สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษายางรีเคลมชนิดใหม่จากผงยางรถยนต์ ถุงมือยาง และยางฟองน้ำที่ใช้แล้ว

STUDY OF NOVEL RECLAIM RUBBERS FROM GROUND RUBBER TIRE, USED GLOVE AND SPONGE RUBBER WASTES

T117288

นางสาวจุฑารัตน์ สังข์ทรัพย์

นายบัณฑิตย์ ไชยหิรัญการ

นางสาววรินทร ตรีสัตยาเวทย์

ลงทะเบียน 117288
วัน,เดือน,ปี 20 ก.ค. 2554

b 12332730
i

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF NOVEL RECLAIM RUBBERS FROM GROUND RUBBER TIRE, USED GLOVE AND SPONGE RUBBER WASTES

MISS CHUTHARAT SUNGSAP

MR.BUNDHIT CHAIHIRUNKARN

MISS VARINTORN TRISATTAYAWEJ

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN INDUSTRIAL CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การศึกษายางรีเคลมชนิดใหม่จากผงยางรถยนต์ ถุงมือยางและยางฟองน้ำที่ใช้แล้ว

Study of Novel Reclaim Rubbers from Ground Rubber Tire, Used Glove and Sponge Rubber Wastes

ชื่อนักศึกษา	นางสาวจุฑารัตน์	สังข์ทรัพย์	50050301
	นายบัณฑิตย์	ไชยหิรัญการ	50050342
	นางสาววรินทร	ตรีสัตยาเวทย์	50050374

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง	การศึกษายางรีเคลมชนิดใหม่จากผงยางรถยนต์ ถุงมือยาง และยางฟองน้ำที่ใช้แล้ว
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจุฑารัตน์ สังข์ทรัพย์
	นายบัณฑิตย์ ไชยหิรัญการ
	นางสาววรินทร ตรีสัตยาเวทย์
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของยางรีเคลม (Reclaim rubber) ที่เตรียมจากวัตถุดิบที่ต่างกันได้แก่ ผงยางรถยนต์ (RR-TR), ถุงมือยาง (RR-GL) และยางฟองน้ำ (RR-SP) ผ่านกระบวนการเคมี-เชิงกล โดยใช้สารรีเคลม (Reclaiming agent) ซึ่งเน้นศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมโยงและสมบัติของยางรีเคลม ได้แก่ชนิดของวัตถุดิบ, ปริมาณสารรีเคลม (2.0-2.4 phr), ขนาดอนุภาคของผงยาง (GRT) 20 และ30 mesh และชนิดของ Supporter (แคลเซียมคาร์บอเนต, ซิลิกา และซิลิกากับเรซิน High styrene 6%) โดยทำการผสมสูตรยางด้วยเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) แล้วทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคกดอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นหาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) ทดสอบสมบัติเชิงกล และศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) จากงานวิจัยพบว่าการใช้สารรีเคลม 2.0 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดและมีผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติการเชื่อมโยงของยางรีเคลม และผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh ให้ยางรีเคลมที่มีสมบัติเชิงกลดี ส่วนผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh จะให้ยางรีเคลมที่มีความนิ่มและพื้นผิวที่เรียบเนียน ชนิดของวัตถุดิบที่ต่างกันจะให้ยางรีเคลมที่มีสมบัติต่างกัน เนื่องจากปริมาณและคุณภาพของเนื้อยางที่ต่างกัน โดยยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL) มีสมบัติดีมากในทุกๆด้าน และการใช้ Supporter แตกต่างกัน ส่งผลให้ลักษณะการเชื่อมโยงของยางรีเคลมที่เตรียมได้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยและสมบัติเชิงกลต่างกันเล็กน้อย โดยจากการทดลองพบว่าซิลิกาเป็น Supporter ที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Study of Novel Reclaim Rubbers from Ground Rubber Tire, Used Glove and Sponge Rubber Wastes	
Students	Miss Chutarat	Sungsap
	Mr. Bundhit	Chaihirunkarn
	Miss Varintorn	Trisattayawej
Degree	Bachelor of Science	
Major	Industrial Chemistry	
Academic year	2010	
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud	

ABSTRACT

In this research work, reclaim rubbers prepared from different rubber wastes were studied, i.e., ground rubber tire (GRT, RR-TR), used glove (RR-GL) and sponge rubber (RR-SP). Chemical-mechanical process with a reclaiming agent was used to prepare the reclaimed rubbers. Some factors affecting properties of reclaimed rubbers were studied including types of the raw materials, reclaiming agent loading (2.0-2.4 phr), GRT size (20 and 30 mesh) and supporters ($CaCO_3$, Silica, Silica + 6% highstyrene resin). The reclaimed samples were compounded by a two-roll mill and shaped by compression molding machine. Cure characteristics, mechanical properties and morphology of reclaim vulcanizates were studied. It was found that the optimum reclaiming agent loading was 2.0 phr. The amount of reclaiming agent loading seemed to have a minor effect on cure characteristics of reclaimed rubbers from different wastes. Reclaimed rubbers made from 20 mesh GRT yielded better mechanical properties than those made from 30 mesh GRT. However, reclaimed rubbers made from 30 mesh GRT were flexible with smooth surface. Different types of raw materials yielded different reclaimed rubber properties. Reclaimed rubbers from used glove (RR-GL) had the best overall properties. By using different supporters for reclaimed agent, cure characteristics and mechanical properties of the reclaimed rubbers were slightly different. Precipitated silica seemed to be the best supporter in the work.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานพิเศษนี้ จะสำเร็จลุล่วงมิได้ถ้าหากขาดความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่คณะผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่างๆ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูงที่เอาใจใส่ดูแล ให้คำปรึกษา พร้อมทั้งให้การช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่างๆ จนโครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบโครงงานพิเศษ ตลอดจนให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยและการแก้ไขปรับปรุงรูปเล่มโครงงานพิเศษให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท ออลเทรด รีซอสเซส (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ยางรีเคลมนำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวก และให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือต่างๆ รวมทั้งช่วยแก้ปัญหาตลอดการดำเนินงาน

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจจนโครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวจุฑารัตน์ สังข์ทรัพย์
นายปัณฑิตย์ ไชยหิรัญการ
นางสาววรินทร ตรีสัตยาเวทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฌ
สารบัญตาราง	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ยางรีเคลม (Reclaimed Rubber)	5
2.2 กระบวนการผลิตยางรีเคลม (Reclaiming process)	6
2.2.1 กระบวนการทางเคมี (Chemical process)	6
2.2.2 กระบวนการอัลตร้าโซนิก (Ultrasonic process)	7
2.2.3 กระบวนการทางไมโครเวฟ (Microwave)	7
2.2.4 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological process)	7
2.3 การพัฒนากระบวนการรีเคลมในปัจจุบัน	8
2.3.1 กระบวนการทางชีววิทยาสำหรับการรีเคลมยาง	8
2.3.2 การทำยางรีเคลมโดยกระบวนการดีลิงค์ (De-link process)	8
2.3.3 การรีเคลมยางโดยใช้วัตถุดิบที่มีใช้ไม่หมดสิ้น (Renewable resource material, RRM)	9
2.3.3.1 กระบวนการรีเคลมโดยใช้การรีเคลมยางที่ใช้วัตถุดิบไม่หมดสิ้น (RRM process)	9
2.3.3.2 กลไกการรีเคลม	9

เอกสารนี้เป็นเอกสาร[illegible]ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 วัตถุดิบ	11
2.5 การผสมยาง (Rubber Compounding)	11
2.5.1 องค์ประกอบของยางคอมปาวด์	12
2.5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมยาง	13
2.5.2.1 เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)	13
2.5.2.2 เครื่องผสมระบบเปิด	14
2.6 ขั้นตอนการผสม (Mixing Step)	15
2.7 กระบวนการเชื่อมโยงยาง (Vulcanization)	16
2.7.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing Agent)	16
2.7.1.1 ระบบเชื่องโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur Vulcanization System)	17
2.7.1.2 ระบบเชื่อมโยงด้วยสารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน (Sulfur Donor Vulcanization System)	20
2.7.1.3 ระบบทำให้ยางเชื่อมโยงด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide system)	20
2.7.2 เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง (Curemeters for rubber compounds)	21
2.7.2.1 เครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น (Oscillating disc rheometers, ODR)	21
2.7.2.2 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometers, MDR)	21
2.8 สารตัวเติม (Filler)	23
2.8.1 สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers)	23
2.8.2 สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers)	23
2.9 การขึ้นรูปยาง (Forming)	24
2.9.1 การใช้แม่พิมพ์ (Molding)	24
2.9.2 การอัดรีด (Extrusion)	25
2.9.3 การใช้เครื่องคาเลนเดอร์ (Calendering)	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10 การทดสอบ	25
2.10.1 การทดสอบคุณภาพของยางดิบ	25
2.10.2 การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต	25
2.10.3 การทดสอบสมบัติของยางเชื่อมโยง	26
2.11 สมบัติและประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ยางรีเคลม	26
2.11.1 เมื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยาง	26
2.11.2 เมื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids)	26
2.11.3 ลักษณะเด่นของผลิตภัณฑ์	26
2.11.4 กรมโรงงานอุตสาหกรรม	27
2.12 ข้อดีและข้อเสียของยางรีเคลม	27
2.12.1 ข้อดีของยางรีเคลม	27
2.12.1 ข้อเสียของยางรีเคลม	27
2.13 ผงยางรถยนต์	27
2.13.1 การบดยาง (Grinding	28
2.13.1.1 การบดเชิงกล (Mechanical grinding)	28
2.13.1.2 การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Crygenic grinding)	29
2.13.2 การประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมยาง	29
2.14 สารรีเคลม (Reclaiming agent)	31
2.15 ยางฟองน้ำ	32
2.15.1 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ	33
2.15.1.1 Dunlop process	33
2.15.1.2 Talalay process	33
2.15.2 การเชื่อมโยงยาง	34
2.15.2.1 การเชื่อมโยงยางด้วยความร้อน	34
2.15.2.2 การเชื่อมโยงยางด้วยลมร้อน	34
2.15.2.3 การเชื่อมโยงยางด้วยการนึ่ง	34
2.15.2.4 การเชื่อมโยงยางด้วยการฉายรังสีอินฟราเรด	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	39
3.1 วัตถุดิบและสารเคมี	39
3.2 เครื่องมือที่ใช้	41
3.3 ขั้นตอนการผสมยางรีเคลม	41
3.3.1 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากอัตราส่วนสารรีเคลมที่แตกต่างกัน	41
3.3.1.1 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากยางรถยนต์ (RR-TR20)	41
3.3.1.2 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL)	43
3.3.2 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากขนาดอนุภาคของผงยาง	43
3.3.2.1 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากขนาดอนุภาคของผงยาง 20 mesh (RR-TR20)	43
3.3.2.2 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากขนาดอนุภาคของผงยาง 30 mesh (RR-TR30)	44
3.3.3 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน	44
3.3.3.1 ศึกษาการใช้งานของยางรีเคลมที่เตรียมจากยางรถยนต์ (RR-TR20)	44
3.3.3.2 ศึกษาการใช้งานของยางรีเคลมที่เตรียมจากถุงมือยาง (RR-GL)	44
3.3.3.3 ศึกษาการใช้งานของยางรีเคลมที่เตรียมจากถุงมือยางเกรด 2 (RR-GL2)	44
3.3.3.4 ศึกษาการใช้งานของยางรีเคลมที่เตรียมจากยางฟองน้ำ (RR-SP)	44
3.3.4 ศึกษาชนิดของ Supporter ที่มีผลต่อสมบัติยางรีเคลม	44
3.3.4.1 ศึกษาชนิดของ Supporter คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (RR-TR30-Ca)	44
3.3.4.2 ศึกษาชนิดของ Supporter คือ ซิลิกา (RR-TR30-Si)	45
3.3.4.3 ศึกษาชนิดของ Supporter คือ ซิลิกากับ High Styrene 6% (RR-TR30-SiHS)	45
3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล	46
3.4.1 การทดสอบแรงดึง	46
3.4.2 การทดสอบแรงฉีกขาด	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3 การทดสอบความแข็งแรงกด	47
3.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	47
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	48
4.1 ผลการศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากอัตราส่วนสารรีเคลมที่ต่างกัน	49
4.1.1 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากยางรถยนต์ (RR-TR20)	50
4.1.2 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL)	51
4.2 ผลการศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากขนาดผงยาง (GRT) ที่ต่างกัน	52
4.3 ผลการศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากวัตถุดิบต่างกัน	58
4.4 ผลการศึกษาชนิดของ Supporter ที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลม	66
4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ	72
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	75
5.1 สรุปผลการทดลอง	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
เอกสารอ้างอิง	77
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก สัณฐานวิทยาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	
ภาคผนวก ข TGA thermogram	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

1.1 ตัวอย่างเศษยางที่ใช้แล้ว 2

2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยาง

(ก) ยางที่ไม่ได้เชื่อมโยง 5

(ข) ยางที่เชื่อมโยงแล้ว 5

(ค) เศษยาง 5

(ง) ยางรีเคลม 5

2.2 แผนภาพแสดงการดีวัลคาไนเซชันโดยวิธีทางเคมี 6

2.3 แผนภาพแสดงการดีวัลคาไนเซชันโดยวิธีอัลตร้าโซนิก 7

2.4 แผนภาพแสดงการดีวัลคาไนเซชันโดยวิธีไมโครเวฟ 7

2.5 แผนภาพแสดงการดีวัลคาไนเซชันโดยวิธีทางชีวภาพ 8

2.6 กลไกการรีเคลมยาง 10

2.7 วัตถุดิบในการผลิตยางรีเคลม 11

2.8 เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) 13

2.9 เครื่องผสมระบบปิดบานบุรี (Banbury-type internal mixer) 14

2.10 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) 15

2.11 ขั้นตอนการผสมยาง 16

2.12 โครงสร้าง cyclooctasulfur, S_8 17

2.13 พันธะเคมีหรือการเชื่อมโยงของสายโมเลกุลยางด้วยกำมะถัน 17

2.14 โครงสร้างกลุ่มไทอะโซล (Thiazole) 19

2.15 โครงสร้างกลุ่มซัลฟีนาไมด์ (Sulfenamide) 19

2.16 N-1, 3 - dimethy butyl – N – phenyl – paraphenylediamine (6PPD) 20

2.17 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น 21

2.18 เครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น (Oscillating disc rheometers, ODR) 21

2.19 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน 22

2.20 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer, MDR) 22

2.21 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.22 การขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์แบบต่างๆ 24
2.23 ขั้นตอนในการเปลี่ยนขนาดของยางรถยนต์โดยวิธีการบดยางเชิงกล 29
2.24 เครื่องบดยางที่อุณหภูมิต่ำ 29
2.25 โครงสร้างของสารรีเคลม
(ก) ไดเอริลไดซัลไฟด์ 31
(ข) ไดฟีนิลไดซัลไฟด์ 31
2.26 ขั้นตอนการทำยางฟองน้ำ 32
3.1 ตัวอย่างกราฟความหนืดมูนนี่ 42
3.2 ตัวอย่างเส้นกราฟเชื่อมโยง (Cure curve) 42
3.3 ชิ้นตัวอย่างทดสอบรูปดัมเบลล์ 46
3.4 ชิ้นตัวอย่างทดสอบรูปปีกนก 46
4.1 การเปรียบเทียบกราฟเชื่อมโยงของยางรีเคลม RR-TR20 ที่อัตราส่วนสารรีเคลมแตกต่างกัน 50
4.2 การเปรียบเทียบกราฟเชื่อมโยงของยางรีเคลม RR-GL ที่อัตราส่วนสารรีเคลมแตกต่างกัน 51
4.3 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20)และ 30 mesh (RR-TR30) 53
4.4 เวลาเชื่อมโยง Cure time, t_{c90} (sec) ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30) 53
4.5 แรงบิดสูงสุด (Plateau torque, M_{HF}) ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30) 54
4.6 ความแข็งแรงดึงTensile Strength (MPa) ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30) 55
4.7 ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30) 55
4.8 ความแข็งกด Hardness (Shore A) ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30) 56
4.9 ภาพ SEM ของ RR-TR 20 mesh ที่กำลังขยาย 500 เท่า 56
4.10 ภาพ SEM ของ RR-TR 30 mesh ที่กำลังขยาย 500 เท่า 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.11 ภาพถ่ายพื้นผิวของ RR-TR20 57

4.12 ภาพถ่ายพื้นผิวของ RR-TR30 58

4.13 กราฟเชื่อมโยงของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน 59

4.14 เวลาในการเชื่อมโยงยางของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน 59

4.15 แรงบิดสูงสุดของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน 60

4.16 ความแข็งแรงดึงของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน 62

4.17 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน 62

4.18 ความแข็งแรงฉีกขาดของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน 63

4.19 ความแข็งกดของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน 63

4.20 ภาพ SEM ของยางรีเคลมสูตร RR-TR20 ที่กำลังขยาย 500 เท่า 64

4.21 ภาพ SEM ของยางรีเคลมสูตร RR-GL ที่กำลังขยาย 500 เท่า 64

4.22 ภาพ SEM ของยางรีเคลมสูตร RR-GL2 ที่กำลังขยาย 500 เท่า 65

4.23 ภาพ SEM ของยางรีเคลมสูตร RR-SP ที่กำลังขยาย 500 เท่า 65

4.24 การเปรียบเทียบลักษณะการเชื่อมโยงของยางรีเคลมแต่ละสูตรที่ใช้ Supporter ต่างชนิด 67

4.25 เวลาเชื่อมโยงยางของยางรีเคลมแต่ละสูตร 68

4.26 ความแข็งแรงดึงของยางรีเคลมในแต่ละสูตร 68

4.27 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางรีเคลมในแต่ละสูตร 69

4.28 มอดุลัสของยางของยางรีเคลมในแต่ละสูตร 69

4.29 ความแข็งแรงฉีกขาดของยางรีเคลมในแต่ละสูตร 70

4.30 ความแข็งกดของยางรีเคลมในแต่ละสูตร 70

4.31 ภาพ SEM ของ RR-TR30-Ca ที่กำลังขยาย 500 เท่า 71

4.32 ภาพ SEM ของ RR-TR30-Si ที่กำลังขยาย 500 เท่า 71

4.33 ภาพ SEM ของ RR-TR30-SiHS ที่กำลังขยาย 500 เท่า 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

รูปที่ **หน้า**

2.1 กระบวนการผลิตยางรีเคลม 6

2.2 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลม 8

2.3 การประยุกต์ใช้งานของผงยางในประเทศสหรัฐอเมริกา 30

3.1 ส่วนประกอบของยางรีเคลมชนิดต่างๆ 40

3.2 ส่วนผสมของยางรีเคลมที่ใช้ 40

3.3 ส่วนประกอบของวัตถุดิบ 45

4.1 ส่วนประกอบของยางรีเคลมชนิดต่างๆ 48

4.2 ลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจากยางรถยนต์ (RR-TR20) 50

4.3 ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) และสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม จากถุงมือยาง (RR-GL) 52

4.4 ลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30) 54

45 ลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม ที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน 60

4.6 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมที่ใช้ Supporter ชนิดต่างๆในแต่ละสูตร 66

4.7 เปรียบเทียบราคาต้นทุนวัตถุดิบของยางรีเคลมในแต่ละสูตร 73

4.8 เปรียบเทียบต้นทุนที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลมโดยใช้ปริมาณของสารรีเคลมที่แตกต่างกัน 73

4.9 เปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตยางรีเคลมโดยใช้ยางรีเคลมชนิดแตกต่างกัน 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CRI	อัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index)
GRT	ขนาดอนุภาคของผงยาง (Ground rubber tire)
MDR	เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer)
M_{HF}	ค่าแรงบิดสูงสุด (Plateau torque)
RR-TR	ยางรีเคลมที่เตรียมจากผงยางรถยนต์
RR-TR20	ยางรีเคลมที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh
RR-TR30	ยางรีเคลมที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh
RR-TR30-Ca	ยางรีเคลมที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh ที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็น supporter
RR-TR30-Si	ยางรีเคลมที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh ที่ใช้ซิลิกาเป็น supporter
RR-TR30-SIHS	ยางรีเคลมที่เตรียมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh ที่ใช้ซิลิกากับเรซิน High styrene 6% เป็น supporter
RR-GL	ยางรีเคลมที่เตรียมจากถุงมือยาง
RR-GL2	ยางรีเคลมที่เตรียมจากถุงมือยาง เกรด 2
RR-SP	ยางรีเคลมที่เตรียมจากยางฟองน้ำ
t_{C90}	เวลาเชื่อมโยง (Cure time)
t_{S2}	เวลาสกอร์ช (Scorch time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกยางเป็นอันดับหนึ่งของโลก อุตสาหกรรมยางจึงนับเป็นอุตสาหกรรมหลักที่สร้างรายได้ให้แก่ประเทศไทย โดยในแต่ละปีประเทศไทยมีรายได้จากการส่งออกยางดิบ และผลิตภัณฑ์ยางเป็นจำนวนหลายหมื่นล้านบาท รวมถึงมีการบริโภคยางภายในประเทศเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆในแต่ละปี [1] ปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางได้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว เช่น อุตสาหกรรมในด้านยางรถยนต์ ท่อยาง ชิ้นส่วนรถยนต์ สายพาน ยางพื้นรองเท้า และผลิตภัณฑ์ยางอื่นๆ มีการใช้ยางเป็นวัตถุดิบหลัก ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ในกระบวนการต่างๆของการผลิตจะมีเศษยางและยางคัดทิ้ง (Rejected rubbers and scraped rubbers) [2] เมื่อนำผลิตภัณฑ์มาใช้งานจนหมดอายุแล้ว ก็มักจะถูกทิ้งโดยไม่ได้นำกลับมาใช้ใหม่ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัด ทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากยางเหล่านั้นได้สูงสุดและยังก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ยางเป็นเทอร์โมเซต (Thermoset) ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ จะเชื่อมโยงภายหลังจากการผ่านความร้อน และความดันเพียงครั้งเดียว เมื่อเย็นลงจะแข็งตัว มีความแข็งแรงมาก ทนความร้อนและความดัน ไม่อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างไม่ได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงพอจะไหม้เป็นเถ้าสีดำ ในโครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมเซต โมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหสามมิติ (3D Network) จับกันแน่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมาก จึงไม่สามารถนำมาหลอมเหลวได้หรือไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ถ้าไม่เปลี่ยนโครงสร้างร่างแหสามมิติของเทอร์โมเซต [3] ซึ่งถ้าหากไม่มีการนำผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้แล้วไปแปรรูปเพื่อลดปริมาณ ก็อาจก่อให้เกิดขยะยางในปริมาณมาก ซึ่งวิธีการกำจัดยางไม่ว่าจะเป็นวิธีการฝังกลบ วิธีการเผา ฯลฯ ล้วนแต่ส่งผลต่อมลภาวะแวดล้อม และส่งผลต่อภาวะโลกร้อนด้วยเช่นกัน ซึ่งไม่ก่อให้เกิดประโยชน์แต่อย่างใด ซึ่งวิธีทางหนึ่งที่แก้ไขได้คือการนำทรัพยากรที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ที่เรียกว่า การรีไซเคิล (Recycle) [4]

การรีไซเคิล คือ การนำทรัพยากรที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการแล้วนำกลับมาใช้ในรูปของผลิตภัณฑ์ต่างๆเช่น การนำฝากระป๋องที่ใช้แล้วมาทำเป็นขาเทียม เป็นต้น ในส่วนของเศษยางรถยนต์นั้นเราสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิง การนำมาหล่อดอกยางใหม่ (Retreadable casing) และการนำมาทำยางรีเคลม (Reclaimed rubber) กล่าวคือการนำมาผ่านกระบวนการกำจัดกำมะถัน (Desulferization) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางรถยนต์ใหม่ การนำมาใช้เป็นสารตัวเติม (Filler) ในพอลิเมอร์ นอกจากที่กล่าวมาแล้วนี้เรายังสามารถใช้ประโยชน์อย่างอื่นจากเศษยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถยนต์ เช่นการนำมาใช้ในทางด้านวิศวกรรมโยธา ใช้มาทำเป็นหินเทียม ใช้ผสมกับยางมะตอยเพื่อใช้ราดถนน เป็นต้น การนำขยะยางกลับมาใช้ใหม่ในรูปของยางรีเคลม โดยการแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์ สามารถใช้เป็นยางวัตถุดิบ ช่วยลดต้นทุนการผลิต ทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของขยะที่ใช้แล้วอีกด้วย ดังนั้น ยางรีเคลมจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการลดต้นทุนการผลิตสำหรับแก้ไขวิกฤตราคายางได้ เนื่องจากยางรีเคลมเป็นยางที่ผ่านการเติมสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปมาแล้ว ดังนั้นสารเติมแต่งเหล่านี้บางส่วนก็จะยังคงอยู่ในยางรีเคลม ด้วยเหตุนี้จะทำให้การนำยางกลับมาใช้ใหม่ โดยมีส่วนผสมของยางรีเคลมกับยางใหม่อยู่ด้วยกันนั้น สามารถที่จะลดปริมาณของสารเติมแต่งต่างๆให้น้อยลงได้ เช่น ปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) สารเชื่อมโยง (Curing agents) สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) สารตัวเติม (Fillers) เป็นต้น ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการใช้สารเคมีได้เป็นอย่างมาก โดยที่ยางยังคงมีสมบัติความยืดหยุ่นและสมบัติเชิงกลที่ดีอยู่จึงสามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยาง เพื่อลดการใช้ยางใหม่ 100% ได้ต่อไป [5]

งานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้ประโยชน์ยางรีเคลมชนิดใหม่ที่ผลิตจากกระบวนการเชิงกล-เคมี (Chemical-Mechanical process) ซึ่งเน้นศึกษาสมบัติของยางที่ขึ้นรูปจากยางรีเคลมที่เตรียมจากเศษยางชนิดต่างๆ เช่น ผงยางรถยนต์ (RR-TR20 และ RR-TR30), ถุงมือยาง (RR-GL และ RR-GL2) และยางฟองน้ำ (RR-SP) โดยศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) และสมบัติเชิงกลของยาง ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength), ร้อยละการยืดณ จุดขาด (% Elongation at break), ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength), มอดุลัสของยาง (Rubber modulus, M100), ความแข็งกด (Hardness) เป็นต้น โดยเน้นศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลมได้แก่ อัตราส่วนสารรีเคลม (Reclaiming agents), ผลของขนาดอนุภาคของผงยาง (Ground rubber tire), ชนิดของวัตถุดิบ และชนิดของ Supporter



รูปที่ 1.1 รูปตัวอย่างเศษยางที่ใช้แล้ว [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาสมบัติของยางรีเคลมที่เตรียมจากวัตถุดิบต่างชนิดกันได้แก่ ผงยางรถยนต์ (RR-TR20 และ RR-TR30), ถุงมือยาง (RR-GL และRR-GL2) และยางฟองน้ำ (RR-SP) โดยเน้นศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลมได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics), สมบัติเชิงกล (Mechanical properties), ร้อยละการบวมตัว (% Swell) และสัณฐานวิทยา (Morphology) ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนสารรีเคลม (Reclaiming agents), ผลของขนาดอนุภาคของผงยาง (Ground rubber tire), ชนิดของวัตถุดิบ และชนิดของ Supporter

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.3.2 ผสมยางคอมเปาวด์สูตรต่างๆ ด้วยเครื่องผสมแบบลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และทำการขึ้นรูปตัวอย่างด้วยเทคนิคกดอัด (Compression molding)

1.3.3 ศึกษาสมบัติต่างๆ ของยางตัวอย่างดังนี้

⊙ ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)

- เวลาสกอร์ช (Scorch time, t_{s2})
- เวลาเชื่อมโยง (Cure time, t_{c90})
- ค่าแรงบิดสูงสุด (Plateau torque, M_{HF})
- อัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI)

⊙ สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)
- ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)
- ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)
- มอดุลัสของยาง (Rubber modulus, M100)
- ความแข็งกด (Hardness (Shore A))

⊙ ร้อยละการบวมตัว (% Swell)

⊙ สัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)

1.3.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลม โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ตอนคือ

1.3.4.1 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากอัตราส่วนสารรีเคลมที่แตกต่างกัน

1.3.4.2 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากขนาดอนุภาคของผงยาง (Ground rubber tire : GRT) ที่แตกต่างกันคือขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.4.3 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน ได้แก่ ผงยางรถยนต์ (RR-TR20), ถุงมือยาง (RR-GL และ RR-GL2) และยางฟองน้ำ (RR-SP)

1.3.4.4 ศึกษาชนิดของ Supporter ที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลมได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (RR-TR30-Ca), ซิลิกา (RR-TR30-Si) และซิลิกากับเรซิน High styrene 6% (RR-TR30-SiHS)

1.3.5 ศึกษาต้นทุนที่ใช้ในการผลิตและสรุปผลการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ช่วยลดปริมาณขยะที่เกิดจากยางใช้แล้วได้

1.4.2 ช่วยอุตสาหกรรมยางลดต้นทุนการผลิตโดยการใช้ยางรีเคลมทดแทนการใช้ยางใหม่ ซึ่งสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิต เนื่องจากยางรีเคลมมีราคาถูกและลดต้นทุนสารเติมแต่งที่ใช้ในการคอมเปาวด์ยางเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่สำคัญในการช่วยลดปริมาณขยะที่เกิดจากยางใช้แล้ว

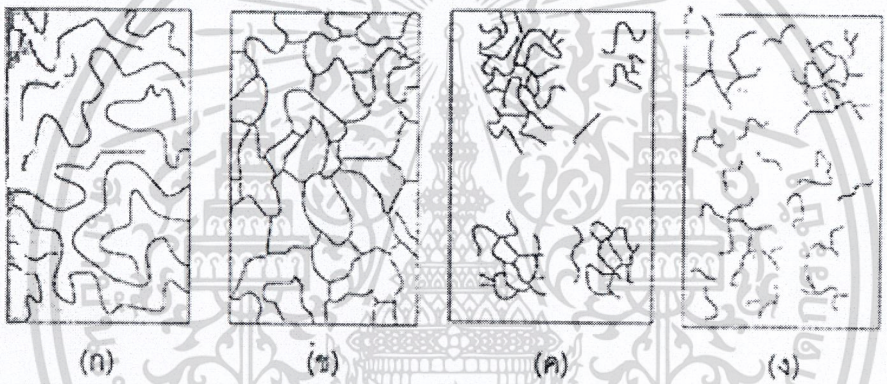
1.4.3 สามารถนำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ในการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากยางที่ใช้แล้วได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางรีเคลม (Reclaimed rubber)

ยางรีเคลม (Reclaimed Rubber) เป็นยางที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้แล้ว เช่น ยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพและผลิตภัณฑ์ยางที่เสียระหว่างกระบวนการผลิต ยางเหล่านี้เป็นยางที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว (Vulcanized rubber) มีโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3D Network) การทำยางรีเคลมเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของยางให้เป็นโครงสร้างสายโซ่สองมิติ คือ สายโซ่ตรงหรือสายโซ่กิ่ง โดยใช้ปฏิกิริยาดีวัลคาไนเซชัน (Devulcanization) แสดงโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยาง (ก) ยางที่ไม่ได้เชื่อมโยง (ข) ยางที่เชื่อมโยงแล้ว (ค) เศษยาง (ง) ยางรีเคลม [7]

ยางรีเคลม คือ การนำยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) แล้วมาทำการแปรรูปให้สามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตได้อีกครั้ง โดยการบดยางวัตถุดิบ (อาจเป็นเศษยางจากกระบวนการผลิต ถุงมือยาง ยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว ฯลฯ) ให้มีขนาดเล็ก แล้วใช้กระบวนการต่างๆ เช่น เคมี-เชิงกล (Chemical-mechanical process) ทำให้พันธะเชื่อมโยงภายในโครงสร้างโมเลกุลของยาง คือ พันธะระหว่างอะตอมกำมะถัน (S-S bonds) และพันธะระหว่างอะตอมกำมะถันกับอะตอมคาร์บอน (C-S bonds) แตกตัวจากกัน ทำให้โครงสร้างโมเลกุลยางเปลี่ยนกลับเป็นสายโซ่ตรงหรือสายโซ่กิ่ง ซึ่งทำให้ยางสามารถไหลได้และสามารถใช้เป็นยางดิบในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางได้ใหม่ โดยอาจใช้ทดแทนยางวัตถุดิบบางส่วนหรือทดแทนได้อย่างสมบูรณ์ทั้ง 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กระบวนการผลิตยางรีเคลม (Reclaiming process)

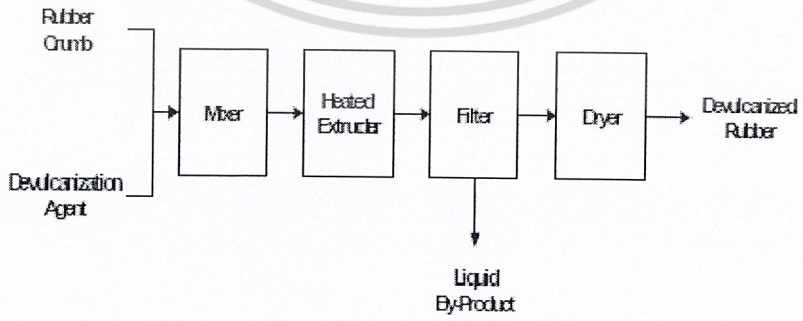
กระบวนการผลิตยางรีเคลม เป็นกระบวนการทำให้ยางที่เสื่อมคุณภาพหรือยางที่ผ่านการวัลคาไนเซชันแล้วกลับมาใช้ได้อีก โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อน ทางเคมี หรือทางกล เพื่อสามารถผสมหรือกลับเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนเซชันได้อีกครั้ง โดยมีหลักการเบื้องต้น คือ การแตกหรือทำลายพันธะเคมีภายใน คือ S-S bonds ซึ่งกระบวนการผลิตยางรีเคลมมี 4 วิธี ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กระบวนการผลิตยางรีเคลม [8]

เทคโนโลยี (Technology)	กระบวนการพื้นฐาน (Basis of Process)
กระบวนการทางเคมี	สารเคมี/ปฏิกิริยาเคมี
กระบวนการอัลตร้าโซนิก	คลื่นเหนือเสียง
กระบวนการไมโครเวฟ	ไมโครเวฟ
กระบวนการทางชีวภาพ	จุลินทรีย์

2.2.1 กระบวนการทางเคมี (Chemical process)

กระบวนการทางเคมี เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมี ทำให้พันธะภายในแตกตัวภายใต้อุณหภูมิและความดันที่กำหนด สารเคมีที่ใช้เช่น Organic disulfides หรือ Mercaptans, Inorganic compounds เป็นต้น กระบวนการทางเคมีส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแบบกะซึ่งเกี่ยวข้องกับการผสมชิ้นยางผ่านการลดขนาดด้วยสารเคมีในอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่แพร่หลาย เนื่องจากง่ายต่อการทดลองและราคาไม่สูง แต่การเกิดปฏิกิริยาจะเกิดเฉพาะส่วนผิวของยางเท่านั้น

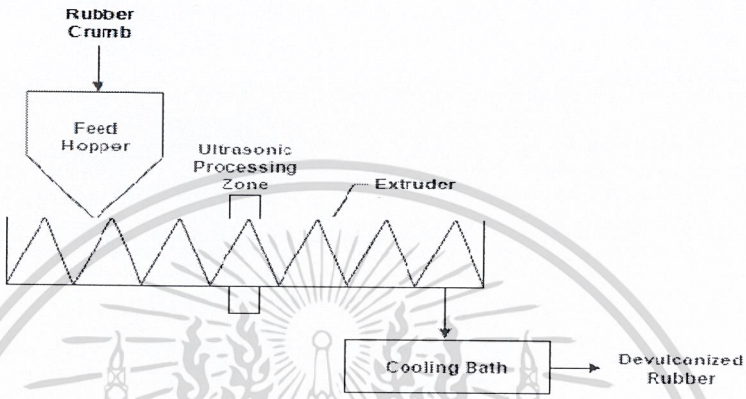


รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการดีวัลคาไนเซชันโดยวิธีทางเคมี [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 กระบวนการอัลตร้าโซนิก (Ultrasonic process)

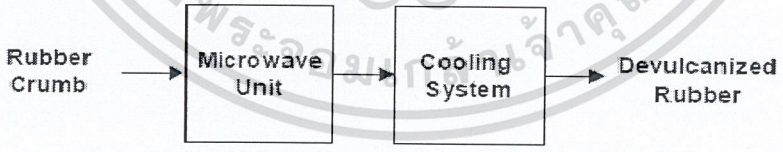
เทคโนโลยีทางด้านดีวัลคาไนเซชันด้วยคลื่นเร็วเหนือเสียง ใช้หลักการในการป้อนวัตถุดิบเข้ามาโดยไม่ให้ความร้อน แล้วใช้เครื่องอัลตร้าโซนิกในการจัดเรียงโมเลกุล กระบวนการนี้เป็นแบบต่อเนื่องหรือแบบกะก็ได้ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องมือหลักคือ เครื่องให้กำเนิดคลื่นเร็วเหนือเสียง (Ultrasonic machine) และเครื่องอัดรีด (Extruder)



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการดีวัลคาไนเซชันโดยวิธีอัลตร้าโซนิก [8]

2.2.3 กระบวนการไมโครเวฟ (Microwave)

กระบวนการไมโครเวฟ อาศัยหลักการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว โดยคลื่นที่มีความเป็นระเบียบและสามารถเข้าถึงภายในของยางได้ตลอดชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม ยางที่จะนำมาทำการดีวัลคาไนเซชัน ยังต้องมีสมบัติพิเศษ คือ จะต้องเป็นยางที่มีความเป็นขั้วเพียงพอภายในโครงสร้างที่จะสามารถดูดซับพลังงานที่ปล่อยออกมาได้ ด้วยอัตราที่พอเพียง

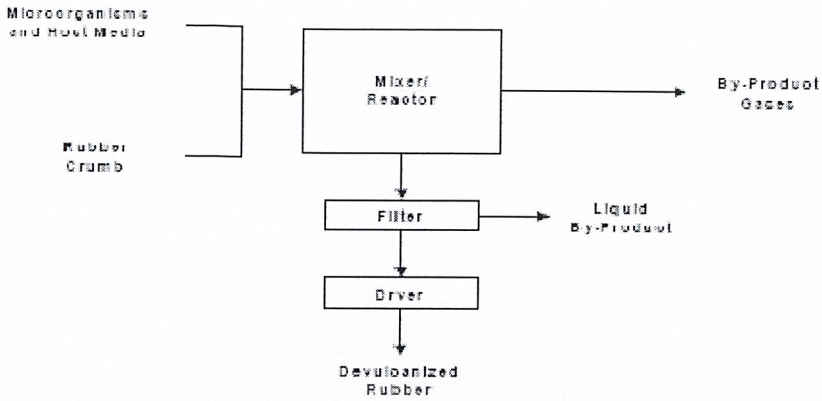


รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงการดีวัลคาไนเซชันโดยวิธีไมโครเวฟ [8]

