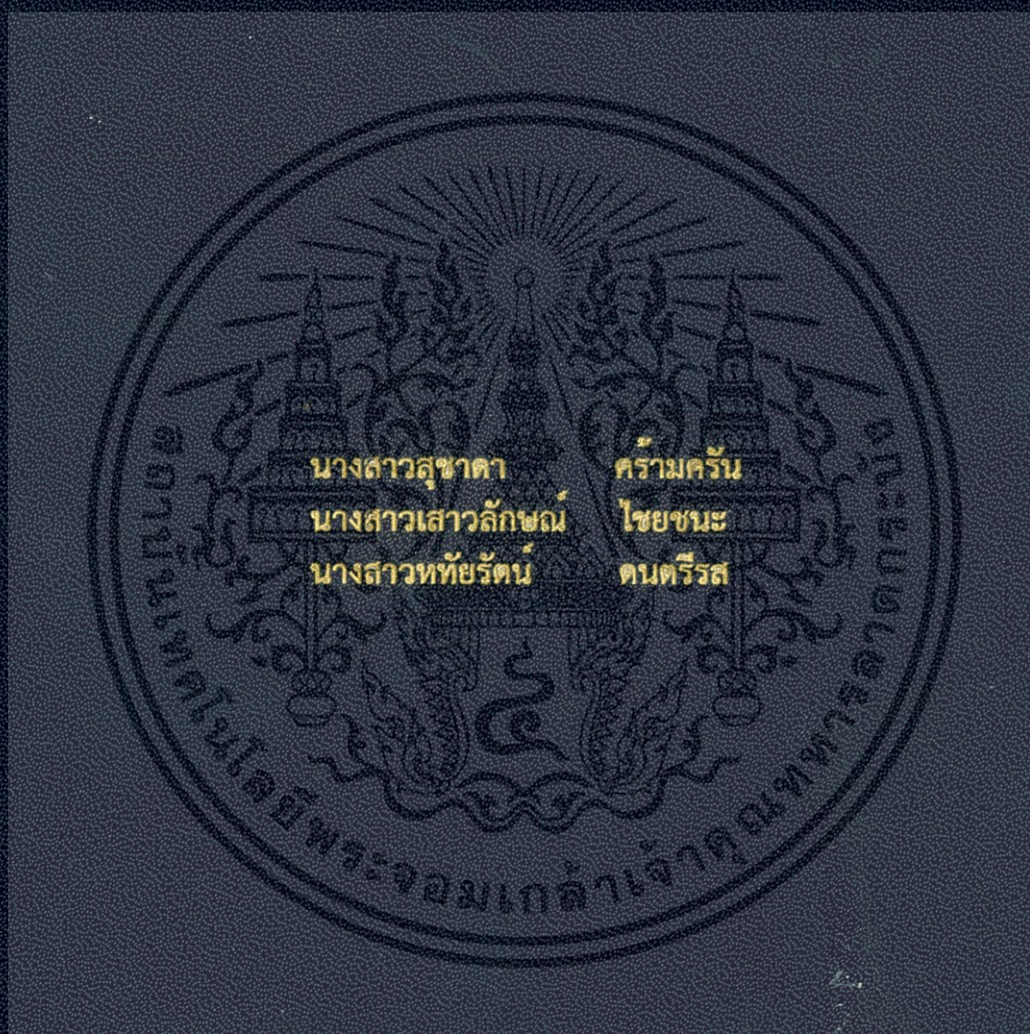


การใช้ประโยชน์หนวดยางเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตยางรถยนต์

UTILIZATION OF PIN VENT RUBBER FROM
TIRE MANUFACTURING PROCESS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การใช้ประโยชน์หนวดยางเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตยางรถยนต์

UTILIZATION OF PIN VENT RUBBER FROM
TIRE MANUFACTURING PROCESS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UTILIZATION OF PIN VENT RUBBER FROM
TIRE MANUFACTURING PROCESS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การใช้ประโยชน์หมวดยางเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตยางรถยนต์ UTILIZATION OF PIN VENT RUBBER FROM TIRE MANUFACTURING PROCESS		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสุชาดา	คร้ามครัน	รหัสนักศึกษา 54050301
	นางสาวเสาวลักษณ์	ไชยชนะ	รหัสนักศึกษา 54050322
	นางสาวหทัยรัตน์	ดนตรีรส	รหัสนักศึกษา 54050323
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด		

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. สุภรัตน์ รักชลธี ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน กรรมการ	
รศ.ดร. อิทธิพล แจ่มชัด กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การใช้ประโยชน์หน่วยยางเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตยางรถยนต์		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสุชาดา	คร้ามครัน	รหัสนักศึกษา 54050301
	นางสาวเสาวลักษณ์	ไชยชนะ	รหัสนักศึกษา 54050322
	นางสาวหทัยรัตน์	ดนตรีรส	รหัสนักศึกษา 54050323
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. อธิพล แจ่มชัด		

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตยางรถยนต์มีขยะหน่วยยาง (Pin vent rubber, PVR) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก - งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการใช้ประโยชน์จากหน่วยยาง ในการใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ (STR - 5L NR) โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของยาง ได้แก่ ปริมาณหน่วยยาง (0 - 125 phr) ขนาดของหน่วยยาง (หน่วยยางที่ได้รับ และแบบบด) และการปรับปรุงสมบัติด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวหน่วยยางด้วยกรดไนตริก, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโซลีน ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง และอัดเป็นตัวอย่างด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณหน่วยยางทำให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และไม่มีผลต่อลักษณะการเชื่อมโยงยาง ยกเว้นที่ปริมาณ 125 phr อย่างไรก็ตามการใส่หน่วยยางปริมาณมาก (125 phr) ทำให้ผสมเข้ากันได้ยากและเกิดรอยดำหิ ยืนยันจากภาพสัณฐานวิทยา จากการศึกษาผลของขนาดหน่วยยางที่ได้รับ (AR - PVR) เทียบกับแบบบด (GR - PVR) พบว่ายางที่ผสม GR - PVR มีค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด และความแข็งกดที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับยางที่ผสม AR - PVR เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวหน่วยยางด้วยสารต่างๆ พบว่า สารออกซิไดซ์ซิงค์และตัวทำละลาย ทำลายพื้นผิว และทำให้หน่วยยางมีความขรุขระ แต่ทำให้สมบัติเชิงกลของยางผสม PVR ลดลง และทำให้ยางเชื่อมโยงช้าลง สรุปได้ว่าสามารถใช้ PVR ที่ได้รับ และไม่ต้องการปรับปรุงผิว เป็นสารตัวเติมใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมาก เช่น ยางบล็อกปูพื้น พื้นยางนัม ฯลฯ

คำสำคัญ : ขยะยางรถยนต์, ยางธรรมชาติ, สารตัวเติม, หน่วยยาง,

Title	Utilization of Pin Vent Rubber from Tire Manufacturing Process		
Students	Miss Suchada	Kramkran	Student ID 54050301
	Miss Saowaluck	Chaichana	Student ID 54050322
	Miss Hathairat	Dontriros	Student ID 54050323
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Academic Year	2014		
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud		

ABSTRACT

Nowadays, a large amount of pin vent rubber (PVR) waste has been produced from tire manufacturing process. The research work was focused on utilization of PVR as fillers for natural rubber (STR - 5L NR). Some factors affecting rubber properties was studied, such as, PVR loading (0 - 125 phr), sizes of PVR (as received PVR, AR - PVR and ground PVR, GR - PVR) and surface treatment by HNO₃, H₂O₂, and xylene. Rubbers, PVR, and other additives were compounded by using a two - roll mill, and shaped into samples by compression molding technique. It was found that mechanical properties of PVR filled rubbers had trends to slightly decrease as PVR loading was increased. Addition of PVR showed insignificant effect to cure characteristics, except at high loading (125 phr). However, difficulty in mixing was found at high PVR loading (e.g. 125 phr) yielding voids as seen in SEM images. By studying the sizes of PVR (AR - PVR vs. GR - PVR), it was found that tensile strength, tear resistance, and hardness of the GR - PVR filled NR showed trends to decrease, compared to those of AR - PVR filled NR. By surface treating the PVR with chemicals and solvent, it was found that surface roughness of PVR was created. However, mechanical properties of treated PVR filled NR were deteriorated. It caused cure time to increase. It can be concluded that AR - PVR without treatment can be used as filler for NR. However, precaution is needed for high loadings and might suitable for low - strength products, such as, rubber block road, fall - proof floor, etc.

Keywords : Tire waste, Natural rubbers (NR), Fillers, Pin Vent Rubber (PVR)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธี และผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบโครงการพิเศษ ตลอดจนให้คำแนะนำโครงการพิเศษนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท โยโกฮามา ไทร์ แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด สำหรับการสนับสนุนด้านวัสดุดิบหนวดยางเหลือทิ้ง

ขอขอบคุณ คุณขวัญใจ พูลสวัสดิ์ ผู้ช่วยวิจัย ที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ ในการทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ Polymer workshop สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้สอนวิธีการใช้เครื่องมือและคอยอำนวยความสะดวกในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นแรงใจแรงกายที่สำคัญ และให้การสนับสนุนด้านการศึกษามาจนประสบความสำเร็จ

นางสาวสุชาดา

นางสาวเสาวลักษณ์

นางสาวหทัยรัตน์

คร้ามครัน

ไชยชนะ

ดนตรีรส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำย่อและสัญลักษณ์.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ยางคอมปาวด์ (Compound rubber).....	5
2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber).....	6
2.2.1 ส่วนประกอบของน้ำยาง.....	6
2.2.2 รูปแบบของยางธรรมชาติ.....	6
2.2.3 โครงสร้างโมเลกุลและสมบัติของยางธรรมชาติ.....	7
2.2.4 สมบัติของยางธรรมชาติ.....	8
2.3 สารเชื่อมโยงยาง (Crosslinking agent).....	9
2.3.1 ระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization).....	10
2.3.2 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators).....	13
2.3.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators).....	15
2.3.4 สมบัติของยางที่ผ่านการเชื่อมโยง.....	16
2.4 สารตัวเติมและสารเติมแต่งในยาง (Rubber fillers and additives).....	17
2.4.1 สารตัวเติม.....	17
2.4.2 สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders).....	18
2.4.3 สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids).....	19
2.4.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Protective agents).....	19
2.4.5 สารเติมแต่งชนิดอื่นๆ.....	19
2.5 กระบวนการผลิตยางรถยนต์.....	20
2.5.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของยางรถยนต์.....	20
2.5.2 ขั้นตอนการผลิตยางรถยนต์.....	21
2.6 ลักษณะหนวดยางและกลไกการยึดติด.....	23
2.6.1 กลไกการยึดติดเชิงกล (Mechanical interlocking).....	24
2.6.2 การยึดติดแบบแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion).....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 แผนการดำเนินการ.....	37
3.2 สารเคมีและอุปกรณ์.....	38
3.3 วิธีการทดลอง	39
3.3.1 ตอนที่ 1. ศึกษาผลของปริมาณหน่วยยาง	39
3.3.2 ตอนที่ 2 ศึกษาผลของขนาดหน่วยยาง	40
3.3.3 ตอนที่ 3. ศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว	41
3.3.3.1 ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารออกซิไดซ์ซิง	41
3.3.3.2 ปรับปรุงพื้นผิวด้วยตัวทำละลาย.....	42
3.3.4 ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics).....	44
3.3.5 การศึกษาผลของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางที่ได้ (Mechanical properties). 44	
3.3.5.1 การทดสอบการดึง (Tensile test).....	44
3.3.5.2 การทดสอบการฉีกขาด (Tear test).....	44
3.3.5.3 การทดสอบความแข็งกด (Hardness test).....	45
3.3.6 การศึกษาผลของขนาดหน่วยยางเฉลี่ย โดยใช้โปรแกรม ImageJ®.....	45
3.3.7 การศึกษาผลของสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM).....	45
3.3.8 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้น	45
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	47
4.1 ตอนที่ 1. ศึกษาผลของปริมาณหน่วยยาง	47
4.2 ตอนที่ 2 ศึกษาผลของขนาดหน่วยยาง	54
4.3 ตอนที่ 3. ศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว	58
4.3.1 การปรับพื้นผิวด้วยสารออกซิไดซ์ซิง.....	58
4.3.2 การปรับพื้นผิวด้วยตัวทำละลาย.....	62
4.4 ตัวอย่างการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์.....	73
4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนบล็อกปูพื้น.....	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.1.1 ตอนที่ 1. ศึกษาผลของปริมาณหน่วยยาง	76
5.1.2 ตอนที่ 2. ศึกษาผลของขนาดหน่วยยาง	76
5.1.3 ตอนที่ 3. ศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว	77
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
เอกสารอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ปริมาณการผลิตยางรถยนต์ และขยะหนวดยาง	3
2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ.....	6
2.2 สมบัติการไหล และสมบัติกายภาพของยางธรรมชาติที่เติมผงยางที่ปรับปรุงผิว	26
2.3 ผลการเชื่อมโยงของยางแต่ละสูตร.....	30
2.4 สูตรของคอมปาวด์	33
2.5 ค่าสมบัติเชิงกลของยางแต่ละสูตร	34
2.6 ยางสูตรต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
3.1 สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 1	40
3.2 สภาพที่เหมาะสมของการปรับปรุงพื้นผิวด้วย HNO_3	41
3.3 สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 3.1.....	42
3.4 ค่าการละลายของพอลิเมอร์ และตัวทำละลาย	42
3.5 สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 3.2.....	43
3.6 สูตรยาง EPDM ที่ใช้ในการขึ้นรูปบล็อกยางปูพื้น	46
4.1 ผลของปริมาณ AR - PVR ที่มีต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยางธรรมชาติ	49
4.2 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางธรรมชาติที่มีปริมาณหนวดยางที่ได้รับ (AR - PVR) และ หนวดยางที่ผ่านการบด (GR - PVR) แตกต่างกัน.....	54
4.3 ขนาดเฉลี่ยของหนวดยางที่ได้รับ (AR - PVR) และหนวดยางที่ผ่านการบด (GR - PVR) จากโปรแกรม ImageJ®	55
4.4 การหาสภาพที่เหมาะสมในการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด HNO_3	59
4.5 การหาสภาพที่เหมาะสมในการปรับปรุงพื้นผิวด้วย H_2O_2	61
4.6 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางสูตรที่ใช้หนวดยางชนิดปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว.....	64
4.7 ชั้นยาง EPDM ผสมกับ PVR	74
4.8 ชั้นยางธรรมชาติผสมกับ PVR	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 สັດส่วนการผลิตยางพาราของโลก.....	1
1.2 หนวดยางจากขั้นตอนการตัดตกแต่ง	2
1.3 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากหนวดยางเป็นยางบล็อกปูพื้น (Rubber block).....	3
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ (Cis - 1, 4 - polyisoprene).....	8
2.2 กราฟการเชื่อมโยง	10
2.3 โครงสร้างโมเลกุลยางแสดงอะไคลิกไฮโดรเจนซึ่งอยู่ในวงกลมเส้นประ	10
2.4 โครงสร้างผลึกของกำมะถันชนิดละลาย	11
2.5 โครงสร้างกำมะถันสัณฐานชนิดไม่ละลาย	11
2.6 ภาพกลไกการเชื่อมโยงยางด้วยกำมะถันโดยปราศจากสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง	12
2.7 ลักษณะพันธะการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในยาง.....	12
2.8 การเปรียบเทียบการเชื่อมโยงของยางที่เติมสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (เส้นทึบ) และยางที่ไม่เติมสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (เส้นประ)	14
2.9 กลไกการเชื่อมโยงของกำมะถันแบบมีสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง และสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง	15
2.10 กราฟสมบัติของยางที่ได้หลังจากเกิดการเชื่อมโยง.....	16
2.11 ส่วนประกอบของยางรถยนต์.....	20
2.12 กระบวนการผลิตยางรถยนต์.....	22
2.13 กระบวนการประกอบและขึ้นรูปยางรถยนต์.....	22
2.14 กระบวนการอบยางรถยนต์.....	23
2.15 กระบวนการตัดยางส่วนเกิน.....	23
2.16 ตัวอย่างหนวดยาง.....	24
2.17 กลไกการยึดติดเชิงกล	24
2.18 กลไกการยึดติดแบบแพร่เข้าหากัน.....	25
2.19 กราฟแสดงความหนืด (a) คือ PP ที่เติม RT และ (b) คือ HIPS ที่เติม RT	29
2.20 สเปกตรา FTIR ของผงยาง (1) ไม่ปรับปรุงผิว (2) ปรับปรุงผิวด้วย HClO ₄ (3) ปรับปรุงผิวด้วย HNO ₃ และ (4) ปรับปรุงผิวด้วย H ₂ SO ₄	32
2.21 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึง และปริมาณ GRP	33
2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) กับขนาดผงยางบดที่เติมลงไป ใน SBR (ผงยางบดปริมาณ 30 phr).....	35
2.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) กับปริมาณผงยางบดที่เติมลงไป ใน SBR (ผงยางบดขนาด 177 - 250 μm)	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย	37
3.2 (a) AR - PVR และ (b) GR - PVR.....	40
4.1 การกระจายตัวของ PVR บนเมทริกซ์ของยาง หลังจากการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (a) สูตรที่ประกอบไปด้วย PVR 50 phr และ (b) สูตรที่ประกอบไปด้วย PVR 125 phr	48
4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาด ของ CRAR กับปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปใในยางธรรมชาติ.....	50
4.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ของ CRAR กับปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปใในยางธรรมชาติ.....	50
4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของ CRAR กับ ปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปใในยางธรรมชาติ	51
4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ CRAR กับปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปใในยางธรรมชาติ.....	51
4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดึงยึด 100 และ 200 ของ CRAR กับปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปใในยางธรรมชาติ.....	52
4.7 ภาพสัณฐานวิทยา แสดงพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่เติม AR - PVR ปริมาณ 50 phr (a) กำลังขยายต่ำ (30 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (300 เท่า).....	53
4.8 ภาพสัณฐานวิทยา แสดงพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่เติม AR - PVR ปริมาณ 125 phr (a) กำลังขยายต่ำ (30 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (300 เท่า).....	53
4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาดของ CRAR และ CRGR กับ ปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปใในยางธรรมชาติ	55
4.10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ CRAR และ CRGR กับ ปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปใในยางธรรมชาติ	56
4.11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ CRAR และ CRGR กับ ปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปใในยางธรรมชาติ	56
4.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดึงยึด 100 ของ CRAR และ CRGR กับปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปใในยางธรรมชาติ.....	57
4.13 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดึงยึด 200ของ CRAR และ CRGR กับปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปใในยางธรรมชาติ.....	57
4.14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด ของ CRAR และ CRGR กับปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปใในยางธรรมชาติ.....	58
4.15 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของหนวดยางในแต่ละตัวทำละลาย	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 สีของ Xylene ที่เปลี่ยนไปเมื่อนำหนวดยางมาแช่ (a) แช่เป็นเวลา 1 วัน และ (b) แช่เป็นเวลา 3 วัน.....	63
4.17 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติความแข็งแรงฉีกขาดของชิ้นงานยางสูตรที่ปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว AR - PVR	65
4.18 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติความแข็งแรงดึงของชิ้นงานยางสูตรที่ปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว AR - PVR	65
4.19 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของชิ้นงานยางสูตรที่ปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว AR - PVR	66
4.20 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงานยางสูตรที่ปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว AR - PVR	67
4.21 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด 100 และ 200 ของชิ้นงานยางสูตรที่ปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว AR - PVR.....	67
4.22 ภาพสัณฐานวิทยาของ AR - PVR ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว (a) กำลังขยายต่ำ (50 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (200 เท่า)	68
4.23 ภาพสัณฐานวิทยาของ AR - PVR ที่ปรับปรุงผิวด้วย 5% HNO ₃ (a) กำลังขยายต่ำ (50 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (200 เท่า)	69
4.24 ภาพสัณฐานวิทยาของ AR - PVR ที่ปรับปรุงผิวด้วย 30% H ₂ O ₂ (a) กำลังขยายต่ำ (50 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (200 เท่า)	69
4.25 ภาพสัณฐานวิทยาของ AR - PVR ที่ปรับปรุงผิวด้วย Xylene (a) กำลังขยายต่ำ (50 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (200 เท่า)	69
4.26 สมการปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางธรรมชาติ	70
4.27 ภาพสัณฐานวิทยา แสดงพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่เติม AR - PVR ที่ไม่ปรับปรุงผิว ปริมาณ 50 phr (a) กำลังขยายต่ำ (30 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (300 เท่า)	71
4.28 ภาพสัณฐานวิทยา แสดงพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่ปรับปรุงผิว AR - PVR ด้วย 5% HNO ₃ (a) กำลังขยายต่ำ (30 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (300 เท่า)	71
4.29 ภาพสัณฐานวิทยา แสดงพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่ปรับปรุงผิว AR - PVR ด้วย 30% H ₂ O ₂ (a) กำลังขยายต่ำ (30 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (300 เท่า)	72
4.30 ภาพสัณฐานวิทยา แสดงพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่ปรับปรุงผิว AR - PVR ด้วย Xylene (a) กำลังขยายต่ำ (30 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (300 เท่า)	72
4.31 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยางบล็อกปูพื้น (Rubber block)	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

