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT 16-20 mesh

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)	M200 (MPa)
1	5.52	209	1.95	5.26
2	5.08	202	1.84	5.04
3	6.33	217	2.11	5.70
4	5.77	214	1.87	5.25
5	6.19	202	2.33	6.14
6	5.60	209	1.93	5.32
7	5.42	212	1.77	4.97
8	5.22	204	1.85	5.11
9	5.64	210	1.90	5.30
10	4.75	206	1.64	7.02
11	4.27	191	1.68	5.72
12	5.12	201	2.05	5.73
13	5.67	204	2.30	5.33
14	5.07	175	2.42	6.49
Average	5.52	205	1.92	5.32
Std error	0.15	2.82	0.06	0.16

ตารางที่ ข.2 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT 20-26 mesh

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)	M200 (MPa)
1	6.88	240	2.01	5.40
2	6.47	224	2.11	5.59
3	7.02	234	2.07	5.67
4	7.17	233	2.20	5.90
5	7.31	221	2.45	6.45
6	6.89	234	2.01	5.67
7	6.50	213	2.16	5.96
8	7.17	231	2.17	5.92
9	6.90	213	2.34	6.32
10	7.36	252	2.48	6.16
11	7.93	221	2.67	7.02
12	6.27	216	2.04	5.72
13	6.66	222	2.09	5.73
14	6.03	221	1.88	5.33
15	7.20	217	2.42	6.49
Average	6.90	222	2.16	5.90
Std error	0.12	2.83	0.06	0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ตามการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสไปใช้

ตารางที่ ข.3 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT 26-30 mesh

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)	M200 (MPa)
1	6.33	216	2.22	5.79
2	5.72	218	1.90	5.18
3	6.33	219	2.17	5.68
4	6.09	225	1.95	5.29
5	6.30	208	2.26	6.04
6	6.68	226	2.22	5.76
7	6.01	219	2.18	5.67
8	5.58	210	1.94	5.27
Average	6.19	218	2.17	5.67
Std error	0.12	2.30	0.53	0.10

ตารางที่ ข 4 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT 30-40 mesh

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)	M200 (MPa)
1	4.71	204	2.10	4.65
2	4.60	202	2.34	4.56
3	4.71	209	2.24	4.52
4	4.18	225	1.86	3.82
5	4.75	259	1.95	3.79
6	4.76	258	1.87	3.80
7	4.97	246	2.04	4.30
8	4.66	231	2.08	4.10
9	5.00	242	2.18	4.24
Average	4.71	231	2.08	4.24
Std error	0.79	1.81	0.54	1.14

ตารางที่ ข.5 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ไม่ใช่ TOR

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)
1	4.33	221	2.26
2	4.32	221	2.16
3	4.35	224	1.98
4	4.22	216	2.11
5	4.07	218	2.00
6	4.02	183	1.89
7	4.01	203	1.77
8	4.20	214	1.96
9	4.16	214	2.21
10	4.40	216	2.21
Average	4.21	213	2.06
Std error	0.04	3.81	0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการดัดแปลงเนื้อหาและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง 0.05 มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ปริมาณ TOR 5 phr

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)
1	4.80	199	2.19
2	4.79	220	2.14
3	4.88	203	2.14
4	4.91	221	2.28
5	4.68	197	2.30
6	4.85	199	2.11
7	4.92	235	2.08
8	4.81	248	2.31
9	4.89	197	2.33
10	4.67	198	2.19
11	4.93	201	2.19
12	4.87	230	2.16
13	4.91	224	2.21
14	4.67	223	2.39
15	4.71	197	2.28
Average	4.82	213	2.22
Std error	0.03	4.35	0.02

ตารางที่ ข.7 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ปริมาณ TOR 6 phr

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)
1	4.96	198	2.10
2	4.87	199	2.17
3	4.77	228	2.23
4	4.71	196	2.10
5	4.92	198	2.02
6	4.87	223	2.16
7	4.99	197	2.19
8	4.82	199	2.32
9	4.89	221	2.26
10	4.78	195	2.20
11	4.89	198	2.17
Average	4.85	203	2.24
Std error	0.02	3.60	0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ปริมาณ TOR 7 phr

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)
1	4.96	232	2.33
2	4.84	185	2.34
3	4.72	171	2.39
4	5.02	203	2.26
5	4.97	215	2.04
6	4.82	248	2.40
7	4.73	211	2.01
8	5.09	235	2.36
9	4.97	221	2.29
10	4.86	212	2.18
11	4.99	212	2.09
12	5.02	194	2.39
13	4.85	206	2.11
Average	4.91	211	2.25
Std error	0.03	5.79	0.04