2.2.4 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological process)

กระบวนการทางชีวภาพเป็นการใช้แบคทีเรียทำลายพันธะระหว่างอะตอมกำมะถันในยาง กระบวนการดีวัลคาไนเซชันถูกปฏิบัติการโดยการคนยางและบรรจุแบคทีเรียที่เหมาะสมในเครื่องต้านไฟฟ้าชีวภาพ การรักษาอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมประมาณ 10-100 วัน แต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากวัตถุดิบหรือยางที่ผ่านการวัลคาไนเซชันจะมีแรงต่อต้านแบคทีเรีย และค่าใช้จ่ายของการเลี้ยงแบคทีเรียในการดำเนินการค่อนข้างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการดีวัลคาไนเซชันโดยวิธีทางชีวภาพ [8]

2.3 การพัฒนากระบวนการรีเคลมในปัจจุบัน

2.3.1 กระบวนการทางชีววิทยาสำหรับการรีเคลมยาง

กระบวนการทางชีววิทยาสำหรับการดีวัลคาไนซ์ของยางเสีย โดยเอายางเสียใส่ในสารแขวนลอยที่มีเชื้อแบคทีเรีย *Chemolithiotrope* ขนาดไมโครกับอากาศที่มีกำมะถัน เป็นกระบวนการที่น่าสนใจซึ่งจะได้ยางรีเคลมโดยวิธีง่าย การดีซัลเฟอไรซ์และการดีวัลคาไนซ์พื้นผิวของอนุภาคอาจจะได้ยางรีเคลมที่มีคุณภาพสูง นำไปสู่การใช้ยางรีไซเคิลในร้อยละที่มากขึ้น ผงยางถูกทดสอบกับแบคทีเรียหลายชนิดในถังปฏิกรณ์ในห้องปฏิบัติการ การออกซิไดซ์กำมะถันขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค

2.3.2 การทำยางรีเคลมโดยกระบวนการดีลิงค์ (De-link process)

ในกระบวนการนี้ ผงยางอนุภาค 40 mesh 100 ส่วน ผสมกับสาร De-Vulc 2-6 ส่วน

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติบางประการของยางรีเคลมที่เตรียมจากกระบวนการดีลิงค์เทียบกับยางบริสุทธิ์ เมื่อ NR คือ ยางธรรมชาติบริสุทธิ์, NR-D คือ ยางธรรมชาติกับ 30% ของยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์, SBR คือ ยางสังเคราะห์บริสุทธิ์, SBR-D คือ ยางสังเคราะห์กับ 30% ของยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลม [9]

Sample	Mooney viscosity ML (1+4) 100°C	Tan δ at maximum torque	300% Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tear resistance (MPa)	Compression set (%)
NR	61.9	0.056	13.56	29.14	543	3.49	19.5
NR-D	72.3	0.062	14.68	27.44	489	2.51	22.0
SBR	96.6	0.091	20.88	26.48	358	1.60	15.0
SBR-D	109.2	0.097	19.95	24.44	345	1.53	13.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การรีเคลมยางโดยใช้วัตถุดิบที่มีใช้ไม่หมดสิ้น (Renewable resource material, RRM)

สารหลายชนิดที่ใช้ในกระบวนการรีเคลมในทางเคมี เช่น ไดซัลไฟด์ โมโนซัลไฟด์ และไทออล สารเหล่านี้จะถูกทำการปรับแต่ง (Treatment) ที่อุณหภูมิและความดันสูง สารพวกไดซัลไฟด์และไทออล เป็นสารที่มีกลิ่นแรงและเป็นอันตราย ดังนั้นสารเหล่านี้จึงไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้

กระบวนการรีเคลมยางทางเคมีและกายภาพ ยกเว้นวิธีทางอุลตร้าซาวด์ ไม่มีรายงานขอบเขตของการรีเคลม ผลิตภัณฑ์ของการรีเคลมไม่มีการวิเคราะห์องค์ประกอบ ผลค่อนข้างแน่นอนว่า การรีเคลมนี้เกิดขึ้นโดยการตัดพันธะระหว่างคาร์บอนกับกำมะถัน และพันธะระหว่างกำมะถันกับกำมะถัน โดยไม่มีโอกาสที่พันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนจะถูกตัดระหว่างการรีเคลม ปริมาณสารที่ละลายจะเท่ากับมวลโมเลกุลของส่วนที่ละลายของยางรีเคลม ซึ่งคาดว่าจะช่วยให้สมบัติของยางรีเคลมดีขึ้น ในกระบวนการรีเคลมทางเคมีและทางกายภาพ ซึ่งข้อมูลนี้สามารถช่วยในการเลือกสารที่เหมาะสมกับกระบวนการ

2.3.3.1 กระบวนการรีเคลมโดยใช้การรีเคลมยางโดยใช้วัตถุดิบที่มีใช้ไม่หมดสิ้น (RRM process)

การนำยางเก่าหรือยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ มาบดในเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งพร้อมกับใส่ RRM และไดออลไลล์ไดซัลไฟด์ (DADS) การรีเคลมจะถูกทำรีเคลมโดยสารรีเคลมต่างกัน เวลาในการบดต่างกัน เมื่อบดไปเรื่อยๆ จะได้ยางที่เหนียวติดลูกกลิ้ง

องค์ประกอบหลักของวิธีนี้ คือ ไดออลไลล์ ไดซัลไฟด์ องค์ประกอบย่อย คือ ไดซัลไฟด์อื่นๆ โมโนซัลไฟด์ พอลิซัลไฟด์ และสารประกอบไทออล ขอบเขตของการรีเคลมกำหนดโดยการวัดปริมาณสารละลาย มวลโมเลกุลของสารที่ละลาย และความหนืดมูนนี่

2.3.3.2 กลไกการรีเคลม

ในกระบวนการรีเคลม โดยสารประกอบไดซัลไฟด์และไทออล ไม่มีข้อมูลพิสูจน์ขึ้นมายืนยัน โดย Adhikari et al. [9] ได้เสนอกลไกการรีเคลมยางดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 ให้ความร้อนเพื่อสลายพันธะกำมะถันของสารรีเคลมไดซัลไฟด์

ขั้นที่ 2 ให้ความร้อนหรือแรงเฉือนเชิงกลเพื่อทำลายโซ่พอลิเมอร์ให้สั้นลง

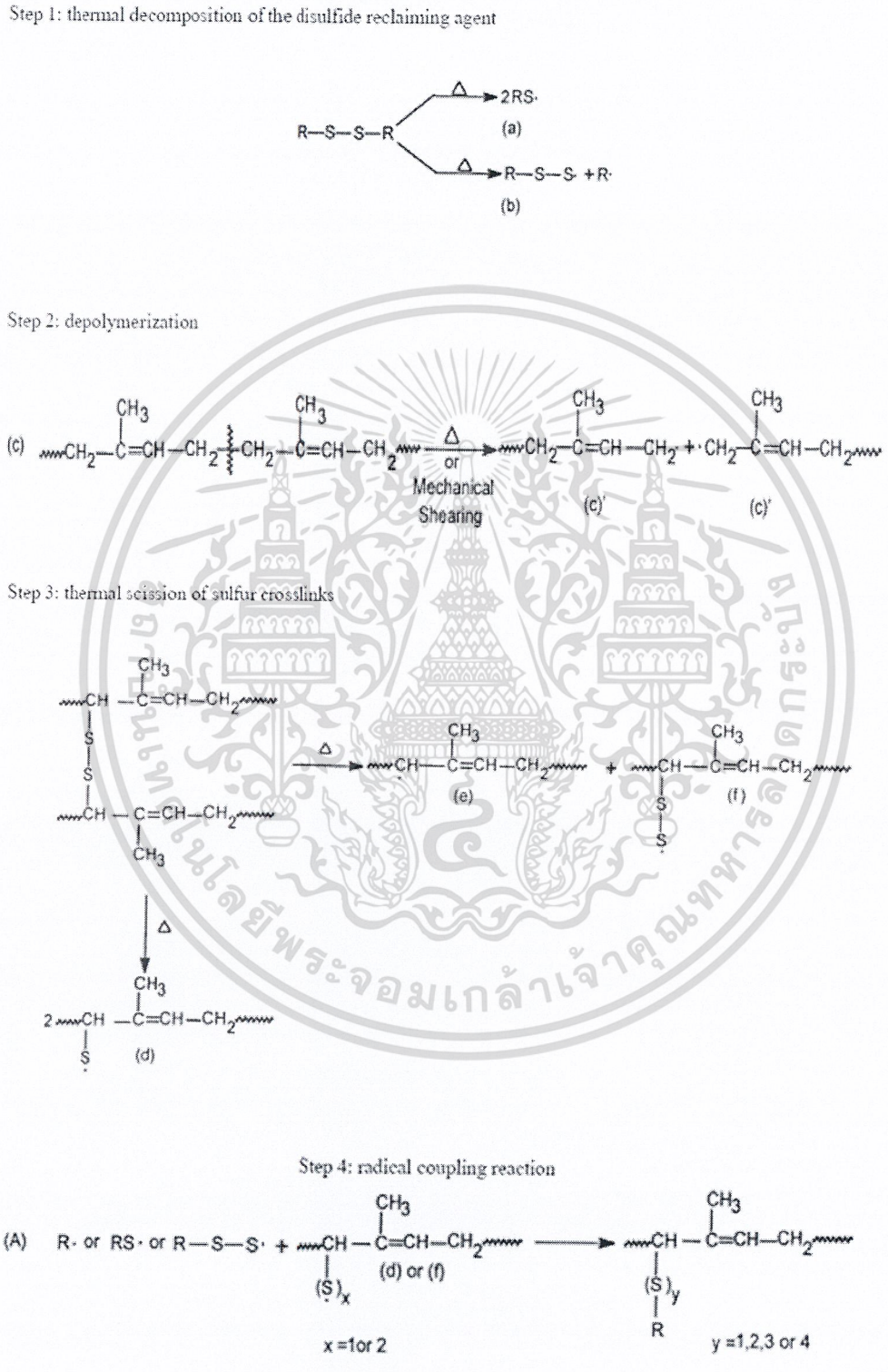
ขั้นที่ 3 ให้ความร้อนเพื่อทำลายพันธะของกำมะถัน

ขั้นที่ 4 เกิดปฏิกิริยาคู่ขนานระหว่างสารรีเคลมไดซัลไฟด์กับสายโซ่พอลิเมอร์ที่สั้นลง

ขณะกระบวนการรีเคลมจริงๆจะเกิดพันธะตามแนวรัศมีจับกับกำมะถันของสารรีเคลมซึ่งเป็นการป้องกันการรวมตัวกันอีกครั้งของสายโซ่พอลิเมอร์ การวิเคราะห์กำมะถันของยางก่อนและหลังการปรับแต่งด้วย DADS ในกรณีนี้แสดงให้เห็นว่า การผสมของกำมะถันกับยางที่ถูกปรับแต่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ เนื่องจากการจับของส่วน DADS กับโมเลกุลของยาง และมักจะปรากฏในลำดับต้นปฏิกิริยาโดยไม่คำนึงถึงอุณหภูมิของสารที่นำมาใช้



รูปที่ 2.6 กลไกการรีเคลมยาง [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วัตถุดิบ

ยางรีเคลม มีหลายชนิด หลายเกรด แตกต่างกันตามวัตถุดิบที่นำมาผลิต เช่น ยางรถยนต์ (Tire) ถุงมือยาง (Glove) ถุงยางอนามัย (Condom) ยางฟองน้ำ (Rubber foam) ชิ้นส่วนรถยนต์ (Autobile parts) ฯลฯ วัตถุดิบเหล่านี้มีสัดส่วนองค์ประกอบที่แตกต่างกัน เช่น ปริมาณเนื้อยาง (% Rubber content) ปริมาณเขม่าดำ (% Carbon black) ฯลฯ ทำให้ยางรีเคลมที่ได้มีสมบัติแตกต่างกัน การใช้งานของยางชนิดนี้จึงสามารถใช้ได้หลากหลาย ได้แก่ วัสดุฉนวน พื้นสนามกีฬา ยางกันกระแทก ชิ้นงานยางขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรม ยางลูกล้อตัน ยางรถเข็น สายพาน ซีลยาง รองเท้าของเล่นเด็ก ยางมะตอย ยางปูพื้นรถยนต์ ท่อยาง อะไหล่ ฯลฯ โดยการผลิตยางรีเคลมส่วนใหญ่ใช้วัตถุดิบจาก

1. ผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตไม่ได้มาตรฐานหรือใช้งานไม่ได้แล้ว เช่น ถุงมือยางรองพื้นรองเท้า ยางจุกขวดนม ถุงยางรั่ว ถุงมือยางเสีย หนังยางวง ฯลฯ

2. ผลิตภัณฑ์ยางที่ผ่านการใช้งานแล้ว เช่น ยางรถบรรทุกที่ใช้หมดดอกแล้ว ถุงมือแพทย์ ยางใน ฯลฯ

3. ยางตาย (Over cured rubber) ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่ทำการผสมและนวดยาง คือ มียางบางส่วนจะสุกก่อน หากนำไปผ่านการขึ้นรูปในขั้นตอนต่อไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีปัญหาด้านคุณภาพ

4. ครีบยางหรือยางที่ถูกรีดออกจากกระบวนการผลิต ในขั้นตอนการขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์

5. ยางเม็ด ผงยางหรือยางผ่านการบดให้เป็นชิ้นเล็กลง มีตั้งแต่ขนาด 2-3 เซนติเมตร จนกระทั่งถึง 20-30 Mesh



รูปที่ 2.7 วัตถุดิบในการผลิตยางรีเคลม [6]

2.5 การผสมยาง (Rubber Compounding) [10]

การผสมยางหรือการคอมปาวด์ คือ ขั้นตอนการผสมยางที่ยังไม่ผ่านการเชื่อมโยง (Vulcanization) กับสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆของยาง ซึ่งการผสมยางจะส่งผลต่อสมบัติของยางที่ได้ ยางที่ได้หลังจากที่ผสมสารเคมีต่างๆเรียบร้อยแล้ว จะเรียกว่า ยางผสมสูตรหรือยางคอมปาวด์ (Rubber compound)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 องค์ประกอบของยางคอมปาวด์ [11]

ยางคอมปาวด์ ประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีหน้าที่ที่แตกต่างกัน องค์ประกอบที่สำคัญของยางคอมปาวด์ได้แก่

-ยาง (Elastomer) เป็นองค์ประกอบหลัก สามารถเลือกใช้ได้ในหลายรูป เช่น ยางดิบ, ยางมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatches) หรือยางผสมสูตรสำเร็จ, ยางผสมน้ำมัน (Rubber oil), ยางผสมเขม่าดำ (Rubber-carbon black), ยางรีเคลม (Reclaimed rubber), หรือยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer, TPEs) เป็นต้น

-สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) เช่นกำมะถัน (Sulfur, S) เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ออกไซด์ของโลหะ (Metal oxides) ฯลฯ ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3D Network) โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง (ยกเว้นโครงสร้างของยางเทอร์โมพลาสติก (TPEs))

-สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) อาจเรียกสั้นๆว่า สารเร่ง ทำหน้าที่ช่วยสารเชื่อมโยงทำให้มีอัตราของการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Rate of vulcanization) เร็วขึ้นลดเวลาเชื่อมโยง (Cure time หรือ Vulcanization time) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นและใช้สารเชื่อมโยงน้อยลง นอกจากนี้ยังทำให้สมบัติของยางที่ผ่านการเชื่อมโยงดีขึ้นด้วย

-สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) อาจเรียกสั้นๆว่า สารกระตุ้น ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงโดยเกิดเป็นสารเชิงซ้อน (Complexes) กับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) ทำให้สารเร่งมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น มีอัตราเร็วของการเชื่อมโยงสูงขึ้น เวลาเชื่อมโยงลดลง และยังช่วยให้สมบัติของยางที่ผ่านการเชื่อมโยงดีขึ้น

-สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) เป็นสารราคาถูก ทำหน้าที่เพิ่มเนื้อหรือลดต้นทุนให้กับผลิตภัณฑ์ยาง สารตัวเติมบางชนิดนอกจากใช้ลดต้นทุนแล้วยังเพิ่มความเข็งแรง หรือเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับยาง เช่น เขม่าดำ (Carbon black, CB) ซิลิกา (Silica) ฯลฯ

-สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) คือ สารเคมีที่ใส่เพื่อช่วยปรับปรุงให้สามารถผสมหรือขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้ง่ายขึ้น

-สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants หรือ Age-Resistors) ได้แก่ สารป้องกันออกซิเดชันหรือแอนตี้ออกซิแดนต์ (Antioxidant), สารป้องกันโอโซนหรือแอนตี้โอโซแนนต์ (Antiozonant) รวมทั้งสารอื่นๆที่ช่วยลดการเสื่อมสภาพของยางจากสิ่งแวดล้อม เช่น ออกซิเจน โอโซน แสงแดด ความร้อน รังสียูวี (UV radiation) ฯลฯ

-พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) หรือ สารเพิ่มความนิ่ม (Softeners) คือ สารที่ใส่เพื่อเพิ่มความนิ่มหรือความยืดหยุ่นของยาง

-สารหล่อลื่น (Lubricants) ช่วยหล่อลื่นหรือลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ หรือหล่อลื่นระหว่างเครื่องผสมกับวัสดุ ช่วยขบวนการผลิตทำให้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-สารเติมแต่งอื่นๆ (Miscellaneous ingredients) เติมเพื่อเพิ่มสมบัติบางประการเช่น

-สารหน่วง (Retarders) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงช้าลง มีเวลานานเพียงพอในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

-สารให้สี (Colorants) เปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ยางให้มีสีสันสวยงามตามต้องการ

-สารให้ฟอง (Blowing agents) ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุน มีโครงสร้างแบบเซลลูลาร์ (Cellular structure) เช่น ฟองน้ำยาง โฟม

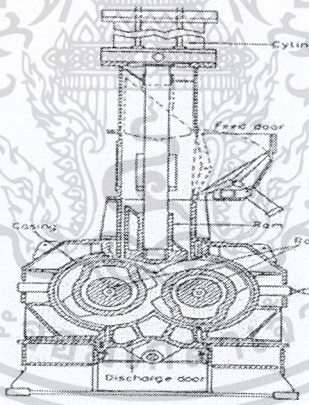
-สารให้กลิ่น (Odorants) ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีกลิ่นหอม หรือระงับกลิ่นของยางที่ไม่พึงปรารถนา

-สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) ช่วยเพิ่มสมบัติการยึดติด (Tackiness) ที่ผิวหน้ายาง ให้เหนียวและยึดติดกับวัสดุอื่นหรือยางด้วยกันเองได้ดีขึ้น

2.5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมยาง

เครื่องมือที่ใช้ในการผสมยาง โดยทั่วไปมี 2 ระบบ คือ เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) เช่น เครื่องนวด (Kneader) เครื่องบานบุรี (Banbury) เป็นต้น และเครื่องผสมระบบเปิด เช่น เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

2.5.2.1 เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) [12]



รูปที่ 2.8 เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) [10]

เครื่องผสมระบบปิดเป็นเครื่องผสมที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะเครื่องผสมระบบปิดได้ถูกออกแบบมาเพื่อทดแทนเครื่องรีดแบบสองลูกกลิ้ง ประกอบด้วยห้องผสม โรเตอร์ แรม และระบบหล่อเย็นหรือระบบให้ความร้อน ซึ่งระบบหล่อเย็นหรือระบบให้ความร้อนนี้จะถูกติดตั้งทั้งที่ผนังด้านในของห้องผสมและที่โรเตอร์ เพื่อช่วยระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการขัดสีในระหว่างการผสมหรือเพื่อให้ความร้อนแก่เครื่องผสม โดยทั่วไปเครื่องผสมระบบปิดสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดหลักคือ

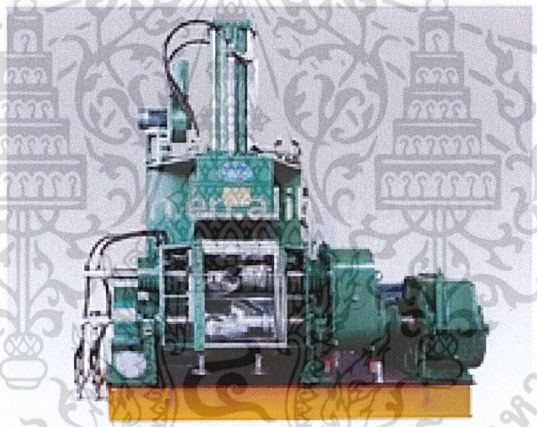
เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ (Intermix-type internal mixer)

-เครื่องผสมระบบปิดบานบุรี (Banbury-type internal mixer)

-เครื่องผสมระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้ (Variable intermeshing clearance-type internal mixer)

เครื่องผสมระบบปิดบานบุรี (Banbury-type internal mixer) เป็นเครื่องจักรที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน โรเตอร์ทั้งสองของเครื่องผสมจะเป็นแบบ “Non-interlocking” หรือบางครั้งเรียกว่าเร็สที่ต่างกันซึ่งมีอัตราเร็วสัมพัทธ์ของโรเตอร์ตั้งแต่ 1:1.1 ถึง 1:1.2 ซึ่งแรงเฉือนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดที่บริเวณช่องว่างระหว่างปีกของโรเตอร์กับผนังห้องผสม ส่วนพื้นที่ที่เหลือในห้องผสมยางและองค์ประกอบอื่นจะไหลหมุนเวียนไปมา ช่วยทำให้องค์ประกอบต่างๆกระจายตัวในยางได้ดียิ่งขึ้น เครื่องผสมบานบุรีเป็นที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากโรเตอร์ของเครื่องผสมมีขนาดที่ไม่ใหญ่มากนักทำให้ยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ในแต่ละครั้ง (Batch size) มีปริมาณค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.9 เครื่องผสมระบบปิดบานบุรี (Banbury-type internal mixer) [12]

2.5.2.2 เครื่องผสมระบบเปิด

เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เป็นเครื่องผสมยางระบบเปิดที่ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วต่างกัน ทำให้เกิดแรงเฉือนที่จำเป็นต่อการบดผสมยางกับสารเคมียาง ในการผสมยางกับสารเคมียางจะใส่ยางลงช่องระหว่างลูกกลิ้ง ยางจะถูกรีดออกมาเป็นแผ่นรอบลูกกลิ้งด้านหน้า จากนั้นจึงเติมสารเคมียาง โดยผู้ผสมต้องทำการกรีดยางแผ่นและพับไปมาในขณะที่เติมสารเคมีลงไปในยาง ซึ่งยางที่ถูกตัดพับจะถูกใส่กลับไปช่องระหว่างลูกกลิ้ง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะช่วยให้สารเคมีต่างๆ กระจายตัวเข้ากับเนื้อยางได้ดี เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้งใช้ผสมยางในปริมาณไม่มาก เนื่องจากต้องใช้ความชำนาญและกำลังคนในการทำการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



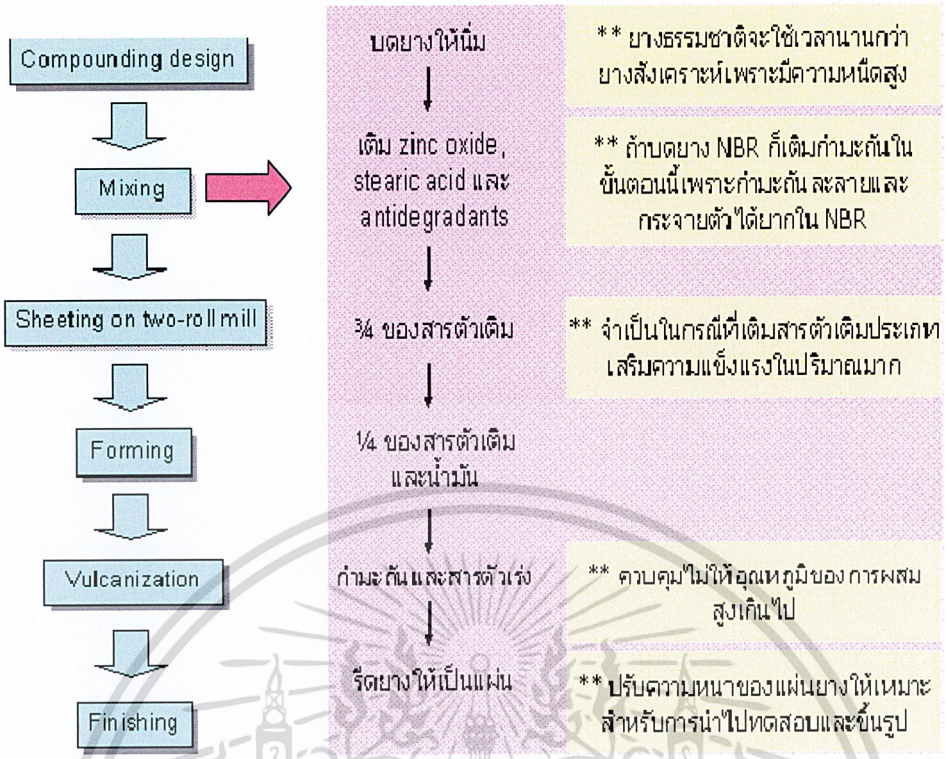
รูปที่ 2.10 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) [10]

2.6 ขั้นตอนการผสม (Mixing Step) [13]

ในการผสมยางอย่างมีประสิทธิภาพและผสมยางให้มีความสม่ำเสมอในด้านคุณภาพนั้น ลำดับขั้นตอนการเติมสารเคมีต่างๆ ต้องเป็นไปตามขั้นตอนอย่างถูกต้อง

หลักการโดยทั่วไปคือ ก่อนการผสมสารเคมีต้องทำการบดยางหรือลดความหนืดของยาง โดยการตัดโมเลกุลของยางซึ่งเป็นการลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยกระบวนการเชิงกล นั่นคืออาศัยแรงเฉือนในเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขั้นตอนในการบดยางเพื่อลดความหนืดของยางก่อนการผสมเคมีนี้ เรียกว่า การบดย่อยหรือมาสติเคชัน (Mastication) ปกติการบดยางที่อุณหภูมิต่ำจะให้ประสิทธิภาพในการบดยางที่ดี เพราะยางจะมีความหนืดส่งผลให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในการผสมสูงขึ้นด้วย ประสิทธิภาพในการบดยางอันเนื่องจากแรงกลจึงเพิ่มขึ้น แต่บางครั้งก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบดยางที่อุณหภูมิสูงได้ โดยการเติมสารเปปไทเซอร์ (Peptizer) ลงไปเล็กน้อย เพราะสารเคมีดังกล่าวจะช่วยให้โมเลกุลยางที่ถูกตัดขาดไปแล้วสามารถกลับเข้าไปทำปฏิกิริยารวมตัวกันใหม่ แต่การบดยางมากเกินไปจะทำให้ยางอ่อนแอ ซึ่งจะส่งผลให้ยางไม่สามารถรับสารตัวเติมได้ในปริมาณมาก ยางเชื่อมโยงที่ได้จึงมีความยืดหยุ่น สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัตที่ไม่ดี ดังนั้น การบดยางจึงควรทำเท่าที่จำเป็นคือ ใช้เวลาสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะนอกจากจะทำให้ยางเชื่อมโยงที่ได้มีสมบัติที่ดีแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย หลังจากการบดยางจนนิ่มแล้ว เติมสารตัวเติมที่กระจายในเนื้อยางได้ยากก่อน เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (Stearic acid) ผงเขม่าดำ เพราะช่วงนี้อุณหภูมิในการบดยังต่ำ และยางมีความหนืดสูง แรงกระทำเชิงกลจึงมีมาก จากนั้นจึงเติมสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง สารอื่นๆ และน้ำมัน สารที่แนะนำให้เติมลำดับสุดท้าย คือ สารตัวเร่ง กำมะถัน และสารหน่วง (Retarder)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการผสมยาง [13]

2.7 กระบวนการเชื่อมโยงยาง (Vulcanization) [10, 13]

การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น กำมะถัน เขม่าดำ และสารเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น หลังจากการผสมเคมียาง ยางผสมที่ได้หรือยางคอมปาวด์ (Rubber compound) จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการเชื่อมโยงหรือในทางเทคนิคจะเรียกว่า กระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วจะเรียกว่า ยางสุกหรือยางเชื่อมโยง (Vulcanizate) ซึ่งจะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลภายในยางเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3D Network) ได้ยางที่เสถียรและเชื่อมโยง ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากและมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

2.7.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing Agent)

สารเชื่อมโยง คือ สารเคมีสำหรับผสมในยาง เพื่อทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแหขึ้น การทำให้ยางเชื่อมโยงหรือทำให้ยางสุก คือ การทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุล เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ส่งผลให้ยางเกิดการเปลี่ยนสภาพจากค่อนข้างอ่อนมีความเป็นพลาสติกสูง ไปเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นดีและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียร และไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากนัก ทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงแดดได้ดียิ่งขึ้น จึงสามารถนำยางไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันต้องอาศัยสารเคมีกลุ่มที่ทำให้ยางเชื่อมโยง (Vulcanizing or

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

Curing agents) และความร้อนเพื่อทำให้สารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่

2.7.1.1 ระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur Vulcanization System)

เป็นระบบที่เหมาะสำหรับการทำให้ยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลสูงเกิดการเชื่อมโยง เช่น ยางธรรมชาติ เพราะพันธะคู่ คือ บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันด้วยกำมะถัน การทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันจะทำให้ยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่มีความทนทานต่อความร้อนต่ำ ระบบนี้ประกอบด้วย

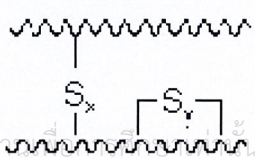
1. กำมะถัน (Sulfur)

กำมะถันเป็นสารเคมีที่รู้จักกันดีในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากใช้เป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยง มีลักษณะเป็นผลึกของแข็งสีเหลืองที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.12 โครงสร้าง cyclooctasulfur, S_8 [14]

ระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน เป็นระบบที่ใช้อย่างกว้างขวางกับยางที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลไม่อิ่มตัว (Unsaturation) ระบบนี้จำเป็นต้องมีสารตัวกระตุ้น (Activator) เช่น ซิงค์ออกไซด์และกรดสเตียริก สำหรับสารเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง โดยสัดส่วนของการใช้กำมะถันต่อสารเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญ เพราะเป็นตัวกำหนดชนิดของพันธะเคมีที่เกิดขึ้น เช่น ถ้าใช้ปริมาณกำมะถันมากและใช้สารเร่งปฏิกิริยาน้อย เรียกว่า ระบบธรรมดาหรือ Conventional Vulcanization (CV system) ซึ่งจะมีพันธะเคมีแบบ Polysulfidic crosslinks และแบบ Cyclic แต่ถ้าใช้ปริมาณกำมะถันน้อยและใช้สารเร่งปฏิกิริยามากจะได้พันธะเคมีส่วนใหญ่เป็นแบบ Monosulfidic crosslinks เรียกระบบนี้ว่า ระบบประสิทธิภาพหรือ Efficient Vulcanization (EV system) นอกจาก 2 ระบบดังกล่าว ยังมีอีกระบบหนึ่งเรียกว่าระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV system) ซึ่งจะอยู่กึ่งกลางระหว่าง 2 ระบบข้างต้น ซึ่งพันธะเคมีแบบ Polysulfidic จะให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดีแต่ไม่ทนต่อความร้อน ในขณะที่ยางที่มีพันธะแบบ Monosulfidic หรือ Disulfidic จะให้สมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่า แต่ยางจะเสถียรต่อความร้อนได้ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.13 พันธะเคมีหรือการเชื่อมโยงของสายโมเลกุลยางด้วยกำมะถัน [10]

117288

2. สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) [11]

สารเร่งปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางในปริมาณเล็กน้อย เพื่อลดเวลาที่จะทำให้ยางเชื่อมโยง โดยการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเร็วขึ้น การใช้สารเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน เพราะปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันและยางจะเกิดขึ้นได้ช้ามากแม้อุณหภูมิสูงๆ

การเติมสารเร่งปฏิกิริยาลงไปในปริมาณเพียงเล็กน้อย จะช่วยทำให้ปฏิกิริยาระหว่างยางและกำมะถันเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น จึงช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงยาง ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงเกินไปและยางเชื่อมโยงที่ได้ก็จะมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางเชื่อมโยงมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น การแบ่งกลุ่มสารเร่งปฏิกิริยา มีหลักเกณฑ์ทั่วไปในการเลือกใช้สารเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

-สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องทำให้ยางคอมปาวด์ที่ได้มีระยะเวลาสกอร์ชที่ยาวเพียงพอที่จะไม่ก่อให้เกิดปัญหายางตายในระหว่างกระบวนการผลิต

-เมื่อปฏิกิริยาเชื่อมโยงเริ่มเกิดขึ้น สารเร่งปฏิกิริยาที่ดีจะต้องทำให้ยางคอมปาวด์มีอัตราเร็วในการเชื่อมโยงที่สูง และยางเชื่อมโยงที่ได้ก็มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงด้วยเช่นกัน

-สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต้องเหมาะสมกับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการคงเชื่อมโยงยาง สำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่หนามากๆ จำเป็นต้องเชื่อมโยงยางที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ และต้องใช้เวลาในการเชื่อมโยงนาน แต่ไม่ควรใช้สารเร่งปฏิกิริยาชนิดที่ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงด้วยอัตราเร็วที่สูงเกินไป เพราะจะทำให้ยางที่บริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์เกิดการเชื่อมโยงมากเกินไปหรือที่เรียกกันว่า Overcure แต่ควรเลือกใช้สารเร่งปฏิกิริยาชนิดที่ทำให้ยางเชื่อมโยงได้ช้าและไม่ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ เมื่อได้รับการเชื่อมโยงนานเกินไปส่วนผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทที่มีขนาดเล็กและบาง เช่น ปลอกยางหุ้มสายไฟ ฯลฯ ซึ่งส่วนใหญ่จะได้รับการเชื่อมโยงด้วยระบบการเชื่อมโยงแบบต่อเนื่อง ที่มีอุณหภูมิของการเชื่อมโยงสูงและใช้ระยะเวลาในการเชื่อมโยงสั้นมากๆ ก็จำเป็นต้องเลือกใช้สารเร่งปฏิกิริยาชนิดที่ทำให้ยางมีอัตราเร็วในการเชื่อมโยงสูง

-สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการยึดติดกับผ้าใบหรือโลหะ สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องทำให้ยางเชื่อมโยงยึดติดกับผ้าใบหรือโลหะได้ดี

-สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องไม่ก่อให้เกิดปัญหาการบลูม

2.1 สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มไทอะโซล (Thiazole)

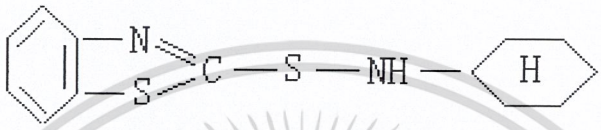
สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มไทอะโซลนิยมใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากราคาไม่แพงและยังทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงได้เร็วอีกด้วย สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มไทอะโซลที่นิยมใช้ได้แก่

-MBT (2-mercaptobenzothiazole)

-MBTS (Dibenzothiazydisulfide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ใช้ได้ดีกับยางแทบทุกประเภท ทำให้ยางมีอัตราเร็วในการเชื่อมโยงปานกลาง และยางเชื่อมโยงที่ได้ก็จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพสูง โดย MBT ทำให้ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้เร็วกว่า MBTS เพราะ MBTS ต้องแตกตัวด้วยความร้อนเป็น MBT ก่อนจึงจะสามารถเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้ ดังนั้น MBTS จึงทำให้ยางมีความปลอดภัยในการขึ้นรูปที่สูงกว่า แต่ยางจะมีอัตราการเชื่อมโยงที่สูงกว่า MBT ทั้ง MBT และ MBTS เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ว่าการใช้สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้เพียงอย่างเดียวอาจให้ยางเชื่อมโยงที่ได้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำ

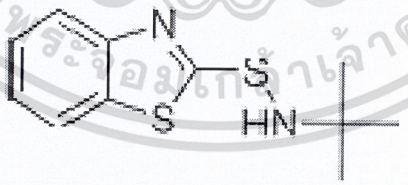


รูปที่ 2.14 โครงสร้างกลุ่มไทอะโซล (Thiazole) [15]

2.2 สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มซัลฟีนาไมด์ (Sulfenamide)

สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มซัลฟีนาไมด์ เป็นสารเร่งปฏิกิริยาชนิดดีเลย์แอคชัน (Delayed-action accelerator) หรือเริ่มเกิดการเชื่อมโยง (Scorch) ช้าเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ทำให้มีเวลาเพียงพอในการเชื่อมโยง นิยมใช้กับยางที่ต้องใช้เวลาผสมหรือขึ้นรูปนาน เนื่องจากหมู่อัลคิล (R) ในโครงสร้างเป็นหมู่ใหญ่ (Bulky) ให้กับโปรตอน (H^+) ช่วยหน่วงให้จุดเริ่มการเชื่อมโยงช้า ให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time) นาน สารเร่งปฏิกิริยาซัลฟีนาไมด์ชนิดที่นิยมใช้ ได้แก่

-CBS (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide) สารเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ช่วยปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องจากความร้อนได้



รูปที่ 2.15 โครงสร้างกลุ่มซัลฟีนาไมด์ (Sulfenamide) [16]

3. สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator)

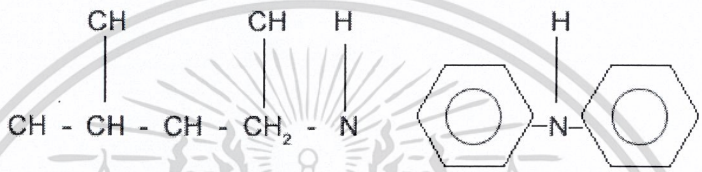
สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วขึ้น ได้แก่ สารอนินทรีย์ พวกซิงค์ออกไซด์ร่วมกับสารอินทรีย์พวกกรดสเตียริก (ZnO/Stearic acid) เนื่องจากราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน สามารถใช้ได้กับยางทั่วไป ซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็นซิงค์-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตียเรต (Zinc stearate) ซึ่งสามารถละลายได้ในยาง และช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง เนื่องจากเป็นซิงค์ไอออน (Zinc ions) ที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง

4. สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agent)

4.1 สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidant) สารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจน คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อจับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของออกซิเจนในอากาศกับยาง (ที่มีพันธะคู่) หรือทำให้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแตกตัวต่อไปเป็นส่วนที่ไม่เป็นอันตรายต่อการเสื่อมสภาพของยาง ทำให้ยางมีอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น เช่น 6PPD