PVR	=	Pin vent rubber
AR - PVR	=	As received PVR
GR - PVR	=	Ground PVR
CRAR	=	Compound rubber add as received PVR
CRGR	=	Compound rubber add ground PVR
NR	=	Natural rubber
SBR	=	Styrene - butadiene rubber
BR	=	Butadiene rubber
phr	=	Parts per hundred of rubber
CRI	=	Cure rate index
M_L	=	Minimum torque
M_H	=	Maximum torque
t_{s2}	=	Scorch time
$t_{c(90)}$	=	Cure time



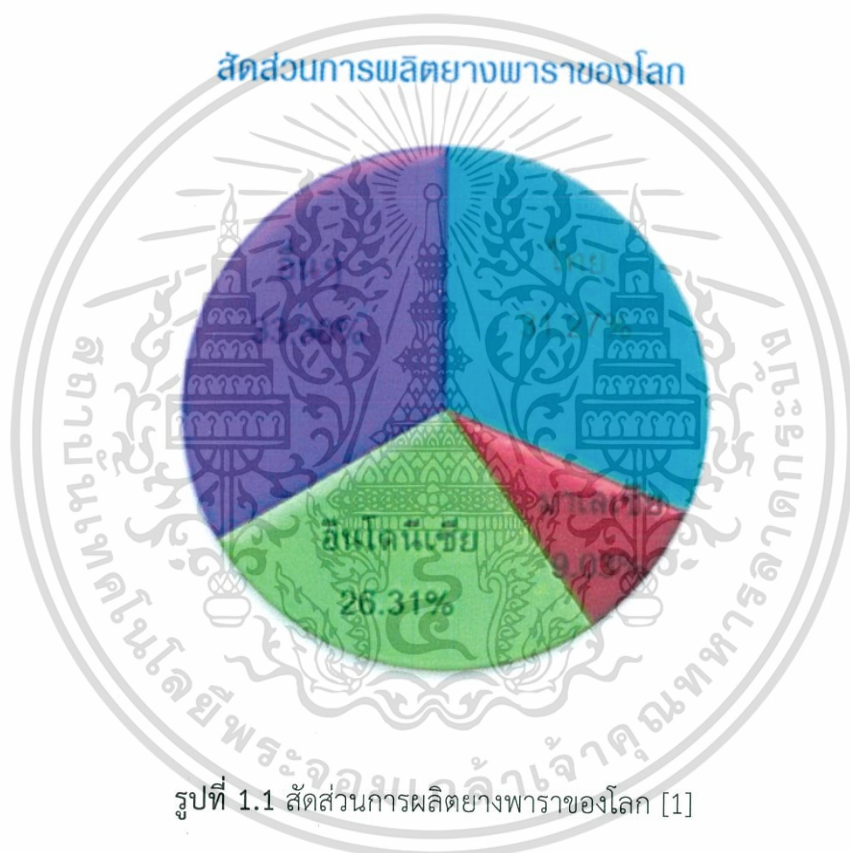
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติรายใหญ่ และผลิตได้เป็นอันดับ 1 ของโลก โดยสถิติการส่งออกยางพาราในรูปวัตถุดิบของไทยสูงถึง 4 ล้านตัน/ปี จากความต้องการเฉลี่ยทั่วโลก 10 ล้านตัน/ปี อันดับรองลงมา ได้แก่ อินโดนีเซีย มาเลเซีย กัมพูชา และเวียดนาม ซึ่งให้ผลผลิตรวมกัน 4 ล้านตัน/ปี [1]



ประเทศไทยมีความได้เปรียบในด้านการเป็นแหล่งวัตถุดิบยางขนาดใหญ่ และเป็นที่ยอมรับในด้านคุณภาพ ทั้งยางแผ่นรมควันและยางแท่ง ซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตยางรถยนต์ทุกประเภท ตลอดจนเป็นฐานการผลิตยางรถยนต์ที่สำคัญของโลก เพื่อสนองความต้องการของตลาดโดยเฉพาะตลาดในต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ฯลฯ ประเทศไทยมีบริษัทต่างๆ มากมาย ในประเทศและบริษัทข้ามชาติ ที่มีส่วนแบ่งทางการตลาดสูงที่สุดในโลก ได้ตั้งฐานการผลิตในประเทศไทย เช่น บริษัท ไทยบริดจสโตน จำกัด บริษัท สยามมิชลิน จำกัด และบริษัท กู๊ดเยียร์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) เป็นผลให้มีปริมาณการใช้งานยางรถยนต์ในประเทศสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณการทำลายน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 หนวดยางจากขั้นตอนการตัดตกแต่ง

นอกจากขยะยางจากยางรถยนต์ที่ใช้งานแล้ว ในอุตสาหกรรมการผลิตยางรถยนต์ยังมีเศษขยะยางเหลือทิ้งจากขั้นตอนการตัดตกแต่งล้อยาง เรียกว่า “หนวดยาง” หรือ “ขนยาง” (Pin vent rubber, PVR) โดยหนวดยางนี้เกิดขึ้นขณะที่ทำการเชื่อมโยงยางล้อ ภายใต้สภาวะความดันและความร้อนสูง ซึ่งในขณะที่ทำการอบนี้จะมียางส่วนเกินถูกดันออกมาตามช่องระบายอากาศในแม่พิมพ์ (Molds) หลังจากอบล้อยางจนสุกแล้วยางส่วนเกินนี้จะถูกตัดทิ้ง และกลายเป็นเศษขยะยางที่มีปริมาณถึง 20 กรัม ต่อการผลิตยางรถยนต์หนึ่งเส้น ในแต่ละวันโรงงาน 1 โรงสามารถผลิตยางรถยนต์เฉลี่ย 10,000 เส้น [2] เมื่อคำนวณออกมาแล้ว พบว่าจะเกิดขยะหนวดยางถึงปริมาณ 200,000 กรัม หรือคิดเป็น 200 กิโลกรัม/วัน เนื่องด้วยไทยเป็นฐานการผลิตยางรถยนต์ที่สำคัญของโลก ทำให้ประเทศไทยมีโรงงานผลิตยางรถยนต์ถึง 22 โรงงาน ซึ่งส่งผลก่อให้เกิดหนวดยางเหลือทิ้งถึง 4,400 กิโลกรัม/วัน หรือ 132,000 กิโลกรัม/เดือน และหากคิดเป็นปีคือ ประมาณ 1,584 ตัน/ปี เป็นผลให้ปริมาณขยะยางในประเทศสูงขึ้นอย่างมาก อีกทั้งหลายบริษัทผู้ผลิตยังต้องเสียค่าใช้จ่ายเพื่อทำการกำจัดหรือขนย้ายขยะเหล่านี้ออกไป เนื่องจากเป็นยางที่เชื่อมโยงแล้วหรือเทอร์โมเซต (Thermosets) ที่ไม่สามารถนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้อีก

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการผลิตยางรถยนต์ และขยะหนวดยาง [2]

จำนวนโรงงาน	จำนวนยางที่ผลิตได้ (เส้น)	จำนวนขยะหนวดยาง (กิโลกรัม)
1 โรงงาน/วัน	10,000	200
22 โรงงาน/วัน	220,000	4,400
22 โรงงาน/เดือน	6,600,000	132,000
22 โรงงาน/ปี	79,200,000	1,584,000

ปัจจุบันมีบริษัทรับซื้อขยะเศษยางที่เกิดจากการผลิตยางรถยนต์ เพื่อนำไปทำหมอนยางพาราเทียม เชื้อเพลิง และรับซื้อไปทำลาย โดยราคาที่รับซื้อไปทำหมอนยางพาราเทียมและเชื้อเพลิง คือ 1.50 บาท/กก. ส่วนราคาที่รับซื้อไปทำลายอยู่ที่ 2 - 3 บาท/กก. ซึ่งมีราคาถูกลงมาก

งานวิจัยนี้จึงนำหนวดยางที่เป็นขยะเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมยางรถยนต์ มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับขยะเหลือทิ้ง โดยนำมาใช้เป็นสารตัวเติม (Fillers) ในยางธรรมชาติ สำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น ยางบล็อกปูพื้น (ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 1.3) พื้นยางนิ่ม (Fall - proof rubber floor) ฯลฯ สามารถทำวัสดุปูพื้นกันกระแทก วัสดุปูพื้นคอกปศุสัตว์ พื้นนิ่มสำหรับสนามเด็กเล่น (Children play ground) และพื้นบ้านผู้สูงอายุ ฯลฯ ที่สามารถป้องกันอุบัติเหตุจากการล้ม งานวิจัยนี้เน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่ส่งผลต่อสมบัติและการใช้งาน ได้แก่ ผลของปริมาณหนวดยาง (PVR loading), ผลของขนาดหนวดยาง (PVR sizes) เปรียบเทียบระหว่างหนวดยางที่ได้รับ (AR - PVR) และหนวดยางที่ผ่านการบด (GR - PVR) และการปรับปรุงสมบัติด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว (Surface - modification) ของหนวดยางด้วยวิธีต่างๆ เช่น การใช้สารออกซิไดซ์ซิง (Oxidizing agent) และการใช้ตัวทำละลาย (Solvent)



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากหนวดยางเป็นยางบล็อกปูพื้น (Rubber block)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์ของหน่วยยางเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตยางล้อรถยนต์ ในการใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับยางธรรมชาติ โดยเน้นศึกษาบางปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติและการใช้งาน ได้แก่ ผลของปริมาณหน่วยยาง ผลของขนาดหน่วยยาง และการปรับปรุงสมบัติด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวหน่วยยาง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกสูตรยาง เตรียมตัวอย่างหน่วยยาง แล้วทำการผสม และอัดขึ้นรูปยางตัวอย่าง
3. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ศึกษา ได้แก่
 - 3.1 ผลของปริมาณหน่วยยาง ที่ 0, 50, 75, 100 และ 125 phr
 - 3.2 ผลของขนาดหน่วยยาง เปรียบเทียบระหว่างหน่วยยางที่ได้รับ และหน่วยยางที่ผ่านการบด
 - 3.3 การปรับปรุงสมบัติด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวหน่วยยางด้วยวิธีต่างๆ เช่น การใช้สารออกซิไดซ์ซิง และการใช้ตัวทำละลาย
4. ทำการทดสอบสมบัติของยางที่เตรียมได้ ได้แก่
 - 4.1 ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)
 - 4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)
 - 4.2.1 การทดสอบการดึง (Tensile test)
 - 4.2.2 การทดสอบการฉีกขาด (Tear test)
 - 4.2.3 การทดสอบความแข็งกด (Hardness test)
 - 4.3 การศึกษาผลของขนาดหน่วยยางเฉลี่ย โดยใช้โปรแกรม ImageJ®
 - 4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย Optical microscope (OM) และ Scanning electron microscope (SEM)
5. ทดลองขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง แสดงการประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ บล็อกยางปูพื้น
6. วิเคราะห์ต้นทุน และสรุปผลการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้ความรู้เกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการใช้ประโยชน์หน่วยยาง และสมบัติการใช้งาน
- ช่วยลดต้นทุน และกำจัดของเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตยางรถยนต์ สามารถใช้ขยะหน่วยยางให้เกิดประโยชน์
- ได้สูตรผลิตผลิตภัณฑ์ยางผสมหน่วยยางที่มีสมบัติที่ดี และมีลวดลายแปลก มีความเป็นไปได้อย่างพาณิชย์ สามารถใช้ทำผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ ได้ เช่น พื้นบล็อกยางปูพื้น พื้นยางนึม ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางคอมปาวด์ (Compound rubber) [3]

ยางคอมปาวด์คือ ยางดิบที่ผ่านการผสมเข้ากับสารเคมียาง โดยชนิดและปริมาณที่ใช้จะถูกกำหนดโดยสูตรเคมียาง ซึ่งสูตรเคมียางแต่ละสูตรจะมีความสำคัญต่อความยากง่ายในการขึ้นรูปและสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ อีกทั้งยังเป็นหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิต การทำผลิตภัณฑ์ยางแต่ละชนิดจะมีการออกสูตรยางที่ต่างกันออกไป แต่โดยทั่วไปแล้วมักมีองค์ประกอบดังนี้

- ยาง ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของยางคอมปาวด์ ยางที่นำมาใช้มีหลายรูปแบบ เช่น ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ หรือยางรีเคลม เป็นต้น
- ระบบสารเชื่อมโยง ได้แก่ สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators)
- สารตัวเติม (Fillers) เป็นสารที่ใส่เพื่อลดต้นทุน และเพิ่มปริมาณยางผสมสูตร ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสารตัวเติมแบบเสริมแรง และไม่เสริมแรง
- สารป้องกันการเสื่อมสภาพ เช่น สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidant) สารป้องกันโอโซน (Antiozonant)
- สารช่วยในการผลิต (Processing aids) เป็นสารที่ช่วยให้การผสม และการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ทำได้ง่ายขึ้น
- สารอื่นๆ นอกเหนือจากสารเหล่านี้ เช่น สารให้สี สารหล่อลื่น สารเพิ่มความหนืด สารให้ฟอง หรือสารหน่วงปฏิกิริยา เป็นต้น

ในขั้นตอนการผสมซึ่งเป็นขั้นตอนที่องค์ประกอบต่างๆ จะต้องผสมเข้าไปในเนื้อยาง และเกิดกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ได้ยางคอมปาวด์ที่มีคุณภาพดี โดยทั่วไปแล้วสารเคมียางที่เป็นองค์ประกอบสำคัญ เช่น กำมะถัน สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง สารป้องกันการเสื่อมสภาพ หรือเกลือซิงค์สเตียเรต ซึ่งเกิดจากการรวมตัวระหว่างซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก สารต่างๆ เหล่านี้สามารถละลายเข้าไปในเนื้อยางได้ดี และหากยิ่งเพิ่มอุณหภูมิที่เหมาะสมในขณะทำการผสม ความสามารถในการละลายของสารเหล่านี้จะยิ่งดีขึ้น ทำให้องค์ประกอบเหล่านี้เข้าไปในเนื้อยางได้ง่าย และมีปัญหาการกระจายตัวลดลง [4] แต่สำหรับสารตัวเติม เช่น เขม่าดำ หรือซิลิกา สารเหล่านี้มักมีปัญหาในการผสม เนื่องจากสารเหล่านี้อยู่ในสถานะของแข็งไม่สามารถละลายในเนื้อยางได้ อีกทั้งขนาดของสารตัวเติมที่เล็กจึงมักเกิดการรวมตัวกันเป็นแอ็กกรีเกต (Aggregate) หรือแอ็กโกลเมอเรต (Agglomerate) ทำให้เกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และบางครั้งอาจเกิดปัญหาเนื่องจากสภาพความมีขี้ของยางกับสารตัวเติมที่ต่างกัน ทำให้ต้องใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) ช่วยในการผสม ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนให้แก่ ยางคอมปาวด์ แต่สำหรับงานวิจัยนี้ใช้สารตัวเติมเป็น PVR ซึ่งเป็นเศษยางเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตยางรถยนต์ โดยองค์ประกอบภายใน PVR ประกอบไปด้วย สารเคมียาง และยางหลายชนิด เช่น ยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวตะไดอีน (Styrene - butadiene rubber) ยางบิวตะ - ไดอีน (Butadiene rubber) เป็นต้น จากองค์ประกอบข้างต้นจะพบว่า PVR มีความเป็นขี้ที่ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ ทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง PVR และยางธรรมชาติจึงเกิดขึ้นได้ดี ดังนั้นการใช้ PVR เพื่อเป็นสารตัวเติมในการลดต้นทุน และเพิ่มปริมาณยางผสมสูตรเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงจัดเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับผู้ผลิตยางคอมปาวด์ที่ไม่ต้องการสมบัติผลิตภัณฑ์ยางที่สูงมากนัก เช่น วัสดุปูพื้นกันกระแทก วัสดุปูพื้นคอกปศุสัตว์ เป็นต้น

2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber) [5]

แหล่งผลิตยางธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุดในโลกคือ แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้คิดเป็นร้อยละ 90 ของแหล่งผลิตทั้งหมด ซึ่งพันธุ์ยางที่ปลูกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้คือ พันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียนซิส (Hevea brasiliensis) น้ำยางที่กรีดได้จากต้นจะเรียกว่าน้ำยางสด (Field latex) ส่วนประกอบในน้ำยางสด แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง 35% และส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางอีก 65 %

2.2.1 ส่วนประกอบของน้ำยาง

น้ำยางธรรมชาติเป็นสารที่ไม่บริสุทธิ์ เมื่อกรีดมาจากต้นยางมีปริมาณของเนื้อยางแห้งอยู่ระหว่าง 25 - 45 % ความแตกต่างระหว่างปริมาณสารที่เป็นของแข็ง และเนื้อยางแห้งมีประมาณ 3 %

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ [6]

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	27 - 48
เนื้อยางแห้ง	25 - 45
สารพวกโปรตีน	1 - 1.50
สารพวกเรซิน	1 - 1.25
ซีลีไค	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ 100

2.2.2 รูปแบบของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามลักษณะรูปแบบของยางดิบ ได้แก่

1. น้ำยาง (Latex)

- น้ำยางสด มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำนม มีสภาพเป็นคอลลอยด์ หรือสารแขวนลอยมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.975 - 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่า pH ประมาณ 6.5 - 7.0 ความหนืดของน้ำยางมีค่าประมาณ 12 - 15 เซนติพอยส์
- น้ำยางข้น (Concentrated latex) คือ น้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นแล้วจะมีปริมาณเนื้อยางประมาณร้อยละ 55 - 65 ซึ่งสูงกว่าน้ำยางสดที่มีปริมาณเนื้อยางประมาณร้อยละ 35 ทำให้สามารถทำการขนส่งได้ง่ายขึ้น

2. ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air dried sheet : ADS) เป็นยางที่ได้จากการนำน้ำยางมาจับตัวเป็นแผ่นด้วยสารเคมี โดยจะต้องใช้ปริมาณตามเกณฑ์ที่กำหนด ส่วนการทำให้แห้งอาจใช้วิธีการผึ่งลมในที่ร่ม หรืออบในโรงอบแต่ต้องปราศจากควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ยางแผ่นรมควัน (Rib smoked sheet: RSS) วัตถุดิบที่ใช้คือน้ำยางพาราสด กระบวนการผลิตคือนำน้ำยางสดมาผ่านกระบวนการทำเป็นยางดิบพิมพ์หลายแล้วรมควัน จากนั้นคัดคุณภาพแผ่นยาง และส่งจำหน่าย

4. ยางเครพ (Crepe rubber) เป็นยางที่ได้จากการนำเศษยางไปรีดด้วยเครื่องรีดยางสองลูกกลิ้ง โดยทั่วไปเรียกว่า เครื่องเครพ ในระหว่างการรีดจะมีการใช้น้ำทำความสะอาด เพื่อนำสิ่งสกปรกออกจากยาง เนื่องจากยางที่ใช้โดยมากเป็นยางที่มีคุณภาพต่ำ มีสิ่งสกปรกเจือปนปริมาณมาก หลังจากรีดในเครื่องเครพแล้ว จะนำยางไปผึ่งแห้ง หรืออบแห้งด้วยลมร้อน ยางเครพที่ได้จะมีสีค่อนข้างเข้ม และมีหลายรูปแบบ เช่น ยาง Brown crepe, Flat bark crepe, Skim crepe และ Blanket crepe เป็นต้น ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ และชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ส่วนยางเครพขาวเป็นยางเครพที่ได้จากน้ำยางที่มีการกำจัดสารเกิดสีคือสารเบต้าแคโรทีน ซึ่งมีสีเหลืองอ่อนโดยการฟอกสียางให้มีสีขาวด้วยสารเคมี