ตารางที่ ข.9 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ปริมาณ TOR 8 phr

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)
1	5.15	278	2.46
2	5.20	265	2.30
3	5.11	274	2.22
4	5.44	266	2.44
5	5.47	279	2.32
6	5.21	250	2.24
7	5.18	304	2.03
8	5.49	332	2.04
9	5.36	274	2.27
10	5.10	277	2.24
11	5.15	292	2.21
Average	5.26	281	2.25
Std error	0.03	6.62	0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ปริมาณ TOR 9 phr

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)
1	5.13	286	2.16
2	4.97	265	2.40
3	4.95	284	2.18
4	4.87	264	2.30
5	4.90	181	2.16
6	4.94	282	2.10
7	4.94	274	2.57
8	4.95	217	2.39
9	4.98	265	2.23
10	5.16	257	2.20
11	5.19	267	2.18
12	4.95	228	2.13
Average	4.99	256	2.25
Std error	0.05	9.13	0.04

ตารางที่ ข.11 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ปริมาณ TOR 10 phr

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)
1	5.05	273	2.33
2	4.75	234	2.23
3	4.55	228	2.16
4	4.95	254	2.28
5	4.90	238	2.24
6	4.90	272	2.16
7	5.09	272	2.35
8	4.95	256	2.23
9	4.82	252	2.27
10	4.93	258	2.22
11	5.03	275	2.34
Average	4.90	256	2.26
Std error	0.04	4.18	0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถัน 0 phr

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)	M200 (MPa)
1	0.51	296	0.29	0.44
2	0.50	320	0.25	0.41
3	0.49	312	0.24	0.37
4	0.41	276	0.25	0.40
5	0.41	296	0.22	0.34
6	0.44	304	0.23	0.36
Average	0.46	296	0.25	0.40
Std error	0.02	6.93	0.01	0.02

ตารางที่ ข.13 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถัน 1 phr

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)	M200 (MPa)
1	2.50	355	0.66	1.29
2	3.08	347	0.75	1.59
3	2.41	333	0.70	1.31
4	2.82	361	0.71	1.48
5	2.95	347	0.77	1.51
6	3.06	384	0.80	1.47
Average	2.95	351	0.75	1.48
Std error	0.11	7.04	0.02	0.04

ตารางที่ ข.14 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถัน 2 phr

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)	M200 (MPa)
1	4.90	267	1.48	3.59
2	4.65	268	1.41	3.34
3	4.94	310	1.49	3.13
4	4.58	308	1.28	2.87
5	4.80	296	1.50	3.18
6	4.66	307	1.24	2.86
7	4.67	273	1.34	3.25
8	4.68	287	1.36	3.16
9	4.76	295	1.36	3.25
Average	4.68	295	1.36	3.18
Std error	0.04	5.76	0.03	0.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถัน 3 phr

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)	M200 (MPa)
1	4.69	225	2.06	4.30
2	5.21	262	1.94	4.16
3	5.07	222	2.02	4.70
4	4.12	205	1.94	4.07
5	4.08	204	1.93	4.06
Average	4.88	224	1.98	4.23
Std error	0.24	11.93	0.03	0.14

ตารางที่ ข.16 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh โดยใช้ปริมาณกำมะถัน 4 phr

ชั้น	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	M100 (MPa)	M200 (MPa)
1	6.25	262	2.62	4.85
2	6.68	266	2.76	5.20
3	6.75	280	2.73	4.98
4	6.27	279	2.47	4.52
5	6.03	259	2.62	4.75
6	5.91	247	2.62	4.91
7	6.27	257	2.64	5.01
Average	6.27	262	2.62	4.91
Std error	0.12	4.46	0.04	0.08

ตารางที่ ข.17 มาตรฐานการร่อนยางของบริษัท ยูเนียนพัฒนา จำกัด

ขนาดอนุภาค (mesh)	เบอร์ตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ผงยาง
16-20	ON 20	≤ 35
	PASS 20	≥ 65
20-26	ON 16	≤ 1
	ON 25	≤ 20
	PASS 25	≥ 79
26-30	ON 25	≤ 5
	ON 30	≤ 15
	PASS 30	≥ 80
30-40	ON 40	≤ 20
	PASS 40	≥ 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.18 ผลการร่อน GRT ขนาด 16-20 mesh