รูปที่ 2.16 N-1, 3 - dimethy butyl – N – phenyl – paraphenyl diamine (6PPD)

4.2 สารต้านทานปฏิกิริยาโอโซน (Antiozonant) สารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อป้องกันหรือลดการเกิดรอยแตกของยางจากการเกิดปฏิกิริยาของโอโซนกับยางเมื่ออยู่ภายใต้ความเครียด

2.7.1.2 ระบบเชื่อมโยงด้วยสารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน (Sulfur Donor Vulcanization System)

นอกจากการใช้ธาตุกำมะถันเป็นสารเชื่อมโยงแล้ว สารประกอบอินทรีย์ที่สลายตัวให้กำมะถันที่อุณหภูมิการอบให้ยางเชื่อมโยง ก็สามารถใช้เป็นสารเชื่อมโยงได้ สารกลุ่มนี้ได้แก่ TMTD (Tetramethylthiuram disulfide) และอนุพันธ์ของ Morpholine เช่น DTDM (Dithiodimorpholine) การใช้สารประกอบพวกนี้เป็นสารเชื่อมโยง มีข้อดีคือ ลดปัญหาการเกิดการบลูม (Bloom) และเนื่องจากปฏิกิริยาจะไม่เกิดจนกว่ากำมะถันจะสลายตัวออกมา ดังนั้นจึงลดปัญหาการเกิดยางตาย (Scorch) สารพวกนี้ยังก่อให้เกิดพันธะเคมีแบบ Monosulfidic เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีมาก

2.7.1.3 ระบบทำให้ยางเชื่อมโยงด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide system)

ระบบนี้สามารถใช้ในการทำให้ยางเกือบทุกชนิดเกิดการเชื่อมโยงโดยเฉพาะยางสังเคราะห์ที่ไม่มีหรือมีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ ยางที่เชื่อมโยงด้วยระบบนี้จะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก ต้นทุนสูงกว่าระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน และยางเชื่อมโยงที่ได้มักมีกลิ่นของ Acetophenone ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการทำปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน แต่ว่ายางจะมีความทนทานต่อความร้อนสูง

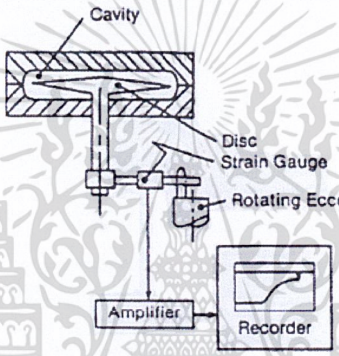
เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง (Curemeters for rubber compounds)

สามารถแบ่งเครื่องวัดการเชื่อมโยงยางออกเป็น 2 ชนิดคือ

2.7.2.1 เครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น (Oscillating disc rheometers, ODR)

เครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น เป็นเครื่องที่สามารถวัดการเชื่อมโยงของยางได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยางและห้องปฏิบัติการทดสอบยางทั่วไป เพื่อใช้ในการหาสภาวะการเชื่อมโยงยางที่เหมาะสม หาเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตยาง และใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง หลักการทำงานคือ การตรวจวัดความแข็งของยาง โดยการวัดการเปลี่ยนแรงหมุน (Torque) ของจานรูปโคนครึ่งวงกลม (Biconical disc) หมุนสั่นอยู่ในตัวอย่างยางที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น [11]



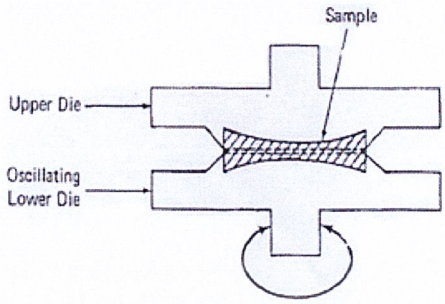
รูปที่ 2.18 เครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น (Oscillating disc rheometers, ODR)

2.7.2.2 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometers, MDR)

เป็นเครื่องวัดการเชื่อมโยงชนิดใหม่ที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เนื่องจากใช้ตัวอย่างเล็กและบางกว่า เป็นผลให้การเชื่อมโยงได้เร็วกว่า ไม่มีข้อผิดพลาดของการทดสอบเนื่องจากแรงเสียดทานของจานหมุน ซึ่งให้ข้อมูลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำกว่า ให้ข้อมูลมากชนิดกว่า เช่น ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, E) อัตราการเชื่อมโยง (Cure rate) และ Phase angles หลักการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานคือ จานด้านล่าง (Lower die) จะหมุนสั่นไปมาทำมุม $\pm$ 1,3 หรือ 5 องศา ที่ความถี่ 1.7 เฮิร์ทซ์ จานด้านบนจะอยู่กับที่และวัดแรงบิด (Torque)

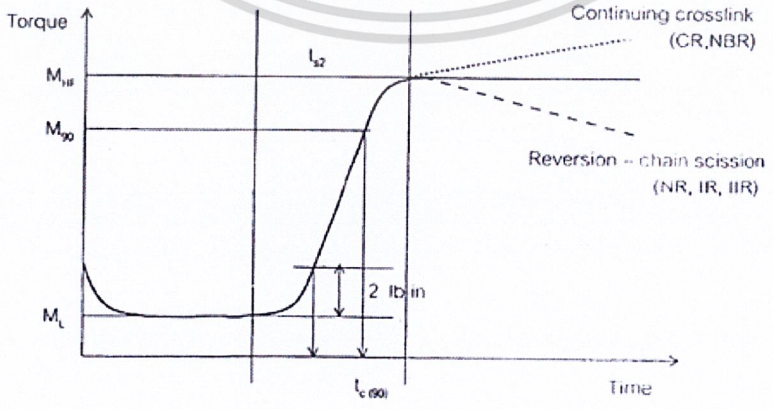


รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน [11]



รูปที่ 2.20 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer, MDR)

ผลการทดสอบการเชื่อมโยงยางสามารถแสดงดังรูปกราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา ซึ่งเรียกว่ากราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ดังรูปที่ 2.21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.21 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) [11]

2.8 สารตัวเติม (Filler) [17]

สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) เป็นสารเติมแต่ง (Additives) ที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่งของยางและพลาสติก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาถูก สามารถใช้ผสมในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ผสม หรือลดต้นทุนการผลิตนั่นเอง สารตัวเติมบางชนิดยังสามารถเสริมแรง (Reinforcement) กล่าวคือทำให้พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมมีความแข็งแรงสูงขึ้น สารตัวเติมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

2.8.1 สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers)

ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิต และช่วยเสริมแรงทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้น สารตัวเติมชนิดเสริมแรงได้แก่ เขม่าดำหรือคาร์บอนแบล็ค (Carbon black, CB) ซิลิกา (Silica) ฯลฯ

-เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำได้จากขบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ เขม่าดำจัดเป็นสารตัวเติมที่สำคัญที่สุดและมีปริมาณการใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากสามารถใส่เขม่าดำในยางได้ในปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr, part per hundred of rubbers) และที่สำคัญที่สุด คือ เขม่าดำสามารถช่วยเสริมแรงให้กับยางอย่างมาก อาจทำให้ความแข็งแรง (Strength) ของยางเพิ่มมากกว่า 10 เท่าเทียบกับยางที่ไม่ใส่เขม่าดำ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processibility) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัวและการบิดเบี้ยวของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น การใช้เขม่าดำมีข้อเสีย คือ ผลิตภัณฑ์ยางที่ใส่สารตัวเติมเขม่าดำมีสีดำ เช่นยางรถยนต์ ฯลฯ

-ซิลิกา (Silica : SiO_2)

เป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำอื่นๆ โดยเฉพาะซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ข้อดีของซิลิกาคือช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่น เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ลดความร้อนสะสม (Heat buildup) เพิ่มความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance) เป็นต้น ในการใช้งานซิลิกานิยมใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) เช่น สารประกอบไซเลน (Silane coupling agent) เคลือบผิวอนุภาคซิลิกาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัฏภาค (Interfacial bonding) ทำให้สมบัติของยางดีขึ้น

2.8.2 สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers)

ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียวไม่ช่วยเสริมแรงให้กับพอลิ-เมอร์ สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรงได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ดินขาว (Kaolin, Clay) ฯลฯ

-ดินขาว (Kaolin, Clay)

ดินขาวเป็นสารตัวเติมชนิดสีไม่ดำ (Non-black fillers) ที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง นิยมใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีสัน ต้องการความสวยงามของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)

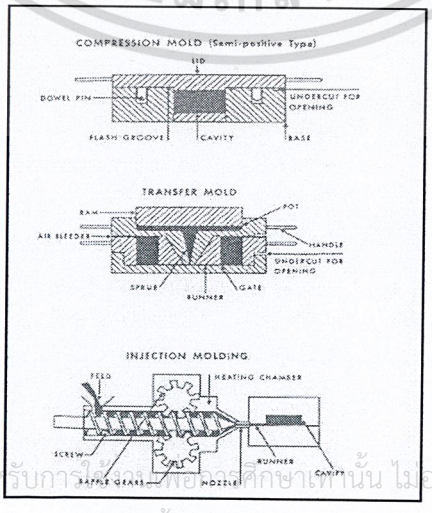
แคลเซียมคาร์บอเนตเตรียมได้จากธรรมชาติคือหินปูน (Limestone) และหินอ่อน (Marble) โดยการบดแบบเปียกและแห้ง ทำให้มีขนาดแตกต่างกัน (1-20 ไมครอน) มีราคาถูกแต่ความหนาแน่นสูง (2.72 g/cm^3) นิยมใช้สารช่วยกระจายตัวเช่น กรดสเตียริก (Stearic acid) เคลือบสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัว

2.9 การขึ้นรูปยาง (Forming) [12]

เทคนิคหลักๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปยางคอมปาวด์ให้เป็นผลิตภัณฑ์มี 3 วิธี

2.9.1 การใช้แม่พิมพ์ (Molding)

การใช้แม่พิมพ์ ขึ้นรูปยางเป็นวิธีการที่ทำให้ยางเกิดเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์พร้อม ๆ กับการเกิดปฏิกิริยายางเชื่อมโยง โดยความร้อนและแรงอัด แม่พิมพ์ที่ใช้จะก่อให้เกิดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แม่พิมพ์มีแบบต่างๆ คือ แบบอัด (Compression) แบบกึ่งฉีด (Transfer) และแบบฉีด (Injection) แม่พิมพ์แบบอัดเป็นพิมพ์แบบง่ายราคาถูกกว่าอีก 2 แบบ ใช้กันอย่างกว้างขวางในการทำผลิตภัณฑ์ยางทั่วๆ ไป ลักษณะของแม่พิมพ์แบบอัดประกอบด้วยฝา 2 ชิ้นที่ยึดกันด้วยสลักฝาด้านหนึ่งจะเป็นช่องรูปร่างของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเวลาอัดยางจะใส่ยางลงในฝานี้ เมื่อประกอบอีกฝาหนึ่งปิดลง และวางพิมพ์ในเครื่องดันให้ความร้อนยางจะไหลในช่องของแม่พิมพ์เต็มตามรูปของแม่พิมพ์ ส่วนแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดนั้นมีส่วนประกอบของพิมพ์มากกว่า 2 ส่วน ยางจะถูกอัดจากส่วนหนึ่งของพิมพ์ที่เรียกว่า Pot ไปยังช่องของแม่พิมพ์ที่เป็นรูปร่างของพิมพ์ของผลิตภัณฑ์ โดยแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดนี้ สามารถทำผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ แม่พิมพ์แบบฉีดได้พัฒนามาจาก 2 แบบแรก จะประกอบด้วย เครื่องที่เป็นส่วนทำให้ยางนิ่ม แล้วฉีดยางเข้าแม่พิมพ์ แบบนี้จะมีราคาสูงมาก และตัวของเครื่องที่เป็นส่วนทำให้ยางนิ่มไหลได้นั้นต้องทำมาจากวัสดุที่แข็งแรงมากราคาจึงสูงมากเช่นกัน



รูปที่ 2.22 การขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์แบบต่างๆ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 การอัดรีด (Extrusion)

เครื่องที่ใช้เพื่ออัดยางผ่านดาย (Die) เป็นเครื่องมือที่ทำงานโดยการอัดหรือดันยางไปยังส่วนหัวของเครื่องซึ่งมีดายรูปร่างต่าง ๆ ตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ ยางจะออกจากดายเป็นชิ้นยาวและมีรูปร่างลักษณะตามชนิดของเครื่องนี้ แบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิดเป็นเครื่องที่อาศัยแรงอัดจากแรม (Ram) และอีกชนิดหนึ่งอาศัยแรงอัดยางจากการหมุนของสกรูชนิดหลังนั้นเป็นชนิดที่ใช้กันอย่างกว้างขวางและเรียนกันว่า Extruder หรือ Forcing machine หรือ Tuber ส่วนชนิดแรกนั้นเป็นเครื่องพิเศษที่จะใช้กับงานบางอย่างซึ่งมีช่วงเวลาใช้งานเพียงสั้น ๆ ผลิตภัณฑ์ยางหลายชนิดที่ผลิตโดยใช้เครื่องอัดแบบสกรู ส่วนที่จะทำให้ดอกยางรถยนต์ (Tread) อัดยางหุ้มสายเคเบิ้ลหรือหุ้มลวดที่จะประกอบทำยางล้อรถยนต์ เป็นต้น โดยปกติแล้วผลิตภัณฑ์ยางจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบสกรูนี้จะต้องผ่านการอบให้เชื่อมโยงในหม้ออบไอน้ำหลังจากที่อัดออกจากดายแล้ว

2.9.3 การใช้เครื่องคาเลนเดอร์ (Calendering)

เครื่องคาเลนเดอร์ เป็นเครื่องที่ประกอบด้วยชุดของลูกกลิ้งจำนวนต่าง ๆ คือ 2 หรือ 3 หรือ 4 ลูกกลิ้ง ซึ่งทำมาจากเหล็กหล่ออย่างดีผิวหน้าขัดเรียบ การใช้เครื่องคาเล็นเดอร์เพื่องานการรีดยางเป็นแผ่นเรียบมีความหนาและความกว้างสม่ำเสมอ

2.10 การทดสอบ [9]

การทดสอบที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมยางแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่

1. การทดสอบคุณภาพยางดิบ
2. การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต (Processibility)
3. การทดสอบสมบัติของยางที่เชื่อมโยงแล้ว (Vulcanizate properties)

2.10.1 การทดสอบคุณภาพของยางดิบ

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางส่วนใหญ่ ถ้าเป็นยางธรรมชาติจะมีการทดสอบสิ่งเจือปน ความชื้น และสารประกอบบางอย่าง เช่น ไนโตรเจน ผงเถ้า ความอ่อนตัวและดัชนีความอ่อนตัวของยาง (Plasticity and plasticity retention index) ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ส่วนยางสังเคราะห์มักทดสอบค่าความหนืดมูนนี่

2.10.2 การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต

สมบัติที่จำเป็น ได้แก่ ความนิ่ม-แข็งของยาง ซึ่งแสดงในรูปของค่าความหนืดมูนนี่ กรณีที่ต้องการศึกษาการไหล (Rheology) ก็ต้องใช้เครื่อง Capillary rheometer ในการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงของยางก็จะวัดโดยใช้เครื่อง Oscillating disc rheometer หรือ Moving die rheometer เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.3 การทดสอบสมบัติของยางเชื่อมโยง

สมบัติพื้นฐานของยางเชื่อมโยงที่ต้องทดสอบ ได้แก่ สมบัติการดึงยาง (Tensile properties) เช่น ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) และร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) สมบัติการทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ความแข็ง (Hardness) การหักงอ (Flex cracking) การล้าตัว (Fatigue) การต้านทานโอโซน (Ozone resistance) การกระเด้ง (Rebound resilience) ความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance) การยุบตัว (Compression set) การเกิดความร้อนสะสม (Heat build-up) เป็นต้น

2.11 สมบัติและประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ยางรีเคลม

2.11.1 เมื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยาง

-ราคาถูกเมื่อเทียบกับยางชนิดอื่น

-ราคาค่อนข้างคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงมาก

-ลดการใช้สารเคมีในสูตรยาง โดยเฉพาะตัวที่มีอยู่ในยางรีเคลมบางส่วนแล้ว

-ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพคงที่สม่ำเสมอและสามารถทำเกรดที่เหมาะกับการใช้งานของลูกค้าเฉพาะรายได้

2.11.2 เมื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aid)

-ยางรีเคลมมีความยืดหยุ่นต่ำกว่า ทำให้เกิดการหดตัวหรือการบวมตัวต่ำในผลิตภัณฑ์ยางอัดรีด (Extruded products) ในระหว่างกระบวนการผลิต

-ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยกระบวนการผลิต เพิ่มอัตราเร็วลูกกลิ้งรีด (Calendering) และการอัดรีด (Extrusion)

-ช่วยให้ไม่เกิดฟองกักในแผ่นอัดรีดหรือผ้าใบยาง

-ความหนืดที่น้อยกว่าทำให้ใช้พลังงานที่น้อยกว่าในการผสมและขึ้นรูป

-สามารถใช้ผลิตยางผสมสูตรที่ไม่ตาย (Non-scorch compounds) ช่วยลดของเสียระหว่างการผลิตและผลิตภัณฑ์ด้อยคุณภาพ

2.11.3 ลักษณะเด่นของผลิตภัณฑ์

-มีสมบัติเชิงกลไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป (Good aging properties)

-ลดต้นทุนผลิตภัณฑ์

-มีสมบัติต้านการซึมผ่านก๊าซดีเยี่ยม (กรณี ยางรีเคลมบิวทิล)

-ช่วยลดผลิตภัณฑ์ด้อยคุณภาพเป็นของเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.4 กรมโรงงานอุตสาหกรรม

เน้นการควบคุมมลภาวะแวดล้อมและการกำจัดของเสียมากขึ้น ทำให้ต้องควบคุมของเสียที่เกิดจากการผลิตและแนวทางในการทำลายทิ้ง วัตถุดิบที่ถูกคัดแยกจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง สามารถนำมาใช้ในการผลิตยางรีเคลมได้ทั้งหมด

2.12 ข้อดีและข้อเสียของยางรีเคลม

2.12.1 ข้อดีของยางรีเคลม

-ราคาถูกเมื่อเทียบกับยางชนิดอื่น และราคาค่อนข้างคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงมาก

-ลดการใช้สารเคมีในสูตรยาง เนื่องจากยังมีสารเคมีเหลือติดอยู่ในยาง ได้แก่ สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) กำมะถัน (Sulfur) น้ำมันยาง (Rubber oil) เขม่าดำ (Carbon black) ฯลฯ

-ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพคงที่สม่ำเสมอ และสามารถผลิตเกรดที่เหมาะกับการใช้งานของลูกค้าเฉพาะรายได้

-สามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aid) เนื่องจากมีน้ำมันผสมอยู่ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายกว่า

-มีความยืดหยุ่นต่ำกว่ายางดิบทั่วไป ทำให้เกิดการหดตัวหรือการบวมตัวต่ำ ในพวกผลิตภัณฑ์ยางอัดรีด (Extruded products) ในระหว่างกระบวนการผลิตและช่วยเพิ่มอัตราเร็วลูกกลิ้งรีด (Calendering) และการอัดรีด (Extrusion)

-ใช้พลังงานในการผสมและขึ้นรูปน้อยกว่า เนื่องจากมีความหนืดที่น้อยกว่า

-ช่วยลดของเสียระหว่างการผลิตและผลิตภัณฑ์ด้อยคุณภาพ โดยนำของเสียมาแปรรูปเป็นยางรีเคลม

2.12.2 ข้อเสียของยางรีเคลม

-สมบัติของยางรีเคลมแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน ต้องปรับสูตรและระวังในการใช้งาน

-สมบัติเชิงกลด้อยกว่ายางใหม่มาก เช่น Tensile strength, % Elongation at break, Tear strength เป็นต้น

-ยางรีเคลมส่วนใหญ่มีสีดำ จึงไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่เน้นความสวยงาม

2.13 ผงยางรถยนต์ [18, 19]

นำยางรถยนต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ ในช่วงแรกนั้นจะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนถ่านหินและน้ำมันในโรงงานต่างๆ เช่น โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ต่อมาได้มีการพัฒนาการนำยางรถยนต์กลับมาใช้ใหม่โดยวิธีต่างๆ เช่น การนำมาหล่อดอกยางใหม่ การนำมาผสมในวัตถุดิบผลิตยางรถยนต์และนำมาเป็นสารเพิ่มเนื้อในพอลิเมอร์ต่างๆ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผงยางหรือยางครัมบ์ (Crumb rubber) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำขยะยาง (เช่น ยางล้อเก่า เศษยางที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต)ไปผ่านกระบวนการบดโดยใช้เครื่องมือเชิงกลต่างๆ เช่น เครื่องแกรนูเลเตอร์ (Granulator) เครื่องบดผงหรือพัลเวอไรเซอร์ (Pulverizer) เครื่องบดหัวฆ้อน (Hammer mill) เครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ทั้งนี้การบดสามารถทำได้ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไปการบดที่อุณหภูมิห้องจะเหมาะกับการผลิตผงยางที่มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ ผงยางที่ได้จะมีรูปร่างที่ไม่เป็นระเบียบและมีพื้นผิวขรุขระ หากต้องการผงยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง จำเป็นต้องนำขยะยางไปผ่านเครื่องบดซ้ำหลายๆ รอบ ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ส่วนการบดที่อุณหภูมิต่ำนั้นเป็นวิธีการบดที่มีต้นทุนสูงเพราะต้องใช้ไนโตรเจนเหลวปริมาณมาก วิธีนี้จึงเหมาะสำหรับใช้การผลิตผงยางที่มีอนุภาคขนาดเล็กเท่านั้น ผงยางที่ได้จากการบดด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ ปัจจุบันได้มีการนำผงยางที่ได้จากการรีไซเคิลไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายรูปแบบ เช่น การนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยาง นำไปใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในพลาสติก นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางรีเคลมและยางเทอร์โมพลาสติก รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา

2.13.1 การบดยาง (Grinding)

การนำยางรถยนต์เข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ต้องลดขนาดของยางให้เป็นชิ้นเล็กๆ ก่อน การบดยางที่ใช้แล้วสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

2.13.1.1 การบดเชิงกล (Mechanical grinding)

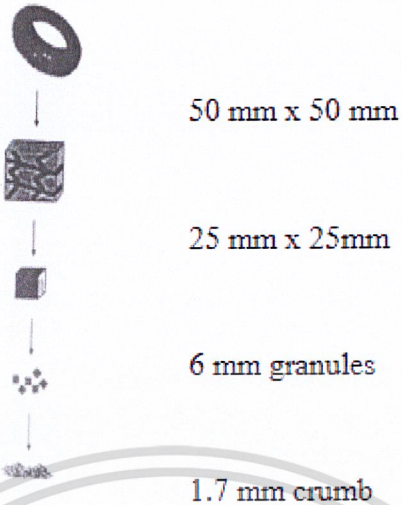
กระบวนการเปลี่ยนยางรถยนต์ให้เป็นผงยางรถยนต์ (Ground rubber tires, GRT) โดยการบดยางรถยนต์ให้เป็นผงที่อุณหภูมิห้อง กระบวนการบดแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.23

ขั้นที่หนึ่ง การตัด (Shredding) ยางรถยนต์จะถูกตัดแยกออกตามองค์ประกอบของยาง จากนั้นจะตัดให้มีขนาด 50 mm X 50 mm ที่เรียกว่าเศษยางรถยนต์ และเศษยางเหล่านี้จะถูกบดให้มีขนาดน้อยกว่า 25 mm ส่วนโลหะที่ผสมอยู่ในเศษยางถูกแยกออกโดยสายพานแม่เหล็กขณะลำเลียงเศษยางเข้าสู่ขั้นตอนการทำเม็ด

ขั้นที่สอง การแยก (Separation) ยางรถยนต์ที่ถูกตัดเป็นชิ้นเล็กๆ จะมีเส้นใยปริมาณมากซึ่งต้องแยกออก ถ้าไม่แยกออกจะมีการปนเปื้อนอยู่ในผงยางรถยนต์ ทำให้ผงยางรถยนต์เกิดพันธะที่ไม่ต้องการกับสารตัวอื่นในระหว่างการนำไปใช้งานเพราะเส้นใยเหล่านี้มีพื้นที่ผิวมาก

ขั้นที่สาม การทำเม็ด (Granulation) ตัดเศษยางให้มีขนาด 6 mm ด้วยใบมีดหมุนที่ออกแบบพิเศษ ส่วนโลหะและเส้นใยที่เหลืออยู่จะถูกแยกออกอีกครั้ง โดยสายพานแม่เหล็กและ Cyclonic fluff separator ตามลำดับ จากนั้นเศษยางรถยนต์จะถูกส่งเข้าสู่เครื่องตัดเม็ดเพื่อตัดให้มีขนาดประมาณ 1.7 mm

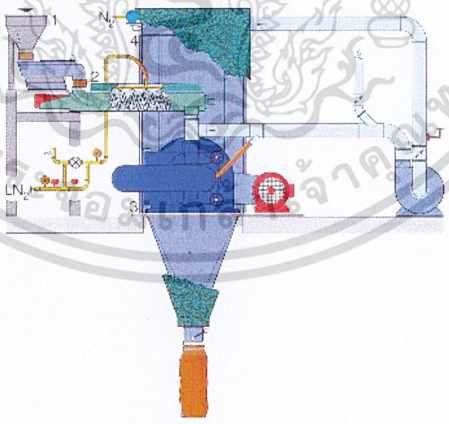
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 ขั้นตอนในการเปลี่ยนขนาดของยางรถยนต์โดยวิธีการบดยางเชิงกล [18]

2.13.1.2 การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding)

การบดที่อุณหภูมิต่ำ เป็นกระบวนการบดยางรถยนต์โดยการนำเศษยางรถยนต์แช่ในไนโตรเจนที่มีอุณหภูมิประมาณ -195 $^{\circ}C$ แล้วจึงบดด้วย Hammer mill และการทำแยกโลหะและเส้นใยออกไปพร้อมๆกันด้วย ผงยางรถยนต์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีขนาดสม่ำเสมอมากกว่าผงยางรถยนต์ที่ได้จากการบดโดยวิธีการบดที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.24 เครื่องบดยางที่อุณหภูมิต่ำ [20]

2.13.2 การประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมยาง [19]

ผงยางได้รับการนำไปใช้เป็นสารตัวเติมทั้งในอุตสาหกรรมยางล้อและในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แผ่นยาง -ท่อยาง
- บล็อกยางปูพื้น -แผ่นปูพื้นสำหรับคอกปศุสัตว์
- พรมปูพื้น -กระถางต้นไม้
- ยางบังโคลน -ยางกันกระแทกท่าเรือ
- พื้นรองเท้า -แผ่นฉนวนกันเสียง
- แผ่นยางรองใต้พรมแผ่นยางชั้นล่างของลู่วิ่งลานกรีฑาหรือสนามเทนนิส

อาจนำผงยางรถยนต์ใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในวัตถุดิบต่างๆ ได้แก่

1.ยางรถยนต์ ผงยางรถยนต์ถูกผสมกับวัตถุดิบผลิตยางรถยนต์ ปริมาณผงยางรถยนต์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับการนำยางรถยนต์ไปใช้งาน การเติมผงยางรถยนต์ในวัตถุดิบจะทำให้ความแข็งแรงลดลง ส่วนความร้อนสะสมเพิ่มขึ้น

2.แผ่นปูพื้น ผลิตจากยางรถยนต์ผสมพอลิยูรีเทน ผงยางรถยนต์ที่ใช้ควรมีขนาดเล็กกว่า 4 เมช แผ่นปูพื้นที่ผลิตได้มีคุณสมบัติดูดกลืนเสียงและทนกระแทกแรงได้ดี

3.ผสมกับยางมะตอยเพื่อลาดถนน การเติมผงยางรถยนต์ลงในยางมะตอยจะช่วยลดการแตกของผิวถนน เพิ่มความทนทานและลดการซึมผ่านของน้ำ

ตารางที่ 2.3 การประยุกต์ใช้งานของผงยางในประเทศสหรัฐอเมริกา [19]

การใช้งาน ปริมาณ (%)	**ปริมาณ (%)**
วิศวกรรมโยธา (ผสมกับยาง มะตอย)	44
อุตสาหกรรมการผลิตยางล้อ	20
ผลิตยางรีเคลม	18
ทำลู่วิ่งลานกรีฑา	8
อุตสาหกรรมยางและพลาสติกอื่นๆ	10

การประยุกต์ใช้ผงยางดังกล่าวมีจุดประสงค์หลัก 3 ประการ คือ

- ลดต้นทุนการผลิต
- ดัดแปรหรือปรับปรุงสมบัติเฉพาะบางประการของผลิตภัณฑ์
- ลดมลพิษโดยการนำเอาขยะยางกลับมาใช้ใหม่

เนื่องจากผงยางมีขนาดของอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่ แม้ว่าจะบดให้ละเอียดมากเพียงใด ผงยางก็ยังคงมีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตรซึ่งถือว่ามีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับเขม่าดำและซิลิกาซึ่งมีขนาดที่เล็กในระดับนาโนเมตร ด้วยเหตุนี้ผงยางจึงจัดเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง การเติมผงยางลงไปในยางจึงมักส่งผลให้ยางมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ด้อยลง ซึ่งการด้อยลงของสมบัติเชิงกลจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของผงยาง ปริมาณผงยาง และขนาดของอนุภาคผงยางที่

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ที่ปรากฏในการนำไปใช้

เติมลงไป โดยทั่วไปแล้วการนำผงยางไปใช้เป็นสารตัวเติมจำเป็นต้องพิจารณาประเด็นต่างๆ คือ ผงยางที่จะนำไปใช้เป็นสารตัวเติมจะต้องมีความเข้ากันได้กับยางที่นำไปใช้สูง เช่น ถ้ายางมีความเป็นขั้วสูง ผงยางที่เลือกใช้ก็ควรเป็นผงยางชนิดที่มีความเป็นขั้วสูง หรือถ้ายางที่มีความเป็นขั้วต่ำผงยางที่เลือกใช้ก็ควรเป็นชนิดที่มีความเป็นขั้วต่ำตามไปด้วยเช่นกันถ้าจะให้ได้สมบัติที่ดีที่สุด ทั้งผงยางและยางที่นำผงยางไปผสมควรจะเป็นยางชนิดเดียวกัน ถ้าหากผงยางมีระดับความเป็นขั้วหรือมีระดับความเข้ากันได้แตกต่างจากยางที่นำไปผสมมาก แรงดึงดูดหรืออันตรกิริยาระหว่างผงยางและยางหลักก็จะมีค่าต่ำ ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลด้อยลงอย่างรวดเร็ว

2.14 สารรีเคลม (Reclaiming Agent)

สารรีเคลม คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่ตัดการเชื่อมโยงสายโซ่กำมะถันในเนื้อยาง (Devulcanized) ทำให้ยางเปลี่ยนจากโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3D Network) หรือเทอร์โมเซต เป็นสายโซ่ตรงหรือเทอร์โมพลาสติก เพื่อนำยางที่ผ่านการตัดสายโซ่แล้วไปทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่อีกครั้ง สารรีเคลมที่ใช้มีหลายชนิด ตัวอย่างเช่น

-Di Xylene Di Sulfide [21]

Di Xylene Di Sulfide หรืออีกชื่อหนึ่งคือ Di Aryl Di Sulfide (DADS) ทำหน้าที่เป็นสารรีเคลมในการผลิตยางรีเคลม โดยสามารถตัดการเชื่อมโยงของยางได้ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ข้อดีของ Di Xylene Di Sulfide คือ ทำการตัดการเชื่อมโยงได้รวดเร็วมาก และทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ประหยัดพลังงานและเวลาในกระบวนการผลิต

สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ Di Xylene Di Sulfide

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



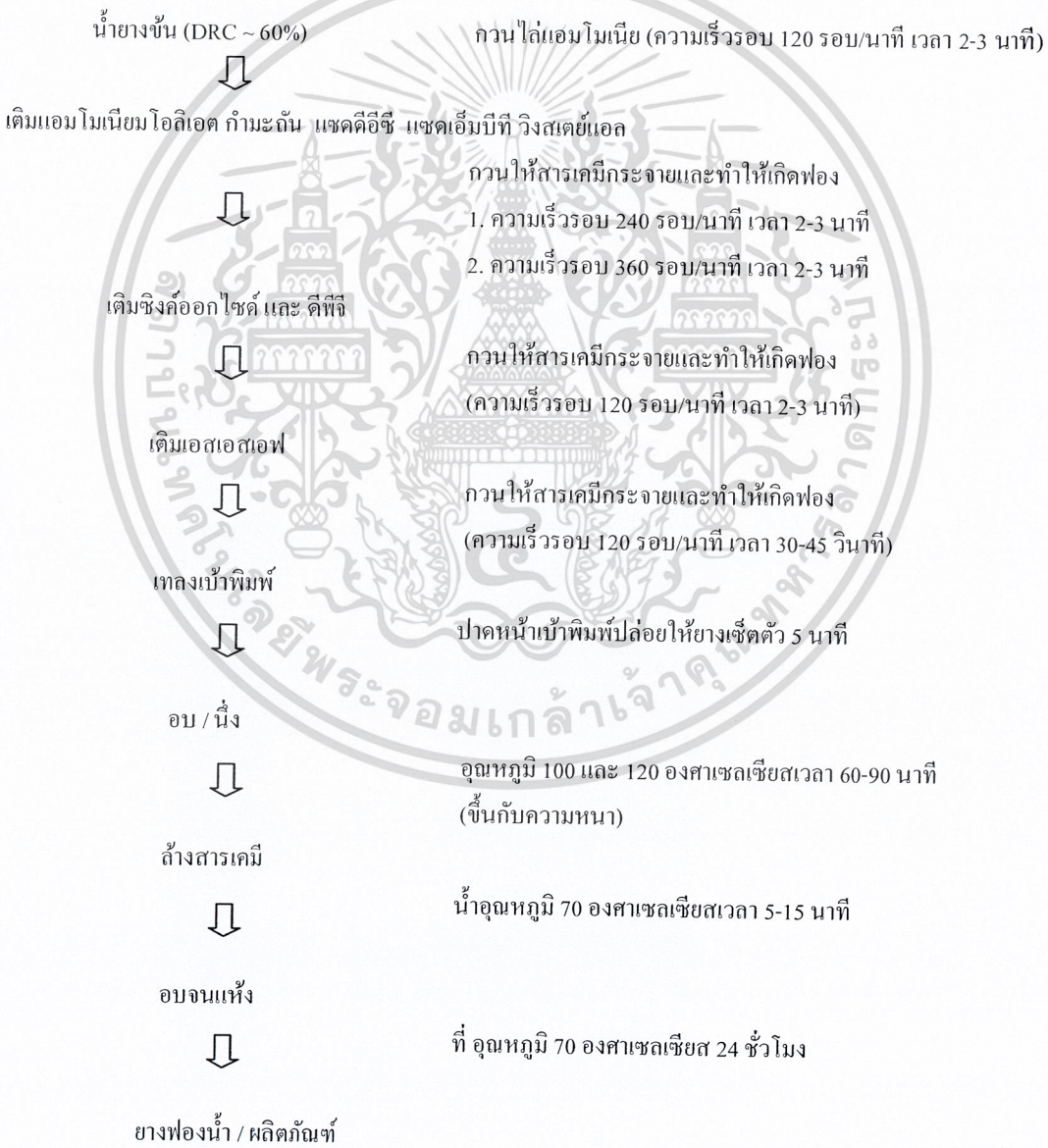
(ก) (ข)

รูปที่ 2.25 โครงสร้างของสารรีเคลม (ก) ไดเอริลไดซัลไฟด์ และ (ข) ไดฟีนิลไดซัลไฟด์ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 ยางฟองน้ำ [22]

ผลิตภัณฑ์ยางโฟมหรือยางฟองน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นรูพรุนเหมาะที่ใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์จำพวก เบาะนั่ง ที่นอน หมอน สื่อการสอน ตุ๊กตา และของชำร่วยต่างๆ เช่น พวงกุญแจ หลักการสำคัญของการผลิตยางฟองน้ำ คือการทำให้น้ำยางเกิดฟองของอากาศหรือของแก๊สต่างๆ แล้วทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงหรือการวัลคาไนซ์ด้วยสารเคมีและความร้อน ในปัจจุบันเทคนิคการผลิตยางฟองน้ำ แบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือเทคนิค Dunlop และเทคนิค Talalay ซึ่งแต่ละเทคนิคต่างกันที่วิธีการทำให้เกิดฟองและการทำให้อนุภาคยางจับตัวกัน ขั้นตอนการทำยางฟองน้ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ขั้นตอนการทำยางฟองน้ำ [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.1 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ

2.15.1.1 Dunlop process [22]

การขึ้นรูปยางฟองน้ำด้วยวิธี Dunlop process

ขั้นตอนแรก ทำให้เกิดฟองด้วยเครื่องที่เรียกว่า "Oakes Frother" พร้อมกับทำการฉีดลมเข้าไปในน้ำยางเพื่อทำให้เกิดเป็นฟองละเอียดจากนั้นมีการผสมซิงค์ออกไซด์และโซเดียมซิลิโคนฟลูออไรด์ (ซึ่งเป็นสารช่วยทำให้อนุภาคยางจับตัวกัน) เข้าไปในน้ำยาง ท้ายสุดยางฟองน้ำจะถูกฉีดหรือเทเข้าไปในแม่พิมพ์ แล้วทำการเชื่อมโยงต่อไป การเชื่อมโยงของยางฟองน้ำทำได้โดยใช้ไอน้ำระบบเปิด อุณหภูมิประมาณ 100°C ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าและเร็วกว่าการเชื่อมโยงด้วยลมร้อน แต่ผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำบางชนิดนั้นเหมาะต่อการใช้การเชื่อมโยงด้วยลมร้อน หลังจากทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงแล้วจะถูกลอกออกจากแม่พิมพ์และล้างในน้ำเพื่อกำจัดสารเคมีที่ละลายในน้ำออก เนื่องจากอาจจะส่งกลิ่นเหม็นหลังจากนำไปใช้งาน วิธีการล้างที่ดีที่สุดคือการล้างด้วยการผ่านผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำระหว่างลูกกลิ้งที่อยู่ใต้ผิวน้ำ และน้ำที่ถูกดูดซับมากับผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำมากเกินไปจะถูกกำจัดด้วยการผ่านระหว่างลูกกลิ้งรีดอีกครั้ง การทำให้ผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำแห้งนั้นควรนำไปอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60-80 °C ซึ่งควรมีการไหลเวียนของลมที่ดีด้วยเพื่อให้ประสิทธิภาพในการทำให้แห้งดีขึ้น การทำให้แห้งอย่างสมบูรณ์เป็นสิ่งสำคัญมากที่ต้องใช้เวลาประมาณ 4-8 ชั่วโมง จากนั้นทำการทำตัด-ตกแต่งผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำจะถูกตัดขอบเพื่อเอาส่วนที่เกินออกมาทิ้งไปก่อนที่จะนำไปบรรจุภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำเก็บได้นานขึ้น หากทำการปกคลุมยางฟองน้ำด้วยผืนผ้าหรือแผ่นหนังเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพจากแสงแดด

2.15.1.2 Talalay process [22]

การขึ้นรูปยางฟองน้ำด้วยวิธี Talalay process

ขั้นตอนแรกใช้เครื่องทำให้เกิดฟองน้ำยางที่เกิดฟองถูกฉีดหรือเทเข้าไปในแม่พิมพ์บางส่วน ทำให้เกิดฟองอย่างสมบูรณ์ด้วยการใช้สุญญากาศช่วย พร้อมกับทำให้เย็น (-30°C) และทำให้เกิดการจับตัวของอนุภาคยางด้วยการผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ยางฟองน้ำเชื่อมโยงด้วยอุณหภูมิ 105°C หลังจากยางทำให้เชื่อมโยงแล้วจะถูกลอกแบบออกจากแม่พิมพ์และล้างในน้ำเพื่อกำจัดสารเคมีที่ละลายในน้ำออก เนื่องจากอาจจะส่งกลิ่นเหม็นขณะนำไปใช้งาน จากนั้นทำให้แห้งอีกครั้ง ยางฟองน้ำเหมาะต่อการนำมาผลิตเป็นฟูกที่นอนและหมอนอิง เนื่องจากยางพาราสามารถป้องกันไรฝุ่นและการเกิดเชื้อแบคทีเรียได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.2 การเชื่อมโยงยาง [22]

2.15.2.1 การเชื่อมโยงยางด้วยความร้อน

วิธีเป็นการนำยางไปทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยการจุ่มในน้ำร้อน ถังน้ำร้อนที่ใช้ในการทำให้ยางเชื่อมโยงทำจากวัสดุอลูมิเนียม น้ำร้อนที่ใช้ในถังควรทำการเปลี่ยนบ้างเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาต่างๆ อันเนื่องจากวัสดุต่างๆ ที่อยู่ในยางอาจถูกชะออกมาผสมในน้ำ

2.15.2.2 การเชื่อมโยงยางด้วยลมร้อน

เครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางด้วยวิธีเป็นเตาอบ โดยทำให้ฟิล์มยางแห้งด้วยการเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 55-65°C และการเชื่อมโยงยางจะใช้ที่อุณหภูมิ 100°C การทำให้ยางเชื่อมโยงจะทำหลังจากการผ่านการทำให้ยางแห้งเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฟองอากาศหรือรอยพองบนผิวของผลิตภัณฑ์

ข้อดีของการเชื่อมโยงยางด้วยลมร้อนคือ เป็นวิธีที่ง่าย เครื่องมือราคาถูก กระบวนการผลิตสะอาดละไม่เป็นอันตรายของการขึ้นสนิมและกัดกร่อน

2.15.2.3 การเชื่อมโยงยางด้วยการนึ่ง

ยางฟองน้ำมักทำการเชื่อมโยงด้วยไอน้ำระบบเปิดในเครื่องนึ่ง ยางจะถูกแขวนในเครื่องนึ่งเพื่อได้รับไอน้ำและทำให้ยางในนั้นเกิดการเชื่อมโยง

2.15.2.4 การเชื่อมโยงยางด้วยการฉายรังสีอินฟราเรด

วิธีการให้ความร้อนด้วยวิธีรังสีอินฟราเรด ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางได้รับความร้อนสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและทำให้กระบวนการวัลคาไนเซชันมีประสิทธิภาพมากด้วย ชิ้นงานยางได้รับความร้อนสม่ำเสมอด้วยการหมุนชิ้นงานยางระหว่างการเชื่อมโยงหรือการติดตั้งตัวฉายรังสีไว้ที่มุมต่างๆ ดังนั้นทำให้แต่ละส่วนของยางได้รับปริมาณรังสีเท่าๆกัน

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วราภรณ์ ขจรไชยกุล และคณะ[29] ศึกษาการผลิตยางรีเคลมจากผลิตภัณฑ์ถุงมือยางที่ไม่งานแล้ว โดยทดลองใช้เครื่องบดแบบต่างๆ และทดลองใช้สารเคมีร่วมด้วย พบว่าเครื่องบดแบบต่างๆ ได้แก่ 1) เครื่องบด Recycle ยาง 2) เครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) 3) เครื่องบดผสม Kneader และ 4) เครื่องบด Creper โดยที่เครื่อง Creper เหมาะกับการบดถุงมือที่สกปรกมากๆและสามารถบดได้ครั้งละปริมาณมาก สำหรับเครื่อง Two-roll mill บดถุงมือได้เร็วและให้รีเคลมละเอียดเป็นแผ่นเรียบได้ง่ายกว่าเครื่องบด Recycle และเครื่อง Kneader โดยที่เครื่อง Kneader จะให้ยางรีเคลมเป็นเม็ดร่วน การใช้สารเคมี De-Link ผสมและบดถุงมือบน Two-roll mill จะทำให้ถุงมือยางกลับสภาพนิ่ม มีค่า Mooney viscosity ต่ำทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณ De-Link ซึ่งยางที่ได้จะมีสภาพเหมือนยางไม่เชื่อมโยง รีเคลมถุงมือจากการบดโดยเครื่องบดแบบต่างๆ และโดยใช้สารเคมี De-Link สามารถนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ ได้ โดยที่จะต้องผสมยางรีเคลมกับยางใหม่ และใช้สารเคมีอื่นๆตามปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Balogh G. และ Samary G. (1996) [30] ศึกษาการนำยางล้อรถที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้เป็นส่วนผสมในการทำยางด้านข้าง (Sidewall) และหน้ายาง (Tread) ของล้อรถบรรทุก ชนิดของยางที่ศึกษา คือ IR:SBR และ BR:SBR ส่วนยางล้อรถที่ใช้แล้วที่นำมาศึกษามี 3 ชนิด คือ ผงยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ยางรีเคลมที่เตรียมโดยวิธีการคัดแยก (Classical method) และผงยางที่ผ่านกระบวนการตัดการเชื่อมโยง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณที่ใช้พบว่าผงยางทุกชนิดทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าการไม่ใส่ผงยาง โดยที่การใช้ยางรีเคลมปริมาณน้อย จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการไม่ใส่ ส่วนการใช้ผงยางที่ผ่านกระบวนการตัดการเชื่อมโยงในปริมาณมากจะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีกว่าการใช้ปริมาณน้อย

Sombatsompop N. และ Kumnuantip C. (2000) [31] ศึกษาผลของการเติมยางรีเคลมจากบริเวณหน้ายางต่อสมบัติของยางธรรมชาติ 2 ชนิด โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณของยางรีเคลมและเวลาบดย่อย ทำการศึกษาสมบัติต่างๆพบว่า ความหนืดมูนนี่ และความหนืดเฉือนเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของยางรีเคลม แต่ลดลงขึ้นอยู่กับเวลาบดย่อย โดยยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่าจะมีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารประกอบเพื่อให้เหมาะกับการบดย่อย และปริมาณของยางรีเคลม จากการศึกษา Die swell พบว่าขึ้นอยู่กับปริมาณของยางรีเคลมมากกว่าน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ อัตราการเชื่อมโยง และเวลาเริ่มเชื่อมโยง พบว่าขึ้นกับปริมาณของยางรีเคลม สำหรับยางที่เชื่อมโยง (Vulcanized rubbers) พบว่ามอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น ความแข็งกด และความร้อนสะสม ขึ้นอยู่กับปริมาณของยางรีเคลม แต่ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงต่อการฉีกขาด ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของยางรีเคลม สมบัติการไหลและลักษณะเฉพาะของการเชื่อมโยง (Unvulcanized rubbers) ไม่ได้ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ ในทางตรงกันข้ามยางที่ผ่านการเชื่อมโยงพบว่าสมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density)

บริษัท FURU (2001) [32] ได้คิดค้นเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับการใช้ล้อยางรถยนต์เก่ามาใช้ให้เป็นประโยชน์ โดยนำผงยางรถยนต์ (GRT) มาผสมกับพอลิพรอพิลีน (PP) เรียกวัสดุใหม่นี้ว่า Elastomeric alloy (EA) มีสมบัติเหมือนยางแต่สามารถถูกแปรรูปได้เหมือนเทอร์โมพลาสติก สามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายเพราะสามารถเติมสารเติมแต่งได้หลายชนิด เป็นที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมรถยนต์ ทำกันชน เป็นต้น ซึ่งสามารถให้ผงยางรถยนต์ได้หลายขนาด นอกจากนี้ยังมีการทำ Revulcon® หรือขยะของยางที่ถูกแปรรูปกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านกรรมวิธีการปรับสภาพทางกลที่ไม่มีสารเคมีใดๆเพิ่มเติมและยางที่บดจะทำการเชื่อมโยงใหม่ได้ (Revulcanized) และหลอมเหลวในแม่พิมพ์ได้ไม่ว่าขยะยางนั้นจะอยู่ในช่วงขนาดอนุภาคเท่าใดและสามารถผสมกับพลาสติกต่างๆขยะพลาสติกและผสมกับยางพอลิเมอร์ผสมที่เกิดจากยางใหม่ในสัดส่วนที่มากกว่าเม็ดยางที่ไม่ได้ปรับสภาพโดยยังคงคุณภาพไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วศิน จิรไพศาลกุล และคณะ (2004) [33] ศึกษาการผลิตท่อน้ำซึมที่เตรียมจากยางรีเคลม (Reclaimed rubber) และผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) โดยใช้สารไดไนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (Dinitrosopentamethylene tetramine, DNPT) เป็นสารให้ฟองและสารประกอบยูเรียเป็นสารกระตุ้นสารให้ฟอง ทำการผสมและขึ้นรูปให้เป็นท่อ แล้วทำให้เกิดการเชื่อมโยง โดยศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม ได้แก่ ปริมาณเขม่าดำ ปริมาณสารให้ฟอง รวมถึงการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำ ความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งกด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีจุดสูงสุดที่ปริมาณเขม่าดำรวม 70 phr จากนั้นสมบัติเหล่านี้จะลดลง ความแข็งแรงฉีกขาด และร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง ส่วนความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกัน และอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่าท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย ยางรีเคลม : ผงยางรถยนต์ : เขม่าดำ เท่ากับ 50 : 50 : 20 เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 2 และ 3 ที่เวลาเชื่อมโยง 60 40 และ 20 นาที ตามลำดับ มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำใกล้เคียงกัน มีต้นทุนการผลิตต่ำคือ 18.18 13.40 และ 9.51 บาทต่อหนึ่งเมตร

Debapriya D. และคณะ (2006) [34] ศึกษากระบวนการรีเคลมเชิงกลของยางรถยนต์ โดยใช้เตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (Tetra methyl thiuram disulfide, TMTD) เป็นสารที่ใช้เป็นตัวทำปฏิกิริยารีเคลม (Reclaiming agent) ผ่านการดีวัลคาไนเซชัน โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งในระยะเวลาที่แตกต่างกัน มีผลต่อการเกิดเจลและความหนาแน่นการเชื่อมโยง รวมทั้งปริมาณ TMTD ที่แตกต่างกัน มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม พบว่า TMTD 2.75 phr เป็นเวลา 40 นาทีเป็นสภาวะที่ดีที่สุด ทำให้ยางรีเคลมมีสมบัติเชิงกลต่างๆ และความเป็นเนื้อเดียวกันดีที่สุด

วิภา จันทรักษ์และคณะ (2549) [35] ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากเศษถุงมือยางธรรมชาติดัดแปลงสภาพผิวด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์เบลนด์กับพอลิพรอพิลีนรีเคลม เศษถุงมือยางธรรมชาติโดยใช้วิธีทางกลร่วมกับทางเคมี ทำโดยการบดเศษถุงมือที่อุณหภูมิ 70^0C โดยใช้ไดแอริลไดซัลไฟด์ (DADS) และเตตราเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD) เป็นสารรีเคลม และทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของสารรีเคลมและระยะเวลาการบด พบว่าค่าความหนืดมูนนี่ ความหนาแน่นของพันธะการเชื่อมและปริมาณเจลของยางรีเคลมลดลง เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบด อีกทั้งพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบดปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่โมเลกุลที่สามารถละลายได้ของยางรีเคลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณที่เหมาะสมของ DADS และ TMTD ที่ใช้เป็นสารรีเคลม พบว่าคือ ที่ระดับ 2 phr และ 1 phr ตามลำดับ ถึงแม้ DADS จะเป็นสารรีเคลมที่มีประสิทธิภาพ แต่เนื่องด้วยการมีกลิ่นที่รุนแรง และมีราคาค่อนข้างแพง TMTD จึงถูกเลือกใช้เป็นสารรีเคลม จากนั้นทำการดัดแปลงสภาพผิวยางรีเคลมที่เตรียมได้ ด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ (RR-g-MA) และนำมาเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ โดยการเบลนด์กับพอลิพรอพิลีนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน 60/40 โดยใช้พอลิพรอพิลีนดัดแปลงสภาพผิวด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MA) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่าสามารถช่วยปรับปรุงความเข้ากันในการเบลนด์ระหว่าง RR-g-MA/PP ส่งผลให้ค่ามอดุลัสสะสมและค่าความหนืดเชิงซ้อนของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ มีค่าสูงกว่าการเบลนด์แบบปกติ

อรสา ภัทรไพบูลย์ และคณะ (2002) [36] ศึกษาการนำถุงมือยางกลับมาใช้ในฐานะเป็นสารตัวเติม ถุงมือที่ถูกคัดทิ้งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 100 ส่วน โดยที่ยังมีสมบัติต่างๆที่ดีในส่วนของเวลาในการทำให้ยางสุก (Cure time) ความต้านทานต่อแรงดึง 300% มอดุลัส (Modulus) การดึงณ จุดขาด (Elongation at break) ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) การขยายตัวของรอยแตก (Crack growth) และความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion index) ยกเว้นเวลาในการอบสุกของยางก่อนกำหนด (Scorch time) และกระบวนการดันยางผ่านหัวดาย (Extrusion) คือจะใช้เวลาสั้นกว่า และให้ผิวที่หยาบกว่าตามลำดับ เมื่อใส่ปริมาณตัวเติมเพิ่มขึ้น การเติม 40 ส่วนเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการรักษาสมบัติที่ดีในด้านเวลาในการอบสุกของยางก่อนกำหนดและกระบวนการดันยางผ่านหัวดายชนิด Gravey ถุงมือชนิดมีแป้งมีค่าเวลาในการทำให้ยางสุก และเวลาในการอบของยางก่อนกำหนด แตกต่างกับถุงมือชนิดคลอริเนตแต่สมบัติทางกายภาพของถุงมือทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

พนิตา สุมานะตระกูล และคณะ [37] ศึกษาอิทธิพลของยางรีเคลมต่อผลของสมบัติการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของของผสมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ การศึกษาการแปรผันปริมาณยางรีเคลมในช่วง 0-50 phr เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในของผสมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิพรอพิลีนที่อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก พบว่าเวลาที่ยางสุกและสมบัติด้านความแข็งลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของยางรีเคลมแต่สมบัติ แต่สมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด สมบัติความกระเด้งตัว และเวลาที่ยางสุกก่อนกำหนดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของยางรีเคลม ซึ่งที่ปริมาณยางรีเคลมเท่ากับ 40 phr จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุดเท่ากับ 15.97 MPa

ซีตีไซยีดะห์ สายวารี และคณะ (2009) [38] ศึกษารีเคลมเศษถุงมือยางธรรมชาติด้วยวิธีทางกลร่วมกับเคมี (Mechano-chemical process) โดยการบดถุงมือยางร่วมกับสารรีเคลมบนเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารรีเคลม 4 ชนิด คือ 2-เมอร์แคปโทเบนโซไทอาโซล (MBT) เตตระเมททิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD) ไดฟีนิลไดซัลไฟด์ (DPDS) และไดเบนโซไทอาซิลไดซัลไฟด์ (MBTS) พบว่า ยางรีเคลมที่เตรียมได้จากการบดเศษถุงมือยางธรรมชาติร่วมกับสารรีเคลมมีค่าความหนืดมูนนี่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่ใช้สารรีเคลม การเพิ่มปริมาณสารรีเคลมจะทำให้ส่วนของสายโซ่โมเลกุลยางที่สามารถละลายได้ในโทลูอีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่ามีส่วนที่เกิดพันธะเชื่อมโยงในยางลดน้อยลง ศึกษาระยะเวลาและอุณหภูมิการบดผสม พบว่าการเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิการบดผสมทำให้ค่าความหนืดมูนนี่ของยางรีเคลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในขณะที่การเพิ่มระยะเวลาในการบดผสมทำให้ค่าความหนืดมูนนี่และปริมาณเจลของยางรีเคลมมีแนวโน้มลดลง ยางรีเคลมที่ใช้สารรีเคลมแต่ละชนิดให้ค่าความหนืดมูนนี่ที่ต่ำที่สุดที่เวลาบดผสมแตกต่างกัน คือ MBT และ TMTD ใช้เวลาบด 30 นาที ในขณะที่ MBTS และ DPDS ใช้เวลาบด 40 นาที

พิพัฒนไทยเจริญ และ คณะ [39] ศึกษากระบวนการดีวัลคาไนเซชันในยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยวิธีเชิงกลร่วมเคมีในยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ยางวัลคาไนซ์ถูกนำมาบดและผสมกับกรดไทโอซาลิไซลิก หรือไดฟีนิลไดซัลไฟด์ซึ่งเป็นตัวดีวัลคาไนซิ่งเอเจนต์ได้ "ยางรีเคลม" นำยางธรรมชาติ (Virgin rubber) มาผสมกับยางรีเคลมที่ได้ในอัตราส่วน 80/20 60/40 40/60 และ20/80 ตามลำดับ หลังจากนั้นเติมสารเชื่อมโยงแล้วนำไปขึ้นรูปอีกครั้งได้ "ยางดีวัลคาไนซ์" จากผลการทดลองพบว่าเวลาการเชื่อมโยงก่อนกำหนด (Scorch time) และเวลาเหมาะสมในการเชื่อมโยง (Optimum cure time) จะลดลงเมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้หากใช้อัตราส่วนเป็น 80/20 ร่วมกับการเติมไดฟีนิลไดซัลไฟด์จะให้ค่าความทนต่อแรงดึง และร้อยละของการยืด ณ จุดขาด คือ 17.23 และ 541% ในขณะที่การใช้อัตราส่วนเป็น 80/20 ร่วมกับการเติมกรดไทโอซาลิไซลิกเป็นสารดีวัลคาไนซิ่งเอเจนต์จะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึง และร้อยละของการยืด ณ จุดขาด คือ 16.45 MPa และ 503% ซึ่งสมบัติเชิงกลที่ได้จะกลับคืนมากกว่า 75% เมื่อเปรียบเทียบกับยางวัลคาไนซ์

อทิตยา โต๊ะสัน (2006) [40] ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต (TPVs) จากวัสดุดัดแปลงจากยางรถยนต์และพลาสติกนำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้วัสดุหลัก 3 ชนิด คือ ยางขยะ (Crumb rubber,CRM) ยางธรรมชาติ (NR) และขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE-r) ทำการเตรียม CRM/NR/HDPE-r ที่สัดส่วนตั้งแต่ 50/10/40 ถึง 20/10/70 โดยใช้ปริมาณของยางธรรมชาติคงที่ ทำการเบลนด์ พบว่าเมื่อปริมาณของพลาสติกเพิ่มมากขึ้นสมบัติเชิงกลของ TPVs ก็จะดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติเชิงกลของ TPVs มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นหลังการรีไซเคิล การเพิ่มปริมาณ Vulcanizing agent ในส่วนของ CRM-NR masterbatch ส่งผลให้สมบัติของ TPVs หลังการรีไซเคิลมีความสม่ำเสมอมากขึ้น โดยที่สัดส่วน 40/10/50 ใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป (injection moulding) และ Banbury เตรียม TPVs พบว่า TPVs ที่ได้จากเครื่อง Injection มีสมบัติใกล้เคียงกับที่ได้จากเครื่อง Brabender ส่วนการเตรียมด้วยเครื่อง Banbury ให้สมบัติที่ต่ำกว่าการเตรียมด้วยเครื่อง Brabender ทั้งนี้ เนื่องจากลักษณะการ Cure ของ Masterbatch เป็นแบบ Reversion จึงไม่เหมาะกับการผสมที่ต้องใช้เวลานานยังเครื่องใช้เวลานานอย่างเครื่อง Banbury

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ จะทำการทดลองแบ่งเป็น 4 ตอน คือ

ตอนที่ 1 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากอัตราส่วนสารรีเคลมที่แตกต่างกัน

ตอนที่ 2 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire : (GRT) ที่แตกต่างกันคือขนาด 20 mesh และ 30 mesh

ตอนที่ 3 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

ตอนที่ 4 ศึกษาชนิดของ Supporter ที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลม ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต, ซิลิกา และซิลิกากับเรซิน High styrene 6%

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1 ยางรีเคลมจากยางรถยนต์ (RR-TR) จากบริษัท ออลเทรด รีซอสเซส (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งส่วนประกอบของยางรีเคลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

3.1.2 ยางรีเคลมชนิดถุงมือ (RR-GL) จากบริษัท ออลเทรด รีซอสเซส (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งส่วนประกอบของยางรีเคลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

3.1.3 ยางรีเคลมชนิดถุงมือ (RR-GL2) จากบริษัท ออลเทรด รีซอสเซส (ประเทศไทย) จำกัดซึ่งส่วนประกอบของยางรีเคลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

3.1.4 ยางรีเคลมจากยางฟองน้ำ (RR-SP) จากบริษัท ออลเทรด รีซอสเซส (ประเทศไทย) จำกัดซึ่งส่วนประกอบของยางรีเคลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

3.1.5 ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ ขนาด 30 เมช ที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็น Supporter จากบริษัท ออลเทรด รีซอสเซส (ประเทศไทย) จำกัดซึ่งส่วนประกอบของยางรีเคลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงได้ดังตารางที่ 3.3

3.1.6 ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ ขนาด 30 เมช ที่ใช้ซิลิกาเป็น Supporter จากบริษัท ออลเทรด รีซอสเซส (ประเทศไทย) จำกัดซึ่งส่วนประกอบของยางรีเคลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงได้ดังตารางที่ 3.3

3.1.7 ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ ขนาด 30 เมช ที่ใช้ซิลิกากับเรซิน High styrene 6% เป็น Supporter จากบริษัท ออลเทรด รีซอสเซส (ประเทศไทย) จำกัดซึ่งส่วนประกอบของยางรีเคลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงได้ดังตารางที่ 3.3

3.1.8 อนุภาคผงยาง (Ground Rubber Tire : GRT) ขนาด 20 เมช (RR-TR 20) และ 30 เมช (RR-TR 30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.9 สารรีเคลม (Reclaiming agent) จากบริษัท ออลเทรด รีซอสเซส (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.10 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง คือ กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า จากบริษัท ส.สามพราน จำกัด

3.1.11 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง คือ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เกรดการค้า จากบริษัท ส.สามพราน จำกัด

3.1.12 สารเชื่อมโยง คือ กำมะถัน เกรดการค้า จากบริษัท ส.สามพราน จำกัด

3.1.13 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง MBTS เกรดการค้า จากบริษัท ส.สามพราน จำกัด

3.1.14 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง DPG เกรดการค้า จากบริษัท ส.สามพราน จำกัด

3.1.15 ตัวทำละลายโทลูอีน เกรดวิเคราะห์ บริษัท แลปซีส จำกัด

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของยางรีเคลมชนิดต่างๆ

ส่วนประกอบ (ส่วนโดยน้ำหนัก, phr)	RR-TR20	RR-GL	RR-TR30	RR-GL2	RR-SP	มาตรฐานทดสอบ
ปริมาณเนื้อยาง	61	80	61	78.8	84.8	ASTM-D297
ปริมาณเขม่าดำ	29	-	29	-	-	ASTM-D297
สารอนินทรีย์อื่นๆ	10	18.75	10	-	-	ASTM-D297
สารรีเคลม	2	2	2	2	2	-

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของยางรีเคลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ส่วนประกอบ (ส่วนโดยน้ำหนัก, phr)	RR-TR20**	RR-GL	RR-TR30	RR-GL2	RR-SP
ยางรีเคลม	100	100	100	100	100
สารรีเคลม *	0.0, 0.2, 0.4	0.0, 0.2, 0.4	-	-	-
ZnO	3	3	3	3	3
Stearic acid	2	2	2	2	2
MBTS	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
DPG	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Sulfur	2	2	2	2	2

หมายเหตุ * ปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยตอนที่ 1 โดยการเพิ่มปริมาณของสารรีเคลม

** ยางรีเคลมที่ใช้ในศึกษาในตอนที่ 2 โดยไม่มีการเติมสารรีเคลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้

3.2.1 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น LMR 200 บริษัท LAB TECH ENGINEERING COMPANY. LTD

3.2.2 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่น SMV-201 บริษัท SHIMADZU CORPORATION.

3.2.3 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer, MDR) รุ่น II F 150 บริษัท NICHIGO CO., LTD

3.2.4 เครื่องอัดแบบ (Compression molding machine) ชนิดเครื่อง 20 x 20 x 7 NO. 27 1 92 บริษัทโรงงานชัยเจริญการช่าง จำกัด

3.2.5 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) รุ่น 38-WI305-235-01 บริษัท อินโทรเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด

3.2.6 เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester (shore A) รุ่น Ats faar บริษัท SOCIETA PER AZIONI MILANO จำกัด

3.2.7 เครื่องตัดตัวอย่างโดยใช้ปั๊มลม ให้เป็นรูปดัมเบลล์ รูปปีกนก และรูปวงกลม รุ่น Torino บริษัท Ceast จำกัด

3.3 ขั้นตอนการผสมยางรีเคลม

3.3.1 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากอัตราส่วนสารรีเคลมที่แตกต่างกัน

3.3.1.1 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากยางรถยนต์ (RR-TR20)

1. เตรียมวัตถุดิบในอัตราส่วนที่กำหนดของแต่ละสูตร ดังตารางที่ 3.2

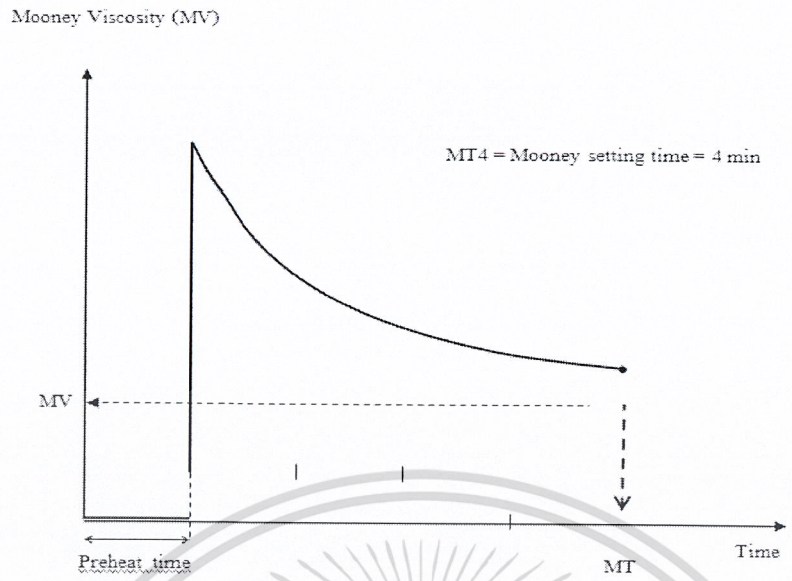
2. นำยางรีเคลม (RR-TR20) จำนวน 400 กรัม มาทำการบดย่อย (Mastication) ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งจนได้ยางที่นิ่ม ใช้เวลาประมาณ 5 นาที

3. ใส่สารรีเคลมลงไป โดยทำการกรีดและพับยาง (Cut and fold) ไปด้วย ใช้เวลาประมาณ 3 นาที

4. ทำการผสมยางรีเคลมกับ Stearic acid และ Zinc oxide โดยการกรีดและพับยางตลอดการเติมสารเคมีเพื่อให้ผสมเข้ากันดีขึ้น ใช้เวลาประมาณ 5 นาที

5. รีดยางให้เป็นแผ่น โดยให้มีความหนาที่เหมาะสม จากนั้นตัดยางเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2x2 นิ้ว จำนวน 2 แผ่น นำไปทดสอบความหนืด ด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ ที่สภาวะ ML (1+4) 100°C เพื่อทดสอบคุณภาพ ดังรูปที่ 3.1[16]

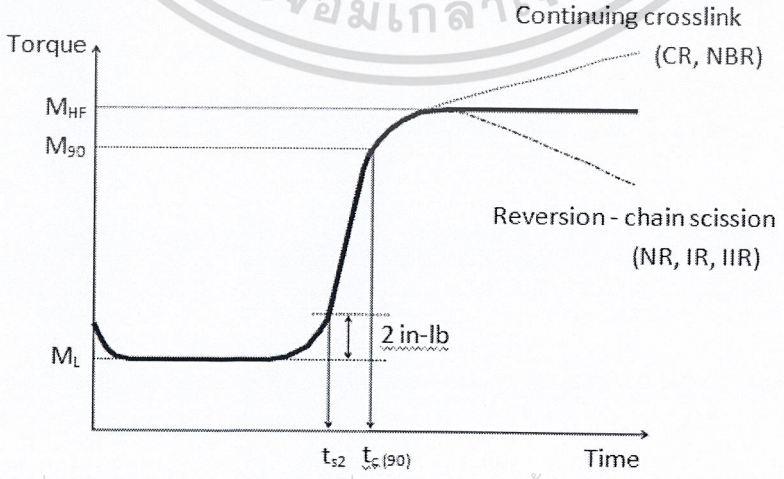
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างกราฟความหนืดมูนนี่ [16]

6. นำยางที่เหลือเข้าเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งอีกครั้ง แล้วเติมกำมะถันและสารเร่ง พร้อมกับกรีดและพับยางตลอดการเติม เพื่อให้สารกระจายเป็นเนื้อเดียวกัน ผสมเข้ากันดีขึ้น โดยใช้เวลาประมาณ 5 นาที

7. รีดยางให้เป็นแผ่น โดยให้มีความหนาที่เหมาะสม จากนั้นตัดยางเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2x2 นิ้ว จำนวน 1 แผ่น แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยง MDR (Moving die rheometer) เพื่อหาค่าเวลาการเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) ซึ่งเป็นเวลาที่ยางเกิดการเชื่อมโยงยางที่ดีที่สุดและหาค่าเวลาก่อนเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time, t_{s2}) ซึ่งเป็นเวลาที่กำมะถันเริ่มทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 150 °C ตามลำดับ ได้กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) ดังรูปที่ 3.2 [16]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเส้นกราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางผสมสูตรแสดงเวลาการเชื่อมโยง (Cure time, t_{c90}) และเวลาก่อนเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) [11]

โดยที่ - M_L คือ ค่าแรงบิด (Torque) ต่ำสุด

- M_{HF} คือ ค่าแรงบิด (Torque) สูงสุด

- t_{s2} คือ เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) เป็นเวลาที่ค่าแรงบิด (Torque) เพิ่มสูงขึ้น 2 ปอนด์นิ้ว (in-lb) หรือ 2 นิวตันเมตร (N.m)

- t_{c90} คือ เวลาเชื่อมโยง (Cure time) เป็นเวลาที่ยางเกิดการเชื่อมโยงที่ดีที่สุด (Optimum cure time) กำหนดเป็นเวลาที่ยางเชื่อมโยง 90 % หรือแรงบิดเพิ่ม 90 % จากค่าแรงบิดต่ำสุด

8. ตัดยางผสมสูตรที่ได้ประมาณ 6x6 นิ้ว ใส่แม่พิมพ์ แล้วนำเข้าเครื่องอัดแบบ (Compression molding) เพื่อทำการอัดเป็นแผ่นและเชื่อมโยงยาง โดยทำการอัดแบบที่อุณหภูมิ 150°C และกำหนดเวลาเท่ากับเวลาเชื่อมโยง (Cure time, t_{c90}) ที่ได้จากเส้นกราฟเชื่อมโยงดังรูป 3.2 โดยใช้เวลาเพิ่มเป็น t_{c90} x 1.2 สำหรับเวลานานขึ้นในการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่พิมพ์ และภายในชิ้นงานยาง

3.3.1.2 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL)

เตรียมวัตถุดิบยางรีเคลมจากถุงมือยางดังตาราง 3.2 และทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.1.1

3.3.2 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากขนาดอนุภาคของผงยาง (Ground rubbe tire: GRT) ที่แตกต่างกันคือขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30)

3.3.2.1 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20)

1. เตรียมวัตถุดิบในอัตราส่วนที่กำหนดของแต่ละสูตร ดังตารางที่ 3.2

2. นำยางรีเคลม (RR-TR 20) จำนวน 400 กรัม มาทำการบดย่อย (Mastication) ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งจนได้ยางที่นิ่มโดยใช้เวลาประมาณ 5 นาที

3. ใส่สารเคมี Stearic acid และ Zinc oxide ทำการผสมยาง โดยการกรีดและพับยางตลอดการเติมสารเคมีเพื่อให้ผสมเข้ากันดีขึ้น

4. รีดยางให้เป็นแผ่น โดยให้มีความหนาที่เหมาะสม จากนั้นตัดยางเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2x2 นิ้ว จำนวน 2 แผ่น นำไปทดสอบความหนืด ด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ ที่สภาวะ ML (1+4) 100°C เพื่อทดสอบคุณภาพ

5. นำยางที่เหลือเข้าเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two- roll mill) อีกครั้ง แล้วเติมกำมะถันและสารเร่ง พร้อมกับกรีดและพับยางตลอดการเติม เพื่อให้สารกระจายเป็นเนื้อเดียวกัน ผสมเข้ากันดีขึ้น

6. รีดยางให้เป็นแผ่น โดยให้มีความหนาที่เหมาะสม จากนั้นตัดยางเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2x2 นิ้ว จำนวน 1 แผ่น แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง ด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยง MDR เพื่อหาค่าเวลาการเชื่อมโยง ซึ่งเป็นเวลาที่ยางเกิดการเชื่อมโยงยางที่ดีที่สุดและหาค่าเวลาก่อนเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช ซึ่งเป็นเวลาที่กำมะถันเริ่มทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 150 °C ตามลำดับ ได้กราฟการเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ตัดยางผสมสูตรที่ได้ประมาณ 6x6 นิ้ว ใส่แม่พิมพ์ แล้วนำเข้าเครื่องอัดแบบ เพื่อทำการอัดเป็นแผ่นและเชื่อมโยงยาง โดยทำการอัดแบบที่อุณหภูมิ 150 °C และกำหนดเวลาเท่ากับเวลาเชื่อมโยง ที่ได้จากเส้นกราฟเชื่อมโยงดังรูป 3.2 โดยใช้เวลาเพิ่มเป็น t_{c90} x 1.2 สำหรับเวลานานขึ้นในการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่พิมพ์ และภายในชิ้นงานยาง

3.3.2.2 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30)

เตรียมวัตถุดิบยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 เมช ดังตารางที่ 3.2 และทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.2.1

3.3.3 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

3.3.3.1 ศึกษาการใช้งานของยางรีเคลมที่เตรียมจากยางรถยนต์ (RR-TR20)

เตรียมวัตถุดิบยางรีเคลมจากยางรถยนต์ ดังตารางที่ 3.2 และทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.2.1

3.3.3.2 ศึกษาการใช้งานของยางรีเคลมที่เตรียมจากถุงมือยาง (RR-GL)

เตรียมวัตถุดิบยางรีเคลมจากถุงมือยาง ดังตารางที่ 3.2 และทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.2.1

3.3.3.3 ศึกษาการใช้งานของยางรีเคลมที่เตรียมจากถุงมือยางเกรด 2 (RR-GL2)

เตรียมวัตถุดิบยางรีเคลมจากถุงมือยางเกรด 2 ดังตารางที่ 3.2 และทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.2.1

3.3.3.4 ศึกษาการใช้งานของยางรีเคลมที่เตรียมจากยางฟองน้ำ (RR-SP)

เตรียมวัตถุดิบยางรีเคลมจากยางฟองน้ำ ดังตารางที่ 3.2 และทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.2.1

3.3.4 ศึกษาชนิดของ Supporter ที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลม

3.3.4.1 ศึกษาชนิดของ Supporter คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (RR-TR30-Ca)

เตรียมวัตถุดิบยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ ขนาด 30 เมช ที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็น Supporter ดังตารางที่ 3.3 และทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ส่วนประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ส่วนผสม (ส่วนโดยน้ำหนัก ,phr)	RR-TR30-Ca*	RR-TR30-Si**	RR-TR30-SiHS***
Rubber	100	100	100
Calcium Carbonate	12.5	-	-
Silica	-	7.5	8
Silica+High Styrene 6%	-	-	1.33
Reclaiming agent	2	2	2
ZnO	3.0	3.0	3.0
Stearic acid	2.0	2.0	2.0
MBTS	0.8	0.8	0.8
DPG	0.2	0.2	0.2
Sulfur	2.0	2.0	2.0

หมายเหตุ * RR-TR30-Ca คือ ยางรีเคลมที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็น Supporter

** RR-TR30-Si คือ ยางรีเคลมที่ใช้ซิลิกาเป็น Supporter

*** RR-TR30-SiHS คือ ยางรีเคลมที่ใช้ซิลิกาและHigh Styrene 6 % Supporter

ปริมาณ Supporter ที่ใช้ไม่เท่ากันเนื่องจากต้องการให้มีความหนืดใกล้เคียงกัน โดยดูจากพื้นที่ผิว กล่าวคือ ซิลิกาเป็นอนุภาคขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวสูงจึงใช้ปริมาณ Supporter น้อย สำหรับแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ มีพื้นที่ผิวน้อยจึงใช้ปริมาณ Supporter มาก เพื่อให้ความหนืดที่ได้ใกล้เคียงกัน

3.3.4.2 ศึกษาชนิดของ Supporter คือ ซิลิกา (RR-TR30-Si)

เตรียมวัตถุดิบยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ ขนาด 30 เมช ที่ใช้ซิลิกาเป็น Supporter ดังตารางที่ 3.3 และทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.2.1

3.3.4.3 ศึกษาชนิดของ Supporter คือ ซิลิกากับ High Styrene 6% (RR-TR30-SiHS)

เตรียมวัตถุดิบยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ ขนาด 30 เมช ที่ใช้ซิลิกากับ High Styrene 6% เป็น Supporter ดังตารางที่ 3.3 และทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.2.1

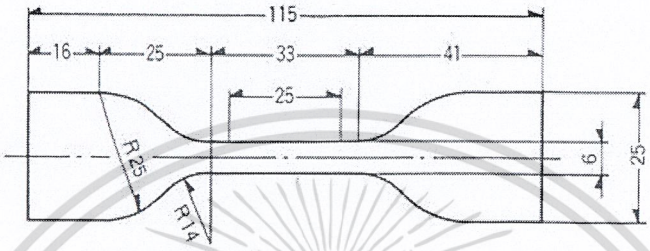
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.4.1 การทดสอบแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 412 [24]

1. ใช้แม่พิมพ์มีดและเครื่องอัดแรงดันลมตัดชิ้นงานตัวอย่างแผ่นยางที่เชื่อมโยงเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) ที่มีความยาวเกจ (Gauge Length) 25 มิลลิเมตร จำนวน 6 ชิ้น ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชิ้นตัวอย่างทดสอบรูปดัมเบลล์ [25]

2. ทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) โดยใช้ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้ (Load cell) ขนาด 5 kN และใช้อัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 mm/min เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง, ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่ามอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ (M100)

3. นำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยของการทดสอบตัวอย่างจำนวน 6 ชิ้น

3.4.2 การทดสอบแรงฉีกขาด

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 624 [26]

1. ใช้แม่พิมพ์มีดและเครื่องอัดแรงดันลมตัดชิ้นงานตัวอย่างแผ่นยางที่เชื่อมโยง เป็นรูปปีกนก ASTM Die C จำนวน 6 ชิ้น ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชิ้นตัวอย่างทดสอบรูปปีกนก [27]

2. ทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) โดยใช้ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้ (Load cell) ขนาด 5 kN และใช้อัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 mm/min เพื่อหาค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)

3. นำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยของการทดสอบตัวอย่างจำนวน 6 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การทดสอบความแข็งแรงกดแบบดูโรมิเตอร์

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2240 [28]

1. นำแผ่นยางที่เหลือจากการตัดไปทดสอบความแข็งกด (Hardness) ด้วยเครื่องดูโร-มิเตอร์ ชนิดชอร์เอ (Shore A durometer) อ่านค่าหลังจากการกดภายในเวลา 1 วินาที ตัวอย่างต้องหนาอย่างน้อย ¼ นิ้ว (6 มิลลิเมตร)

2. ทำการทดสอบอย่างน้อย 10 ตำแหน่งที่ไม่ซ้ำกันต่อ 1 ตัวอย่าง

3.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

แช่ตัวอย่างยางที่วัลคาไนซ์แล้วในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการหักอย่างรวดเร็ว ทำการเคลือบผิวที่ศึกษาด้วยทองแล้วนำไปส่องดูพื้นผิวบริเวณที่เกิดการแตกหัก (Fractured surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของอนุภาคยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การนำเสนอผลการทดลองของงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 4 ตอน คือ

ตอนที่ 1 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากอัตราส่วนสารรีเคลมที่แตกต่างกัน

ตอนที่ 2 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากขนาดอนุภาคของผงยาง (Ground rubber tire : (GRT) ที่แตกต่างกันคือขนาด 20 mesh และ 30 mesh

ตอนที่ 3 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

ตอนที่ 4 ศึกษาชนิดของ Supporter ที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลม ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต, ซิลิกา และซิลิกากับเรซิน High styrene 6%

โดยทั้ง 4 ตอน จะทำการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) และสมบัติเชิงกลของยาง ได้แก่ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และมอดุลัสของยาง (Rubber modulus, M100) ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) และความแข็งกด (Hardness-Shore A) และตรวจสอบเนื้อยางรีเคลมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

ในยางรีเคลมแต่ละชนิดจะมีปริมาณและคุณภาพของเนื้อยางที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบของยางรีเคลมชนิดต่างๆ

ส่วนประกอบ (ส่วนโดยน้ำหนัก, phr)	RR-TR20	RR-GL	RR-TR30	RR-GL2	RR-SP	มาตรฐานทดสอบ
ปริมาณเนื้อยาง	61	80	61	78.8	84.8	ASTM-D297
ปริมาณเขม่าดำ	29	-	29	-	-	ASTM-D297
สารอนินทรีย์อื่นๆ	10	18.75	10	-	-	ASTM-D297
สารรีเคลม	2	2	2	2	2	-

จะเห็นว่ายางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ คือ RR-TR20 และ RR-TR30 มีเนื้อยางอยู่ปริมาณน้อย (ประมาณ 61%) เมื่อเปรียบเทียบกับยางอีก 3 ชนิดที่เหลือคือ RR-GL, RR-GL2 และRR-SP เนื่องจาก RR-TR20 และ RR-TR30 มาจากผงยางรถยนต์ ซึ่งมีสารตัวเติม (Fillers) อยู่ในปริมาณมาก (ส่วนใหญ่คือเขม่าดำ) แต่วัตถุดิบของ RR-GL, RR-GL2 และ RR-SP คือ ถุงมือยางและยางฟองน้ำ ซึ่งเตรียมจากน้ำยางข้นและใส่สารตัวเติมในปริมาณน้อยมาก ยางรีเคลมเหล่านี้จึงมีปริมาณเนื้อยางอยู่ในปริมาณสูงมาก (ประมาณ 80%) โดยชนิดของเนื้อยางของยางรีเคลมส่วนใหญ่คือยางธรรมชาติ (NR) แต่ RR-TR20 และ RR-TR30 ซึ่งมาจากผงยางรถยนต์ จะมียางชนิดอื่นผสมอยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

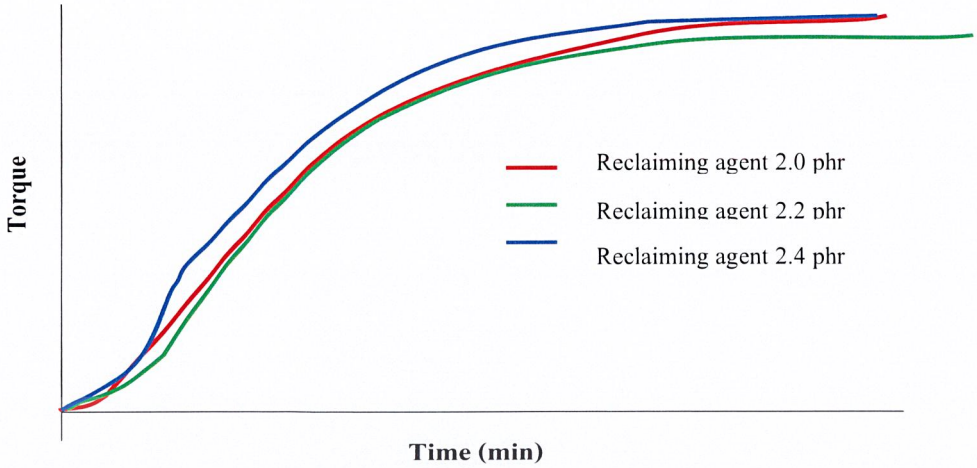
เช่น ยางสไตรีน-บิวตะไดอีน (Styrene-butadiene rubber, SBR), ยางบิวตะไดอีน (Butadiene rubber, BR) เป็นต้น อีกทั้งวัตถุดิบที่ใช้คือยางแห้ง ซึ่งในการผลิตจะต้องผ่านกระบวนการบดย่อย (Mastication) ทำให้สายโซ่ในเนื้อยางถูกตัดขาด ต่างจาก RR-GL, RR-GL2 และ RR-SP ซึ่งเตรียมจากน้ำยางข้นของยางธรรมชาติ (NR) โดยไม่มีการผสมยางชนิดอื่นเลย และในกระบวนการผลิตไม่ต้องผ่านกระบวนการบดย่อย ทำให้สายโซ่ในเนื้อยางไม่ถูกตัดขาด จากปัจจัยดังกล่าวข้างต้นคือ ปริมาณของเนื้อยางในยางรีเคลม ปริมาณของสารตัวเติมในยางรีเคลม และการบดย่อย (Mastication) ล้วนส่งผลต่อสมบัติของยางรีเคลมทั้งสิ้น ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลการทดลองจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ประกอบด้วย

4.1. ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากอัตราส่วนสารรีเคลมที่แตกต่างกัน

4.1.1 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20)

ในการทดลองตอนนี้ เป็นการศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) โดยใช้ปริมาณสารรีเคลม 2.0, 2.2, 2.4 phr ตามลำดับ จากนั้นศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง ผลการทดลองสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 พบว่า กราฟเชื่อมโยงของยางรีเคลมจากยางรถยนต์ (RR-TR20) ทั้ง 3 สูตรมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แสดงให้เห็นว่าลักษณะการเชื่อมโยงของยางทั้ง 3 สูตรไม่แตกต่างกัน อาจเป็นผลเนื่องมาจากสารรีเคลมที่ใส่จะถูกดูดซับ (Absorb) เข้าไปในผิวของก้อนยาง (GRT) เกิดการบวมตัว (Swell) และถูกใช้ไปในการเปลี่ยนโครงสร้างของยางวัลคาไนซ์ให้เป็นสายโซ่ตรงหรือสายโซ่กิ่ง (Reclaimed process) การเติมสารรีเคลมแตกต่างกันเล็กน้อย (2.0 -2.4 phr) อาจไม่ทำให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัย เนื่องจากสารรีเคลมมีความเป็นกลาง (pH เท่ากับ 7) จึงไม่ได้ช่วยเร่งหรือหน่วงปฏิกิริยาเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบกราฟเชื่อมโยงของยางรีเคลม RR-TR20 ที่อัตราส่วนสารรีเคลมแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) และสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจากยางรถยนต์ (RR-TR20)

Properties	Re 2.0 phr	Re 2.2 phr	Re 2.4 phr
Scorch time, t_{s2}(sec)	18	24	24
Cure time, t_{c90} (sec)	446	414	428
M_{HF} (kgf.cm)	64	62	70
Cure Rate Index (s^{-1})	0.23	0.26	0.25
Tensile Strength (MPa)	4.5 ± 0.1	4.9 ± 0.1	4.5 ± 0.2
% Elongation at break (%)	261.5 ± 12	287.7 ± 9	245.7 ± 21
M 100 (MPa)	1.7 ± 0.1	1.6 ± 0.1	1.8 ± 0.1
Tear Strength (kN/m)	15.9 ± 0.6	15.1 ± 1.1	12.6 ± 0.8
Hardness (Shore A)	57.9 ± 0.3	57.1 ± 0.2	61.5 ± 0.2

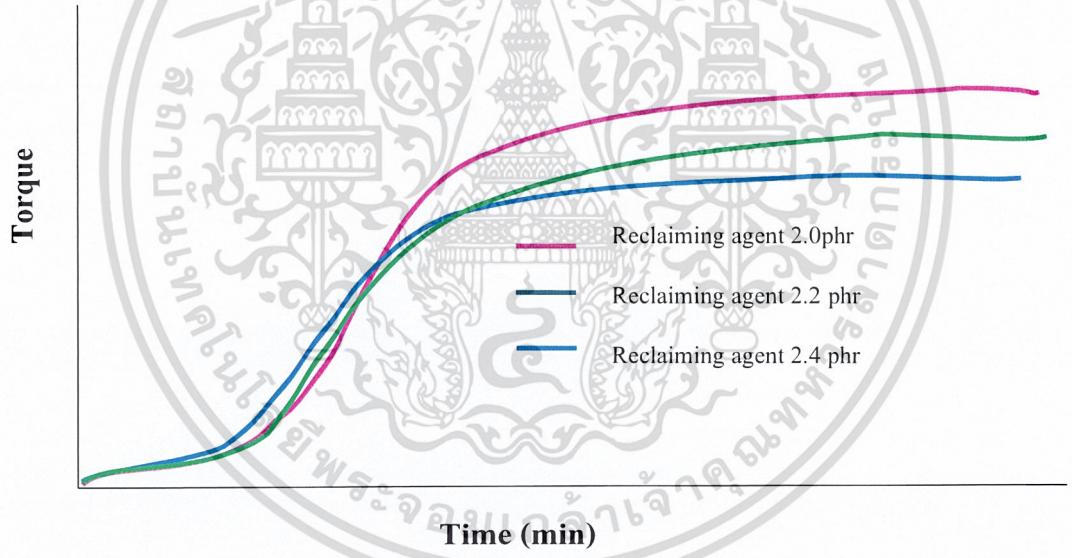
จากตารางที่ 4.2 เป็นการศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ (RR-TR20) โดยทำการใช้ปริมาณสารรีเคลม 2.0, 2.2, 2.4 phr พบว่ายางรีเคลมจากยางรถยนต์ (RR-TR20) ทั้ง 3 สูตรมีสมบัติเชิงกลคล้ายคลึงกัน เนื่องจากยางทุกสูตรใส่สารเชื่อมโยง (กำมะถันและสารเร่ง) ปริมาณเท่ากัน จึงคาดว่าทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงที่มีโครงสร้างหรือองศาการเชื่อมโยงใกล้เคียงกัน ส่งผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ยางเชื่อมโยงที่ได้มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารรีเคลม จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม

4.1.2 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL)

ในการทดลองตอนนี้ เป็นการศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL) โดยทำการใช้ปริมาณสารรีเคลม 2.0, 2.2, 2.4 phr ตามลำดับ จากนั้นศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงผลการทดลองสามารถได้ ดังรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 พบว่า กราฟเชื่อมโยงของยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL) ทั้ง 3 สูตรมีลักษณะการเชื่อมโยงของยางทั้ง 3 มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณสารรีเคลม จะทำให้มีแนวโน้มการเชื่อมโยงที่ช้าลง (t_{s2}และt_{c90} เพิ่มขึ้น) และมีอัตราเร็วการเชื่อมโยงที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากถุงมือยางมีปริมาณเนื้อยางมาก มีสารเชื่อมโยงและสารเพิ่มเนื้อปริมาณน้อยกว่าผงยางจากยางรถยนต์ โดยเฉพาะเนื้อยางถุงมือมีความนิ่มกว่าผงยางรถยนต์มาก ดังนั้นเมื่อทำการใส่สารรีเคลม จึงเกิดการบวมตัวหรือเปลี่ยนขนาดได้มากกว่า มีเนื้อยางที่ถูกรีเคลมได้มากกว่าจึงทำให้ต้องใช้เวลาในการเชื่อมโยงได้ที่นานกว่าและมีอัตราเร็วน้อยกว่า



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบกราฟเชื่อมโยงของยางรีเคลม RR-GL ที่อัตราส่วนสารรีเคลมแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) และสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL)

Properties	Re 2.0 phr	Re 2.2 phr	Re 2.4 phr
Scorch time, t_{s2}(sec)	108	126	126
Cure time, t_{c90} (sec)	324	399	412
M_{HF} (kgf.cm)	45	42	40
Cure Rate Index (s^{-1})	0.46	0.36	0.35
Tensile Strength (MPa)	13.9 ± 0.4	12.4 ± 0.2	11.6 ± 0.3
% Elongation at break (%)	1299.0 ± 35	1277.8 ± 12	1066.4 ± 16
M 100 (MPa)	0.7 ± 0.1	0.7 ± 0.1	0.8 ± 0.1
Tear Strength (kN/m)	33.1 ± 1.0	34.4 ± 1.2	38.8 ± 0.8
Hardness (Shore A)	40.2 ± 0.5	40.4 ± 0.1	41.2 ± 0.1

จากตารางที่ 4.3 เป็นการศึกษาการใช้งานยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL) โดยทำการใช้ปริมาณสารรีเคลม 2.0, 2.2, 2.4 phr ตามลำดับ พบว่ายางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL) ทั้ง 3 สูตร มีสมบัติเชิงกลแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากยางทุกสูตรใส่สารเชื่อมโยงปริมาณเท่ากัน (กำมะถันและสารเร่ง) จึงทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายหรือองศาการเชื่อมโยงที่ใกล้เคียงกัน มีสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกันมาก

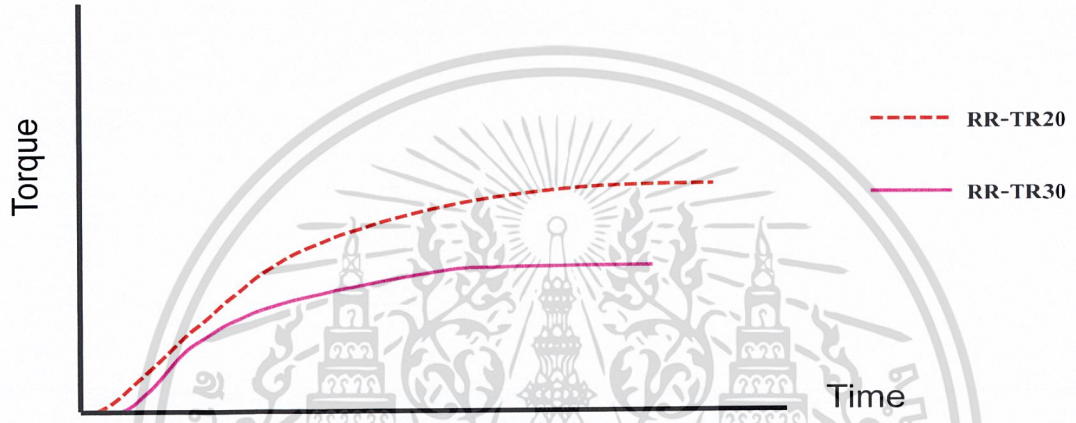
จากการทดลองศึกษาผลของการใช้ปริมาณสารรีเคลม 2.0-2.4 phr ทั้งวัตถุดิบจากผงยางรถยนต์ 20 mesh (RR-TR20) และถุงมือยาง (RR-GL) พบว่าการเพิ่มปริมาณสารรีเคลมไม่ได้ส่งผลให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยกับทั้งลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกล จากการศึกษาพบว่าการใช้สารรีเคลมน้อยกว่า 2.0 phr ไม่สามารถทำให้เกิดการผสมและการรีเคลมได้อย่างทั่วถึง โดยสามารถสังเกตด้วยตาเปล่าได้ คือยางรีเคลมที่เตรียมได้จะมีผิวขรุขระมาก ไม่เกาะตัวกัน ทำให้ไม่สะดวกต่อการนำมาใช้งาน ส่วนการใช้สารรีเคลมมากกว่า 2.0 phr สมบัติเชิงกลที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก และเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต ดังนั้นจึงทำการเลือกใช้ปริมาณสารรีเคลม 2.0 phr ในการศึกษาตอนต่อไป

4.2 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากขนาดอนุภาคของผงยาง (Ground rubber tire : GRT) ที่แตกต่างกัน

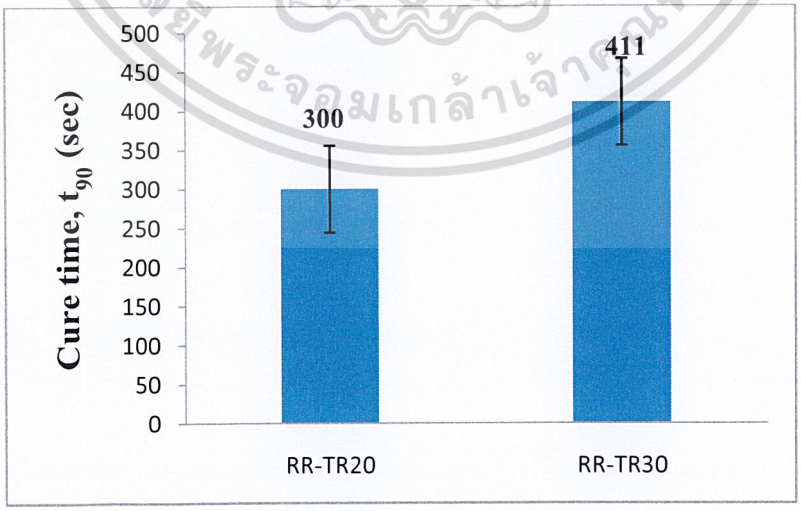
พบว่า กราฟเชื่อมโยง ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) ใช้เวลาสกอร์ชและเวลาเชื่อมโยงสั้นกว่า และมีอัตราเร็วการเชื่อมโยงสูงกว่ายางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30) เนื่องจากยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30) เตรียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผงยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารรีเคลมมากกว่า ทำให้เกิดปฏิกิริยาตัดพันธะเชื่อมโยงภายในเนื้อยางที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า ดังนั้นเมื่อทำการเชื่อมโยงยางใหม่จึงเกิดการเชื่อมโยงมากกว่า ทำให้ใช้เวลาเชื่อมโยงนานกว่ายางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และการที่อนุภาคของผงยาง 30 mesh มีขนาดเล็ก เนื่องจากผ่านการบดเชิงกล (Grinding) มาก ทำให้สายโซ่ในเนื้อยางถูกตัดมาก ส่งผลให้ค่าแรงบิดสูงสุด ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30) มีค่าต่ำลง

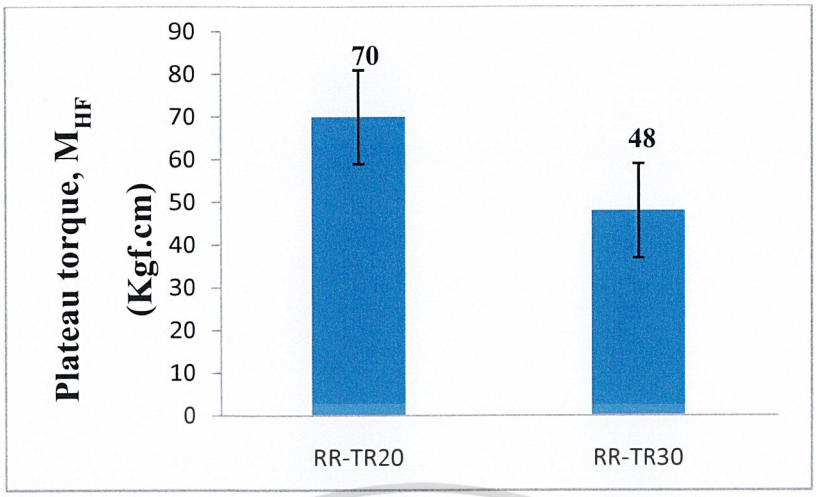


รูปที่ 4.3 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30)



รูปที่ 4.4 เวลาเชื่อมโยง ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แรงบิดสูงสุด ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30)

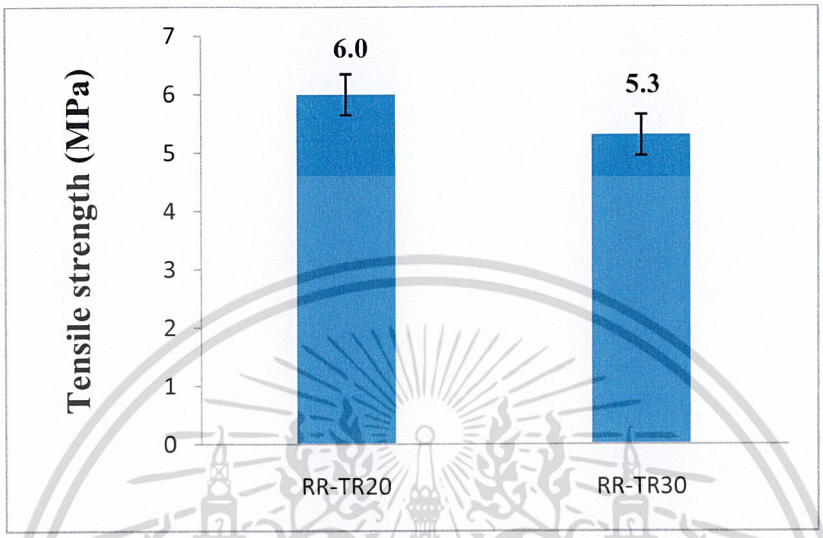
ตารางที่ 4.4 ลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30)

Properties	RR-TR20	RR-TR30
Scorch time, t_{s2}(sec)	42	66
Cure time, t_{c90} (sec)	300	411
M_{HF} (kgf.cm)	70	48
Cure rate index, CRI (s^{-1})	0.39	0.29
Tensile strength (MPa)	6.0 ± 0.5	5.3 ± 0.2
% Elongation at break (%)	252.6 ± 9	367.8 ± 14
M 100 (MPa)	2.4 ± 0.1	1.4 ± 0.1
Tear strength (kN/m)	17.22 ± 0.6	19.28 ± 1.6
Hardness (Shore A)	64.2 ± 0.6	58.2 ± 0.6

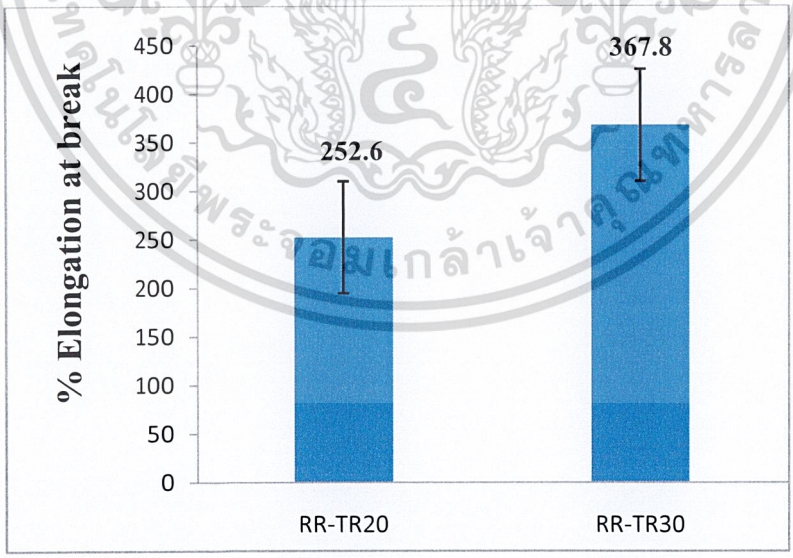
จากตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติเชิงกล จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงดึง, มอดุลัสของยาง และความแข็งกด ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) มีค่าสูงกว่าของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30) เนื่องจากอนุภาคของผงยาง 30 mesh ที่ใช้เตรียมยางรีเคลม (RR-TR30) ผ่านการบดเชิงกล (Grinding) มากกว่าสายโซ่ในเนื้อยางจึงถูกตัดมากกว่า ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเชิงกลของยางในส่วนการรับแรงมีค่าลดน้อยลง เป็นผลให้ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30) มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่า และเนื้อยางมีความนิ่มมากกว่า (ค่ามอดุลัสของยางและความแข็งกดที่ได้มีค่าต่ำกว่า) ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20)

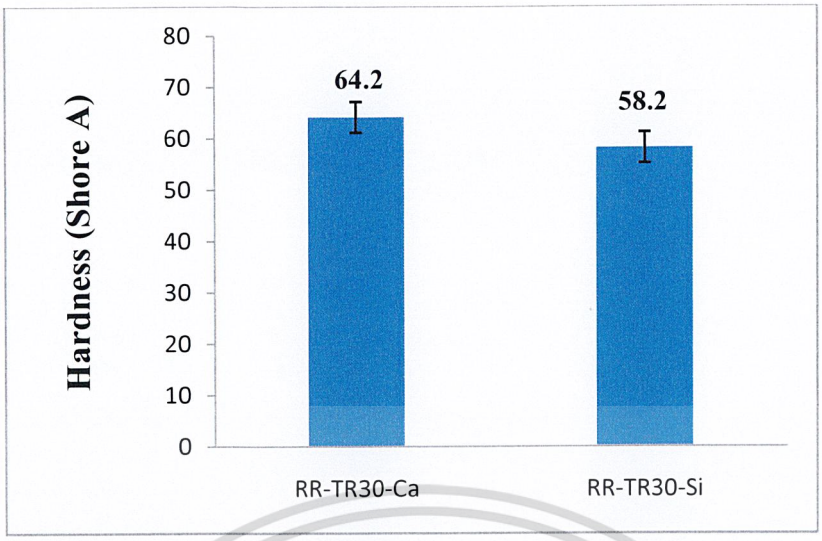


รูปที่ 4.6 ความแข็งแรงดึง ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30)



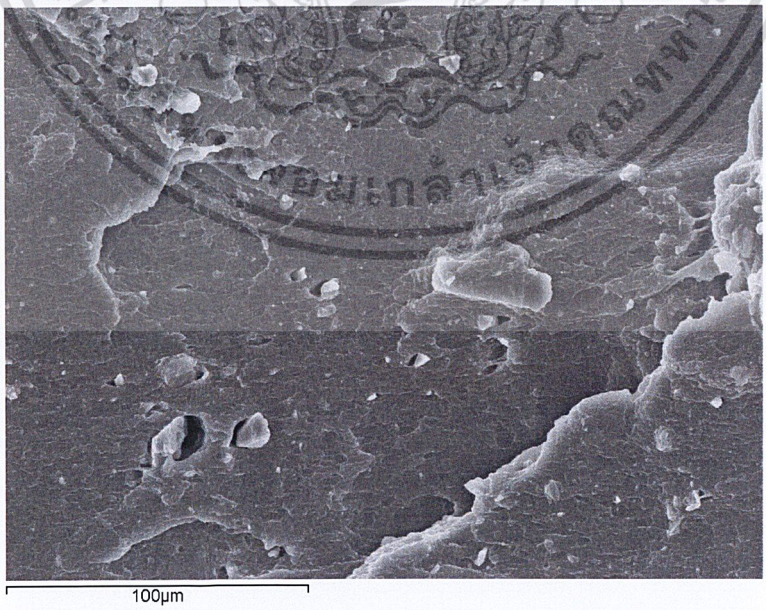
รูปที่ 4.7 ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



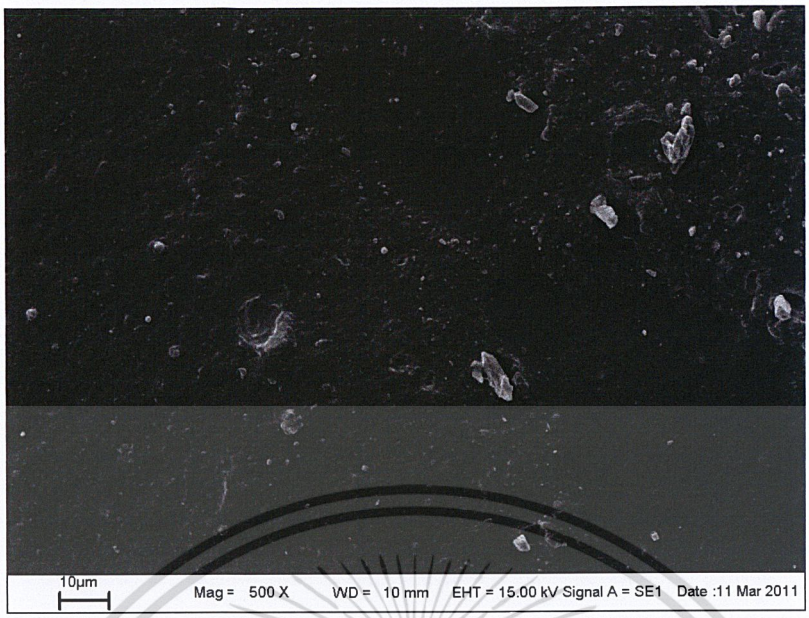
รูปที่ 4.8 ความแข็งกด ของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) และ 30 mesh (RR-TR30)

จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของยางรีเคลมทั้ง 2 ชนิด พบว่ายางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30) มีความเรียบของพื้นผิวมากกว่ายางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) เนื่องจากยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30) เตรียมจากผงยางรถยนต์ (GRT) ขนาดเล็กกว่าจึงมีความละเอียดของพื้นผิวมากกว่า ทำให้พื้นผิวของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30) มีความเรียบมากกว่า



รูปที่ 4.9 ภาพ SEM ของ RR-TR 20 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



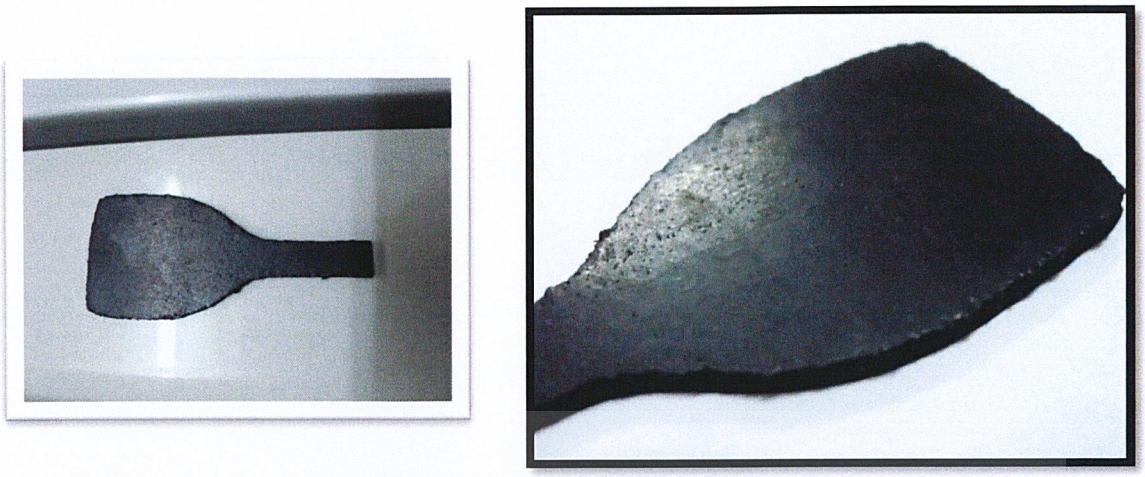
รูปที่ 4.10 ภาพ SEM ของ RR-TR 30 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 เมื่อสังเกตลักษณะพื้นผิวของยางรีเคลม พบว่ายางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30) มีพื้นผิวที่เรียบเนียนกว่ายางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) เนื่องจากเตรียมจากผงยาง 30 mesh ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า จึงให้พื้นผิวที่มีความละเอียดสูงกว่า



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายพื้นผิวของ RR-TR20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



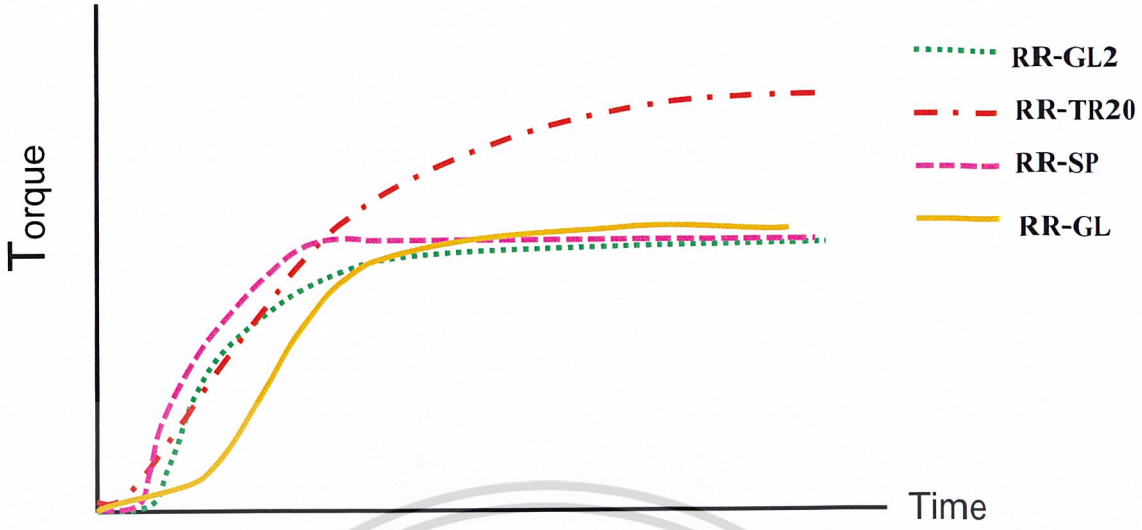
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายพื้นผิวของ RR-TR30

ดังนั้นในการเลือกใช้ยางรีเคลมทั้ง 2 ชนิด จึงมีความแตกต่างกันคือ ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) ใช้ในงานที่ต้องคำนึงถึงการรับแรงเป็นสำคัญ เพราะมีค่าความแข็งแรงดึงสูง แต่ถ้าคำนึงถึงความยืดหยุ่นหรือความนิ่มเป็นสำคัญ ควรเลือกใช้ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30) เพราะมีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูง มอดุลัสของยางและความแข็งกดต่ำ นอกจากนี้ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30) ยังมีพื้นผิวที่เรียบกว่ายางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) ด้วย อย่างไรก็ดีการเตรียมผงยางรถยนต์ (GRT) ขนาด 30 mesh ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบดและร่อนวัตถุดิบมากกว่า ทำให้ใช้ต้นทุนในการผลิตสูงกว่า

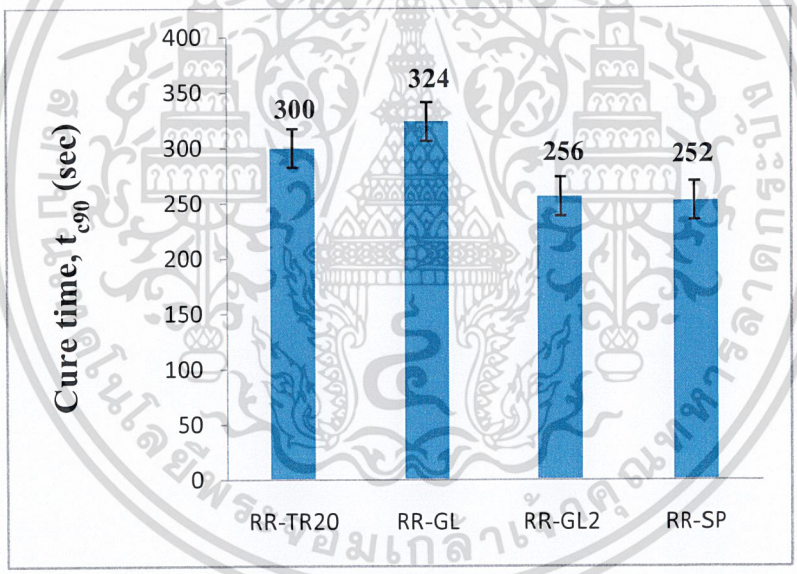
4.3 ศึกษาการใช้งานยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