5. ยางแท่ง (Block rubber) ในอดีตยางธรรมชาติที่ผลิตขึ้นมาส่วนใหญ่จะผลิตในรูปของยางแผ่นรมควัน ยางเครพ หรือน้ำยางข้น ซึ่งยางธรรมชาติเหล่านี้จะไม่มีมาตรฐานการจัดชั้นยางที่ชัดเจนตามปกติจะใช้สายตาในการพิจารณาตัดสินชั้นยาง ต่อมาในปี พศ.2508 สถาบันวิจัยยางมาเลเซีย (Rubber research institute of Malaysia, RRIM) ได้มีการผลิตยางแท่งขึ้นเป็นแท่งแรกเพื่อปรับปรุง และพัฒนาคุณภาพของยางธรรมชาติให้ได้มาตรฐานเหมาะสมกับการใช้งาน จนทำให้ยางแท่งเป็นยางธรรมชาติชนิดแรกที่ผลิตมา โดยมีการควบคุมคุณภาพให้ได้มาตรฐานตลอดจนมีการระบุคุณภาพของยางดิบที่ผลิตได้แน่นอน

6. ยางแท่งความหนืดคงที่ (Constant viscosity rubber) เป็นยางที่ผลิตขึ้น เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการควบคุมความหนืดของยางที่ใช้ในการแปรรูป เช่น อุตสาหกรรมยางท่อ อุตสาหกรรมทำกาว เป็นต้น

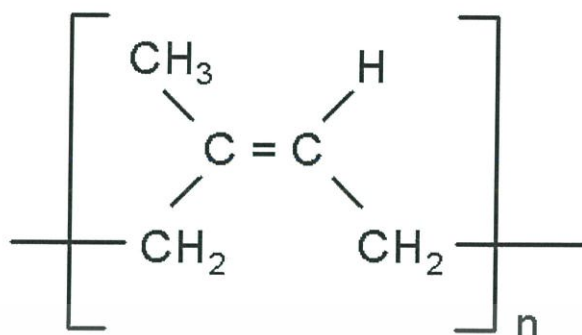
7. ยางสกิน (Skim rubber) เป็นยางธรรมชาติที่ได้จากการจับตัวน้ำยางสกิน (Skim latex) ด้วยกรดแล้วนำยางที่ได้ไปทำการรีดแผ่น และทำให้แห้ง โดยน้ำยางสกินเป็นน้ำส่วนที่เหลือจากการทำน้ำยางข้นด้วยการนำน้ำยางสดมาทำการเซนตริฟิวส์แยกอนุภาคเม็ดยางออกจากน้ำ ซึ่งอนุภาคเม็ดยางที่เบากว่าน้ำส่วนใหญ่จึงแยกตัวออกไปเป็นน้ำยางข้น น้ำยางข้นที่ได้มีปริมาณเนื้อยางอยู่ร้อยละ 60 - 63 ส่วนน้ำยางสกิน คือ ส่วนที่เหลือจากการเซนตริฟิวส์แยกเนื้อยางส่วนใหญ่ออกไปแล้วยังมีส่วนของเนื้อยางออกมาด้วยเป็นเนื้อยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กๆ ประมาณร้อยละ 3 - 6

2.2.3 โครงสร้างโมเลกุลและสมบัติของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยซิส 1,4 - พอลิไอโซพรีน (Cis - 1,4 - polyisoprene) มากกว่า 99% มีหน่วยไอโซพรีน (Isoprene unit) ประมาณ 3,000 - 5,000 หน่วยต่อโมเลกุล มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) กว้างทำให้มีความสามารถในการแปรรูปได้ดี ยางธรรมชาติมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ที่ประมาณ -60°C ทำใหยางธรรมชาติมีอุณหภูมิการใช้งานที่กว้าง และโดยทั่วไปโครงสร้างของยางธรรมชาติจะจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำ หรือเมื่อถูกยืดมันจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำใหยางแข็งมากขึ้น ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางมีสมบัติเชิงกลดีนั่นคือ ยางจะมีความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance) สูง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ (Cis - 1, 4 - polyisoprene) [7]

2.2.4 สมบัติของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ผ่านการเชื่อมโยงจะมีสมบัติต่างๆ ดังนี้

1. ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความต้านทานต่อแรงดึง แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรง และมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางรัดของ เป็นต้น
2. ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (Heat build - up) ที่เกิดขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกันที่ดีจึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น
3. ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิสูงจึงเหมาะสำหรับการผลิตกระเปาะน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกในขณะที่ร้อน ดังนั้นยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง
4. ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อได้รับแรงภายนอกสามารถยืดขยายได้หลายเท่า แต่เมื่อปล่อยแรงกระทำยางจะกลับคืนสู่รูปร่าง และขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว
5. สมบัติทางกายภาพ มีค่าความถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติที่ 20°C เท่ากับ 0.934 และมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้ายางถูกแช่แข็งหรือถูกยืด ค่าความร้อนจำเพาะที่ 20°C เท่ากับ 0.502 มีความต้านทานไฟฟ้า 10^{15} Ohms - cm ซึ่งใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี
6. ความสามารถในการแปรรูป ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงทำให้แปรรูปได้ยาก จึงต้องทำการบดย่อยก่อนแปรรูป ทุกครั้งของการบดยางจะทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติลดต่ำลงทำให้ยางนิ่มลง แต่อาจทำให้เกิดปัญหาต่างๆ เช่น ในกรณีการอัดเบ้าจะเกิดอากาศขัง (Air trap) ในยางได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติมีสมบัติความเหนียวติด (Tack) ที่ดี โหลได้ง่าย และมีความต้านทานต่อการฉีกขาดที่อุณหภูมิสูงได้ดี จึงไม่มีปัญหาในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยการอัดเบ้า
7. พฤติกรรมในตัวทำละลาย ยางธรรมชาติสามารถเกิดการบวมพอง และในบางกรณีสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด ได้สารละลายที่มีความหนืดสูง ยางธรรมชาติที่เกิดการเชื่อมโยงแล้วจะบวมพองในตัวทำละลาย ซึ่งปริมาณของการบวมตัวขึ้นอยู่กับชนิดตัวทำละลาย และระดับการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมโยง ดังนั้นการเชื่อมโยงทางเคมีจะช่วยปรับปรุงความทนทานต่อการบวมตัวในตัวทำละลายของยางธรรมชาติได้

แม้ว่ายางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติมีข้อเสียหลัก คือการเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อปฏิกิริยากับออกซิเจน และโอโซน โดยมีแสงแดด และความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (กลุ่มของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขั้วน้ำมัน และสารเคมีต่ำ จึงไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องสัมผัสกับตัวทำละลายไม่มีขั้ว

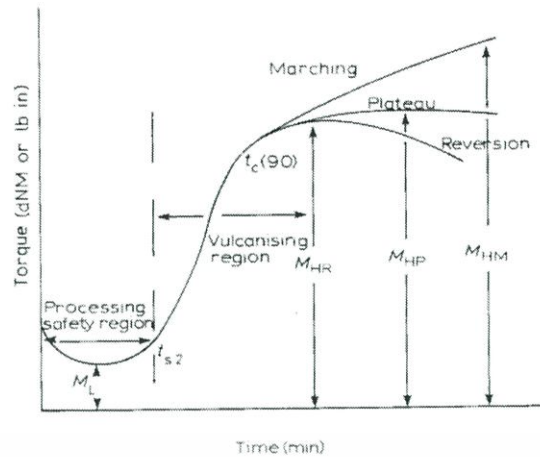
2.3 สารเชื่อมโยงยาง (Crosslinking agent) [5]

สารเชื่อมโยงยาง เป็นสารที่มีความสำคัญที่สุดของกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากสารเชื่อมโยงยางจะเปลี่ยนสมบัติของยางจากสภาพอ่อนนิ่ม เหนียวติด และไหลได้ให้มีความแข็งแรงคงรูป และมีความเหนียวติดต่ำลง โดยสารเชื่อมโยงนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลยางให้เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3 - Dimension) โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า กระบวนการเชื่อมโยง (Crosslinking), วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) หรือการทำให้ยางสุก (Curing) [5] ซึ่งยางที่ผ่านการเชื่อมโยงในสภาวะที่มีความร้อน และความดันแล้วจะมีสมบัติที่เปลี่ยนไปดังนี้คือ

- มีค่าความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
- มีมอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
- มีความยืดหยุ่น (Elasticity) ดีขึ้น
- มีการเปลี่ยนขนาดถาวรเมื่อได้รับแรงลดลง
- มีฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ลดลง
- เหนียวติด (Sticky) น้อยลง
- ทนต่อการเสื่อมสภาพจากความร้อน โอโซน และแสงแดดได้ดีขึ้น ทำให้มีอายุการใช้งานนาน

การเชื่อมโยงยางถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1839 โดยนาย ชาลส์ กู๊ดเยียร์ (Charles Goodyear) โดยการให้ความร้อนกับยางธรรมชาติที่ผสมสารกำมะถัน ทำให้ยางมีความคงรูปมากขึ้น ในปัจจุบันระบบสารเชื่อมโยงยางที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายระบบ ได้แก่ ระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization) ระบบการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization) ระบบการเชื่อมโยงด้วยสารประกอบออกไซด์ของโลหะบางชนิด และระบบการเชื่อมโยงโดยใช้สารเคมีชนิดอื่นๆ เช่น ฟีนอลิก (Phenolic) อนุพันธ์ของเบนโซควิโนน (Benzoquinone derivatives) และ บิสแมลลิมิด (Bismaleimides) เป็นต้น

เมื่อผสมยางคอมพาวด์เข้ากับสารเชื่อมโยงยางแล้ว สามารถตรวจสอบลักษณะการเชื่อมโยงของยางได้โดยตัดชิ้นงานตัวอย่างมาทดสอบด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยง (Moving die rheometer, MDR) จะได้ผลเป็นกราฟที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟการเชื่อมโยง [8]

จากกราฟสามารถอธิบายเป็นข้อมูลต่างๆ ได้ดังนี้

M_L = ค่าแรงบิด (Torque) ต่ำสุด

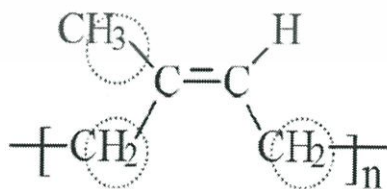
M_{HF} = ค่าแรงบิด (Torque) สูงสุด

t_{s2} = เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) เป็นเวลาที่ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นเป็น 2 ปอนด์ต่อนิ้วช่วงเวลานี้สามารถขึ้นรูปร่างผสมสูตรให้มีรูปร่างที่ต้องการได้ โดยยางจะยังไม่เกิดการเชื่อมโยง

$t_{c(90)}$ = เวลาเชื่อมโยง (Cure time) เป็นช่วงเวลาที่ยางเกิดการเชื่อมโยงอย่างสมบูรณ์ที่สุด คือเวลาที่ยางเชื่อมโยง 90% หรือแรงบิดเพิ่มขึ้น 90% จากค่าแรงบิดต่ำสุด

2.3.1 ระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization)

ระบบการเชื่อมโยงด้วยสารกำมะถัน เป็นระบบที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก แต่กำมะถันจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีเฉพาะกับยางที่ไม่อิ่มตัว หรือยางที่มีพันธะคู่จำนวนมาก (High - diene) และต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งอะลลิก (Allylic hydrogen) หรือตำแหน่งคาร์บอนที่ติดจากพันธะคู่ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังนิยมใช้กำมะถันร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activator) เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพ

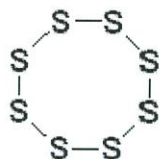


รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลยางแสดงอะลลิกไฮโดรเจนซึ่งอยู่ในวงกลมเส้นประ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของกำมะถันที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางมี 2 ชนิดคือ

1. กำมะถันผลึกรวมบิก (Rhombic sulfur)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกรวมบิกของกำมะถันชนิดละลาย [9]

กำมะถันรูปผลึกรวมบิก จะมีโครงสร้างเป็นวงแหวนที่มีอะตอมกำมะถัน 8 อะตอม (S_8) กำมะถันชนิดนี้สามารถละลายได้ในยาง โดยจะแตกตัวที่อุณหภูมิ 150°C กำมะถันชนิดนี้นิยมใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีราคาถูก และใช้ในปริมาณน้อย แต่หากใส่ในปริมาณมากจะเกิดการบวม (Bloom) ซึ่งเกิดจากการแพร่ของกำมะถันมาสะสมที่ผิวหน้าของยาง เนื่องจากกำมะถันชนิดนี้มีการละลายแปรผันตามอุณหภูมิ ขณะทำการผสมหากมีอุณหภูมิสูงจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น แต่เมื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเสร็จแล้วอุณหภูมิชิ้นงานจะลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของกำมะถันลดลง และเกิดการแพร่ของกำมะถันมาที่ผิวหน้าของชิ้นงานยาง เกิดเป็นรอยคราบสีเหลืองที่ผิวหน้า ทำให้ชิ้นงานมีความสวยงาม และการยึดติดที่ผิวหน้าลดลง อีกทั้งยังทำให้การเชื่อมโยงไม่มีประสิทธิภาพ เกิดการสูญเสียของสารเชื่อมโยงยาง

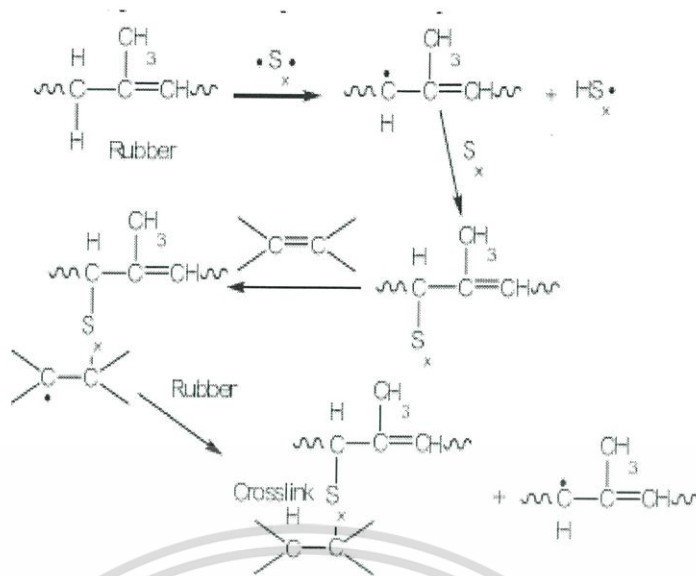
2. กำมะถันอสัณฐาน (Amorphous sulfur)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างกำมะถันอสัณฐานชนิดไม่ละลาย [9]

กำมะถันชนิดนี้จะอยู่ในรูปอสัณฐาน โดยจะมีโครงสร้างใหญ่กึ่งเสถียร ไม่ละลายในตัวทำละลาย และยางจึงยากต่อการผสม แต่เมื่อผสมได้เข้ากันแล้ว จะเกิดโครงสร้างซับซ้อนกับยาง และไม่เกิดการบวม กำมะถันชนิดนี้จะใช้กับยางที่ต้องการใส่กำมะถันปริมาณมาก เช่น ยางอีโบนด์ แต่ข้อจำกัดของกำมะถันชนิดนี้คือ มีราคาแพง และอาจเปลี่ยนโครงสร้างเป็นกำมะถันชนิดละลายได้เมื่อมีอุณหภูมิสูงเกิน 100°C ขึ้นไป

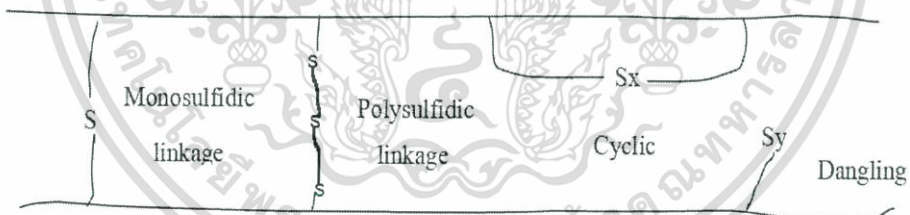
กลไกการเชื่อมโยงยางด้วยกำมะถันโดยปราศจากสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงจะเริ่มจากการแตกตัวของกำมะถันซึ่งแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระแบบไบเรดิคัล (Biradical) จากนั้นอนุมูลอิสระจะเข้าจับอะโวลิกไฮโดรเจน ทำให้เกิดอนุมูลอิสระที่ตำแหน่งอะโวลิกไฮโดรเจน และจะเข้าจับกับกำมะถันที่แตกตัวอีกโมเลกุล จนได้เป็นสายโซ่โมเลกุลยางที่มีอะตอมกำมะถันติดอนุมูลอิสระซึ่งมีความว่องไวและพร้อมที่จะเข้าทำปฏิกิริยาบริเวณพันธะคู่ของสายโซ่โมเลกุลยางอื่นๆ กลไกที่เกิดขึ้นสามารถจำลองได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ภาพกลไกการเชื่อมโยงยางด้วยกำมะถันโดยปราศจากสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง [7]

เมื่อยางเชื่อมโยงยางด้วยกำมะถันแล้วจะเกิดเป็นพันธะการเชื่อมโยงต่างๆ ดังรูปที่ 2.7 จากรูป พบว่าในการเชื่อมโยงยางสามารถเกิดพันธะการเชื่อมโยงได้หลากหลายพันธะ ได้แก่

- พันธะเชื่อมโยงกำมะถันอะตอมเดี่ยว (Monosulfidic linkage)
- พันธะเชื่อมโยงกำมะถันหลายอะตอม (Polysulfidic linkage)
- พันธะเชื่อมโยงแบบโซ่เดียวกัน หรือเกิดโครงสร้างเป็นวง (Cyclic)
- พันธะเชื่อมโยงแบบด้านด้านเดียว หรือเกิดโครงสร้างห้อย (Dangling)



รูปที่ 2.7 ลักษณะพันธะการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในยาง [5]

การเกิดพันธะเชื่อมโยงแบบวง หรือโครงสร้างแบบห้อย เป็นการเชื่อมโยงเพียงด้านเดียวซึ่งเป็นการเชื่อมโยงที่ไม่มีประสิทธิภาพ และมีสาเหตุมาจากปริมาณกำมะถันที่มากเกินไป อย่างที่มีลักษณะการเชื่อมโยงเช่นนี้ปริมาณมากจะทำให้ยางมีสมบัติบางประการต่ำ เช่น สมบัติเชิงกลเช่นเดียวกับกับ การเชื่อมโยงกำมะถันหลายอะตอม นอกจากนี้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงก็มีผลเช่นกัน เพราะหากใส่ปริมาณมากจะเกิดการเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากกำมะถันจะถูกกระตุ้น และแตกตัวเป็นกำมะถันอะตอมเดี่ยวที่ติดอนุพลอิสระ และได้พันธะเชื่อมโยงแบบกำมะถันอะตอมเดี่ยว แต่หากใส่ปริมาณน้อยกำมะถันจะแตกตัวแบบหลายอะตอม และเกิดพันธะเชื่อมโยงแบบกำมะถันหลายอะตอมซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