ครั้งที่	ON 16	ON 20	ON 25	ON 30	ON 40	P 40
1	0.13	13.97	10.09	13.18	25.03	37.60
2	0.15	11.75	18.13	17.88	25.06	27.03
3	0.06	8.20	22.42	21.03	30.55	17.74
4	0.18	11.18	22.00	21.73	33.57	11.34
5	0.15	11.21	22.06	22.03	35.20	9.35
6	0.20	10.93	20.35	22.22	34.96	11.34
7	0.15	7.44	20.63	22.47	34.82	14.49
8	0.08	5.76	18.42	21.26	35.61	18.87
Average	0.14	10.06	19.26	20.23	31.85	18.47
Std error	0.02	0.95	1.43	1.13	1.59	3.38

ตารางที่ ข.19 ผลการร่อน GRT ขนาด 20-26 mesh

ครั้งที่	ON 16	ON 20	ON 25	ON 30	ON 40	P 40
1	0.09	0.19	15.30	19.87	32.65	31.90
2	0.22	0.51	10.20	14.55	31.82	42.70
3	0.66	3.92	14.34	16.37	34.85	29.86
4	0.45	4.60	12.54	15.76	35.24	31.41
5	0.08	0.62	13.82	17.72	33.46	34.30
6	0.19	0.74	11.50	21.66	34.10	31.81
7	0.15	0.38	14.88	23.13	35.95	25.51
8	0.44	1.91	10.85	17.94	32.31	36.55
9	0.22	1.34	13.42	20.55	29.14	35.33
Average	0.28	1.58	12.98	18.62	33.28	33.26
Std error	0.07	0.54	0.61	0.96	0.69	1.60

ตารางที่ ข.20 ผลการร่อน GRT ขนาด 26-30 mesh

ครั้งที่	ON 25	ON 30	ON 40	ON 45	P45
1	1.78	2.90	62.82	16.38	16.12
2	2.50	17.09	59.19	9.38	11.84
3	1.74	7.59	61.88	10.66	18.13
4	1.62	2.33	58.04	11.35	26.66
5	0.19	0.46	42.70	20.72	35.93
6	4.02	3.28	17.49	15.40	59.81
7	0.05	0.23	31.82	22.24	45.66
8	0.60	0.27	27.35	21.31	50.47
Average	1.56	4.27	45.16	15.93	33.08
Std error	0.46	2.02	6.30	1.81	6.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.21 ผลการร่อน GRT ขนาด 30-40 mesh

ครั้งที่	ON 30	ON 40	ON 45	P45
1	0.25	7.20	15.52	77.03
2	1.67	6.91	24.14	67.28
3	0.75	3.57	11.79	83.89
4	0.19	17.65	15.09	67.07
5	0.76	0.68	14.84	83.72
6	1.24	8.02	17.48	73.26
7	0.81	6.12	13.97	79.10
8	0.75	7.74	11.33	80.18
Average	0.80	7.24	15.52	76.44
Std error	0.17	1.73	1.42	2.36

ตารางที่ ข.22 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ไม่ใส่สารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.1872	4.5884	5.1281
1.1972	4.6170	5.1189
1.2099	4.6531	5.1074
1.1987	4.6212	5.1175
1.2235	4.6997	5.1023
	ค่าเฉลี่ย	5.1148 ± 0.0045

ตารางที่ ข.23 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่สารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.2136	2.9969	3.6105
1.2841	3.1777	3.6162
1.2698	3.1820	3.6502
1.2055	2.9690	3.6034
1.2788	3.1675	3.6187
	ค่าเฉลี่ย	3.6198 ± 0.0180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.24 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh ที่ไม่ใส่สารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.0828	4.1696	5.1127
1.0576	3.9414	4.9778
1.0922	4.2075	5.1144
1.0854	4.0953	5.0282
1.0465	3.9096	4.9878
	ค่าเฉลี่ย	5.0442 ± 0.0296

ตารางที่ ข.25 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 20-26 mesh ที่ใส่สารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.2449	3.0007	3.5463
1.2259	2.9636	3.5540
1.2456	2.8916	3.4496
1.2311	2.9699	3.5485
1.2566	3.0356	3.5521
	ค่าเฉลี่ย	3.5301 ± 0.0202

ตารางที่ ข.26 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh ที่ไม่ใส่สารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.2742	4.5275	4.7891
1.2411	4.4825	4.8527
1.3047	4.8511	4.9685
1.2899	4.6083	4.8102
1.2863	4.6226	4.8332
	ค่าเฉลี่ย	4.8507 ± 0.0313

ตารางที่ ข.27 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 26-30 mesh ที่ใส่สารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.1574	2.8655	3.6170
1.1894	2.9696	3.640
1.2005	2.9836	3.6280
1.1988	2.8777	3.5360
1.1652	2.8878	3.6200
	ค่าเฉลี่ย	3.6082 ± 0.0186