พบว่า กราฟเชื่อมโยงของยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ (RR-TR20) มีค่าแรงบิดสูงสุดสูงกว่ายางรีเคลมตัวอื่นๆมาก เนื่องจากยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ (RR-TR20) วัตถุดิบที่ใช้มาจากยางรถยนต์ ซึ่งมีการเติมสารตัวเติมลงไปในปริมาณมาก ทำให้ยางมีความหนืดและความแข็งสูงขึ้น เพราะสารตัวเติมจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ยางในเนื้อยาง ส่งผลให้ยางมีสมบัติการไหลต่ำลง ยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL), ยางรีเคลมจากถุงมือยางเกรด2 (RR-GL2) และยางรีเคลมจากยางฟองน้ำ (RR-SP) วัตถุดิบที่ใช้คือ ถุงมือยาง และเศษยางฟองน้ำ ซึ่งมีการใส่สารตัวเติมลงไปในปริมาณน้อยมาก อาจเรียกได้ว่าแทบไม่มีสารตัวเติมเลย ทำให้ยางมีความหนืดและความแข็งต่ำมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

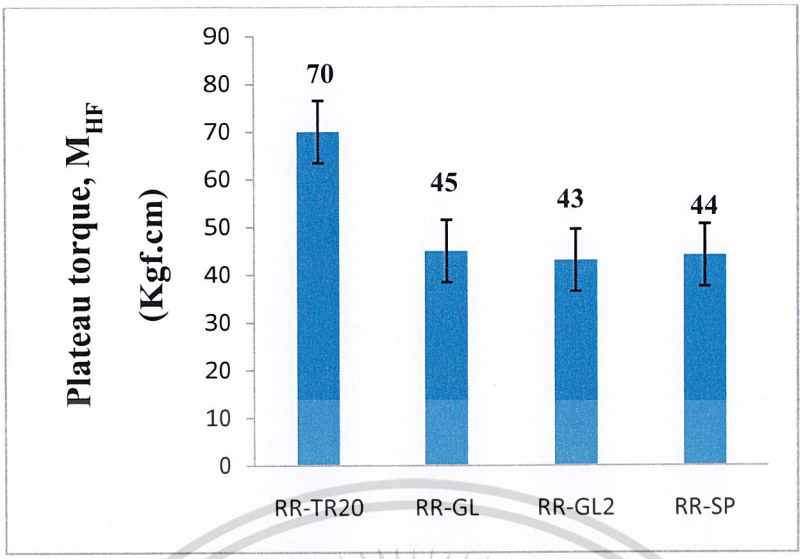


รูปที่ 4.13 กราฟเชื่อมโยงของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.14 เวลาในการเชื่อมโยงยางของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แรงบิดสูงสุดของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.5 ลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

Properties	RR-TR20	RR-GL	RR-GL2	RR-SP
Scorch time, t_{s2}(sec)	42	108	51	60
Cure time, t_{c90} (sec)	300	324	256	252
M_{HF} (kgf.cm)	70	45	43	44
Cure rate index, CRI (s^{-1})	0.39	0.46	0.49	0.52
Tensile strength (MPa)	6.0 ± 0.5	13.9 ± 0.4	5.5 ± 0.1	4.6 ± 0.2
% Elongation at break (%)	252.6 ± 9	1299.0 ± 35	656.6 ± 2	730.9 ± 15
M 100 (MPa)	2.4 ± 0.1	0.7 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.7 ± 0.1
Tear strength (kN/m)	17.2 ± 0.6	33.1 ± 1.0	24.7 ± 1.4	24.0 ± 1.0
Hardness (Shore A)	64.2 ± 0.6	40.2 ± 0.5	48.3 ± 0.4	39.6 ± 0.5

จากตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติเชิงกล จะเห็นว่ายางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL) มีสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นกว่ายางรีเคลมตัวอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นความแข็งแรงดึง, ร้อยละการยืด ณ จุดขาด, ความแข็งแรงฉีกขาดและยังมีความแข็งกดต่ำอีกด้วย เนื่องจากยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL) วัตถุดิบที่ใช้คือถุงมือยางที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งถุงมือยางเหล่านี้ล้วนผลิตมาจากน้ำยางข้น โดยผ่านกระบวนการจุ่มแบบ (Dipping process) ซึ่งกระบวนการนี้ยางจะไม่ผ่านการบดย่อย (Mastication) สายโซ่ในเนื้อยางจึงไม่ถูกตัด ทำให้ยางยังคงมีสมบัติที่ดีเยี่ยมไม่ว่าจะเป็นการรับแรงหรือความยืดหยุ่น ถึงแม้ยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL) จะมีสมบัติโดดเด่นที่สุดในทุกๆด้าน แต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

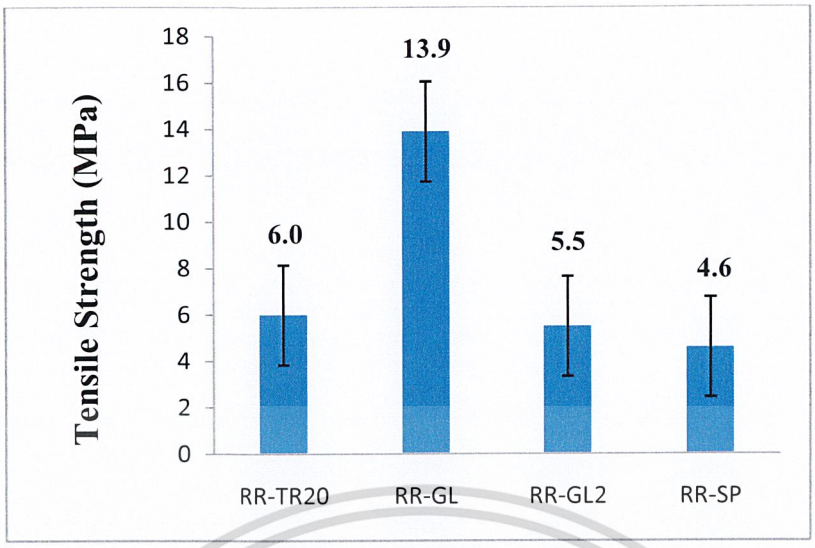
ก็มีราคาสูงที่สุด เมื่อเทียบกับยางรีเคลมตัวอื่นๆ เนื่องจากถุงมือยางใช้แล้วที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางรีเคลมชนิดนี้มีราคาสูงกว่าวัตถุดิบของยางรีเคลมตัวอื่นๆ

ส่วนยางรีเคลมอีก 3 ชนิดที่เหลือ แม้ว่าจะมีสมบัติด้อยกว่ายางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL) มาก แต่ก็มีจุดเด่นในเรื่องราคาที่ถูกกว่า ซึ่งแต่ละชนิดจะมีสมบัติเด่นที่แตกต่างกันออกไป คือยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ (RR-TR20) มีราคาถูกที่สุดและมีสมบัติในการรับแรงที่ดี โดยดูจากค่าความแข็งแรงดึง ที่สูงกว่าอีก 2 ตัวที่เหลือ เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลมชนิดนี้คือผงยางรถยนต์ (GRT) ซึ่งมาจากยางรถยนต์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ในยางรถยนต์เหล่านี้จะมีการเติมสารตัวเติม ลงไปในปริมาณมาก เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติในการรับแรง ดังนั้นในยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ (RR-TR20) จึงมีสารตัวเติมเหล่านี้อยู่ด้วย สารตัวเติมเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มสมบัติในการรับแรงของยางรีเคลมชนิดนี้ และเนื้อยางในยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ (RR-TR20) มีอยู่ในปริมาณน้อย ในขณะที่การใส่สารเชื่อมโยง (กำมะถัน) มีการใส่ในปริมาณที่เท่ากัน ทำให้ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ (RR-TR20) มีองศาการเชื่อมโยง (Degree of crosslink) สูง ปัจจัยเหล่านี้ช่วยเพิ่มสมบัติการรับแรงและความแข็งแรงดึงของ RR-TR20 อย่างไรก็ตามวัตถุดิบของยางรีเคลมชนิดนี้คือผงยางรถยนต์ ซึ่งมาจากยางรถยนต์ ในการผลิตยางรถยนต์ ยางที่นำไปผลิตจะต้องผ่านการบดย่อย ทำสายโซ่ในเนื้อยางถูกตัดไปบางส่วน อีกทั้งยางรถยนต์เหล่านี้ยังผ่านการใช้งานมาอย่างหนัก ไม่ว่าจะเป็นการรับแรงทั้งรถยนต์และคนโดยสารซึ่งเป็นน้ำหนักที่มาก การเสียดสีขัดถูที่เกิดมากเนื่องจากการรับน้ำหนักมากและการหมุนด้วยความเร็วสูง และสภาพแวดล้อมในช่วงที่ใช้งาน เช่นแดดร้อน ถนนขรุขระ เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ล้วนเป็นผลให้ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ (RR-TR20) มีสมบัติเชิงกลลดลงเช่นกัน

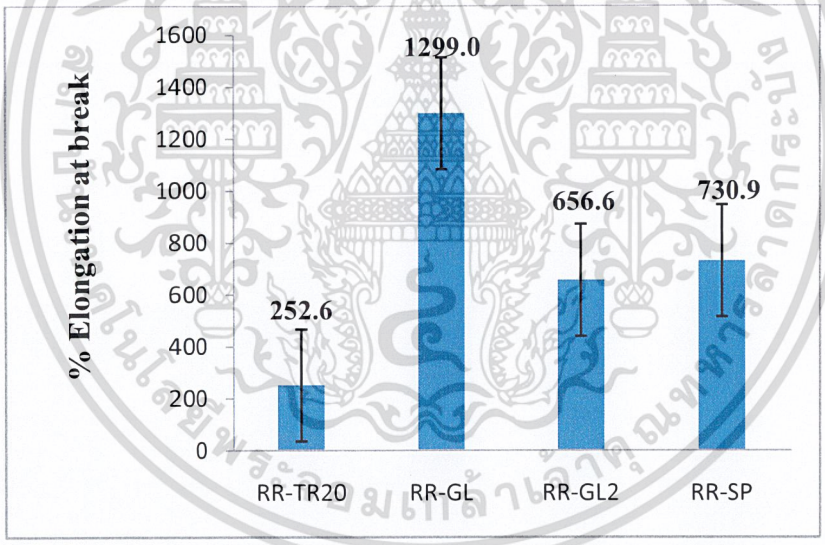
ยางรีเคลมจากยางฟองน้ำ (RR-SP) ถึงแม้ว่าจะมีสมบัติในการรับแรงต่ำที่สุด แต่ก็มีความยืดหยุ่นและความแข็งแรงฉีกขาดสูง และมีความแข็งกดต่ำที่สุดด้วย เนื่องจากยางรีเคลมจากยางฟองน้ำ (RR-SP) มาจากเศษยางฟองน้ำบด ซึ่งมีลักษณะเป็นขลุย จึงมีช่องว่างในเนื้อยางมาก ทำให้ยางมีความนิ่มสูง และยางฟองน้ำนั้นทำมาจากน้ำยางข้น โดยผ่านกระบวนการหล่อแบบ (Casting process) ซึ่งไม่ผ่านการบดย่อยสายโซ่ในเนื้อยางจึงไม่ถูกตัด ทำให้มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาดสูง

ยางรีเคลมจากถุงมือยางเกรด2 (RR-GL2) มีสมบัติอยู่ระหว่างยางรีเคลมจากยางฟองน้ำ (RR-SP) และยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ (RR-TR20) ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลมจากถุงมือยางเกรด2 (RR-GL2) คือถุงมือยางที่ผ่านการเก็บไว้เป็นเวลานาน ทำให้อาจมีความชื้นสะสมในเนื้อยางมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

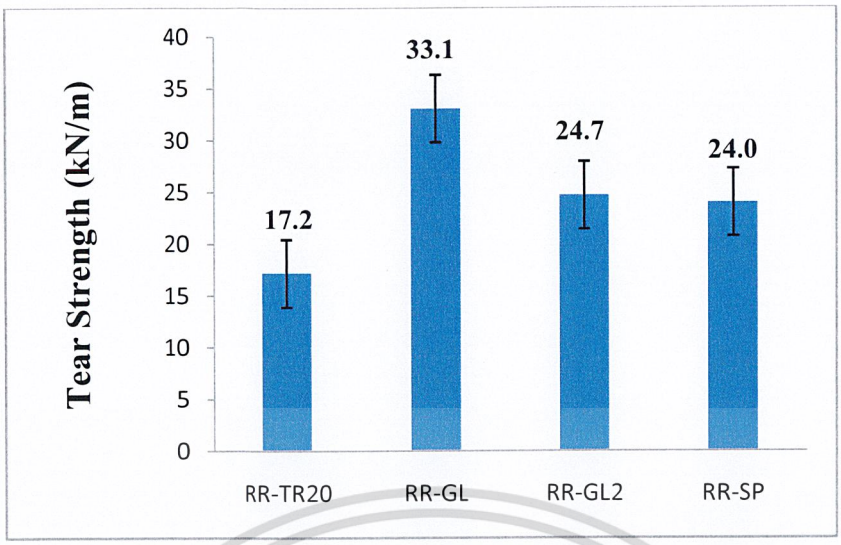


รูปที่ 4.16 ความแข็งแรงดึงของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

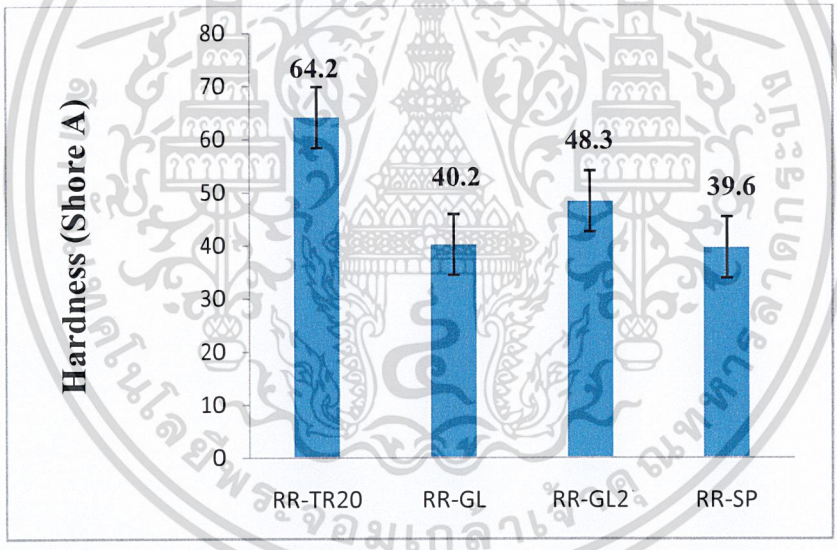


รูปที่ 4.17 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ความแข็งแรงฉีกขาดของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

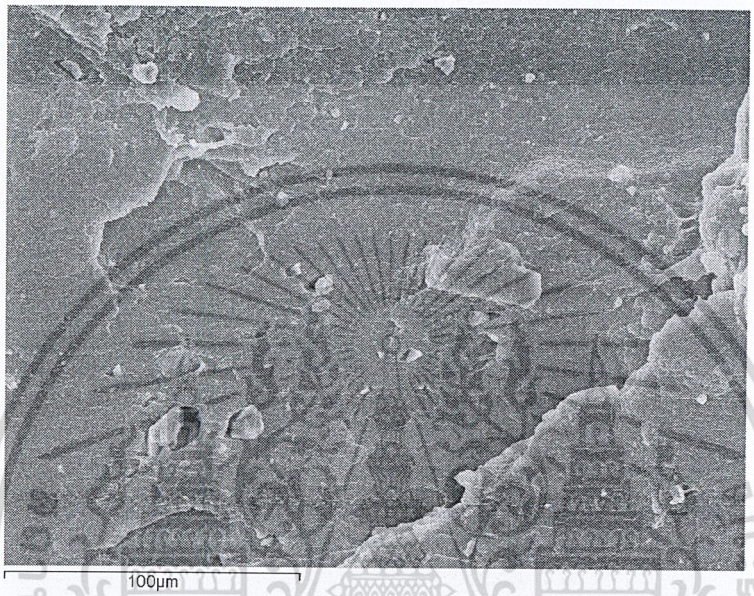


รูปที่ 4.19 ความแข็งกดของยางรีเคลมที่เตรียมจากชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

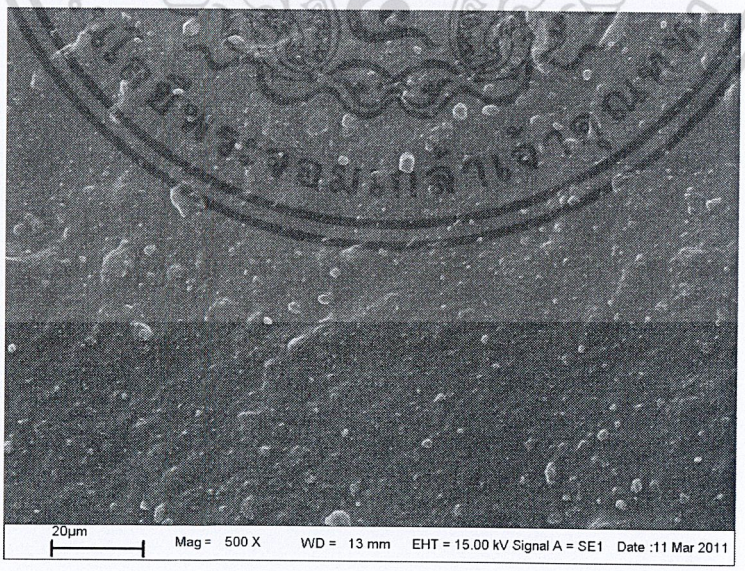
จากภาพที่ 4.20 – 4.23 แสดงสัณฐานวิทยาของยางรีเคลมทั้ง 4 ชนิด คือ ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ (RR-TR20), ยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL), ยางรีเคลมจากถุงมือยางเกรด2 (RR-GL2) และยางรีเคลมจากยางฟองน้ำ (RR-SP) พบว่ายางรีเคลมแต่ละชนิดมีลักษณะเนื้อยางแตกต่างกันออกไปตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ แต่ในยางรีเคลมจากถุงมือยางเกรด2 (RR-GL2) พบรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ในเนื้อยาง เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้มาจากถุงมือยางเกรด2 ซึ่งถูกเก็บไว้เป็นเวลานาน อาจเกิดการเสื่อมสภาพ (Degradation) เกิดเป็นจุดบกพร่อง (Defect) และในยางรีเคลมจากยางฟองน้ำ (RR-SP) พบว่าพื้นผิวมีความขรุขระมาก เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้คือยางฟองน้ำ ซึ่งมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะเป็นขลุยและมีรูพรุนมาก เมื่อนำยางฟองน้ำเหล่านี้มาเปลี่ยนเป็นยางรีเคลม (RR-SP) รูพรุนเหล่านี้อาจถูกกำจัดไม่หมด เกิดเป็นจุดบกพร่อง (Defect) ในเนื้อยาง สิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุให้ยางรีเคลมจากถุงมือยางเกรด2 (RR-GL2) และยางรีเคลมจากยางฟองน้ำ (RR-SP) มีสมบัติเชิงกลต่ำ

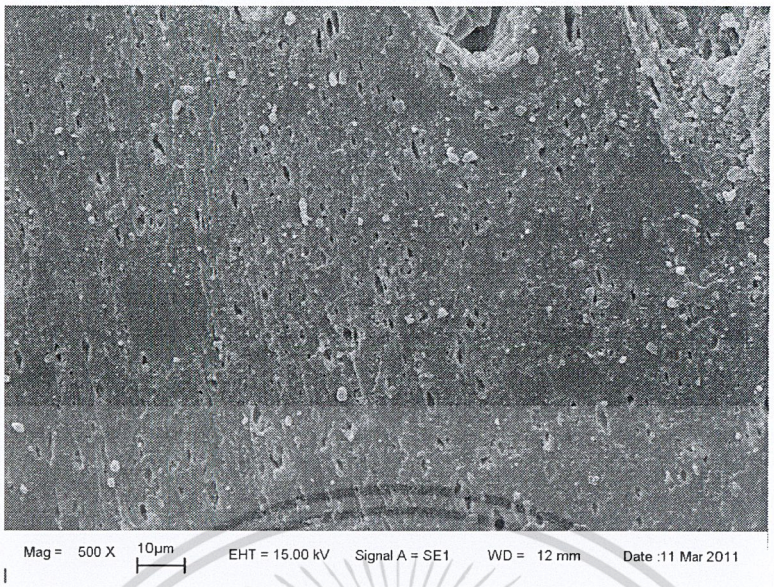


รูปที่4.20 ภาพ SEM ของยางรีเคลมสูตร RR-TR20 ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่4.21 ภาพ SEM ของยางรีเคลมสูตร RR-GL ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.22 ภาพ SEM ของยางรีเคลมสูตร RR-GL2 ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่4.23 ภาพ SEM ของยางรีเคลมสูตร RR-SP ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จะเห็นว่ายางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL) มีสมบัติดีกว่าในทุกด้าน แต่ก็มีราคาสูงกว่ายางรีเคลมชนิดอื่นเช่นกัน ในขณะที่ยางรีเคลมอีก 3 ชนิดที่เหลือคือ ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ (RR-TR20), ยางรีเคลมจากถุงมือยางเกรด2 (RR-GL2) และยางรีเคลมจากยางฟองน้ำ (RR-SP) จะสมบัติเด่นในด้านที่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าสมบัติของยางรีเคลมเหล่านี้จะด้อยกว่าสมบัติของยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL) มาก แต่ก็มีราคาที่ถูกกว่ามากเช่นกัน ดังนั้นการเลือกไปใช้งานจึงควรคำนึงถึงสมบัติที่ต้องการเป็นสำคัญ กล่าวคือถ้าต้องการสมบัติที่ดีในทุกด้านควรเลือกรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL) แต่ถ้าต้องการเน้นความยืดหยุ่นและความนิ่ม ก็ควรเลือกยางรีเคลมจากยางฟองน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(RR-SP) ถ้าต้องการสมบัติด้านการรับแรง ก็ควรเลือกรีเคลมจากผงยางรถยนต์ (RR-TR20) อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ยางรีเคลมอาจนำยางรีเคลมชนิดต่างๆ มาผสมเข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางรีเคลมให้ได้ตามความต้องการ อีกทั้งยังเป็นการปรับต้นทุนของยางรีเคลมตามความต้องการด้วย

4.4 ศึกษาชนิดของ Supporter ที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลม

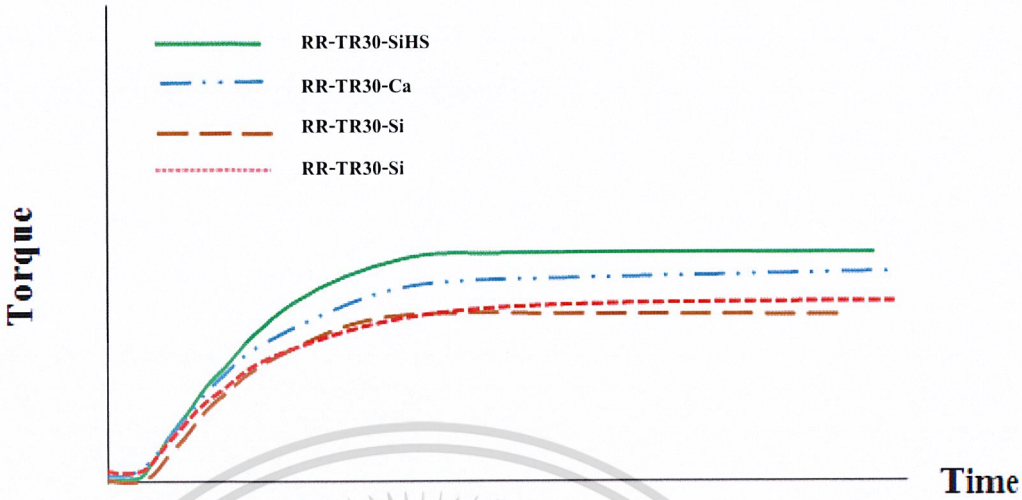
เนื่องจากสารรีเคลม (Reclaiming agent) ที่ใช้เป็นของเหลว ซึ่งไม่สะดวกในการผสมและใช้งาน ดังนั้นจึงมีการใช้สารตัวเติม (Fillers) ที่เป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวสูง ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยยึดเกาะ (Supporter) เพื่อให้สารรีเคลมเข้าไปเคลือบเกาะที่ผิวของ Supporter ส่งผลให้มีความหนืดสูงขึ้น ใช้งานง่ายขึ้น ดังนั้นในการวิจัยตอนนี้จึงทำการศึกษาผลของชนิดสารตัวเติมที่เป็น Supporter ได้แก่แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดบด (RR-TR30-Ca), ซิลิกาเกรดตกตะกอน (Precipitated silica) (RR-TR30-Si) และซิลิกาผสมเรซิน High styrene 6% (RR-TR30-SiHS) ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของยางรีเคลมที่เตรียมได้ โดยเลือกใช้ยางวัตถุดิบคือผงยางรถยนต์ (GRT) ขนาด 30 mesh โดยการใส่ Supporter จะคำนึงถึงความหนืดของสารรีเคลมที่ออกมามากกว่าปริมาณการใส่ในการทดลองจึงทำการใส่ Supporter ชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน เพื่อให้ได้สารรีเคลมที่ใช้กับยางรีเคลมแต่ละสูตรคือ RR-TR30-Ca, RR-TR30-Si และRR-TR30-SiHS มีความหนืดใกล้เคียงกัน

จากการทดลอง สามารถแสดงผลการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) และสมบัติเชิงกล ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมที่ใช้ Supporter ชนิดต่างๆในแต่ละสูตร

Properties	RR-TR30-Ca	RR-TR30-Si	RR-TR30-SiHS	RR-TR30
Scorch time, t_{s2}(sec)	45	63	54	66
Cure time, t_{c90} (sec)	396	324	300	411
M_{HF} (kgf.cm)	63	50	62	48
Cure Rate Index (s^{-1})	0.283	0.383	0.407	0.290
Tensile Strength (MPa)	5.1 ± 0.12	5.6 ± 0.14	5.5 ± 0.11	5.3±0.21
Elongation at break (%)	214.2 ± 3	292.2 ± 12	213.3 ± 6	367.8±14
M 100 (MPa)	2.5 ± 0.01	1.8 ± 0.04	2.4 ± 0.02	1.4±0.04
Tear Strength (kN/m)	18.57 ± 0.51	23.97 ± 0.26	21.21 ± 1.33	19.28±1.60
Hardness (Shore A)	61.5 ± 0.50	57.0 ± 0.70	64.2 ± 0.70	58.2±0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

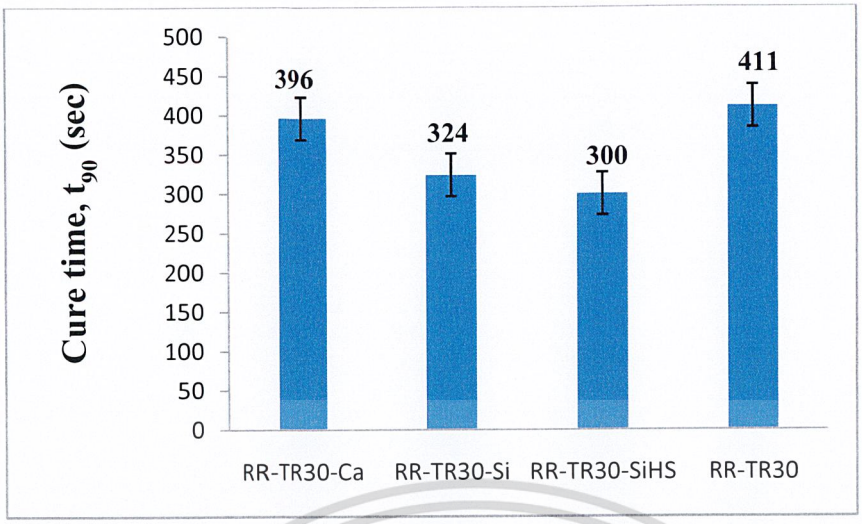


รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบลักษณะการเชื่อมโยงของยางรีเคลมแต่ละสูตรที่ใช้Supporter ต่างชนิด

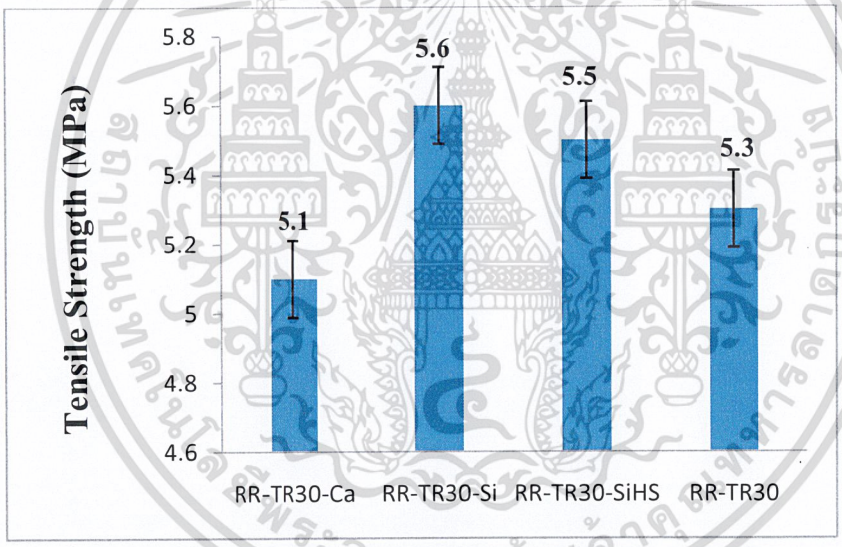
จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าการใช้สารตัวเติมแต่ละชนิดเป็น Supporter ทำให้ลักษณะการเชื่อมโยงของยางรีเคลมที่เตรียมได้ไม่แตกต่างอย่างมีนัย ได้แก่ t_{s2}, t_{c90} และ CRI สำหรับค่าแรงบิดสูงสุด (Plateau modulus, M_{HF}) มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงว่าสารตัวเติมมิได้ส่งเสริมหรือรบกวนปฏิกิริยาเชื่อมโยงยาง

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.25-4.30 พบว่าการใช้ Supporter ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่างกันเล็กน้อย กล่าวคือการใช้ซิลิกาชนิดตกตะกอน (RR-TR30-Si) ทำให้สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมที่เตรียมได้ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าซิลิกาเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing filler) ช่วยรับและกระจายแรงให้กับวัสดุ ทำให้ยางรีเคลมที่เตรียมได้ (RR-TR30-Si) มีสมบัติเชิงกลสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณการใส่สารตัวเติมซิลิกาน้อยคือ 7.5 phr จึงมิได้สงผลต่อการเสริมแรงอย่างเด่นชัด สำหรับการเพิ่มเรซิน High styrene 6% ในสูตร RR-TR30-SiHS ส่งผลเล็กน้อยต่อสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม คือทำให้ค่าแข็งกด (Hardness) และมอดุลัสของยาง (M100) สูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเรซิน High styrene เป็นสารที่มีองค์ประกอบของส่วนพอลิสไตรีนมาก ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) สูงที่อุณหภูมิห้องมีความแข็งสูงกว่ายาง ดังนั้นจึงส่งผลให้วัสดุมีความแข็งโดยรวมสูงขึ้น สำหรับการใช้สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing filler) จึงไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

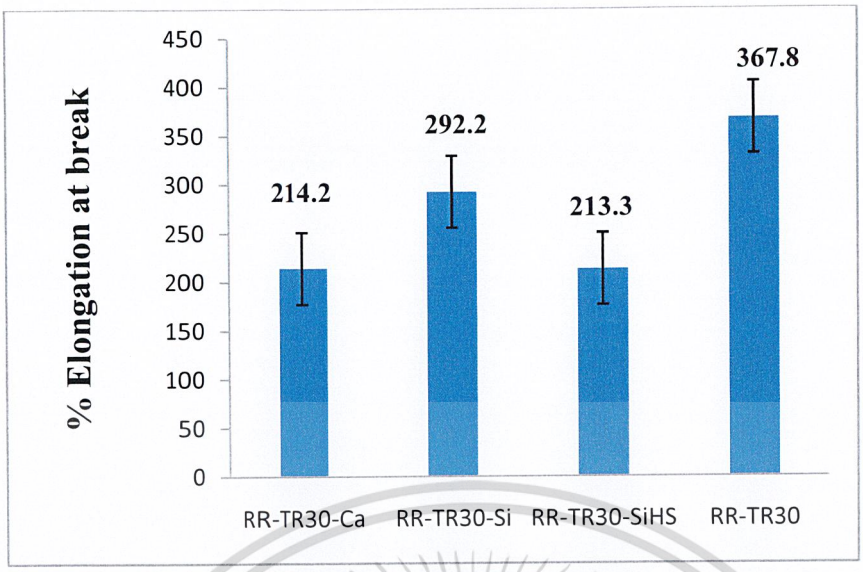


รูปที่ 4.25 เวลาเชื่อมโยงยางของยางรีเคลมแต่ละสูตร

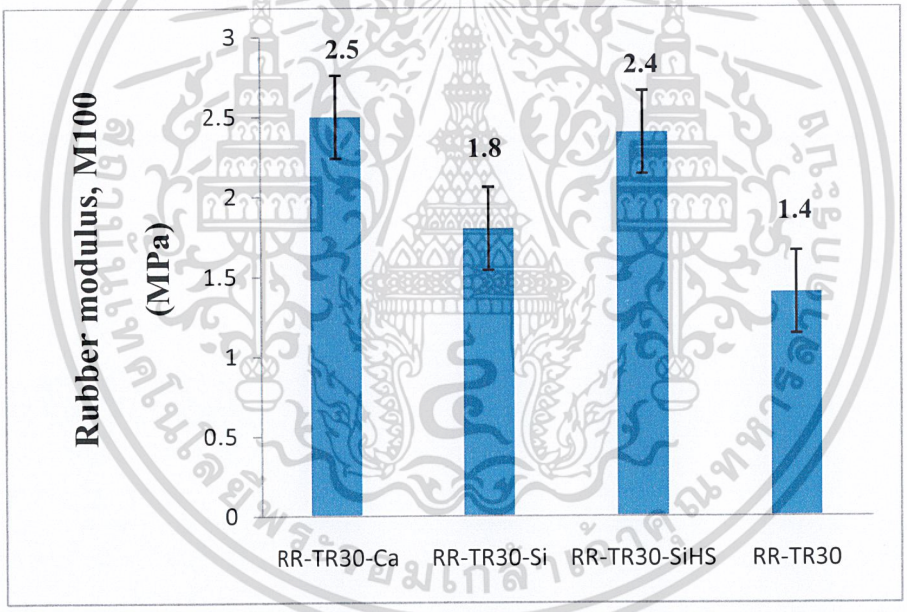


รูปที่ 4.26 ความแข็งแรงดึงของยางรีเคลมในแต่ละสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

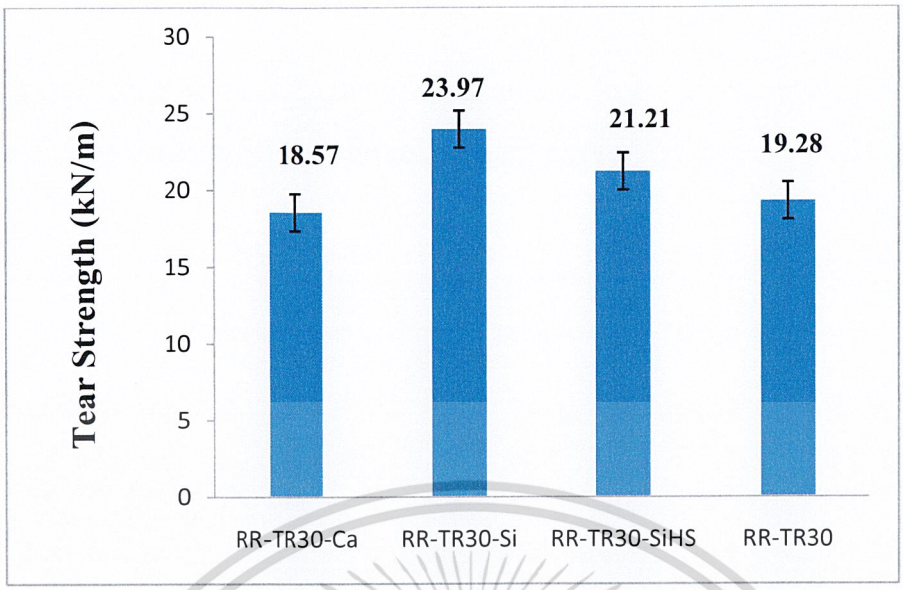


รูปที่ 4.27 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางรีเคลมในแต่ละสูตร

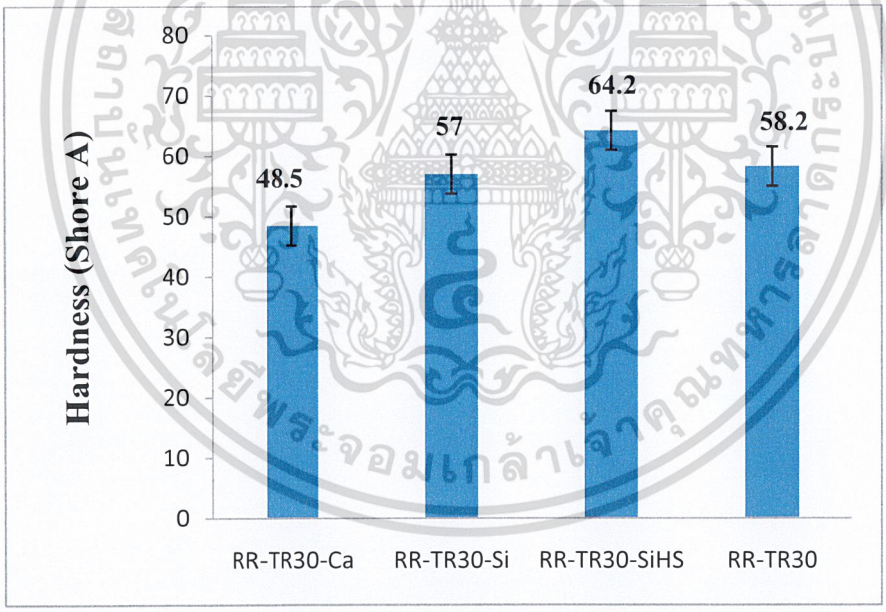


รูปที่ 4.28 มอดุลัสของยางของยางรีเคลมในแต่ละสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