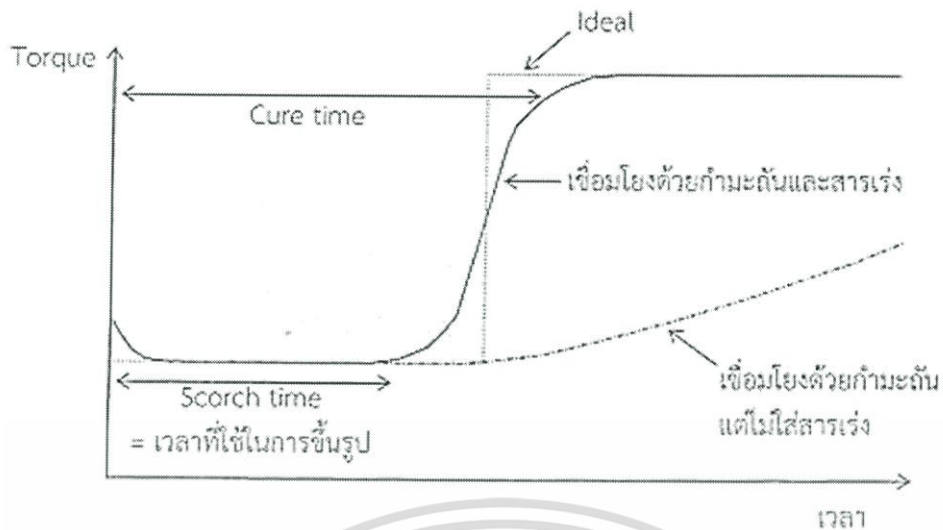
โดยปกติการเชื่อมโยงที่จะทำให้ยางมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน มักมีการเชื่อมโยง 1 พันธะในทุกๆ 200 หน่วยมอโนเมอร์ หรือยางจะมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมโยง (Molecular weight between crosslink, M_c) ประมาณ 8,000 - 12,000 g/mol ซึ่งปริมาณการเชื่อมโยงจะระบุด้วยองศาการเชื่อมโยง (Degree of vulcanization) หรือความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density, ρ_c)

ประเภทการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันสามารถจำแนกได้ 3 รูปแบบ

1. ระบบการเชื่อมโยงแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization, CV) เป็นการเชื่อมโยงโดยใช้กำมะถันปริมาณมาก และใช้สารเร่งปริมาณน้อย จึงได้พันธะการเชื่อมโยงแบบเชื่อมโยงกำมะถันหลายอะตอม (Polysulfidic linkage) ซึ่งความแข็งแรงพันธะของ S - S bond จะต่ำกว่าความแข็งแรงพันธะ C - S bond จึงง่ายต่อการถูกทำลายด้วยความร้อน หรือเมื่อรับแรงกระทำ ทำให้สมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์ยางแยลง เช่น เกิดการบวมเกิดการเปลี่ยนขนาดถาวร (Permanent set) เมื่อรับแรงมีสมบัติเปลี่ยนไปเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน (Poor aging properties) และใช้เวลาในการเชื่อมโยงนานเพราะกำมะถันมีปริมาณมากเกินไป
2. ระบบการเชื่อมโยงแบบมีประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization, EV) เป็นการเชื่อมโยงที่ใช้กำมะถันปริมาณน้อย และใช้สารเร่งปริมาณมาก ทำให้ได้พันธะการเชื่อมโยงกำมะถันอะตอมเดียว (Monosulfidic linkage) ยางที่ได้จากการเชื่อมโยงจะมีสมบัติที่ดี คือ สมบัติไม่เปลี่ยนแปลงแม้ใช้งานเป็นเวลานานมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรต่ำ และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง แต่การเชื่อมโยงระบบนี้จะมีต้นทุนสูงกว่า เพราะสารเร่งที่ใช้มีราคาแพง
3. ระบบสารเชื่อมโยงแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi - efficient vulcanization, Semi - EV) ระบบนี้ใช้ปริมาณกำมะถันต่อสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอยู่ระหว่างระบบ CV และ EV

2.3.2 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงจะช่วยเร่งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Crosslink rate) เร็วขึ้น ทำให้เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยง (Cure time) ลดลง เกิดการเชื่อมโยงยางที่มีประสิทธิภาพสูง และใช้กำมะถันปริมาณน้อยลง ผลจากการใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงสามารถเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบการเชื่อมโยงของยางที่เติมสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (เส้นทึบ) และยางที่ไม่เติมสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง(เส้นประ) [5]

ชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แบ่งได้หลายชนิด แต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน สำหรับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาจใช้ร่วมกันมากกว่าหนึ่งชนิด สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณมากกว่า จะเรียกว่า “สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงปฐมภูมิ” ส่วนสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณน้อยกว่า จะเรียกว่า “สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงทุติยภูมิ” โดยสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงทั้งสองจะเกิดปฏิกิริยาแบบเสริมกัน เรียกว่า “ปรากฏการณ์ซินเนียจิสติก (Synergistic effects)”

ชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงต่างๆ แบ่งตามมาตรฐาน ASTM ได้เป็น 6 กลุ่มดังนี้

กลุ่ม 1 ซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides) ได้แก่

CBS, (N - cyclohexylbenzothiazole - 2 - sulfenamide),
TBBS (N - tert - butyl - 2 - benzothiazolesulfenamide)

กลุ่ม 2 ไทเอโซล (Thiazoles) ได้แก่

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

กลุ่ม 3 กัวนิติน (Guanidines) ได้แก่

DPG (Diphenylguanidine),
DOTG (Di - o - tolylguanidine)

กลุ่ม 4 ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates) ได้แก่

ZMDC (Zinc dimethyldithiocarbamate),
ZDEC (Zinc diethyldithiocarbamate)

กลุ่ม 5 ไทยูเรมไดซัลไฟด์ (Thiuram disulfides) ได้แก่

TMTD (Tetramethylthiuramdisulfide),
TETD (Tetraethylthiuramdisulfide),

TMTM (Tetramethylthiurammonosulfide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

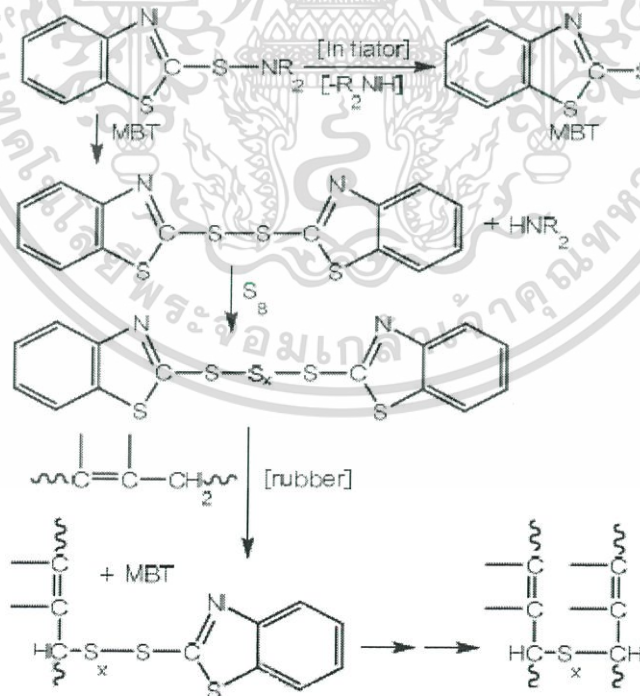
กลุ่ม 6 ไทยูแรมชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไดซัลไฟด์ (Thiuram other than disulfides)

นอกจากนี้ยังมีสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอีกสองกลุ่มที่ไม่ได้รวมอยู่ด้วย เนื่องจากมีปริมาณการใช้ต่ำ และมีความเป็นพิษ (Toxicity) ได้แก่ อัลดีไฮด์เอมีน (Aldehyde amines) และไทโอยูเรีย (Thioureas)

การใส่สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงควรใส่เป็นลำดับสุดท้าย เพื่อเลี่ยงการเชื่อมโยงก่อนเวลา (Scorch) โดยในการผสมควรใช้งานในรูปแบบเม็ด หรือมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch) เนื่องจากใช้ในปริมาณน้อยอาจเกิดการสูญเสียขณะทำการผสม อีกทั้งประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงต่ออย่างแต่ละชนิดอาจไม่เหมือนกัน ดังนั้นปริมาณที่ใช้สำหรับยางแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน และชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงจะมีผลมากกว่าปริมาณที่ใช้ ฉะนั้นผู้ใช้ควรพิจารณา หรือออกแบบสูตรยางให้เหมาะสมกับยางก่อนทำการผสม

2.3.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง จะมีหน้าที่กระตุ้น หรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่นิยมใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับกรดสเตียริก (ZnO/Stearic acid) โดยสารทั้งสองจะทำปฏิกิริยาร่วมกันเกิดเป็นซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) ซึ่งสามารถละลายได้ในยาง อยู่ในรูปซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) และช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง นอกจากนี้กรดสเตียริกยังช่วยเป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) ทำให้ยางมีความหนืดลดลง และผสมได้ง่ายขึ้น กลไกการเกิดพันธะเชื่อมโยงของกำมะถันแบบมีสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง และสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้จากรูปที่ 2.9



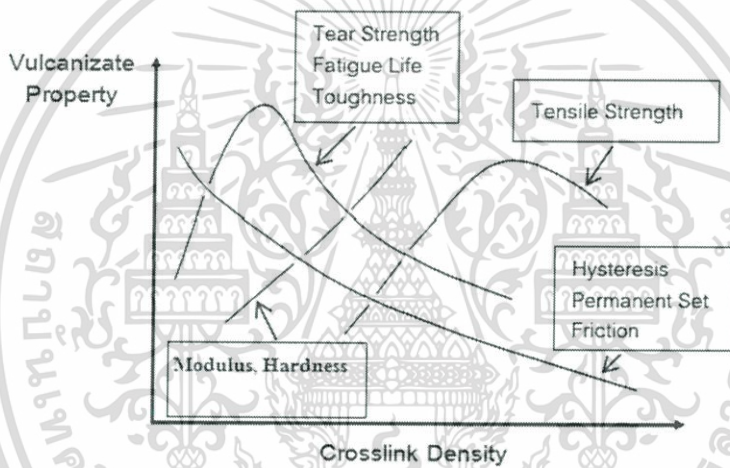
รูปที่ 2.9 กลไกการเชื่อมโยงของกำมะถันแบบมีสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง และสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นแรกสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง จะเกิดปฏิกิริยารวมตัวกัน (Ac - Ac) จากนั้นโมเลกุลของกำมะถันที่แตกตัว (วงกำมะถัน S_8 จะแตกตัวเป็น S_x เหลือ S_{x-8}) จะแทรกตัวในโมเลกุลของสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Ac - S_x - Ac) ได้เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่มีกำมะถัน ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลยางที่ตำแหน่งอะลิลิกไฮโดรเจน ในขั้นนี้สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยงจะช่วยเร่งปฏิกิริยาไดออกซอนของซิงค์ (Zn^{2+}) จากซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) ซึ่งละลายอยู่ในยางจะกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวของพันธะระหว่างสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับกำมะถัน (Ac - S_x bond) จะได้สายโซ่ยางที่มีกำมะถัน พร้อมสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงติดอยู่ที่ตำแหน่งอะลิลิก (ยาง - S_x - Ac) จากนั้นจะเกิดการแตกออกของพันธะระหว่างสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับกำมะถันอีกข้าง (Ac - S_x bond) และเกิดปฏิกิริยากับสายโซ่โมเลกุลยางโซ่อื่นๆ กลายเป็นพันธะเชื่อมโยง

2.3.4 สมบัติของยางที่ผ่านการเชื่อมโยง

ยางที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้วจะมีสมบัติบางประการเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟสมบัติของยางที่ได้หลังจากเกิดการเชื่อมโยง [7]

- ยางที่ผ่านการเชื่อมโยงจะมีความแข็ง เช่น โมดูลัสของยัง และ ความแข็งกด เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นการเชื่อมโยง (ρ_c) เนื่องจากมีพันธะการเชื่อมโยงมาก ทำให้โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้ยาก ยางจึงมีความแข็งขึ้น และต้องใช้แรงมากขึ้นในการเปลี่ยนรูปร่าง

- สำหรับสมบัติความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด อายุความต้านทานต่อการล้า และ ความเหนียว จะเพิ่มขึ้นถึงความหนาแน่นการเชื่อมโยงค่าหนึ่งเท่านั้น หลังจากนั้นค่าจะลดลง โดยในช่วงแรกค่าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของจุดเชื่อมโยง ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่หลุดออกจากกันยากขึ้นเมื่อได้รับแรง ความแข็งแรงของยางจึงเพิ่มขึ้น แต่ ณ จุดนี้ ยางจะยังเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์ เมื่อถึงจุดสูงสุดหรือ จุดเกิดเจล (Gel point) ซึ่งเป็นจุดที่ยางเชื่อมโยงอย่างสมบูรณ์ จึงสามารถรับแรงได้สูงสุด แต่หลังจากจุดนี้ ยางได้รับการเชื่อมโยงที่มากเกินไป ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้จำกัด และไม่สามารถกระจายแรงที่ได้รับ ทำให้ยางมีลักษณะที่แข็งแต่เปราะ และรับแรงได้น้อยลง

- สมบัติฮิสเทอรีซิส ความคงรูป และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลง เมื่อเพิ่มความหนาแน่นการเชื่อมโยง เนื่องจากยางมีการเชื่อมโยงมาก จึงมีความแข็งคงรูปสูง ทำให้ยากต่อการทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนขนาดถาวร และมีการสูญเสียพลังงานในรูปแบบอื่นๆ เช่น ความร้อนลดลง การยึดติดกับวัสดุอื่นๆ ก็ลดลงเช่นกัน เพราะมีสายโซ่ที่ไม่มีการเชื่อมโยงน้อยลง

2.4 สารตัวเติมและสารเติมแต่งในยาง (Rubber fillers and additives) [5]

2.4.1 สารตัวเติม

สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ นิยมใช้มากในยาง เนื่องจากสารตัวเติมมีราคาถูกเทียบกับราคา ยาง ฉะนั้นในอุตสาหกรรมยางจึงมักใช้สารตัวเติมเพื่อลดต้นทุนการผลิต และช่วยเพิ่มปริมาณให้กับ ยางผสมคอมพาวด์ สารตัวเติมบางชนิดสามารถเสริมแรงให้กับยาง ช่วยให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เช่น ซิลิกา และเขม่าดำ เป็นต้น ในที่นี้จะแบ่งสารตัวเติมออกเป็น 2 กลุ่มคือ สารตัวเติมที่มีสีดำ และ สารตัวเติมที่ไม่มีสีดำ

1. สารตัวเติมที่มีสีดำ

ในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ จะนิยมใช้สารตัวเติมที่มีสีดำนั่นคือ เขม่าดำ (Carbon black) เนื่องจากเป็นสารตัวเติมที่มีราคาถูก และช่วยเสริมแรงให้กับยางได้ดี การผลิตเขม่าดำจะได้จาก กระบวนการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ หรือการแตกตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal cracking) ของ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ โดยเขม่าดำที่ได้มีด้วยกันหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เขม่าดำชนิดเฟอร์เนส (Furnace blacks) ซึ่งหน้าทีนอกเหนือจากสารตัวเติม ที่เสริมแรงแล้ว เขม่าดำยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ของยางโดยจะลด ความยืดหยุ่น และการหดตัวบิดเบี้ยวของชิ้นงานยางที่ได้จากการขึ้นรูป แต่ข้อเสียของเขม่าดำคือ จะทำให้ยางมีสีดำ จึงไม่เหมาะกับยางที่ต้องการเติมสีเพื่อความสวยงาม

อันตรกิริยาระหว่างยางกับเขม่าดำจะมีผลต่อการเสริมแรง ซึ่งอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นมีได้สอง ลักษณะ ได้แก่ การยึดเกาะทางกายภาพ เป็นการแทรกตัวของสายโซ่โมเลกุลยางเข้าไปในโครงสร้างที่ ซับซ้อนของเขม่าดำ และการยึดเกาะด้วยพันธะเคมี เกิดจากหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของเขม่าดำทำ ปฏิกริยาต่อกันกับสายโซ่โมเลกุลของยางจนทำให้เกิดพันธะเชื่อมต่อระหว่างเขม่าดำกับยาง

ปัจจัยของเขม่าดำที่มีผลต่อการเสริมแรง

- *ขนาดอนุภาคเขม่าดำ* เขม่าดำยังมีขนาดอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้มีประสิทธิภาพ การเสริมแรงสูง ยางจะทนทานต่อการสึกหรอได้ดี แต่ขนาดอนุภาคที่เล็กจะยากต่อการผสม เพราะจะ กระจายตัวได้ไม่ดี

- *โครงสร้างเขม่าดำ* เขม่าดำที่มีโครงสร้างกิ่งก้านสาขามาก มีความไม่เป็นระเบียบสูงจะ สามารถดูดซับน้ำมัน และสารเติมแต่งตัวอื่นๆ ได้ดี อีกทั้งสายโซ่โมเลกุลยางก็จะสามารถแทรกตัวเข้า ไปได้มาก ทำให้มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงสูง

- *เคมีของพื้นผิว* หากที่พื้นผิวของเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกริยากับสายโซ่ โมเลกุลยางได้ ก็จะช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเขม่าดำกับยาง

2. สารตัวเติมที่ไม่มีสีดำ

สารตัวเติมสีไม่ดำจะมีประสิทธิภาพการเสริมแรงน้อยกว่าเขม่าดำ ยกเว้นซิลิกา โดยสาร เสริมแรงชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสินแร่อนินทรีย์ ซึ่งจะมีความหนาแน่นสูง เมื่อผสมกับยางจะทำให้ยางมี น้ำหนักมากขึ้นจึงเติมได้ในปริมาณเล็กน้อย อีกทั้งสินแร่อนินทรีย์นี้จะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วจึงมักดูด ความชื้นแล้วจับตัวเป็นก้อน หรือดูดสารเคมีบางชนิดที่เป็นส่วนผสมในยาง เช่น สารซิงค์ออกไซด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง ส่งผลให้การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพลดลง ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องเติมสารเคลือบ เช่น ในกรณีที่ใช้สารเสริมแรงเป็นซิลิกา มักเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) เพื่อเคลือบซิลิกาไม่ให้อุดตันสารเติมแต่งตัวอื่นๆ ที่มีขี้ หรือต้องใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling) เพื่อให้เกิดการยึดเกาะที่ดีระหว่างยางกับสารตัวเติม ตัวอย่างสารตัวเติมในกลุ่มนี้เช่น

- *ดินขาว (Kaolin)* เป็นสารตัวเติมที่ได้จากการทำให้แร่ดินขาว หรือเคลอิโอไนต์ให้บริสุทธิ์ ดินขาวเป็นสารตัวเติมไม่มีสีดำที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก มีพื้นผิวเฉื่อย และช่วยในการเสริมแรงให้ยางได้ แต่ข้อจำกัดคือ ดินขาวมีความหนาแน่นสูง และมีโมเลกุลของน้ำอยู่ภายในโครงสร้าง

- *ซิลิกา (Silica)* เป็นสารตัวเติมที่ช่วยในการเสริมแรงได้ดีที่สุด สูตรโครงสร้างทั่วไปคือ SiO_2 สมบัติของยางที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากเติมซิลิกาคือ ความแข็งแรงฉีกขาด ความต้านทานต่อการขีดถู และการยึดเกาะกับองค์ประกอบอื่นๆ ในยางดีขึ้น อีกทั้งช่วยยังลดความร้อนสะสมในยาง เนื่องจากซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol group, $\text{Si} - \text{OH}$) ที่พื้นผิวซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำ และความชื้นเป็นกรดที่พื้นผิว ทำให้สารตัวเติมซิลิกาสามารถเสริมแรงได้ดีในยางที่มีขี้ เช่น ยางไนไตรล์ (NBR) เป็นต้น

- *แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)* เป็นสารตัวเติมสีขาวที่เกิดจากการสะสมของตะกอน เช่น ชากเปลือกหอยต่างๆ เป็นเวลานาน สารตัวเติมนี้มีให้เลือกหลายขนาด และมีราคาถูก แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่ทนต่อกรด และมักจับรวมตัวเป็นก้อน ดังนั้นจึงมักเติมสารช่วยกระจายตัว เช่น กรดสเตียริกขณะทำการผสม นอกจากนี้ยังเป็นสารตัวเติมที่ไม่มีประสิทธิภาพการเสริมแรง

- *ทัลคัม (Talcum)* มักใช้เป็นสารป้องกันการยึดติดของยาง และใช้เป็นสารตัวเติมแบบเสริมแรงในพลาสติก เช่น พอลิพรอพิลีน (PP)

- *ไมก้า (Mica)* เป็นสารตัวเติมที่แข็ง ช่วยในการเสริมแรง ทนต่ออุณหภูมิสูง และเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี แต่จะนิยมใช้ไมก้าในพลาสติกมากกว่ายาง เนื่องจากมีราคาแพง และมีสมบัติความต้านทานการแตกหักลดลง

- *แมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium carbonate)* เมื่อผสมในยางจะเพิ่มสมบัติการยึดหยุ่นดึงตัว และเสถียรภาพรูปทรง นิยมใช้เป็นสารตัวเติมในยางใส แต่มีราคาแพง