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.28 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh ที่ไม่ใส่สารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.0491	3.6569	4.7158
1.0532	3.7914	4.8399
1.0718	3.9337	4.9163
1.0575	3.8319	4.8656
1.0622	3.7391	4.7532
	ค่าเฉลี่ย	4.8182 ± 0.0368

ตารางที่ ข.29 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 30-40 mesh ที่ใส่สารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.2242	3.0516	3.6358
1.2188	3.0578	3.6534
1.2554	3.0513	3.5682
1.2452	3.1141	3.6447
1.2366	3.0861	3.6390
	ค่าเฉลี่ย	3.6282 ± 0.0153

ตารางที่ ข.30 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่กำมะถัน 0 phr

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.2786	3.9843	4.3138
1.2675	3.9586	4.3214
1.2351	3.8620	4.3255
1.2244	3.8269	4.3240
1.2571	3.9228	4.3186
	ค่าเฉลี่ย	4.3287 ± 0.0001

ตารางที่ ข.31 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่กำมะถัน 1 phr

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.2888	3.8140	4.1433
1.2428	3.6727	4.1388
1.2437	3.6785	4.1415
1.2221	3.6090	4.1365
1.2365	3.6745	4.1567
	ค่าเฉลี่ย	4.1437 ± 0.0035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.32 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่กัมมะถัน 2 phr

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.2384	2.9727	3.5355
1.2451	3.0775	3.6130
1.2812	3.1439	3.5936
1.2145	2.9921	3.6042
1.2756	3.1534	3.6134
ค่าเฉลี่ย		3.5919 ± 0.0146

ตารางที่ ข.33 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่กัมมะถัน 3 phr

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.2136	2.6621	3.3105
1.2841	2.8235	3.3162
1.2755	2.8446	3.3503
1.2233	2.6866	3.3134
1.2487	2.7485	3.3187
ค่าเฉลี่ย		3.3218 ± 0.0072

ตารางที่ ข.34 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ใส่กัมมะถัน 4 phr

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.2242	2.5635	3.2231
1.2188	2.4462	3.1985
1.2554	2.4766	3.1877
1.2452	2.5215	3.1976
1.2366	2.5562	3.1932
ค่าเฉลี่ย		3.2000 ± 0.0061

ตารางที่ ข.35 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่ไม่ใส่ TOR และสารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.1011	4.3265	5.1981
1.0972	4.2313	5.1189
1.0896	4.2205	5.1374
1.1088	4.3144	5.1565
1.0756	4.2095	5.1811
ค่าเฉลี่ย		5.1584 ± 0.0143

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.36 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ที่  
ไม่ใส่ TOR แต่ใส่สารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.2136	2.9969	3.6105
1.2841	3.1777	3.6162
1.2755	3.1963	3.6502
1.2682	3.1234	3.6034
1.2572	3.1140	3.6187
	ค่าเฉลี่ย	3.6198 ± 0.0080

ตารางที่ ข.37 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh  
ใส่ TOR 5 phr แต่ไม่ใส่สารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.5825	5.8313	4.9323
1.5836	5.6571	4.8099
1.6076	6.1488	5.0845
1.6124	5.8306	4.8575
1.6081	5.9601	4.9556
	ค่าเฉลี่ย	4.9280 ± 0.0470

ตารางที่ ข.38 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh  
ใส่ TOR 5 phr และใส่สารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.2962	3.1396	3.5591
1.2866	3.1248	3.5662
1.2835	3.0985	3.5503
1.2011	2.9137	3.5631
1.2132	2.9332	3.5543
	ค่าเฉลี่ย	3.5586 ± 0.0470

ตารางที่ ข.39 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh ใส่  
TOR 10 phr แต่ไม่ใส่สารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.6215	5.7479	4.7800
1.6177	5.7156	4.7673
1.6243	5.7529	4.7767
1.6155	5.7264	4.7798
1.6082	5.9603	4.9555
	ค่าเฉลี่ย	4.8119 ± 0.0360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.40 ผลอัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตรของยางรีเคลมจาก GRT ขนาด 16-20 mesh  
ใส่ TOR 10 phr และใส่สารเคมี

น้ำหนักก่อนแช่ (g)	น้ำหนักหลังแช่ (g)	อัตราส่วนการบวมตัวโดยปริมาตร
1.2242	3.0516	3.6358
1.2188	3.0578	3.6534
1.2554	3.0513	3.5682
1.2452	3.1141	3.6447
1.2366	3.0861	3.6390
	ค่าเฉลี่ย	$3.5212 \pm 0.0081$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้