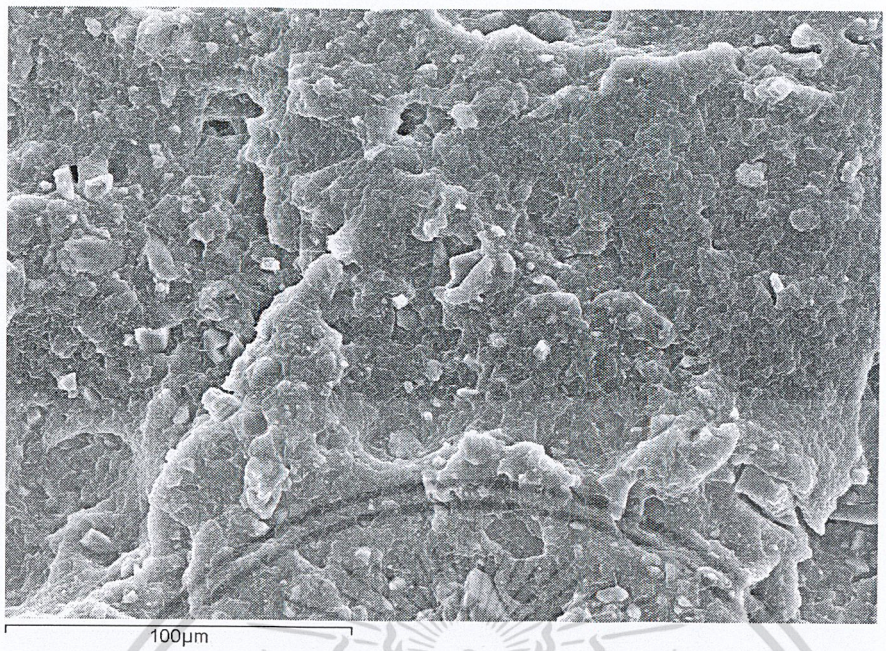
รูปที่ 4.29 ความแข็งแรงฉีกขาดของยางรีเคลมในแต่ละสูตร



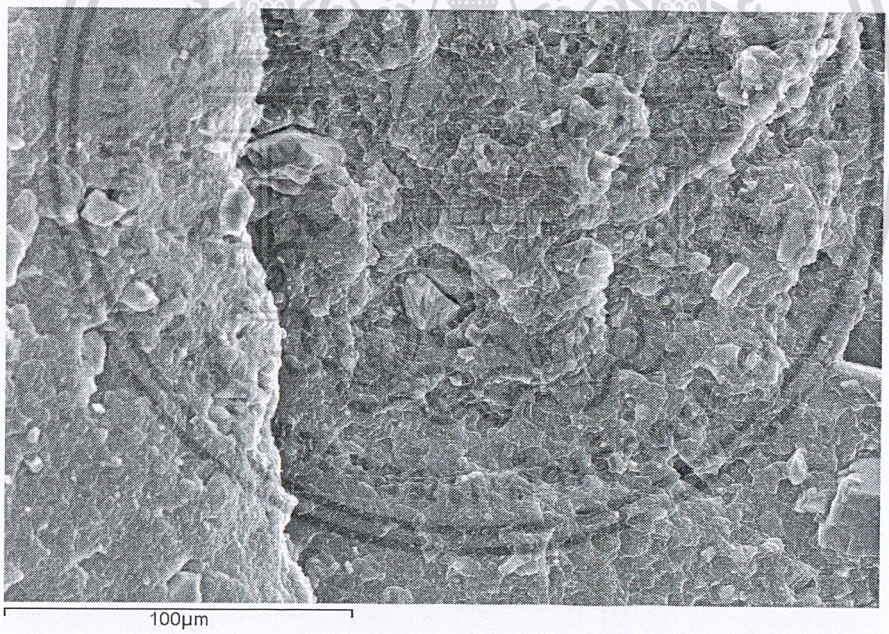
รูปที่ 4.30 ความแข็งกดของยางรีเคลมในแต่ละสูตร

จากนั้นทำการตรวจสอบเนื้อยางรีเคลมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ของยางแต่ละสูตรที่มีการเติมสารตัวเติม พบว่ายางรีเคลมทั้ง 3 ชนิด มีการะจายตัวของสารตัวเติมในเนื้อยางรีเคลมอย่างสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

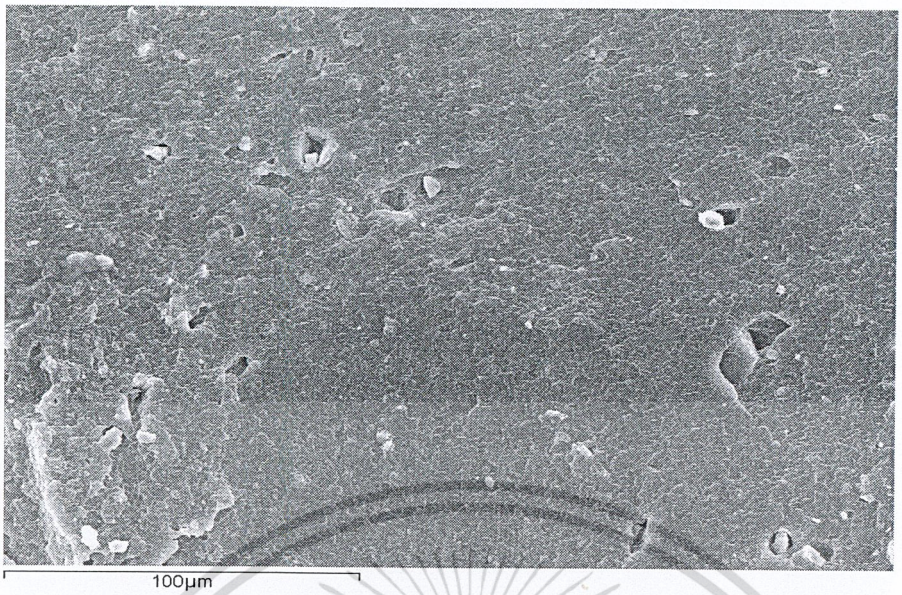


รูปที่ 4.31 ภาพ SEM ของ RR-TR30-Ca ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.32 ภาพ SEM ของ RR-TR30-Si ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.33 ภาพ SEM ของ RR-TR30-SiHS ที่กำลังขยาย 500 เท่า

4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ

การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบของยางรีเคลมในงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลมแต่ละสูตรเพื่อทำการเปรียบเทียบกับราคาของยางธรรมชาติ (NR) ซึ่งใช้ในการลดต้นทุนในการผลิต

จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 จะเห็นว่ายางรีเคลมแต่ละชนิด มีราคาถูกกว่ายางธรรมชาติมาก นอกจากนี้การใช้ปริมาณสารรีเคลมแตกต่างกัน (2.0-2.4 phr) ส่งผลให้ต้นทุนของวัสดุต่างกันเล็กน้อย ราคาต้นทุนยางรีเคลมที่เตรียมจากเศษยางแต่ละชนิด ได้แก่ผงยางรถยนต์ (GRT) ถุงมือยาง (GL) และยางฟองน้ำ (SP) มีราคาแตกต่างกัน ขึ้นกับราคาของวัตถุดิบ และปริมาณเนื้อยางที่อยู่ในวัตถุดิบนั้น เนื่องจากถุงมือยาง และยางฟองน้ำมีเนื้อยางอยู่มาก (ประมาณ 80%) เทียบกับผงยางรถยนต์ GRT ซึ่งมีเนื้อยางประมาณ 60% ดังนั้นจึงมีราคาแพงกว่า แต่ผู้ผลิตในอุตสาหกรรมยางอาจมีความต้องกรมากกว่า เนื่องจากมีเนื้อยางที่สามารถใช้ประโยชน์ใหม่ได้มากกว่า

การใช้ยางรีเคลมทดแทนยางธรรมชาติ นอกจากจะเป็นการลดต้นทุนการผลิตในส่วนของเนื้อยางแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตในส่วนของสารเติมแต่ง (Additives) ที่ต้องใช้อีกด้วย เพราะในเนื้อยางรีเคลม โดยเฉพาะยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์จะมีสารเติมแต่งในเนื้อยางปริมาณมากอยู่แล้ว ดังนั้นในกระบวนการขึ้นรูปยางรีเคลมจึงใช้สารเติมแต่งปริมาณน้อยกว่ายางธรรมชาติ นอกจากเหตุผลในเชิงเศรษฐกิจข้างต้นแล้ว การใช้ยางรีเคลมยังเป็นการส่งเสริมการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม โดยการเปลี่ยนขยะยางเป็นผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้ประโยชน์ใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ราคาต้นทุนวัตถุดิบของยางรีเคลมในแต่ละสูตร

ยางและสารเคมี	ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ (phr)	ราคาวัตถุดิบ (บาท/กิโลกรัม)
ยางรีเคลมจากยางรถยนต์ (RR-TR20)	100	19
ยางรีเคลมจากยางรถยนต์ (RR-TR30)	100	20
ยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL)	100	35
ยางรีเคลมจากยางฟองน้ำ (RR-SP)	100	50
สารรีเคลม (Reclaiming agent)	2.0, 2.2, 2.4	78.5
ผงยาง	-	8
ซิลิกา	7.5,8	37
แคลเซียมคาร์บอเนต	12.5	7
High Styrene 6%	1.33	190
Activator – Stearic acid	2	52
Activator – ZnO	3	88
Accelerator-MBTS	0.8	135
DPG	0.2	350
สารเชื่อมโยงกำมะถัน	2	20

หมายเหตุ *ราคาวัตถุดิบ ณ เดือนมีนาคม พ.ศ. 2554

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบต้นทุนที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลมโดยใช้ปริมาณของสารรีเคลมที่แตกต่างกัน

ราคายางรีเคลมในแต่ละสูตร / สูตรและปริมาณสารรีเคลมที่ใช้ (phr)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ค่าใช้จ่ายที่ลดลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ (%)
RR-TR20 Re+2.0 phr	24.86	79.28
RR-TR20 Re+2.2 phr	25.02	79.15
RR-TR20 Re+2.4 phr	25.17	79.03
RR-GL Re+2.0 phr	40.86	65.95
RR-GL Re+2.2 phr	41.02	65.82
RR-GL Re+2.4 phr	41.17	65.69
Natural rubber (NR)*	120	-

หมายเหตุ * ราคายางแผ่นรมควันชั้นสาม (RSS-3) ณ เดือน มีนาคม พ.ศ. 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.9 ต้นทุนในการผลิตยางรีเคลมโดยใช้ยางรีเคลมชนิดแตกต่างกัน

ราคายางรีเคลมในแต่ละสูตร / สูตรยางรีเคลมในงานวิจัย	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ค่าใช้จ่ายที่ลดลง เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ (%)
RR-TR20	24.86	79.28
RR-TR30	25.86	78.45
RR-GL	40.86	65.95
RR-GL2	30.86	74.28
RR-SP	55.86	53.45
RR-TR30-Ca	62.74	47.72
RR-TR30-Si	64.64	46.13
RTR30-SiHS	67.16	44.03
NR*	120	-

หมายเหตุ * ราคายางแผ่นรมควันชั้นสาม (RSS-3) ณ เดือน มีนาคม พ.ศ. 2554

จากตารางที่ 4.8 และ 4.9 จะเห็นว่ายางรีเคลมมีราคาถูกกว่ายางธรรมชาติมาก การใช้ยางรีเคลมทดแทนยางธรรมชาติ นอกจากจะเป็นการลดต้นทุนการผลิตในส่วนของเนื้อยางแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตในส่วนของสารเติมแต่งที่ต้องใช้อีกด้วย เพราะในเนื้อยางรีเคลมโดยเฉพาะยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์จะมีสารเติมแต่ง (Additives) ในเนื้อยางปริมาณมากอยู่แล้ว ดังนั้นในกระบวนการขึ้นรูปยางรีเคลมจึงใช้สารเติมแต่งปริมาณน้อยกว่ายางธรรมชาติ นอกจากเหตุผลในเชิงเศรษฐกิจข้างต้นแล้ว การใช้ยางรีเคลมยังเป็นการส่งเสริมการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม โดยการเปลี่ยนขยะยางเป็นผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้ประโยชน์ใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของยางรีเคลม โดยเน้นศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางรีเคลมได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics), สมบัติเชิงกล (Mechanical properties), และสัณฐานวิทยา (Morphology) ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนสารรีเคลม (Reclaiming agents), ผลของขนาดอนุภาคของผงยาง (Particle sizes), ชนิดของวัตถุดิบ และชนิดของสารตัวเติม (Fillers) ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

5.1 สรุปผลการทดลอง

- ผลการศึกษาการใช้ปริมาณสารรีเคลม 2.0-2.4 phr ทั้งวัตถุดิบจากผงยางรถยนต์ 20 mesh (RR-TR20) และถุงมือยาง (RR-GL) พบว่าการเพิ่มปริมาณสารรีเคลมไม่ได้ส่งผลให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยกับทั้งลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) และสมบัติเชิงกล จากการศึกษาพบว่าการใช้สารรีเคลมน้อยกว่า 2.0 phr ไม่สามารถทำให้เกิดการผสมและการรีเคลมได้อย่างทั่วถึง และการใช้สารรีเคลมมากกว่า 2.0 phr จะได้สมบัติเชิงกลที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก และเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต ดังนั้นจึงทำการเลือกใช้ปริมาณสารรีเคลม 2.0 phr

- ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 20 mesh (RR-TR20) มีสมบัติเชิงกลดีกว่ายางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30) แต่ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ขนาด 30 mesh (RR-TR30) จะมีความนิ่มและความเรียบเนียนของพื้นผิวสูงกว่า

- ยางรีเคลมจากถุงมือยาง (RR-GL) มีสมบัติดีมากในทุกๆด้าน ยางรีเคลมจากผงยางรถยนต์ (RR-TR20) มีสมบัติเชิงกลดี ยางรีเคลมจากยางฟองน้ำ (RR-SP) และยางรีเคลมจากถุงมือยางเกรด2 (RR-GL2) จะมีความนิ่มของเนื้อยางสูง

- การใช้สารตัวเติม Supporter แตกต่างกัน ส่งผลให้ลักษณะการเชื่อมโยงของยางรีเคลมที่เตรียมได้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยและสมบัติเชิงกลต่างกันเล็กน้อย โดยจากการทดลองพบว่าซิลิกาเป็นสารตัวเติม Supporter ที่ดีที่สุดในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.5.1 ควรทำการผสมยางรีเคลมชนิดต่างๆ เข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางรีเคลมให้มีความหลากหลายมากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการปรับปรุงต้นทุนในการเลือกใช้งานยางรีเคลมด้วย

5.5.2 ควรทดสอบสมบัติบางประการของยางรีเคลมเพิ่มเติมเช่น ค่าความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance), ค่าการเสียรูปถาวร (Compression set) เป็นต้น เพราะสมบัติเหล่ามีความจำเป็นต่อการพิจารณาเลือกยางรีเคลมไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. สมาคมยางพาราไทย. 2551. **"สถิติการส่งออกยาง"**. [Online].Available : http://www.thainr.com/th/?detail=stat-thai
2. สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. **"นวัตกรรมการใช้ประโยชน์จากการแปรรูปยางรถยนต์ที่ใช้ แล้ว ครั้งที่ 3"**.2547
3. อรสา อ่อนจันทร์, 2549, **พอลิเมอร์.**[Online].Available : http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_8_2549_plastic-1.pdf
4. Liu, H.S. Richard C.P., Mead J.L. and Stacer R.G..1999. **"Study Examinees Use of Recycled Rubber in Thermoplastic Blends"**. [Online]. Available : http://www.scaptirenews.com
5. พนิตา สุมานะตระกูล, ชญานุช แสงวิเชียร, อรสา ภัทรไพบูลย์ชัย. 2552. **"อิทธิพลของยางรีเคลมต่อผลของคุณสมบัติการเชื่อมโยงและคุณสมบัติเชิงกลของของผสมเทอร์โมพลาสติก อิลาสโตเมอร์"**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
6. บริษัท ออลเทรด รีซอสเซส (ประเทศไทย) จำกัด. **"Product info"**.
7. Indian Rubber institute. **Rubber Engineering**. India : The McGraw – Hill companies. 2000. pp 59, 711 – 713
8. Alan C.2004. "**Evaluation of Waste Tire Devulcanization Technologies"**. [Online]. Available: http://www.ciwmb.ca.gov/Publications/Tires/62204008.pdf
9. Adhikari B., De D. and Maiti S..2000. "**Reclamation and recycling of waste rubber"**. [Online]. Available : http://www.sciencedirect.com
10. หน่วยเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (ศาลายา) จังหวัดนครปฐม. 2549. **"ชนิดของยางและการใช้งาน".** [Online]. Available : http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm
11. อิทธิพล แจ้งชัด. **"เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีการยาง"**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552
12. พงษ์ธร แซ่อุย และชาคริต สิริสิงห. "**กระบวนการผลิตและการทดสอบยาง**". ปทุมธานี. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2550.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. กระบวนการวัลคาไนเซชัน. 2553. **"ระบบวัลคาไนเซชันกำมะถัน"**. [Online]. Available : http://mali1992.wordpress.com/.../**กระบวนการวัลคาไนเซชัน**-vulcaniza/

14. Sufre. 2552.**"Sufre-molekularenegitura"**.[Online].Available :http://eu.wikipedia.org/wiki/Sufre

15. Silk Biochemical Co., Ltd. 2552.**"Thiazole"**. [Online]. Available : http://www.diytrade.com/china/4/manufacturers/158081/products-list.html

16. Chemical book. 2547.**"Sulfenamide"**. [Online]. Available : http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB9344237.htm

17. อิทธิพล แจ้งชัด. "**การทดลองที่ 1 การผสมและเชื่อมโยงยาง : อิทธิพลของสารตัวเติม**".เอกสารประกอบการสอนวิชาปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.

18. John S.. "**Polymer Recycling : Science, Technology and Application**". John Wiley & Sons: Chichester, Inc., 1998,24(4) : 412-426

19. พงษ์ธร แซ่อุย.วิทยศาสตร์และเทคโนโลยีการยาง .2552. **"การประยุกต์ใช้งานของผงยาง"** [Online]. Available : http://www.rubbercenter.org/informationcenter/file/magazine9.pdf

20. Makarov V.M. and Drozdovski V.F.. "**Reprocessing of Tyres and Rubber Wastes Recycling from the Rubber Products Industry**". Ellis Horrwood, 1991,22(3) : 315-320

21. Arihant oil chemicals.2005. "**Rubber Reclaiming Agent**" [Online]. Available :http://www.alibaba.com/product/arihantoils-11558154-10982278/Rubber_Reclaiming_Agent.html

22. Manufacturing process rubber latex. 2553. **"การเชื่อมโยงยาง".**[Online]. Available : http://staff.kmutt.ac.th/~isirsang/men%20333%20Manufacturing%20process%20of%20rubber%20latex%20(W9)-1-2533.pdf

23. ศิริชัย พัฒนวาณิชชัย. 2543.**"ผลิตภัณฑ์โฟมยาง".** [Online]. Available : http://www.rubbercenter.org/files/foam.pdf

24. ASTM D 412 Committee on standard. Standard Test Method from Valcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer-Tension. Thailadethai : American Society from Testing and Material. 1992.

25. DUMBBELL CO.,LTD. 2008. **"รูปดัมเบลล์".** [Online]. Available : http://www1.odn.ne.jp/aal63880/CUTTER01-E.htm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26. ASTM D 624 Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers. Thailadethai : American Society from Testing and Material.1991.

27. Ides. The Palstics Web. 2005. **"Tear Strength".** [Online]. Available : http://www.ides.com/property_descriptions/ASTMD624.asp

28. ASTM D 2240 Committee on standard.Standard Test Method from Rubber Property-Durometer Hardness. Thailadethai: American Society from Testing and Material.1991.

29. วราภรณ์ ขจรไชยกุล และวิภา เศวตกนิษฐ์. 2549. **"การผลิตยางรีเคลมจากถุงมือยางเสีย".** [Online]. Available :http://www.rubberthai.com/research/year/38/3..htm

30. Balogh G. and Samay G. **"Possibilities of Recycling Tyre Waste".** International Polymer Science and Technology., 1996, 23(11) : 86-91.

31. Sombatsompop N. and Kumnuantip C. **"Rheology, Cure Characteriscs, Physical and Mechanical Properties of Tire Tread Reclaimed Rubber/Natural Rubber Compound".** Journal of Applied Polymer Science., 2003,87(2) : 1723-1731.

32. Robert W. **"The Rubber International Magazine".** 2001,14(4) : 59-99.

33. วศิน จิรไพศาลกุล . **"การผลิตท่อน้ำซึมจากยาง รีเคลมและผงยางรถยนต์".** โครงงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

34. De D., Das A., Dey B., Debnath S. and Roy B.. **"Reclaiming of ground rubber tire (GRT) by a novel reclaiming agent".** European Polymer Journal., 2006, 42(2) : 917– 927.

35. วิภา จันทรักษ์ .2546. **"การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิสโตเมอร์จากเศษถุงยางธรรมชาติดัดแปลงสภาพผิวด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์เบลนด์กับพอลิพรอพิลีน".** [Online]. Available : http://www.sat.psu.ac.th/polymer2008/standard/4.5.1.2549.htm

36. Patarapaiboolchai, O., Tulayapitak, T. and Sriwang, I. **"Recycled gloves as a filler".** Songklanakarin Journal. Science. Technology., 2002, 24(4) : 701-706

37. พนิตา สุมานะตระกูล .2549. **"อิทธิพลของยางรีเคลมต่อผลของสมบัติการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของของผสมเทอร์โมพลาสติกอิสโตเมอร์".** [Online]. Available : http://www.sat.psu.ac.th/polymer2008/standard/4.5.1.2549.htm

38. ซีตีไซยีดะห์ สายวารี .2552. **"รีเคลมเศษถึงมือยางธรรมชาติ".** [Online]. Available : http://www.scisoc.or.th/stt/34/sec_e/paper/STT34_E_E0004.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

39. พิพัฒน์ไทยเจริญ .2551. **"กระบวนการดีวัลคาไนเซชันในยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยวิธีเชิงกลร่วมเคมีในยางธรรมชาติวัลคาไนซ์".** [Online]. Available : http://www3.eng.psu.ac.th/pec/6/pec6/paper/MaE/PEC6OR143.pdf

40. อทิตยา โต๊ะสัน. 2550. **"สมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซตจากวัสดุดัดแปลงจากยางรถยนต์และพลาสติกนำกลับมาใช้ใหม่".** [Online]. Available : http://www.sat.psu.ac.th/polymer2008/standard/4.5.1.2549.htm

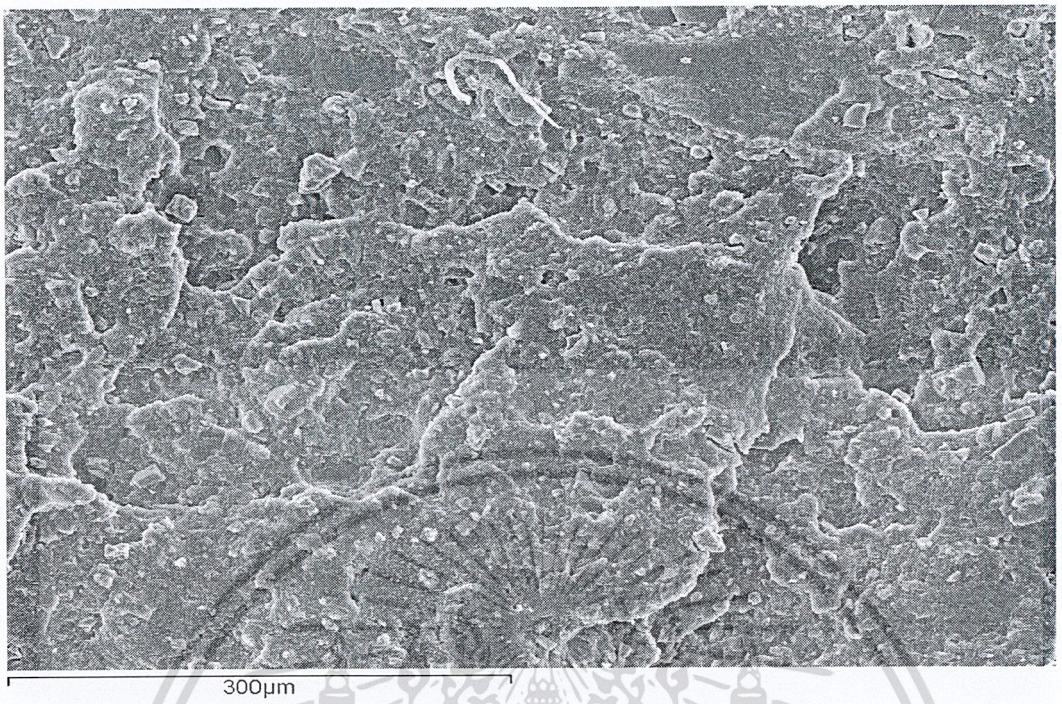
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

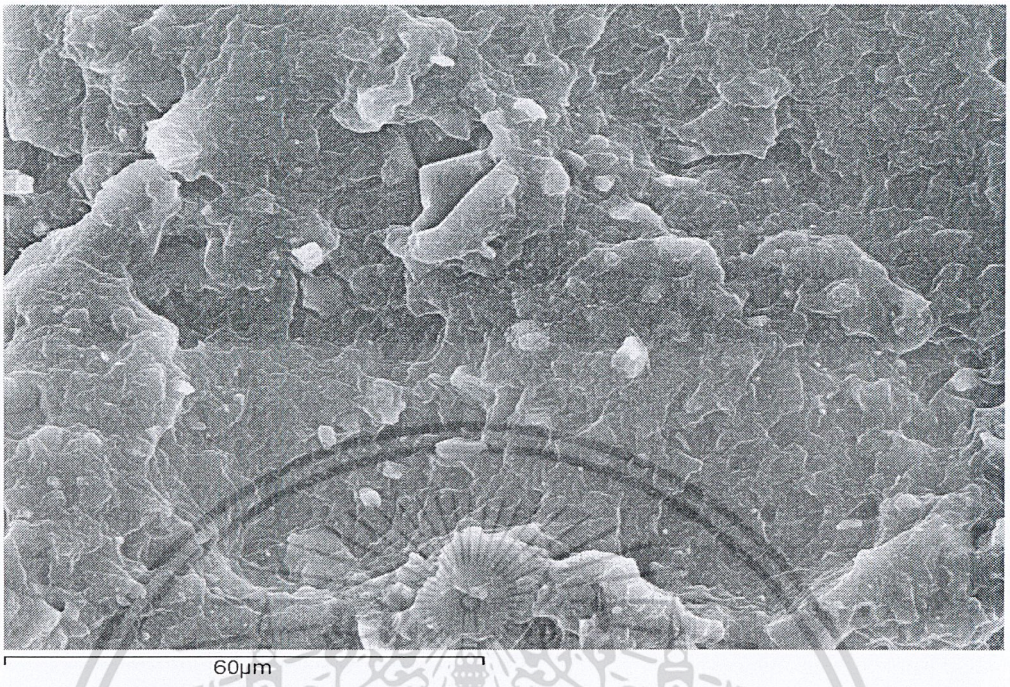


รูปที่ ก.1 ภาพ SEM ของ RR-TR20-Ca กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ ก.2 ภาพ SEM ของ RR-TR20-Ca กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 ภาพ SEM ของ RR-TR20-Ca กำลังขยาย 1000 เท่า

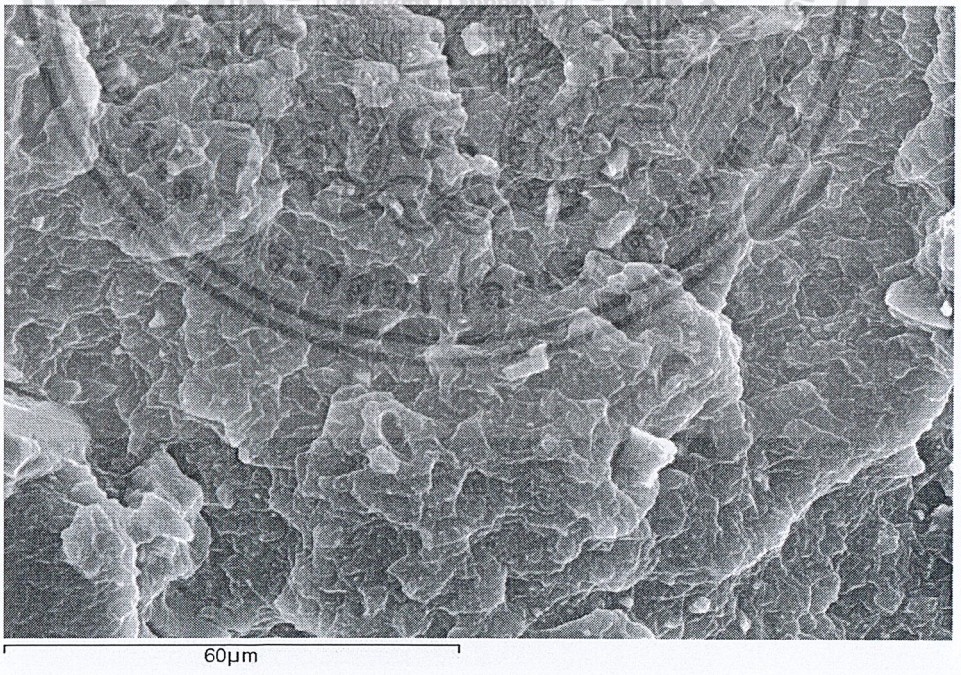


รูปที่ ก.4 ภาพ SEM ของ RR-TR20-Si กำลังขยาย 200 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

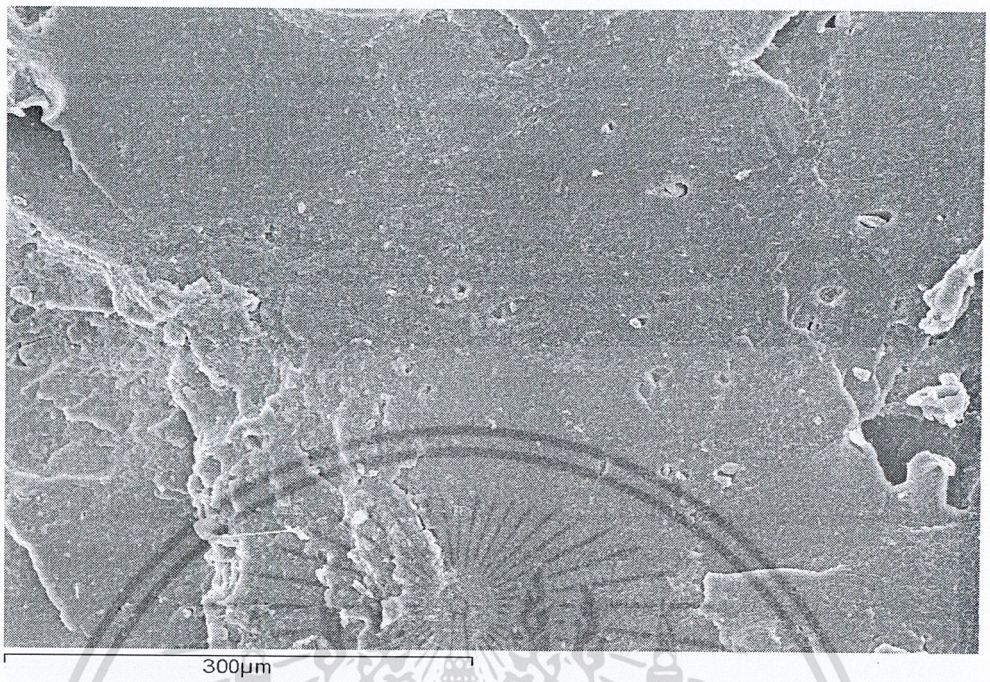


รูปที่ ก.5 ภาพ SEM ของ RR-TR20-Si กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ ก.6 ภาพ SEM ของ RR-TR20-Si กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

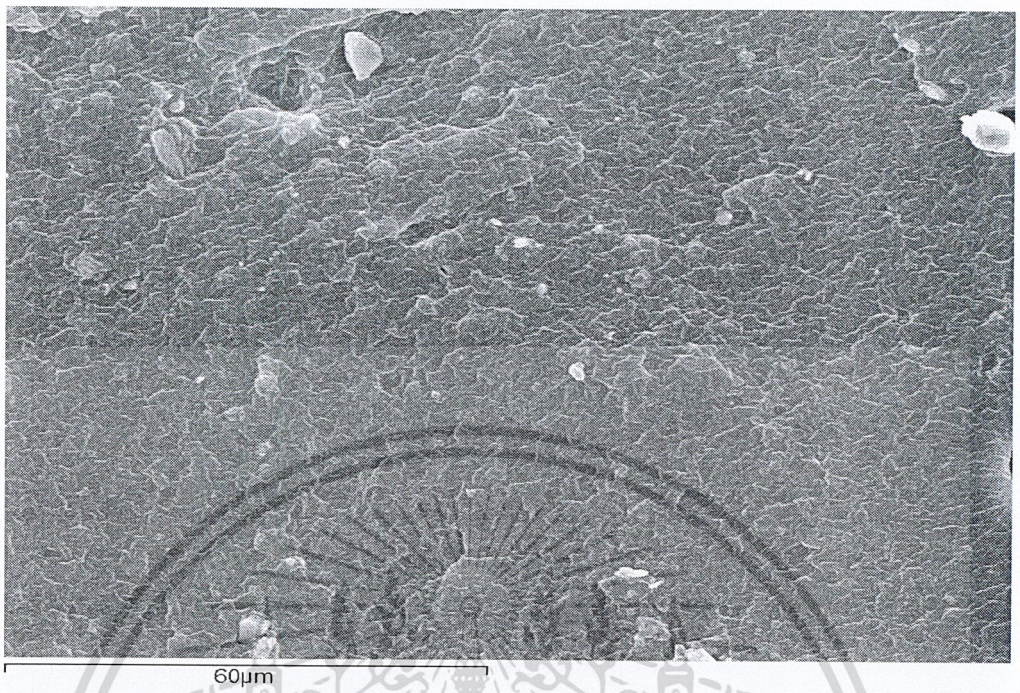


รูปที่ ก.7 ภาพ SEM ของ RR-TR20-SiHS กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ ก.7 ภาพ SEM ของ RR-TR20-SiHS กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

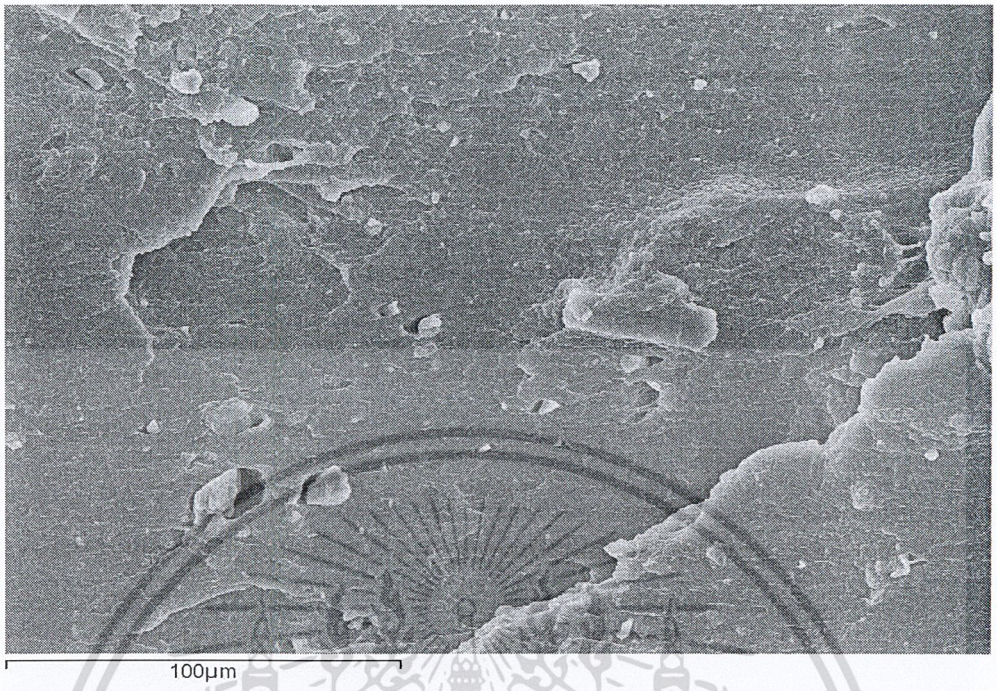


รูปที่ ก.8 ภาพ SEM ของ RR-TR20-SiHS กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ ก.9 ภาพ SEM ของ RR-TR20 กำลังขยาย 200 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

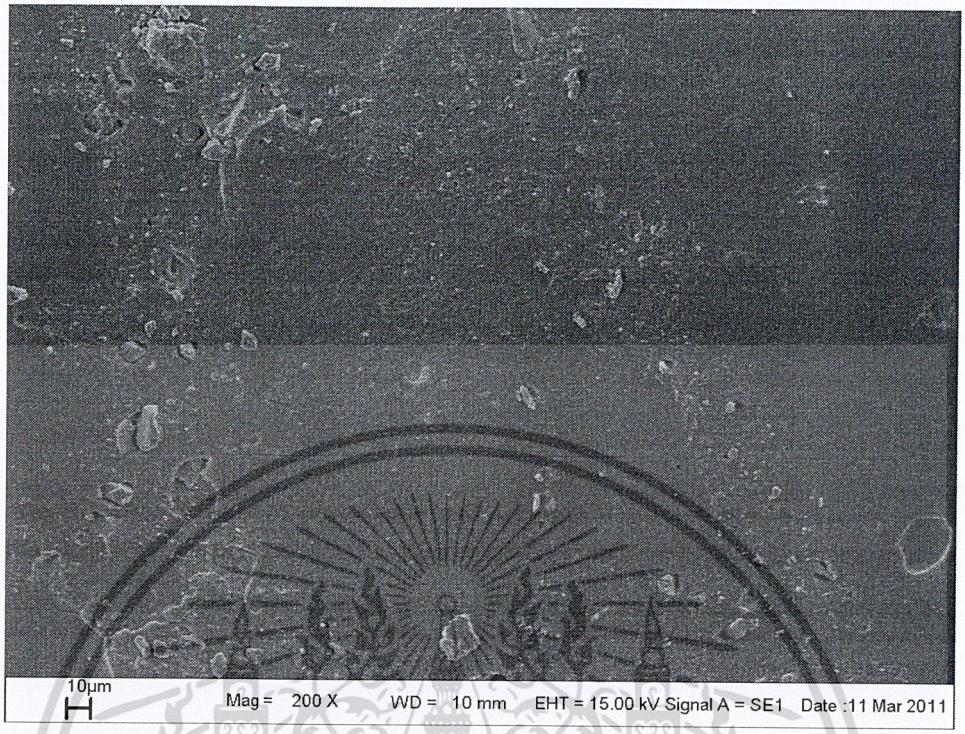


รูปที่ ก.10 ภาพ SEM ของ RR-TR20 กำลังขยาย 500 เท่า

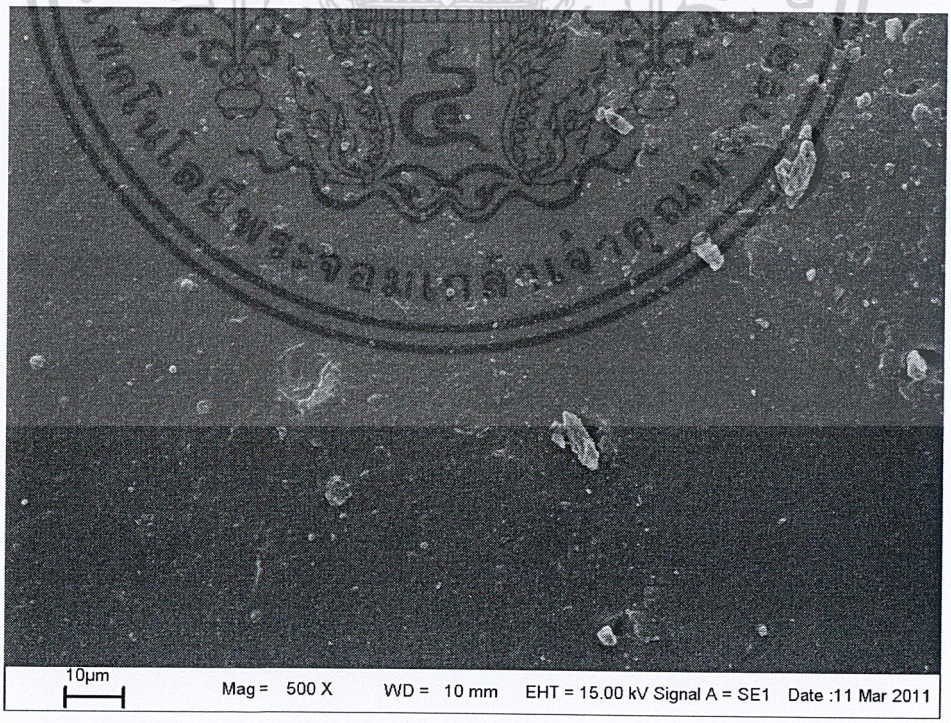


รูปที่ ก.11 ภาพ SEM ของ RR-TR20 กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