- *แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate)* เป็นสารตัวเติมแบบไม่เสริมแรง มีผิวเฉื่อย และทนต่อ - สารเคมี แต่เนื่องจากมีความหนาแน่นที่สูงมาก จึงนิยมใช้เพื่อปรับความหนาแน่นให้ยาง

2.4.2 สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders)

สารหน่วงปฏิกิริยาจะถูกใช้เพื่อเพิ่มเวลาก่อนการเชื่อมโยง (Scorch time) หรือป้องกันการเชื่อมโยงก่อนกำหนด เพื่อไม่ให้ยางเกิดการเชื่อมโยงในระหว่างการผลิต หรือขณะเก็บรักษา ทำให้สามารถเก็บยางผสมสูตรได้นานขึ้น ข้อสำคัญอีกอย่างของสารชนิดนี้คือ เมื่อสลายตัวแล้วจะต้องไม่ขัดขวางการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง และต้องไม่มีผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของยาง สารหน่วงปฏิกิริยาแบ่งได้ 2 ประเภทคือ

1. สารหน่วงปฏิกิริยาชนิดกรด (Acidic retarders) สารหน่วงปฏิกิริยาชนิดกรดนี้จะทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนในยางที่เป็นด่าง ซึ่งต่างนี้จะช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง แต่เมื่อเติมกรดลงไปการเชื่อมโยงจะเกิดช้าลง ตัวอย่างสารหน่วงปฏิกิริยาชนิดกรด เช่น กรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) และกรดมาลิก

(Maleic acid) สารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. **ไซโคลเฮกซิลไทโอพทาไลไมด์ (Cyclohexylthiophthalimide, CTP)** เป็นสารหน่วงปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงใช้ได้กับยาง และสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงหลายชนิด อีกทั้งไม่ทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนสี แต่ข้อจำกัดคือ ไม่สามารถใช้ร่วมกับระบบการเชื่อมโยงยางด้วยสารออกไซด์โลหะ

2.4.3 สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารช่วยในกระบวนการผลิต เป็นสารเคมีที่ผสมในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น สารช่วยในการผลิตมีหลายชนิด เช่น

- **เปปไทเซอร์ (Peptizer)** เป็นสารช่วยเร่งให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้ยางมีความหนืดน้อยลง มีความนิ่มตัวมากขึ้นง่ายต่อการผสม ตัวอย่างสารเปปไทเซอร์ เช่น กรดซัลโฟนิค (Sulfonic acid) เพนตะคลอโรไทโอฟินอล (Pentachlorothiophenol) เป็นต้น

- **พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers)** เป็นสารโมเลกุลขนาดเล็กที่สามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางได้ ช่วยเพิ่มปริมาตรอิสระให้ยาง ทำให้ยางนิ่มตัวมากขึ้น และลดพลังงานในการขึ้นรูป ข้อสำคัญคือ ต้องเข้ากับยางได้ดี และไม่เกิดการแพร่ที่ผิวหน้า (Bleeding) สารพลาสติกไซเซอร์อาจมีชื่อเรียกแตกต่างกันขึ้นอยู่กับหน้าที่ที่ใช้ เช่น สารเพิ่มความนิ่ม (Softener) สารเพิ่มเนื้อ (Extender) เป็นต้น ตัวอย่างสารพลาสติกไซเซอร์ ได้แก่ กลุ่มน้ำมันปิโตรเลียม เช่น น้ำมันอะโรมาติก น้ำมันแนฟทาติก และน้ำมันพาราฟิน อีกกลุ่มคือ น้ำมันเอสเทอร์ซึ่งเป็นเอสเทอร์ของกรดอินทรีย์หรือกรดฟอสฟอริก มักใช้ในการผสมยางทนน้ำมัน

2.4.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Protective agents)

ผลิตภัณฑ์ยางมักเกิดการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยางที่มีโครงสร้างไม่อิ่มตัว ซึ่งจะมีพันธะคู่ที่ยังว่องไวต่อปฏิกิริยา สาเหตุของการเสื่อมสภาพในยางมีที่มาจากหลายปัจจัย เช่น ออกซิเจน (O_2) โอโซน (O_3) ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และ โอโซนชันตามลำดับ หรือเสื่อมสภาพจากการล้า ความร้อน โลหะหนัก การบวมตัวเนื่องจากน้ำมันและตัวทำละลาย เป็นต้น

สารป้องกันการเสื่อมสภาพแบ่งได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆ 3 กลุ่ม ได้แก่

1. **สารแอนติออกซิแดนต์ (Antioxidants)** สารกลุ่มนี้จะป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยาของออกซิเจน โดยมีทั้งชนิดไม่เปลี่ยนสี และชนิดเปลี่ยนสี
2. **สารแอนติโอโซนแนนต์ (Antiozonants)** ทำหน้าที่ป้องกันการเสื่อมสภาพจากโอโซน สารแอนติโอโซนแนนต์ที่นิยมใช้คือ *Para - phenylene diamines, PPDs*
3. **แว็กซ์ (Wax)** หน้าที่นอกเหนือจากการช่วยผสมและหล่อลื่นแล้ว แวกซ์ยังสามารถช่วยป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยาของโอโซน โดยแว็กซ์จะแพร่มายังบริเวณผิวหน้าของยางแล้วเกิดเป็นชั้นฟิล์มเคลือบที่ผิวหน้า แต่แว็กซ์จะช่วยปกป้องได้ดีเมื่อยางอยู่ในสภาวะอยู่นิ่ง เพราะถ้าหากยางได้รับแรงจะทำให้ชั้นแว็กซ์แตกออกได้

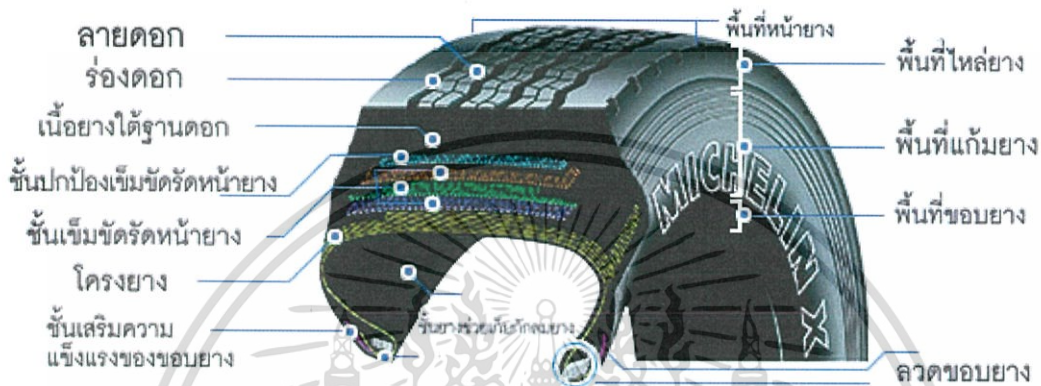
2.4.5 สารเติมแต่งชนิดอื่นๆ

- **สารให้สี (Colorants)** แบ่งได้เป็น สีอินทรีย์ และสีอนินทรีย์ โดยสีอินทรีย์จะให้สีที่สดใสใช้ในปริมาณน้อย แต่ราคาจะแพง และซีดลงได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดเป็นเวลานาน ส่วนสีอนินทรีย์จะให้สีที่ทึบ และต้องใช้ในปริมาณมาก แต่สีที่ได้มีมีการยึดติดคงทนมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สารเพิ่มการยึดติด (*Tackifiers*) จะช่วยเพิ่มให้ยางยึดติดกับวัสดุอื่น หรือยึดติดกับยางด้วยกันเองได้ดีขึ้น ตัวอย่างสารยึดติด เช่น ชั้นสน ปิโตรเลียมเรซิน เป็นต้น
- สารขัดสี (*Abrasion*) เป็นสารที่ใส่เพื่อเพิ่มการขัดสีให้กับวัสดุ เช่น ยางลบ
- สารลดไฟฟ้าสถิตย์ (*Antistatic agent*) ช่วยลดไฟฟ้าสถิตย์ในชิ้นงานยางโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณผิวหน้า สารลดไฟฟ้าสถิตย์ที่ใช้ในยางคือ เขม่าดำชนิด Conductive channel black

2.5 กระบวนการผลิตยางรถยนต์ [5]



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของยางรถยนต์ [10]

2.5.1. ส่วนประกอบต่างๆ ของยางรถยนต์

1. **หน้ายาง** (Tread) คือ ส่วนประกอบที่อยู่นอกสุดของยาง และเป็นส่วนเดียวที่สัมผัสผิวถนนทำหน้าที่ป้องกันของมีคมที่จะทำอันตรายต่อโครงยาง ที่หน้ายางจะประกอบไปด้วยดอกยาง และร่องยางทำหน้าที่ในการยึดเกาะถนน ดอกยางมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันออกไป ในการใช้จึงควรเลือกชนิดของดอกยางให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน
2. **ไหล่ยาง** (Shoulder) เป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างหน้ายางกับแก้มยางมีความหนาใกล้เคียงกับหน้ายาง ปกติไหล่ยางจะถูกออกแบบเป็นร่องให้เหมาะสม เพื่อช่วยระบายความร้อนภายในยางให้ออกมาได้ง่าย
3. **แก้มยาง** (Side wall) เป็นส่วนด้านข้างสุดของยางที่ไม่ได้สัมผัสพื้นผิวถนนขณะที่รถวิ่งอยู่ และเป็นส่วนที่ยืดหยุ่นมากที่สุดของยางในขณะใช้งาน ทำหน้าที่หุ้มโครงยางเพื่อป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากการใช้งาน และป้องกันไม่ให้ความชื้นผ่านเข้าไปทำความเสียหายแก่โครงยางได้
4. **โครงยาง** (Carcass) เป็นส่วนประกอบหลักของยางทำขึ้นจากชั้นผ้าใบ (Textiles) ที่วางซ้อนกันหลายๆ ชั้น (Body ply) แล้วขึ้นรูปเป็นโครงยางทำหน้าที่คงรูปร่าง และรักษาความดันลมภายในยางเพื่อให้ยางสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้รวมถึงต้องทนทานต่อแรงกระแทกหรือสั่นสะเทือนจากถนนที่มีต่ออย่างดี
5. **ผ้าใบเสริมหน้ายางหรือเข็มขัดรัดหน้ายาง** (Breaker or belt) เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างหน้ายางกับโครงยางในกรณียางธรรมดา (Bias tire) เราเรียกว่า “ผ้าใบเสริมหน้ายาง (Breaker)” ส่วนในกรณียางเรเดียล (Radial tire) จะเรียกว่า “เข็มขัดรัดหน้ายาง (Belt)” ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้ายางให้ยางสามารถรับแรงกระแทกได้ดี และป้องกันไม่ให้โครงยางชำรุดเสียหายจากสิ่งอันตรายต่างๆ จากพื้นถนน

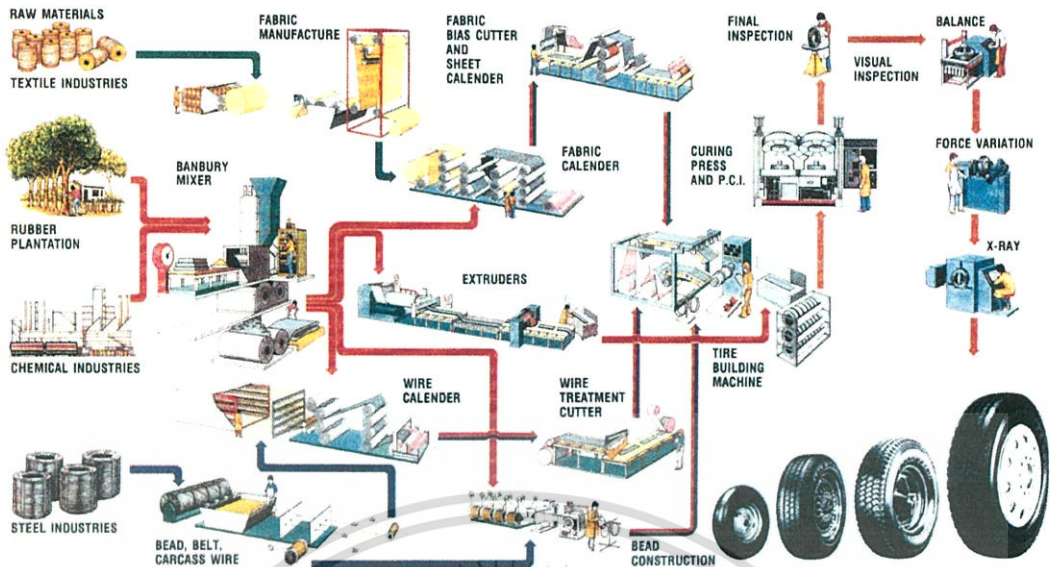
6. ขอบยาง (Bead) ประกอบด้วยกลุ่มของเส้นลวดเหล็กกล้า (High carbon steel) ที่ช่วยยึดส่วนปลายทั้งสองข้างของโครงยางเอาไว้ เพื่อให้บริเวณขอบยางมีความแข็งแรงสามารถยึดแน่นสนิทกับกระทะล้อได้ดีเมื่อนำไปใช้งาน

นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบย่อยอื่นๆ เช่น ผ้าใบหุ้มขดลวด และยางแข็งๆ ที่มีลักษณะคล้ายสามเหลี่ยม ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างส่วนที่แข็งคือ บริเวณขอบยางกับส่วนที่อ่อน และยืดหยุ่นคือ บริเวณแก้มยาง และยังมีผ้าใบหุ้มขอบลวดที่อยู่ด้านนอกสุดของขอบยาง เพื่อป้องกันการเกิดอันตรายกับโครงยางจากการถอดประกอบเข้ากับกระทะล้อในแต่ละครั้งด้วย

2.5.2 ขั้นตอนการผลิตยางรถยนต์

1. การผสมยาง นำวัตถุดิบทั้งหมด ได้แก่ ยางดิบ (ยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์) ผงเขม่าดำ กำมะถัน และสารเคมีอื่นๆ มาผสม และบดเข้าด้วยกัน แล้วรอให้เย็นจากนั้นเคลือบด้วยน้ำแป้ง เพื่อป้องกันการติดกันของยางแล้วรีดออกมาเป็นแผ่นยางคอมปาวด์ จากนั้นนำมาแบ่งเพื่อใช้ในการผลิตส่วนต่างๆ
2. การผลิตชั้นผ้าใบ รีด และฉาบยางลงบนผ้าใบไนลอน หรือโพลีเอสเตอร์ ทั้ง 2 ด้าน เส้นใยจะผ่านเข้าไปในลูกกลิ้งของเครื่องฉาบผ้าใบ (Calender) และเครื่องก็จะอัดยางลงบนเส้นใยทั้งสองหน้า จำนวนของยางที่จะอัดลงบนเส้นใยนี้จะต้องมีการควบคุม เพราะมีผลต่ออายุการใช้งานของยาง จากนั้นก็ผ่านไปยังเครื่องตัดผ้าใบ (Bias cutter) จะได้เป็นโครงผ้าใบ
3. การผลิตขอบลวด ฉาบยางบนเส้นลวดทองแดงที่เรียงกันอยู่ จากนั้นม้วนเส้นลวดที่เคลือบยางแล้วให้เป็นวงกลมจะได้ขอบลวดออกมา (Bead rings)
4. การผลิตหน้ายาง นำยางคอมปาวด์ที่แบ่งไว้มาทำการนวดยางให้อ่อนตัวลงอีกครั้งด้วยเครื่อง Extruder ยางจะดันผ่านแม่พิมพ์ออกมาให้มีรูปร่าง และขนาดตามต้องการ ตัดยางเป็นท่อนตามความยาวที่กำหนด จะได้หน้ายาง (Tread)
5. การผลิตเข็มขัดรัดหน้ายาง เคลือบยางบนเส้นลวดทองเหลืองหลายเส้นที่วางเรียงเป็นแผงแล้ว โดยจะเคลือบลวดทั้งด้านบน และด้านล่างซึ่งมีความดันเท่ากันทั้งหมด ได้เป็นแผ่นที่มีผิวเรียบ
6. การประกอบและขึ้นรูปยาง ยางรถจะถูกประกอบขึ้นบนเหล็กทรงกระบอก (Drum) หรือใช้เครื่องขึ้นรูปยาง (Tyre - automatic build machine) โดยติดโครงผ้าใบลงไปบนเครื่องขึ้นรูปยาง แล้วนำวงลวดขอบยางมาติดทั้งสองด้าน จากนั้นติดเข็มขัดรัดหน้ายาง แก้มยาง หน้ายาง ตามลำดับ จะได้โครงยางสำเร็จรูป (Green tire)
7. การอบยาง ยางรถดิบจะถูกใส่ลงในแม่พิมพ์ เมื่อแม่พิมพ์ปิดยางรถดิบ ก็จะได้รับแรงอัดจนมีรูปร่างตามแม่พิมพ์ที่ออกแบบไว้ ความร้อนจากไอน้ำในแม่พิมพ์ จะทำให้เนื้อยางไหลจนเต็มแบบ
8. การตัดยางส่วนเกินออก ยางที่ผ่านการอบแล้ว จะถูกนำมาตัดส่วนเกินออก ที่เรียกว่า “หนวดยาง”
9. การตรวจสอบยาง ตรวจสอบความเรียบร้อย และค่าความสมดุลต่างๆ ของยาง

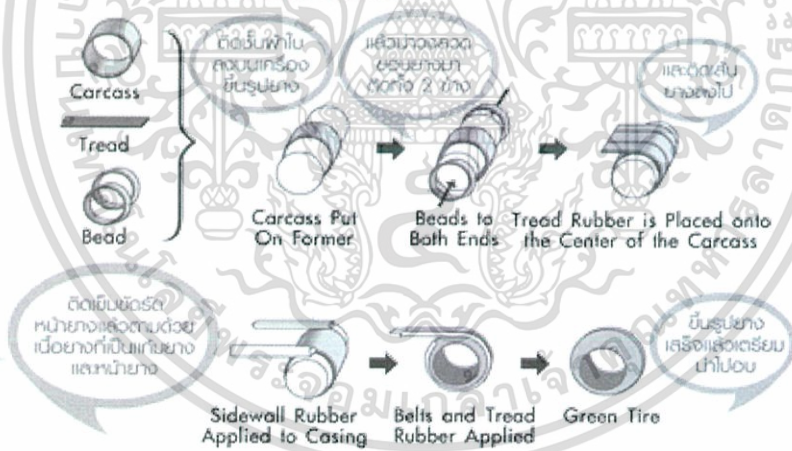
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 กระบวนการผลิตยางรถยนต์ [11]

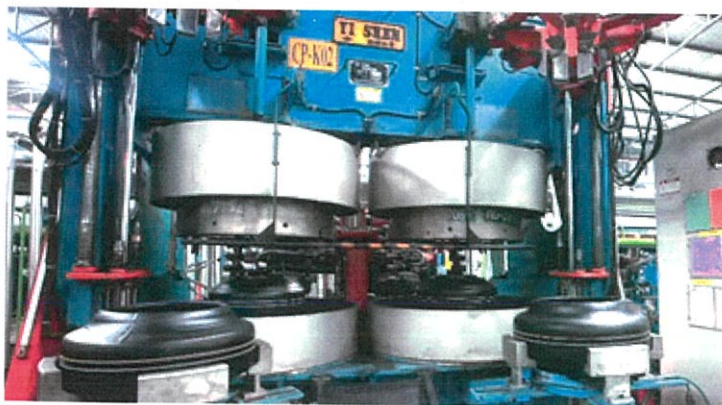
ขั้นรูปอย่างและประกอบยาง

เริ่มจากตัดขึ้นฟ้าใบลงในเครื่องขึ้นรูปยาง แล้วนำวงสวด ยอนยาง มาตัดทั้ง 2 ด้าน จากนั้นตัดเข็มขัดรัดหน้ายาง แกนยาง หน้ายาง ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 กระบวนการประกอบและขึ้นรูปยางรถยนต์ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



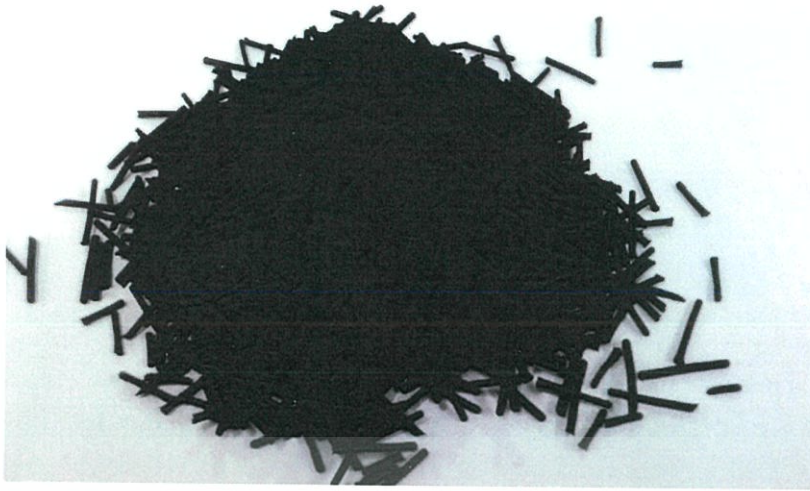
รูปที่ 2.14 กระบวนการอบขยงรถยนต์ [13]



รูปที่ 2.15 กระบวนการตัดขยงส่วนเกิน [9]

2.6 ลักษณะหนวดขยงและกลไกการยึดติด [14]

หนวดขยง คือขยงส่วนเกินจากบริเวณหน้าขยงของขยงรถยนต์ที่ประกอบไปด้วยขยงธรรมชาติ ขยงสไตรีนบิวตะไดอิน ขยงบิวตะไดอิน และสารเคมีขยงต่างๆ ซึ่งขั้นตอนการอบขยงในกระบวนการผลิตขยงรถยนต์ จะมีเศษเหลือจากหน้าขยงที่ดันออกมาจากช่องระบายอากาศ (Air - vent) ในแม่พิมพ์ เพื่อลดจุดบกพร่องที่เกิดจากช่องว่างอากาศ อีกทั้งยังช่วยระบายแก๊สและขยงส่วนเกินออก เพื่อให้มั่นใจว่าขยงเต็มแม่พิมพ์ได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นขยงส่วนเกินเหล่านี้จะถูกตัดทิ้งกลายเป็นขยะที่สร้างรายจ่ายในการกำจัดของโรงงาน

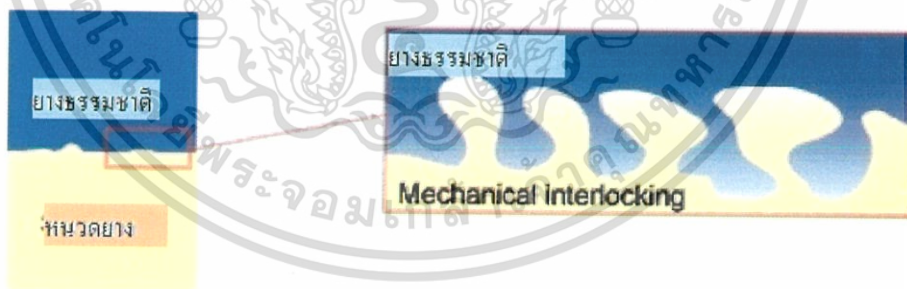


รูปที่ 2.16 ตัวอย่างหนวดยาง

กลไกการยึดติดระหว่างหนวดยางกับยางธรรมชาติมีกลไกที่สำคัญ 2 กลไก ได้แก่

2.6.1 กลไกการยึดติดเชิงกล (Mechanical interlocking)

กลไกการยึดติดเชิงกลเกิดจากการไหลของสายโซ่โพลิเมอร์ของยางธรรมชาติเข้าไปแทนที่ช่องว่างอากาศบนพื้นผิวของหนวดยาง เมื่อยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมโยงจะแข็งตัว และลึอกติดอยู่กับพื้นผิวหนวดยาง ดังรูปที่ 2.17 โดยกลไกนี้จะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อผิวหน้าของหนวดยางมีความขรุขระ เพราะความขรุขระจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของหนวดยาง และยางธรรมชาติได้มากขึ้น ทำให้เกิดการยึดติดได้ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงทดลองเพิ่มพื้นที่ผิวหนวดยางผ่าน 2 วิธี คือทำการบดหนวดยางให้มีขนาดเล็กลง และการทดลองปรับปรุงผิวหนวดยางที่ไม่ผ่านการบดด้วยสารออกซิไดซ์ซึ่ง



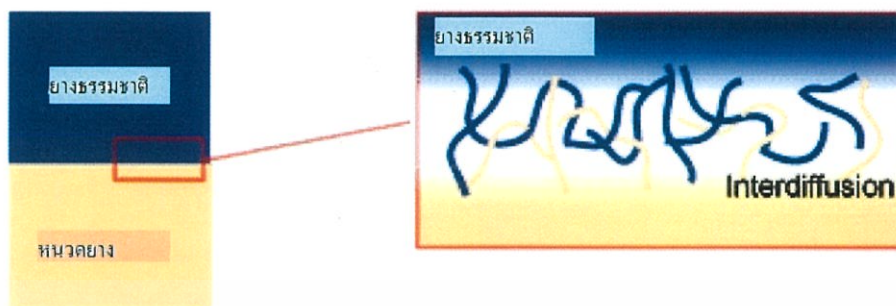
รูปที่ 2.17 กลไกการยึดติดเชิงกล [14]

2.6.2. การยึดติดแบบแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion)

การยึดเกาะเช่นนี้จะเกิดได้เมื่อสายโซ่โพลิเมอร์ของพอลิเมอร์บริเวณพื้นผิวสัมผัสทั้งสองชนิดมีการแพร่ (Diffusion) เข้าหากันและกัน ดังรูปที่ 2.18 โดยความแข็งแรงของการยึดเกาะแบบแพร่เข้าหากันจะขึ้นอยู่กับปริมาณการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โพลิเมอร์ (Molecular entanglement) ว่ามีปริมาณมากหรือน้อย แต่ความสามารถในการในการแพร่ และการเกี่ยวพันกันของสายโซ่จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำให้หนวดยางบวมตัวในตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เหมาะสม เพื่อให้สายโซ่โมเลกุลของหน่วยที่ยังไม่ผ่านการเชื่อมโยงสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น และเกิดการยึดเกาะกับยางธรรมชาติได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2.18 กลไกการยึดติดแบบแพร่เข้าหากัน[14]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

H. Ismail และคณะ [15] ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง, สมบัติการทนต่อแรงดึง และการบวมตัวของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมเป็นผงยางบริไซเคิล วัสดุที่ใช้ในการทดลองได้แก่ยางธรรมชาติเกรด (SMR L), ผงยางริไซเคิลที่ (RRP) ผ่านการบดให้มีขนาด 250 - 500 μm โดยปรับเปลี่ยนปริมาณเป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 phr และสารตัวเติมพื้นฐานอื่นๆ ที่ใช้ในการทำยางผสมสูตร แล้วผสมด้วยเครื่องรีดแบบสองลูกกลิ้ง จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ข้างต้นซึ่งได้ผลดังนี้

ผลการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ RRP ในยางผสมสูตร จะทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง และ เวลาเชื่อมโยงลดลง เนื่องจากภายใน RRP ยังคงมีสารกระตุ้น หรือสารเชื่อมโยงที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา เมื่อนำมาผสมในยางผสมสูตรจะช่วยลดเวลาในการเชื่อมโยงลง แต่ปริมาณ RRP ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลเสียต่อกระบวนการขึ้นรูป เพราะยางผสมสูตรที่ได้จะมีความสามารถในการไหลลดลง เนื่องจากอนุภาคของผงยางบดที่เป็นเม็ดผงในเนื้อยาง และยังเป็นยางที่ผ่านการเชื่อมโยงมาบางส่วน จึงยากต่อการไหลในเนื้อยางที่เป็นเมทริกซ์ ฉะนั้นจึงทำให้ค่าแรงบิดต่ำสุดมีค่าสูงขึ้น

ผลจากการศึกษาสมบัติการทนต่อแรงดึงพบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ของยางผสมสูตรจะมีค่าสูงสุดที่ RRP 10 phr หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ RRP ค่าความแข็งแรงดึงจะลดลง เนื่องจากการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติที่เป็นเมทริกซ์กับ RRP จะแย่ง อีกรังยังเพิ่มปริมาณ RRP จะเกิดการรวมกันของอนุภาคกลายเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการการอันตรกิริยาระหว่าง Particle - Particle ของ RRP แทน จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าต่ำลง เช่นเดียวกัน เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สำหรับผลของ มอดุลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด 100 และ 200 จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณ RRP เนื่องจาก RRP เป็นสารตัวเติมที่แข็งจึงมีค่าความแข็งแรงที่สูงกว่ายางธรรมชาติที่เป็นเมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการศึกษาเรื่องการบวมตัวในโพลูอินของยางผสมสูตร โดยใช้ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมโยงมาทดสอบ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ RRP จะทำให้ยางผสมสูตรทนต่อการบวมตัวได้มากขึ้น เนื่องจาก RRP ที่เกิดการเชื่อมโยงอยู่แล้วจะช่วยลดการแทรกซึมของโพลูอินในเนื้อยางผสมสูตร

A. A. Yehia และคณะ [16] ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวผวยาลัทธิยนต์บด ซึ่งใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่มีต่อสมบัติด้านการไหล สมบัติเชิงกายภาพ การบวมตัวในโพลูอิน และสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน (Aging properties) โดยนำยางลัทธิยนต์ที่ผ่านการใช้งานมาบดให้ได้ขนาด 125 - 500 ไมครอน จากนั้นปรับปรุงผิวผวยาลัทธิยนต์ด้วยสารออกซิไดซ์ซึ่งได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% และกรดไนตริก 66% ซึ่งถูกปรับเปลี่ยนความเข้มข้นเป็น 10% 20% 30% และ 60% จากนั้นนำผวยาลัทธิยนต์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวมาผสมกับยางธรรมชาติ และสารเคมียางแล้วขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ จากการปรับปรุงผิวผวยาลัทธิยนต์ด้วยสารออกซิไดซ์ซึ่งทั้งสองชนิดสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (IR spectrometer) โดยพบว่ามีแถบความถี่ช่วง 1710 และ 1720 cm^{-1} ซึ่งเป็นช่วงการสั่นของหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น จะช่วยเพิ่มความมีขั้วให้กับพื้นผิวของผวยาลัทธิยนต์ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงได้ เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้อาจไปเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ที่เป็นสารตัวกลางอยู่ในยางตัวอย่างเช่น หมู่คาร์บอนิล แอลดีไฮด์ หรือหมู่คาร์บอกซิลิกที่มีอยู่ในผวยาลัทธิยนต์ที่ผ่านการปรับปรุงผิว อาจเกิดการรวมตัวกันกับหมู่เอมีโนที่เหลือตกค้างในยาง หรือเกลืออินทรีย์ แล้วทำให้เกิดการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น

ผลที่ได้จากการใช้สารตัวเติมเป็นผวยาลัทธิยนต์ที่ผ่านการปรับปรุงผิว ได้ผลตามตารางที่ 2.2 จากตารางพบว่า ผวยาลัทธิยนต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดไนตริกจะทำให้ยางผสมสูตรมีค่าแรงบิดสูงสุด (M_{HF}) ค่าแรงบิดต่ำสุด (M_L) เวลาก่อนการเชื่อมโยง (t_{c2}) และเวลาในการเชื่อมโยง (t_{c90}) เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรดไนตริกขึ้นถึง 20% แต่หลังจากนั้นค่าที่ได้จะลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของกรดไนตริกที่มากเกินไป เช่นเดียวกับค่าการรับแรงดึง ได้แก่ โมดูลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด 200 ความแข็งแรงดึง และ เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ได้ค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นกรดไนตริก 20% ดังนั้นในกรณีการปรับปรุงผวยาลัทธิยนต์ด้วยกรดไนตริกความเข้มข้นที่ 20% เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด และหากเปรียบเทียบระหว่างยางผสมสูตรที่ปรับปรุงผิวด้วย 20% HNO_3 และ 30% H_2O_2 จะพบว่าลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรทั้งสองไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรที่ปรับปรุงผิวด้วย 30% H_2O_2 จะมีค่ามากกว่า

ตารางที่ 2.2 สมบัติการไหล และสมบัติกายภาพของยางธรรมชาติที่เติมผวยาลัทธิยนต์ที่ปรับปรุงผิว [16]

Code	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{15}
Oxidizing agent	—	—	—	HNO ₃		H ₂ O ₂
Concentration, %	—	10	20	30	60	30
RP, phr	40	40	40	40	40	40
Rheometric characteristics at 142 °C						
M_L , dNm	1	1	1	2	2	2
M_{11} , dNm	36	30	41	35	28	40
T_{c90} , min	12.5	12.2	12.5	11.8	11.8	11.5
T_{c2} , min	3.5	3.5	3.5	3.2	3.0	3.5
CRI, min ⁻¹	11.1	11.5	11.1	11.6	11.4	12.5
Physicomechanical properties at room temperature						
M 200%, MPa	1.5	1.8	2.4	1.8	1.8	3.0
TS, MPa	5.6	7.4	8.1	7.1	6.8	9.1
ϵ , %	450	450	467	450	400	500
Q_{90} , %	225	222	226	223	221	227

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างยางผสมสูตรที่ใช้สารตัวเติมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว และสารตัวเติมที่ปรับปรุงผิวด้วย 20% HNO_3 และ 30% H_2O_2 พบว่า ยางผสมสูตรที่เติมผงยางที่ผ่านการปรับปรุงผิวจะช่วยเพิ่มค่าแรงบิดสูงสุด เวลาเริ่มเชื่อมโยง และอัตราเร็วในการเชื่อมโยง อีกทั้งยังช่วยลดเวลาในการเชื่อมโยงให้สั้นลง นอกจากนี้การปรับปรุงพื้นผิวของผงยางยังช่วยให้ยางผสมสูตรมีความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นมากกว่ายางผสมสูตรที่เติมผงยางที่ไม่ปรับปรุงผิว และยังช่วยให้การบวมตัวในโทลูอีนลดลงอีกด้วย

ผลจากการทดสอบ Thermal oxidative aging พบว่าที่ทุกชั้นงานทดสอบ (ยางผสมสูตรที่เติมผงยางที่ปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว) จะมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ความสามารถในการดึงยึดจะลดลง (ยางมีลักษณะแข็งเปราะ) รวมทั้งการบวมตัวในโทลูอีนลดลงเช่นกัน แต่ผลจากยางผสมสูตรที่เติมผงยางที่ผ่านการปรับปรุงผิวจะพบว่า ความต้านทานต่อ Thermal oxidative aging จะลดลงเนื่องจากผงยางเหล่านี้ผ่านการออกซิไดซ์มาแล้ว และนำมาผสมกับยางจะเกิดการออกซิไดซ์ในยางต่อไปเรื่อยๆ ตลอดอายุการใช้งาน และถึงแม้ว่ายางผสมสูตรที่เติมผงยางปรับปรุงผิวจะให้สมบัติที่ดีกว่าผงยางที่ไม่ปรับปรุงผิว แต่สมบัติเหล่านี้ยังด้อยกว่ายางผสมสูตรที่ไม่ใส่สารตัวเติมใดๆ เลยสรุปคือ ผงยางทั้งสองชนิดมีหน้าที่แค่เป็นสารตัวเติมที่ช่วยเพิ่มปริมาตรยางผสมสูตร แต่ไม่ช่วยเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติ

U. S. Ishiaku และคณะ [17] ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ใช้ผงยางที่ผ่านการเชื่อมโยงเป็นสารตัวเติม วิธีทดลองเริ่มจากนำขยะเศษยาง (RP) ที่ผ่านการเชื่อมโยงมาดด้วยวิธี Sanding process (Polishing) มาผสมกับยางธรรมชาติ และสารเคมียางด้วยปริมาณตั้งแต่ 0 - 70% แล้วทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกล

ผลการทดลองพบว่าค่าแรงบิดต่ำสุด (M_L) มีค่าต่ำสุดที่ปริมาณ RP 20% หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ RP มากขึ้น พบว่าค่าแรงบิดต่ำสุดจะเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากอนุภาคของ RP เป็นยางที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว ซึ่งยากต่อการไหลในเมทริกซ์ยาง ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณ RP มากขึ้น ความสามารถในการไหลของยางผสมสูตรจะลดลง แต่การลดลงที่เกิดขึ้นเป็นการลดแบบไม่พบนัยสำคัญ ฉะนั้นจะไม่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูป สำหรับค่าแรงบิดสูงสุดพบว่า (M_H) เมื่อเพิ่มปริมาณ RP จะทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจาก RP ซึ่งเป็นยางที่เชื่อมโยงมาแล้วจึงมีค่ามอดุลัสสูงกว่าเมื่อเทียบกับเมทริกซ์ยาง จึงทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดสูงขึ้น และเช่นเดียวกันกับค่าความต่างของแรงบิดซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงขอบเขตการเชื่อมโยงที่เป็นผลมาจากการเชื่อมโยงใหม่ที่กำลังเกิดกับยางผสมสูตร และการเชื่อมโยงที่มีอยู่เดิมใน RP

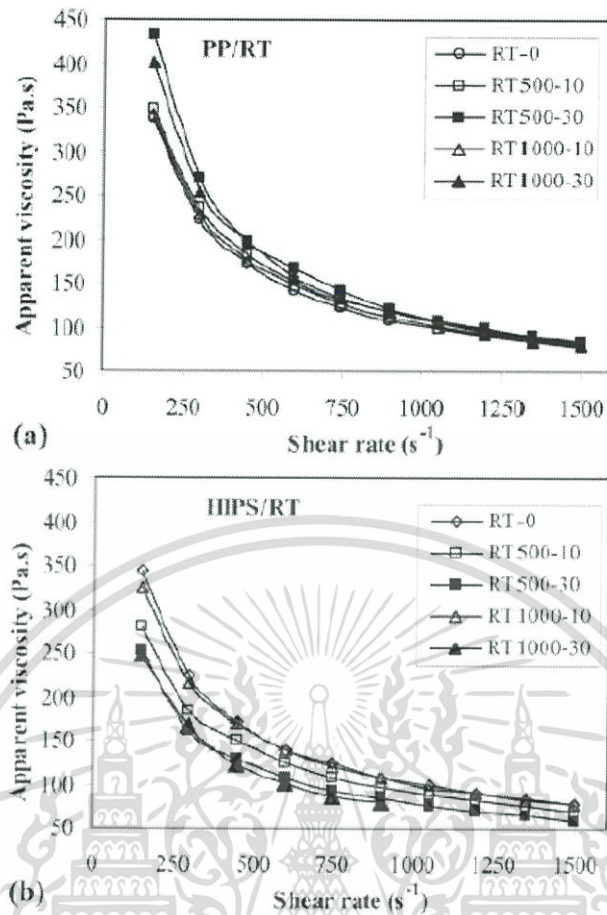
ผลการทดสอบเรื่องเวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{s2}) และเวลาเชื่อมโยง ($t_{c(90)}$) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ RP เนื่องจากกำมะถันจะแพร่จากเมทริกซ์ยางเข้าสู่ RP อีกทั้งสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงรูปแบบซับซ้อนซึ่งยังไม่เกิดปฏิกิริยาที่อยู่ใน RP แพร่ไปสู่เมทริกซ์ยางเช่นกัน ทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงลดลง

ผลการทดสอบเรื่องสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ RP ถึง 20% จะได้ค่าความแข็งแรงดึง (TS) สูงสุด หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ RP มากขึ้น พบว่าค่าความแข็งแรงดึงจะลดลงเรื่อยๆ และที่ปริมาณ RP 30% จะให้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับยางผสมสูตรที่ไม่ใส่สารตัวเติม สาเหตุเนื่องจากในช่วงแรกที่มี RP ปริมาณน้อยจะยังคงมีการยึดระหว่างพื้นผิวของ RP กับเมทริกซ์ยางที่ดี และ RP เป็นอนุภาคที่มีมอดุลัสสูงกว่ายาง ฉะนั้นในช่วงนี้จึงเปรียบเสมือนเป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงให้เมทริกซ์ยาง ทำให้ชิ้นงานยางมีความแข็งแรงดึงสูง แต่หลังจากเมื่อเพิ่ม RP มากกว่า 20% พบว่า RP การค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะจับตัวกันเป็นแอ็กโกลเมอเรตซึ่งมีอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค - อนุภาคมากขึ้น และปริมาณ RP ที่เพิ่มขึ้น ยังทำให้เมทริกซ์ยางห่อหุ้มไม่ครอบคลุมทั้งหมดจึงทำให้ความแข็งแรงดิ่งลดลง สำหรับค่าการดื่อยืด ณ จุดขาด (Elongation at break, EB) จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ RP แต่สำหรับค่ามอดุลัสที่ 100 และ 300 (M100 และ M300) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ RP เช่นเดียวกับผลของค่าแรงบิดสูงสุด ความแข็งกด และความแข็งแรงฉีกขาด