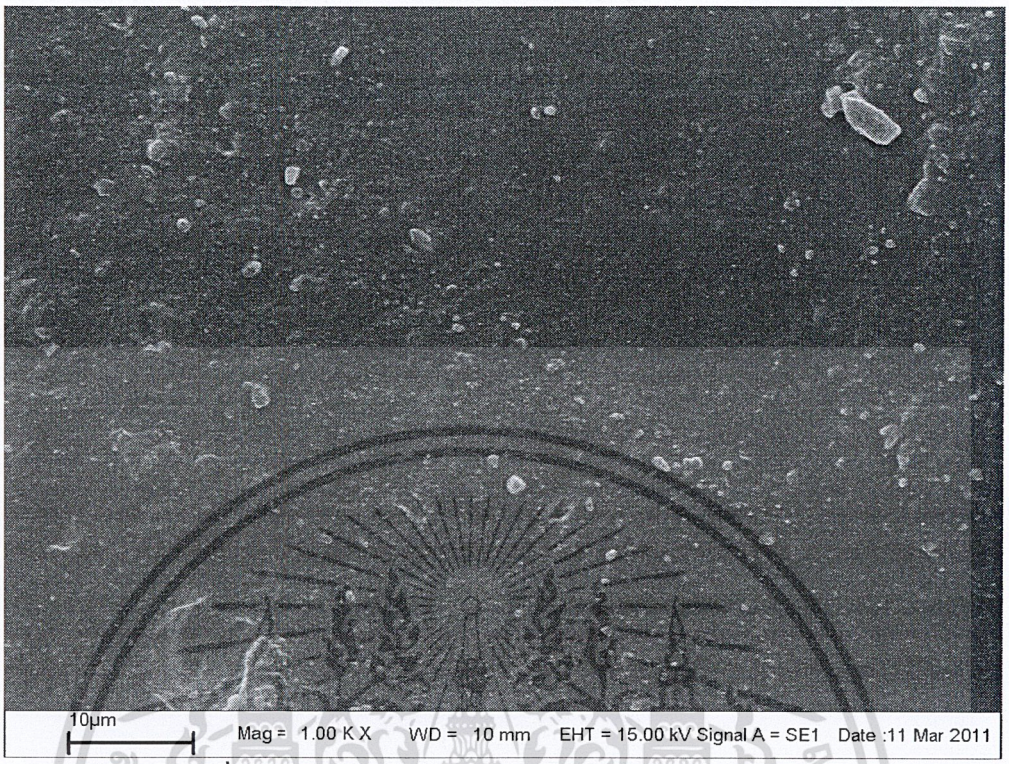


รูปที่ ก.12 ภาพ SEM ของ RR-TR30 กำลังขยาย 200 เท่า

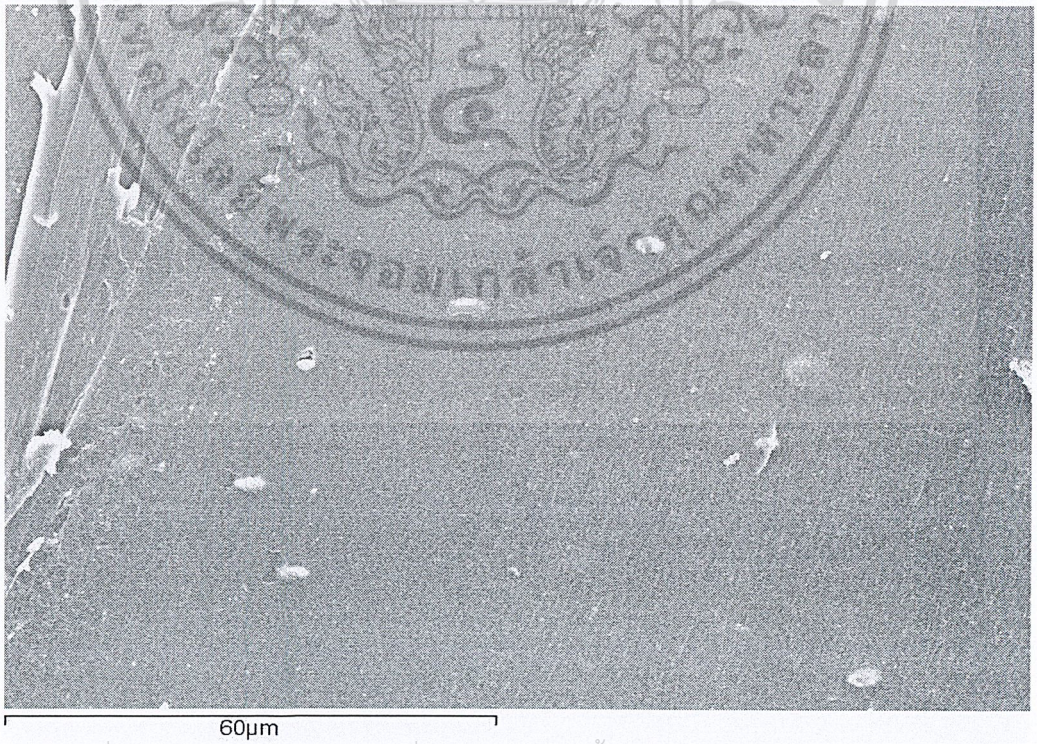


รูปที่ ก.13 ภาพ SEM ของ RR-TR30 กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

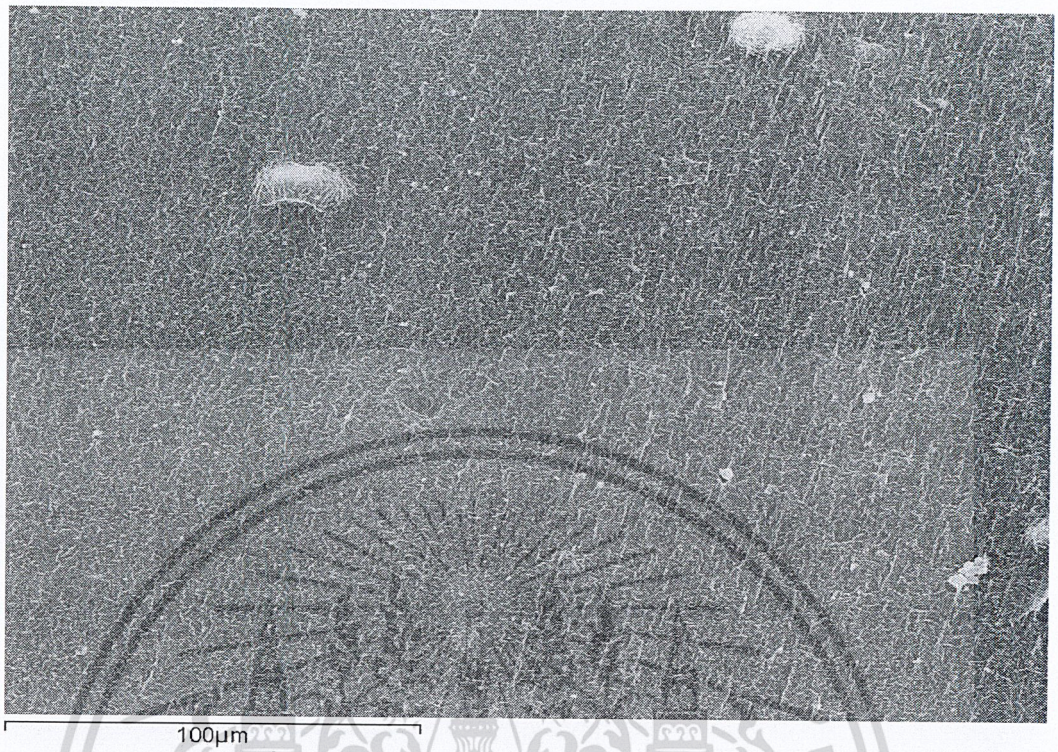


รูปที่ ก.14 ภาพ SEM ของ RR-TR30 กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ ก.15 ภาพ SEM ของ NR กำลังขยาย 200 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.16 ภาพ SEM ของ NR กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ ก.17 ภาพ SEM ของ NR กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

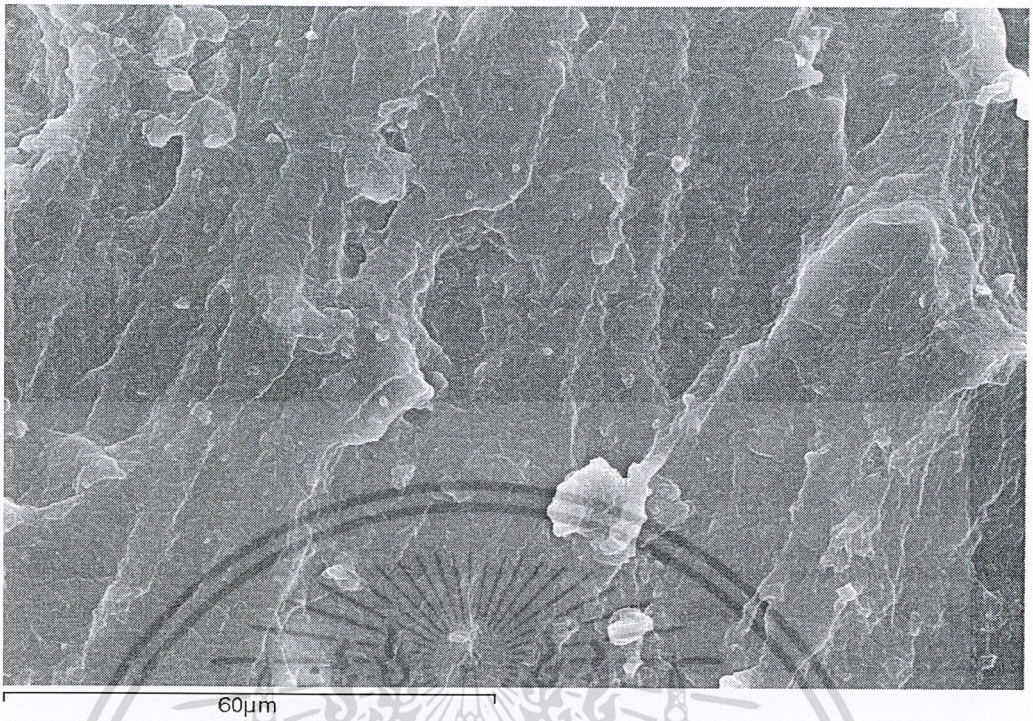


รูปที่ ก.18 ภาพ SEM ของ RR-SP กำลังขยาย 200 เท่า

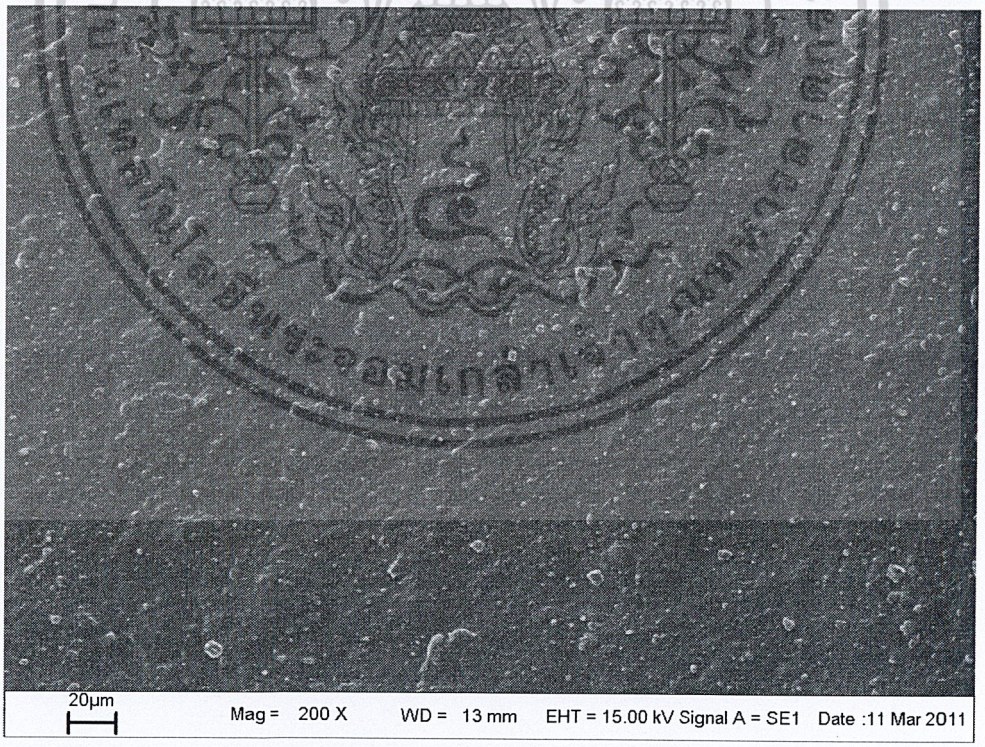


รูปที่ ก.19 ภาพ SEM ของ RR-SP กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

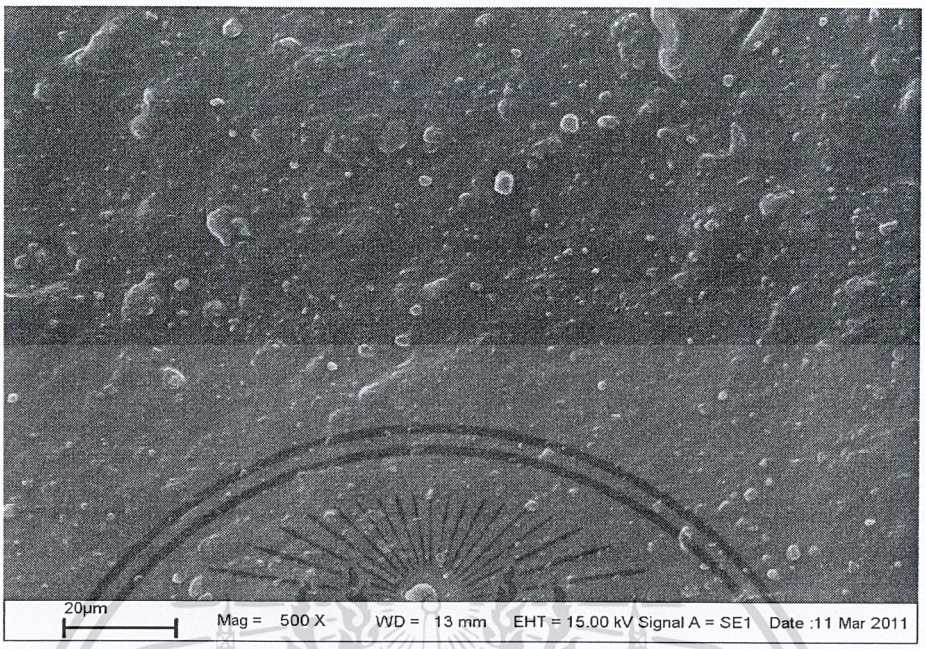


รูปที่ ก.20 ภาพ SEM ของ RR-SP กำลังขยาย 1000 เท่า

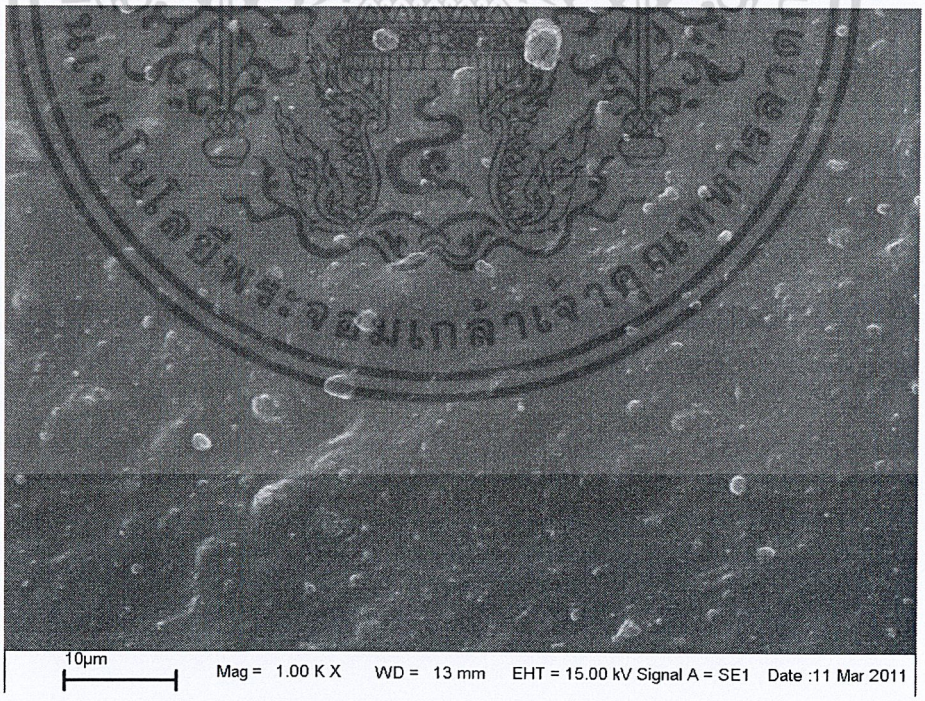


รูปที่ ก.21 ภาพ SEM ของ RR-GL กำลังขยาย 200 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

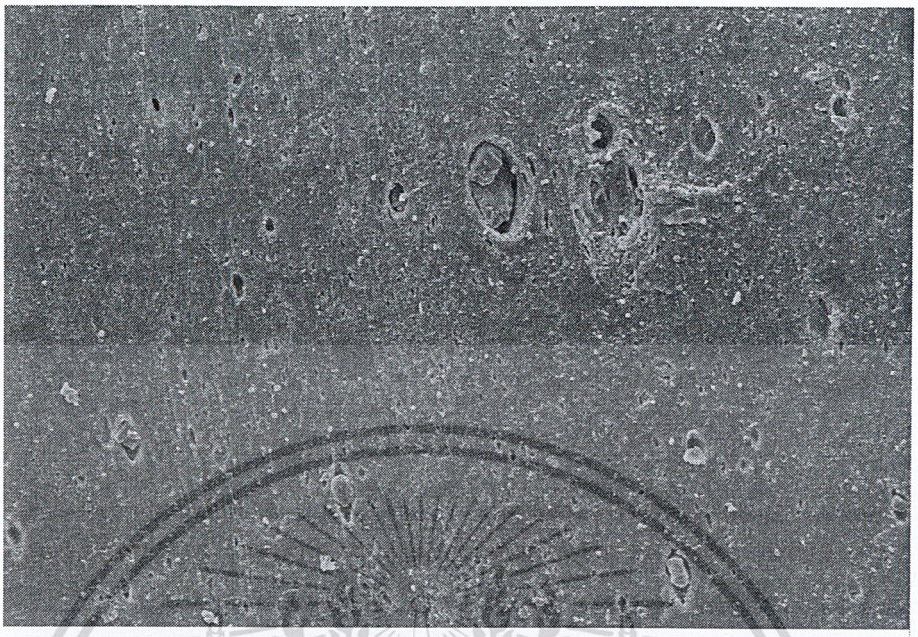


รูปที่ ก.22 ภาพ SEM ของ RR-GL กำลังขยาย 500 เท่า

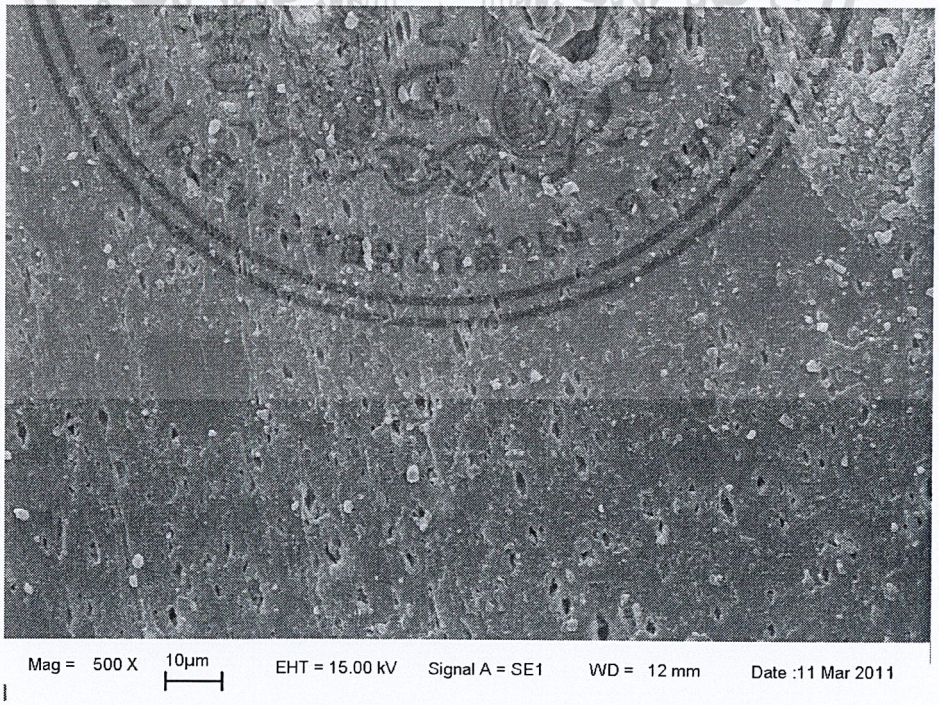


รูปที่ ก.23 ภาพ SEM ของ RR-GL กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

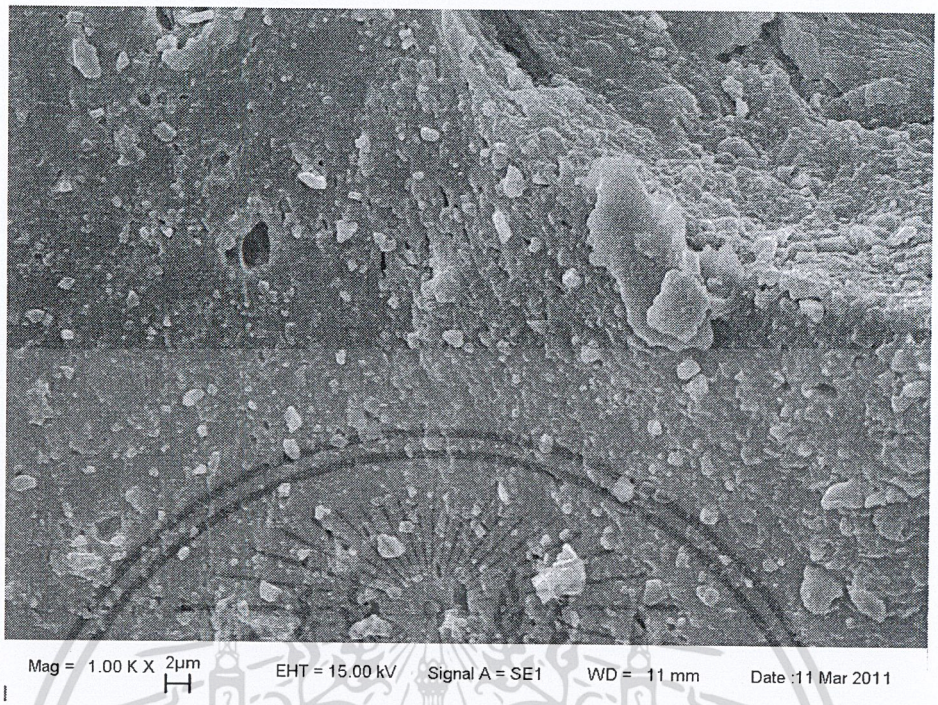


รูปที่ ก.24 ภาพ SEM ของ RR-GL(2) กำลังขยาย 200 เท่า

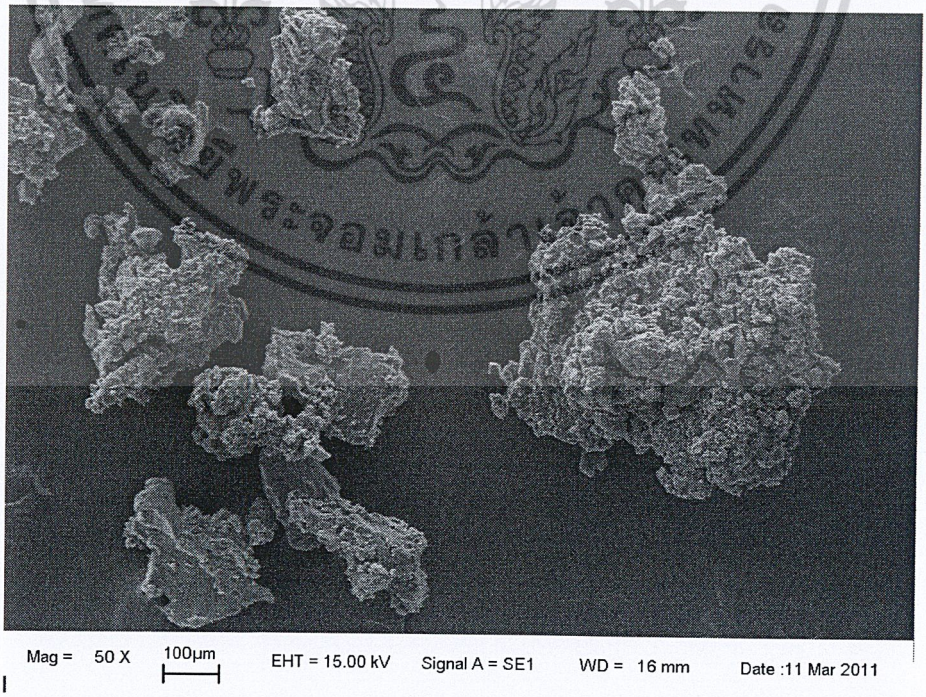


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.25 ภาพ SEM ของ RR-GL(2) กำลังขยาย 500 เท่า

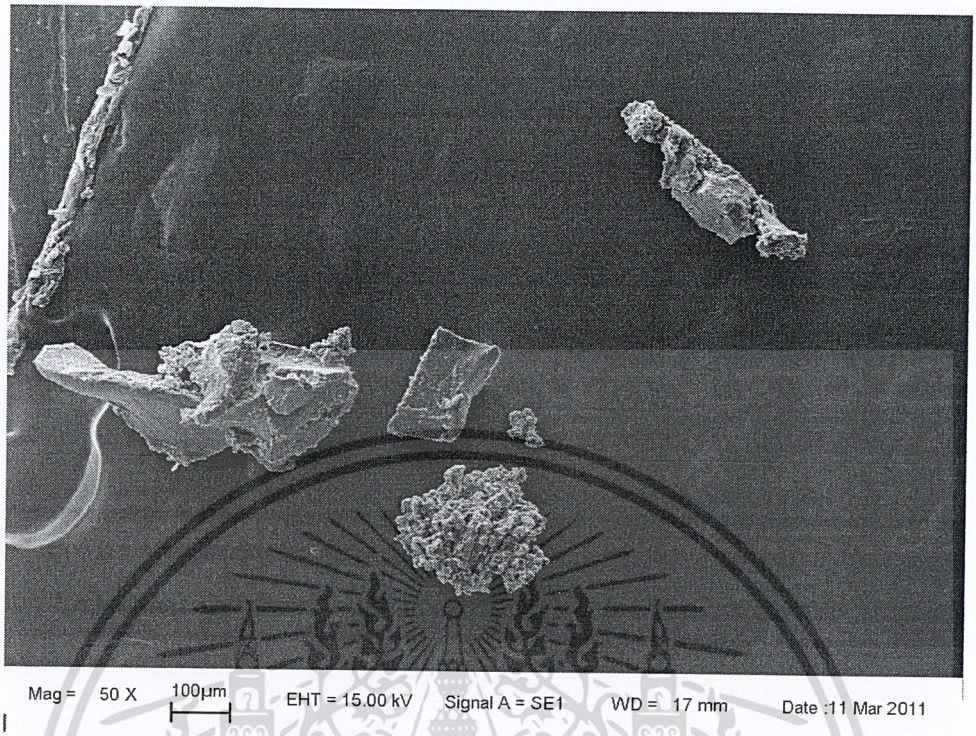


รูปที่ ก.26 ภาพ SEM ของ RR-GL(2) กำลังขยาย 1000 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.27 ขนาดอนุภาคผงยาง RR-TR20 กำลังขยาย 50 เท่า



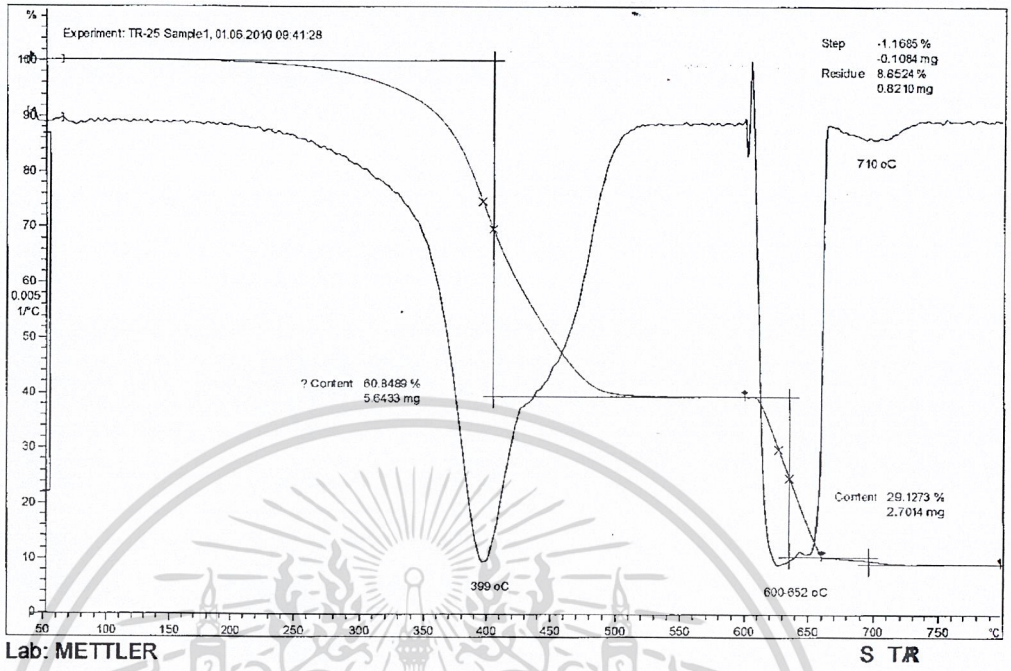
รูปที่ ก.28 ขนาดอนุภาคผงยาง RR-TR30 กำลังขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

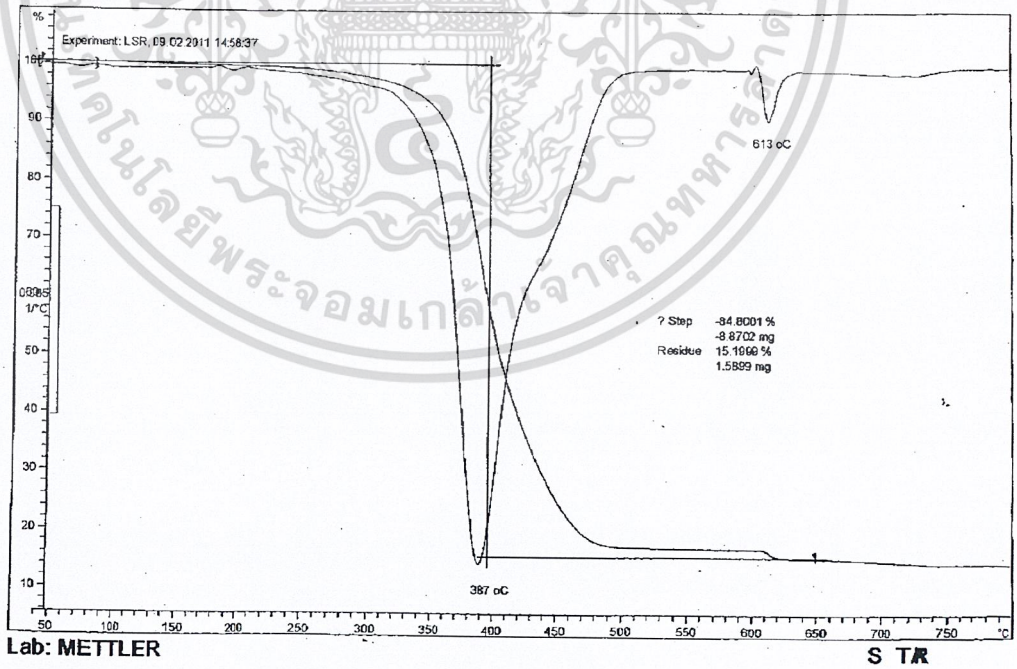
ภาคผนวก ข

TGA thermogram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

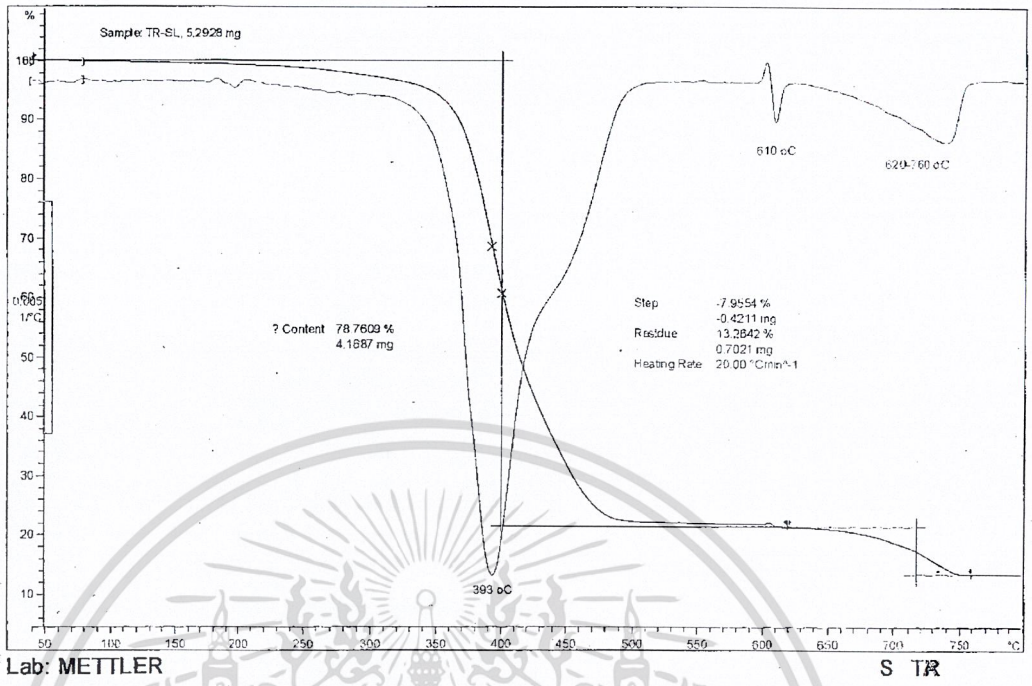


รูปที่ ข.1 ผงยางรถยนต์ (RR-TR)

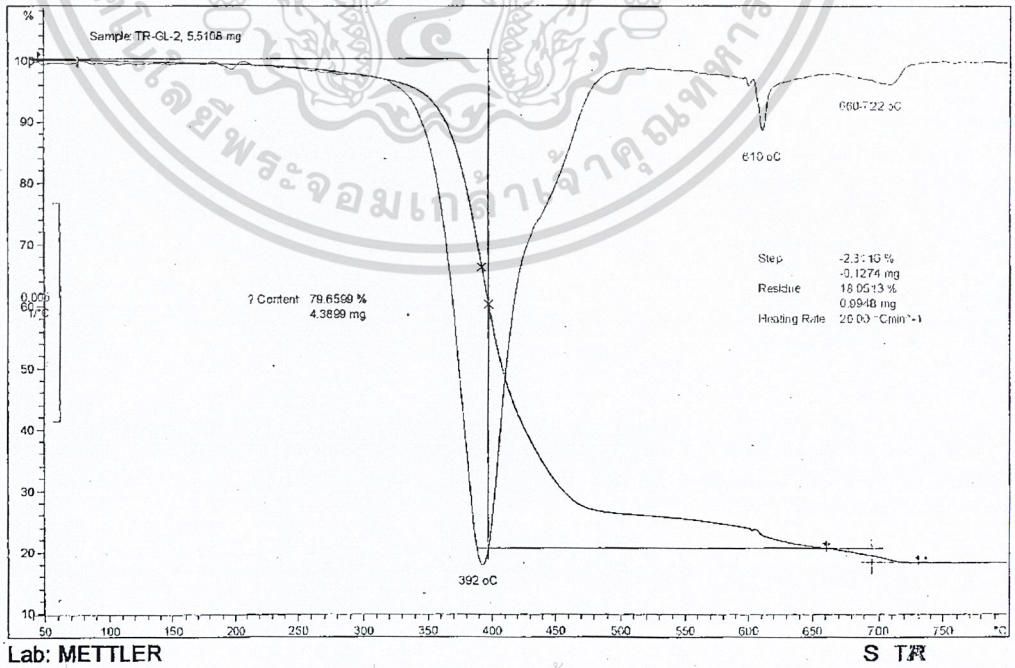


รูปที่ ข.2 ยางฟองน้ำ (RR-SP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 ถุงมือยาง (RR-GL)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.4 ถุงมือยาง (RR-GL 2)