ผลจากการศึกษาความแข็งกด พบว่าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ RP เนื่องจากเหตุผลสองปัจจัย อย่างแรกคือ อนุภาค RP มีมอดุลัสสูงกว่าเมทริกซ์ยาง และในขณะที่เกิดการเชื่อมโยงสารเชื่อมโยงที่แพร่เข้าไปใน RP จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น ค่ามอดุลัสของ RP ก็เพิ่มขึ้นตามเช่นกัน ปัจจัยที่สองคือ สารตัวเติมมีความเป็น Semi - rigid

L. S. Montagna และคณะ [18] ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคยางที่เติมลงในพลาสติกรีไซเคิลต่อสมบัติด้านต่างๆ ในการศึกษาจะใช้เศษขยะยางที่เหลือทิ้งมาบดให้มี 2 ขนาดคือ 500 ไมครอน และ 500 - 1000 ไมครอน จากนั้นนำผงยาง (Tyre rubber, TR) มาเติมลงในพลาสติกรีไซเคิล 2 ชนิดได้แก่ Polypropylene (PP) และ High impact polystyrene (HIPS) ซึ่งถูกตัดให้เป็นแผ่นขนาดเล็ก โดยหน้าที่ของพลาสติกคือ จะเป็นเมทริกซ์ให้กับผงยาง จากนั้นจึงขึ้นรูปของผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบฉีด แล้วทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ของชิ้นงาน เช่น สมบัติการไหล สมบัติกายภาพ และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโดยอัตราส่วนของ PP/RT และ HIPS/RT จะทำที่ทั้งสองอัตราส่วนคือ 90/10 และ 70/30 นอกจากนี้จะยังพิจารณาชนิด และขนาดของ RT ที่มีผลต่อสมบัติของพลาสติกที่ได้ ผลจากการศึกษาสมบัติการไหลได้ผลดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความหนืด (a) คือ PP ที่เติม RT และ (b) คือ HIPS ที่เติม RT [18]

จากกราฟสามารถอธิบายผลได้ดังนี้ จากรูปที่ 2.19 (a) ซึ่งเป็นกราฟของ PP/RT พบว่าที่ขนาด RT 500 ไมครอน จะทำให้ของผสมมีความหนืดสูงที่สุด เนื่องจากขนาดผงยางที่เล็กจะมีพื้นที่ผิวมากจึงเกิดอันตรกิริยาระหว่าง Filler - Matrix ได้ดี เช่นเดียวกันกับผลจากการเพิ่มปริมาณ RT สำหรับรูปที่ 2.19 (b) เป็นกราฟของ HIPS/RT จากกราฟพบว่า ผลที่ได้จะตรงข้ามกับกราฟของ PP/RT คือ ที่ขนาด RT 500 หรือเมื่อเพิ่มปริมาณ RT ลงใน HIPS matrix จะทำให้ความหนืดลดลง อธิบายได้ว่าเป็นผลจากธรรมชาติของเมทริกซ์ซึ่งแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ลักษณะของสารตัวเติมมีผลเช่นเดียวกัน ยิ่งสารตัวเติมมีพื้นที่ผิวที่หยาบมากทำให้ของผสมต้านทานต่อการเสีรูปจากการไหลได้ดี และทำให้ความหนืดมีค่าสูงขึ้น

ผลจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพด้านความหนาแน่นพบว่า ทั้ง PP/RT และ HIPS/RT ที่ขนาดอนุภาค RT 500 - 1000 ไมครอน ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุผสมลดลงมากที่สุด เนื่องจากขนาด RT ที่ใหญ่จะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย การผสมจึงไม่ดี และทำให้เกิดช่องว่างอากาศภายในชิ้นงาน ความหนาแน่นจึงลดลง แต่ถ้าหากเติม RT 500 ไมครอน ทำให้เกิดช่องว่างอากาศน้อยกว่า เนื่องจากขนาดที่เล็ก และมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากจึงไหลได้ดี ทำให้ได้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง ผลจากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ RT ใน PP จะทำให้วัสดุผสมมีค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสของยังลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัว และค่าความแข็งแรงการโค้งงอจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณ และขนาดของ RT นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณ RT ยังส่งผลให้ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งแรงกระแทก (Impact strength) ลดลงอีกด้วย โดยสรุปแล้วสารตัวเติม RT ที่ใส่ลงไปพลาสติก รีไซเคิลมีหน้าที่แค่ช่วยเพิ่มเนื้อแต่ไม่เสริมแรง อีกทั้งยังทำให้ความแข็งแรงลดลง แต่หากไม่คำนึงถึงความแข็งแรงมากนักสามารถใช้ RT เป็นสารตัวเติมได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ขนาดอนุภาคเล็กก็ช่วยในเข้ากันกับพลาสติกได้ดี และนอกจากจะช่วยลดต้นทุนการผลิตแล้วยังช่วยลดปริมาณขยะได้อีกด้วย

M. S. Sobhy และคณะ [19] ศึกษาเกี่ยวกับผลของการเติมผงยางลงในยาง SBR ต่อสมบัติด้านการบวมตัวในตัวทำละลายแต่ละชนิด โดยในการทดลองจะนำยางเหลือทิ้งมาบดให้มีขนาด 125 ไมครอน และ 200 ไมครอน แล้วนำผงยางแต่ละขนาดมาผสมลงในยาง SBR ด้วยเครื่องผสมสอง ลูกกลิ้ง จากนั้นจึงนำยางผสมสูตรที่ได้มาเชื่อมโยงด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปจะได้เป็นชิ้นงานยางที่มีความคงรูป ผลจากการบวมตัวในตัวทำละลายพบว่า ตัวทำละลาย DMF ทำให้เกิดการบวมตัวของยางน้อยที่สุด ส่วนตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม (Chloroform) ทำให้แผ่นยางเกิดการบวมตัวได้มากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมผงยางขนาดใหญ่ลงในยาง SBR จะทำให้ยางใช้เวลาในการเชื่อมโยงนานเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการเติมผงยางขนาดเล็ก

D. S. Ogunniyi และคณะ [20] ศึกษาสมบัติของยางคอมปาวด์ที่มีส่วนประกอบของผงยางเหลือทิ้งที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ยางธรรมชาติเกรด (SMR 20) ผงยางเหลือทิ้งที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว และสารเคมีต่างๆ ที่ใช้โดยทั่วไปในยางคอมปาวด์ จากนั้นผสมยางโดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ข้อมูลในตารางต่อไปนี้จะแสดงถึงสูตรยาง และลักษณะการเชื่อมโยงยางคอมปาวด์

ตารางที่ 2.3 ผลการเชื่อมโยงของยางแต่ละสูตร [20]

Compounding formulation	1	2	3	4	5	6	7
Natural rubber	100	100	100	100	100	100	100
Stearic acid	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Zinc oxide	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Powdered rubber waste	-	5	10	20	30	40	60
MBTS (Dibenzothiazyl disulphide)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
DPG (Diphenylguanidine)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Sulfur	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Results							
Scorch time at 180 °C t_2 (s)	91	95	96	76	74	73	66
Cure time at 180 °C t_{90} (s)	146	157	166	145	144	147	139
Hardness, shore A	33	36	37	37	38	40	41
300% Modulus (MPa)	0.87	1.21	1.23	1.37	1.73	2.08	2.31
Elongation - at - break (%)	1000	710	663	850	630	590	520
Tensile strength (MPa)	16.9	16.3	13.4	13.2	13.1	10.7	8.7

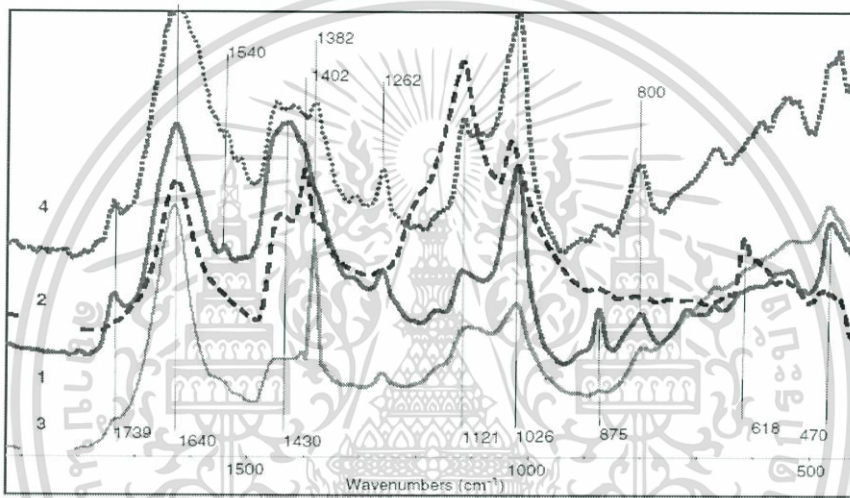
ผลของผงยางเหลือทิ้งต่อยางธรรมชาติ พบว่าตารางที่ 2.3 มียางคอมปาวด์ที่ไม่เติมสารตัวเติมเป็นตัวควบคุม และมีสูตรยางคอมปาวด์ที่ประกอบไปด้วยปริมาณของผงยางเหลือทิ้งที่แตกต่างกัน ซึ่งได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบแนวโน้มของค่าเวลาเริ่มเชื่อมโยง เมื่อเติมผงเศษยางเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมผงยางเหลือทิ้งเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งกด และมอดุลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด 300 เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ณ จุดขาด จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมผงยางเหลือทั้ง Burgoyne, Leaker และ Krekic ได้ รายงานไว้ว่าค่าความแข็งแรงดิ่งจะลดลง 15 % สำหรับสารประกอบที่ประกอบไปด้วยผงยางเหลือทั้ง 10% ขนาด 425 - 600 ไมครอน ผลของการศึกษาแนวโน้มของค่า Scorchiness ในสารประกอบที่ประกอบไปด้วยผงยางเหลือทั้งอาจมีผลมาจากการไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีในผงยางเหลือทั้ง ตัวอย่างเช่น Gibala และ Hamed จะแสดงให้เห็นถึงสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่แตกตัวออกมา แล้วเคลื่อนย้ายจากผงยางเหลือทั้ง Vulcanized ไปยังเมทริกซ์ของยางเป็นเหตุให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงลดลง อีกทั้งแหล่งของผงยางเหลือทั้งยังส่งผลต่อสารประกอบสุดท้ายและสมบัติการ Vulcanizate ผลของการเกิดพันธะที่ผิวหน้าระหว่างผงยางเหลือทั้งและยางเมทริกซ์เพียงเล็กน้อยอาจจะให้เกิดการลดลงของสมบัติเมื่อผงยางเหลือทั้งถูกรวมเข้าด้วยกัน ความพยายามที่จะการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวอนุภาคผงยางเหลือทั้งหลังจากเกิดพันธะ และการรวมเข้าด้วยกันกลายเป็นยางคอมปาวด์แล้ว อาจจะส่งผลในการปรับปรุงสมบัติได้

X. Colom และคณะ [21] ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวผงยางรีไซเคิลด้วยสารออกซิแดนต์เพื่อปรับปรุงความสามารถในการยึดติดที่บริเวณพื้นผิว โดยนำยางรถยนต์มาบดให้มีขนาด 400 - 600 ไมครอน อบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 hr จากนั้นนำมาปรับปรุงผิวด้วยสาร Oxidant acid ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (96% H₂SO₄) กรดไนตริก (60% HNO₃) และ กรดเปอร์คลอริก (60% HClO₄) ซึ่งมีวิธีการคือ เทกรดให้ท่วมผงยางเป็นเวลา 1 min จากนั้นนำผงยางออกจากกรด และทิ้งให้ทำปฏิกิริยากับอากาศนาน 2 min เมื่อครบแล้วจึงล้างผงยางด้วยน้ำกลั่นร้อน และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (15 wt% Ammonia) ขั้นตอนสุดท้ายคือล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าเป็นกลาง เมื่อปรับปรุงผิวผงยางแล้วจึงนำผงยางมาผสมกับ High - density polyethylene (HDPE) ที่ปริมาณ 5, 10, 20, และ 40% ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง อุณหภูมิ 153°C ไม่เกิน 3 min สำหรับสูตรที่มี HDPE ล้วนทำการผสมเช่นเดียวกัน เพื่อให้พอลิเมอร์ทุกสูตรมีประวัติทางความร้อนที่เหมือนกัน จากนั้นจึงนำมาขึ้นรูปด้วย Hot press molding และทดสอบสมบัติเชิงกลผ่านการทดสอบการดึงยึด ศึกษาผลจากการปรับปรุงพื้นผิวผงยางด้วยเทคนิค FTIR และศึกษาสัณฐานวิทยาของผงยางด้วยเทคนิค SEM ผลจากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า การเติมผงยางลงใน HDPE ที่ปริมาณ 5% จะช่วยปรับปรุงความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูปในช่วงยืดหยุ่น (Stiffness) ได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณผงยาง 10% ของสูตรไม่ปรับปรุงผิว และปรับปรุงด้วย HClO₄ จะทำให้ชิ้นงานมีค่ามอดูลัสของยัง เบียร์เซนต์ การดึงยึด และความเหนียวที่ต่ำกว่าสูตร HDPE ล้วน สาเหตุเนื่องจากเกิดการกระจายตัวไม่ดี ทำให้การยึดติดไม่ติดตามไปด้วย สำหรับการปรับปรุงผงยางด้วย H₂SO₄ และ HNO₃ สามารถช่วยปรับปรุงการยึดติดกับเมทริกซ์ HDPE ได้ดี ช่วยให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากผงยางที่แข็งขึ้นหลังจากปรับปรุงผิวด้วยกรด เนื่องจากเกิดการเชื่อมสภาพ แต่การปรับปรุงผิวด้วย H₂SO₄ จะให้ผลดีที่สุด เนื่องจากชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงดิ่ง และมอดูลัสของยังสูงที่สุด สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด พบว่าการใส่ผงยางลงใน HDPE จะทำให้ค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับสูตร HDPE ล้วน และการปรับปรุงผิวผงยางด้วยกรดจะให้ค่าต่ำกว่าสูตรที่ไม่ปรับปรุงผิวผงยาง ผลจากการศึกษาสัณฐานวิทยาของผงยางด้วยเทคนิคแบบจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าการปรับปรุงผิวด้วย H₂SO₄ และ HNO₃ ทำให้ผิวของผงยางมีความหยาบมากขึ้นเหมาะกับการยึดติดเชิงกล แต่การปรับปรุงผิวด้วย HClO₄ แทบจะไม่เกิดผลใดๆ กับพื้นผิวของผงยาง ส่งผลให้เกิดการยึดเกาะที่ไม่ดี และทำให้ค่าสมบัติเชิงกลต่ำ ผลจากการศึกษาผงยางด้วยเทคนิค FTIR พบว่า การปรับปรุงผิวผงยางด้วย H₂SO₄ จะทำให้เกิดการเชื่อมสภาพของพอลิบิวตะไดอิน และหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ไม่อ้อมตัวในผวยางจึงทำให้แถบการสั่นของหมู่ C=C ลดลง และพบแถบการสั่นของ O=S=O ที่ความถี่ 1402, 1121 และ 618 cm^{-1} ดังนั้นการปรับปรุงผิวด้วยกรดจึงเกิดทั้งการเสื่อมสภาพของผวยาง และปฏิกิริยาเคมี การปรับปรุงด้วย HNO_3 ให้ผลเช่นเดียวกับการปรับปรุงด้วย H_2SO_4 แต่จะพบการสั่นของหมู่ N-N=O ที่ความถี่ 1382 cm^{-1} แทนการสั่นของหมู่ O=S=O การปรับปรุงผิวด้วยกรด HNO_3 และ H_2SO_4 จะให้สเปกตรัมที่คล้ายกันจึงทำให้มีสมบัติเชิงกล และลักษณะสัญญาณวิทยาที่เหมือนกัน สำหรับการปรับปรุง HClO_4 ทำให้เกิดผลกับผวยางน้อยกว่า ทำให้พบพีคมีความเข้มน้อย

สรุปการปรับปรุงผิวผวยางด้วย H_2SO_4 จะให้ผลที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจากความเข้มข้นของกรดที่มาก ทำให้เกิดความพรุน และความหยابที่ผิวซึ่งจะช่วยเพิ่มการ Interlock กับ HDPE ได้มากขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น



รูปที่ 2.20 สเปกตรัม FTIR ของผวยาง (1) ไม่ปรับปรุงผิว (2) ปรับปรุงผิวด้วย HClO_4 (3) ปรับปรุงผิวด้วย HNO_3 และ (4) ปรับปรุงผิวด้วย H_2SO_4 [21]

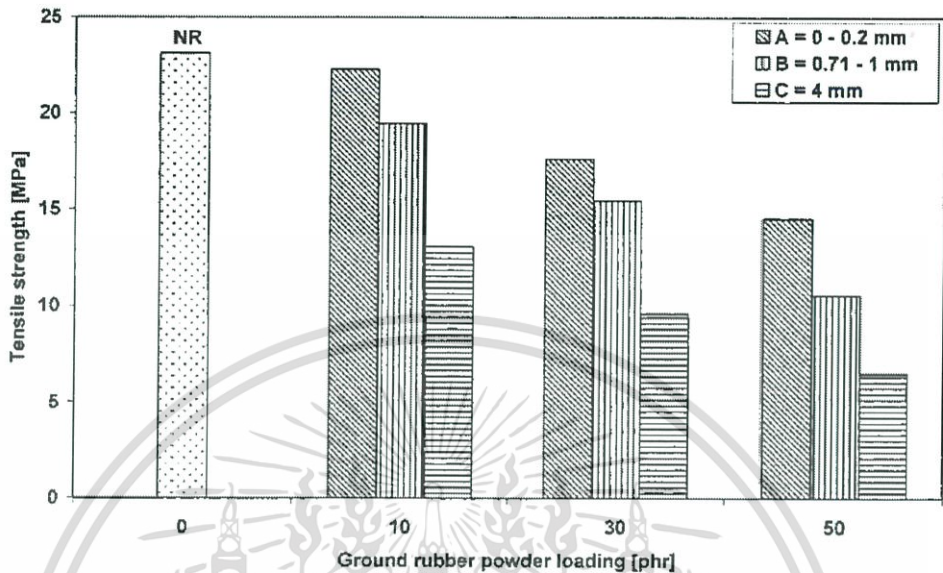
S. Li และคณะ [22] ศึกษาเกี่ยวกับขนาด และปริมาณของผวยางบด (Ground - rubber powder, GRP) สำหรับใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่มีผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกล โดย GRP ได้มาจากรถยนต์นั่งส่วนบุคคล และรถบรรทุกที่ผ่านการกำจัดเส้นใย และโลหะต่างๆ ออกแล้ว ศึกษา GRP ที่ 3 ขนาด คือ 0 - 0.2, 0.71 - 1 และ 4 mm และปรับเปลี่ยนปริมาณเป็น 10, 30 และ 50 phr ผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งที่ 60°C และขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปที่ 160°C จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ

ผลการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง เมื่อเพิ่มปริมาณ GRP มากขึ้น พบว่าค่าแรงบิดต่ำสุด (M_L) และค่าแรงบิดสูงสุด (M_{HF}) มีค่ามากขึ้น แต่เวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{s2}) และเวลาเชื่อมโยง ($t_{c(90)}$) มีค่าลดลง เนื่องจากการแพร่ของกัมมะถันจากเมทริกซ์ยางสู่ GRP และการแพร่ของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงจาก GRP สู่เมทริกซ์ยาง ทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง และเวลาเชื่อมโยงลดลง

ผลการทดสอบเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด ความแข็งกด และความต้านทานการขีดถู พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้น และอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น สมบัติเชิงกลจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวโน้มลดลง จึงพบค่าที่ต่ำที่สุดที่ 10 phr และเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ดังรูปที่ 2.21 เนื่องจากเมื่อปริมาณมากขึ้น และขนาดใหญ่ขึ้นจะเกิดการแยกเฟสระหว่างผวยางบดกับยาง ทำให้สมบัติแย่ง



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึง และปริมาณ GRP [22]

S. Li และคณะ [23] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์ ด้วยการเติม Ground rubber powder (GRP) และ Devulcanized rubber โดยศึกษาจากลักษณะการเชื่อมโยงสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล วัสดุที่ใช้คือ GRP ได้มาจากรถยนต์นั่งส่วนบุคคล และรถบรรทุก ที่มีขนาด 4 mm ปริมาณที่ศึกษา คือ 10, 30 และ 50 phr ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สูตรของคอมปาวด์ [23]

Formulation (phr)	NR	Devulcanized rubber	GRP (4-mm)	Zinc oxide	Stearic acid	N-220	CBS ^a	Sulphur
NR	100	-	-	5	2	35	0.7	2.25
GRP 10 ^b	100	-	10	5	2	35	0.7	2.25
30	100	-	30	5	2	35	0.7	2.25
50	100	-	50	5	2	35	0.7	2.25
Dev. F 10 ^c	100	10	-	5	2	35	0.7	2.25
30	100	30	-	5	2	35	0.7	2.25
50	100	50	-	5	2	35	0.7	2.25
Dev. R 10 ^d	96.6	3.4	-	5	2	35	0.7	2.25
30	89.8	10.2	-	5	2	35	0.7	2.25
50	83	17	-	5	2	35	0.7	2.25

^aN-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphonamide, as an accelerator.

^bAmount of curatives was based on the virgin rubber content.

^cAmount of curatives was based on the virgin rubber content.

^dAmount of curatives was based on the total rubber content, including virgin rubber and devulcanized rubber.

ผลจากศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงพบว่า ค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดสูงสุดลดลงเมื่อเติม Devulcanized - rubber มากขึ้น แต่สำหรับ GRP เมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดสูงสุดมากขึ้น เนื่องมาจาก GRP เป็นยางที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว จึงทำให้ยากต่อเอกสารที่เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลในเมทริกซ์ยาง เมื่อเพิ่มปริมาณจึงทำให้แรงบิดสูงขึ้นตาม และอาจเกิดจากการรวมตัวของผงยางเกิดเป็นกลุ่มก้อน ทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น แรงบิดจึงสูงขึ้นด้วย เวลาเริ่มเชื่อมโยง และเวลาเชื่อมโยงลดลง เมื่อปริมาณ GRP และ Devulcanized rubber เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการแพร่ของกำมะถันจากเมทริกซ์สู่ GRP และส่วนของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงใน GRP ที่เหลือแพร่เข้าสู่เมทริกซ์ ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า Devulcanized rubber (Dev. R) มีสมบัติเชิงกลดีกว่า Dev. F และ GRP ตามลำดับ เนื่องมาจาก Dev.R มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากกว่าจึงแข็งแรงมากกว่า แสดงค่าดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าสมบัติเชิงกลของยางแต่ละสูตร [23]

Formulation (phr)	Tensile strength (Mpa)		Elongation at break (%)		Tear strength (N/mm)		Abrasion (mm ³)		Hardness (Shore A)	
		SD ^a		SD		SD		SD		SD
NR	23.2	0.5	719.5	9.9	20.8	2.2	150	7	54.0	0.5
GRP 10 ^b	13.1	4.2	256.2	76.5	20.1	6.9	111	16	59.5	0.5
30	9.6	2.1	313.8	43.3	16.8	3.6	120	1	61.0	6.0
50	6.5	1.0	241.0	18.2	22.5	6.9	132	11	59.5	0.5
Dev. F 10 ^c	20.4	1.9	438.5	106.3	20.6	8.3	157	8	54.0	1.5
30	14.6	2.9	379.1	51.2	19.9	2.8	210	10	52.5	1.5
50	13.4	3.3	422.7	64.6	27.0	2.9	239	3	51.0	0.5
Dev. R 10 ^d	26.3	0.5	522.8	12.9	17.1	1.9	122	4	57.5	1.5
30	20.4	1.8	469.0	26.0	19.7	2.4	132	1	60.0	0.5
50	20.7	0.7	425.8	11.8	22.4	4.7	132	1	64.5	0.5

^aStandard deviation.

^bAmount of curatives was based on the virgin rubber content.

^cAmount of curatives was based on the virgin rubber content.

^dAmount of curatives was based on the total rubber content, including virgin rubber and devulcanized rubber

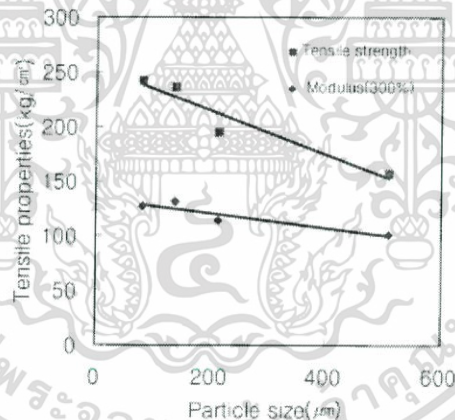
S. C. Han และคณะ [24] ศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของยางคอมปาวด์ SBR และยางคอมปาวด์ NR ที่มีการเติม Ground rubber โดยศึกษาสมบัติต่างๆ จากผลของขนาดและปริมาณของ Ground rubber powder (GRP) วัสดุที่ใช้คือ GRP ที่มีขนาดแตกต่างกัน 4 ขนาด ได้แก่ 420 - 600, 177 - 250, 125 - 150 และ 75 - 88 ไมครอน ซึ่งผ่านการคัดแยกด้วยตะแกรงขนาด 30 - 40, 60 - 80, 100 - 120 และ 170 - 200 Mesh ตามลำดับ ปริมาณที่ศึกษาคือ 10, 30 และ 50 phr ดังตารางที่ 2.6 ผลจากศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง สำหรับยางคอมปาวด์ SBR เวลาเริ่มเชื่อมโยง และค่าแรงบิดสูงสุดจะลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ GRP ค่าแรงบิดลดลง เนื่องมาจากการแพร่ของกำมะถันจากเมทริกซ์สู่ GRP ส่วนเวลาเริ่มเชื่อมโยงลดลง เนื่องมาจากส่วนของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงใน GRP ที่เหลือแพร่เข้าสู่เมทริกซ์ ผลจากการทดสอบสมบัติทางกายภาพพบว่า ค่าความแข็งแรงดึง และมอดูลัสลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ และขนาดของ GRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ยางสูตรต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย [24]

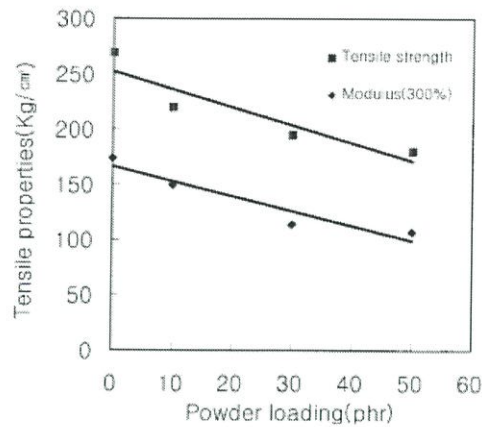
Ingredients/Physical Properties	Compound Recipe							
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
SBR-1502	100	100	100	100	100	100	100	100
Zinc oxide	3	3	3	3	3	3	3	3
Stearic acid	1	1	1	1	1	1	1	1
Carbon black (N330)	50	50	50	50	50	50	50	50
Sulfur	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75
NS (TBBS) ^a	1	1	1	1	1	1	1	1
Ground rubber powder								
30–40 mesh		30						
60–80 mesh			10	30	50			
100–120 mesh						10	30	
170–200 mesh								30
Mooney viscometer								
Male + 4 at 125°C (lbs in.)	66.0	80.0	64.0	76.0	84.0	68.0	77.0	79.0
Scorch time (t5, min)	30.8	21.2	25.3	22.9	20.0	27.7	22.3	22.5
Rheometer at 160°C								
T40 (min)	8.1	6.4	6.4	5.9	5.4	6.5	5.5	5.7
T90 (min)	15.9	15.0	13.6	13.7	12.5	13.6	12.3	13.0
T _{max} (lbs in.)	54.0	43.0	49.0	45.0	42.0	50.0	46.0	46.0
Tensile tests								
Hardness (Shore A)	68	66	68	67	67	68	67	67
100% modulus (kg/cm ²)	30	22	28	23	23	29	25	25
Tensile strength (kg/cm ²)	269	157	220	195	180	250	236	242
Elongation at break (%)	418	421	408	465	456	430	470	487

^a *N-t*-Butyl-2-benzothiazole sulfenamide.



รูปที่ 2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) กับขนาดผงยางบดที่เติมลงไป ใน SBR (ผงยางบดปริมาณ 30 phr) [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) กับปริมาณผงยางบดที่เติมลงไป ใน SBR (ผงยางบดขนาด 177 - 250 μm) [24]

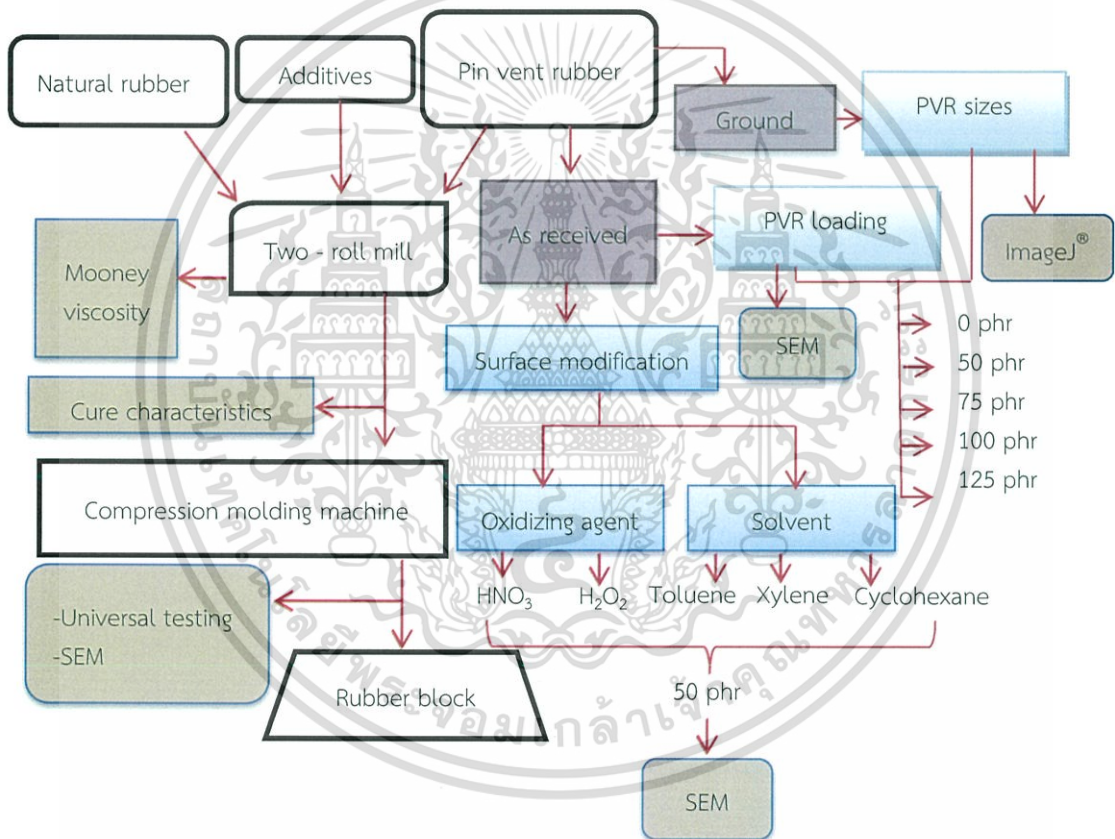
สรุปการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- การใช้สารตัวเติมผงยางบดที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้วลงในยางผสมสูตรจะส่งผลให้ยางผสมสูตรมีความหนืดเพิ่มขึ้น ความสามารถในการไหลลดลง พิจารณาได้จากค่าแรงบิดต่ำสุด (M_L) ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งการเพิ่มปริมาณผงยางบดยังช่วยให้ยางผสมสูตรเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น เนื่องจากค่าเวลาก่อนการเชื่อมโยง (t_{s2}) และเวลาในการเชื่อมโยง ($t_{c(90)}$) ที่ใช้จะลดลง
- ผลจากสมบัติด้านการทนต่อแรงดึงพบว่า ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และการดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) จะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงยางบด จนกระทั่งถึงจุดหนึ่ง หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงยางบดจะทำให้สมบัติการทนต่อแรงดึงลดลง เนื่องจากการรวมตัวกันของยางบด และปริมาณผงยางที่มากเกินไปทำให้เมทริกซ์ยางห่อหุ้มได้ไม่หมด ส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างผงยาง และเมทริกซ์ยางแย่งลง
- สำหรับค่าแรงบิดสูงสุดพบว่า (M_{HF}) ค่ามอดุลัสที่ 100 และ 300 (M_{100} , M_{300}) และค่าความแข็งกด (Hardness) จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงยางบด เนื่องจากอนุภาคยางบดมีมอดุลัสสูงกว่าเมทริกซ์ยาง
- ยางผสมสูตรที่ใส่สารตัวเติมเป็นผงยางบดที่ผ่านการเชื่อมโยงจะมีการบวมตัวในโทลูอินต่ำเมื่อเทียบกับยางผสมสูตรที่ไม่ใช้สารตัวเติม
- การปรับปรุงผิวผงยางด้วย 30% H_2O_2 จะทำให้ยางผสมสูตรที่ได้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าการปรับปรุงผิวด้วย 20% HNO_3 และค่าที่ได้ยังสูงกว่ายางผสมสูตรที่ใช้สารตัวเติมเป็นผงยางบดที่ไม่ปรับปรุงผิว ในขณะที่ผลจากลักษณะการเชื่อมโยงพบว่า การปรับปรุงผิวด้วยสารออกซิไดซิงจะช่วยเพิ่มค่าแรงบิดสูงสุด เวลาเริ่มเชื่อมโยง และอัตราเร็วในการเชื่อมโยง อีกทั้งยังช่วยลดเวลาในการเชื่อมโยงให้สั้นลง

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินการ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการนำหนวดยาง (PVR) ที่เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตยางล้อรถยนต์มาทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยการใช้เป็นสารตัวเติมในกระบวนการผลิตชิ้นงานยางสำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ เช่น ยางบล็อกปูพื้น พื้นยางนึม เป็นต้น ซึ่งจะทำให้การศึกษาปริมาณการผสมขนาด และการปรับปรุงสมบัติด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของหนวดยาง เพื่อให้ยาง NR และ PVR มีความสามารถเข้ากันได้ดีในขั้นตอนการผสม และได้สมบัติต่างๆ เป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งขั้นตอนในการทำการวิจัยในครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- งานวิจัยนี้ได้แบ่งศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของยางออกเป็น 3 ตอนคือ
- ตอนที่ 1. ศึกษาผลของปริมาณหนวดยาง
- ตอนที่ 2. ศึกษาผลของขนาดหนวดยาง
- ตอนที่ 3. ศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว แบ่งออกเป็น
- ตอนที่ 3.1 การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารออกซิไดซ์เชิง
- ตอนที่ 3.2 การปรับปรุงพื้นผิวด้วยตัวทำละลาย

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

สารเคมี

1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) : MBJ Enterprise Co., Ltd.
2. หนวดยาง (Pin vent rubber, PVR) : Yokohama Tire Manufacturing (Thailand) Co.,Ltd.
3. กำมะถัน (Sulfur) เกรดวิเคราะห์ : Sahapaisal Industry Co., Ltd.
4. กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า : P.T. Cisadane Raya Chemicals (Oleo Chem Far East Pte.Ltd.)
5. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เกรดการค้า : Global Chemical Co., Ltd.
6. Wingstay เกรดการค้า : OMNOVA Solutions Inc.
7. MBTS (Mercaptobenzothiazole disulfide) เกรดการค้า : Sahapaisal Industry Co., Ltd.
8. TMTD (Tetramethylthiuram disulfide) เกรดการค้า : Taminco N.V. Inc.
9. กรดไนตริกเข้มข้น 65% v/v (65% v/v HNO₃) เกรดวิเคราะห์ : Italmar (Thailand) Co., Ltd.
10. กรดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% v/v (30% v/v H₂O₂) เกรดห้องปฏิบัติการ : Italmar (Thailand) Co., Ltd.
11. โทลูอีน (Toluene) เกรดทั่วไป : Italmar (Thailand) Co., Ltd.
12. ไซลีน (Xylene) เกรดวิเคราะห์ : Italmar (Thailand) Co., Ltd.
13. ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane) เกรดวิเคราะห์ : Italmar (Thailand) Co., Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์

1. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น LP20 : HydroTech Co., Tai – HUEI.
2. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two - roll mill) รุ่น ERM200 : LabTech Engineering Co., Ltd.
3. เครื่องวัดความหนืดแบบมูนี (Mooney viscometer) รุ่น SMV - 201 : Shimudzu Co., Ltd.
4. เครื่องวัดการเชื่อมโยง MDR (Moving die rheometer : curelastimeter) รุ่น IIF150 : Nichigo Shoji Co., Ltd.
5. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น LR 5K : Intro Enterprise Co., Ltd.
6. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Hardness tester) ชนิด Shore A รุ่น TECLOCK GS - 719N : ATS Faar S.P.A Co., Ltd.
7. กล้องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) รุ่น VT300 VITINY
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น LEO 1455 VP : LEO Electron Microscopy Ltd.
9. เครื่องตัดชิ้นงานแบบมือ
10. แม่แบบ (Mold) ขนาด $15.24 \times 15.24 \text{ cm}^2$ หนา 0.02 cm
11. เครื่องชั่งละเอียด
12. แม่แบบตัดตัวอย่าง
13. แท่นให้ความร้อน (Hot plate)
14. บริษัทเครื่องแก้ว

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ตอนที่ 1. ศึกษาผลของปริมาณหน่วยยาง

- ตัดยาง NR และซังสารเคมีต่างๆ ตามตารางที่ 3.1
- ทำการผสมยางสูตรที่ 1 โดยเริ่มจากการนำยางธรรมชาติมาทำการบดย่อย ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C โดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งจนกระทั่งยางพันรอบลูกกลิ้ง ทำการกรีดพียางจนกระทั่งยางนิ่มขึ้น ใช้เวลาประมาณ 5 min
- เติม AR - PVR ลงไป ตามด้วยสารเติมแต่ง ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์, Wingstay, น้ำมันแนฟทินิก และกรดสเตียริก ให้เสร็จภายในเวลา 10 min และทำการกรีดพียางต่อจนสารเคมีกระจายทั่วเนื้ออย่างอีก 5 min
- ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 5 mm แล้วกรีดยางออกจากลูกกลิ้ง
- ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นสี่เหลี่ยมขนาด $5.08 \times 5.08 \text{ cm}^2$ จำนวน 2 แผ่น นำมาวัดความหนืดมูนีโดยใช้เครื่อง Mooney viscometer กำหนดอุณหภูมิในการวัดความหนืดที่ 100°C โดยหาค่าความหนืด ML 1+4 (100°C) ของยางผสมสูตรก่อนการเชื่อมโยง
- ทำการผสมยางต่อด้วยการเติมสารเชื่อมโยงกำมะถัน และสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง TMTD และ MBTS กรีดพียางต่อจนกระทั่งสารเคมีกระจายทั่วเนื้ออย่าง ใช้เวลา 5 min
- ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 5 mm แล้วกรีดยางออกจากลูกกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ $5.08 \times 5.08 \text{ cm}^2$ จำนวน 1 แผ่น แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงด้วยเครื่อง MDR เพื่อหาเวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{s2}) และเวลาเชื่อมโยง ($t_{c(90)}$) ที่อุณหภูมิ 150°C
- ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้ใส่แม่แบบ ($15.24 \times 15.24 \text{ cm}^2$) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปได้แผ่นตัวอย่าง 5 แผ่น ที่อุณหภูมิ 150°C ใช้เวลาเท่ากับเวลาเชื่อมโยง โดยเพิ่มเวลาเชื่อมโยงอีก 20% สำหรับเวลานานขึ้นในการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่แบบ และภายในขึ้นงานยาง
- ทำซ้ำโดยเปลี่ยนเป็นยางสูตร 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

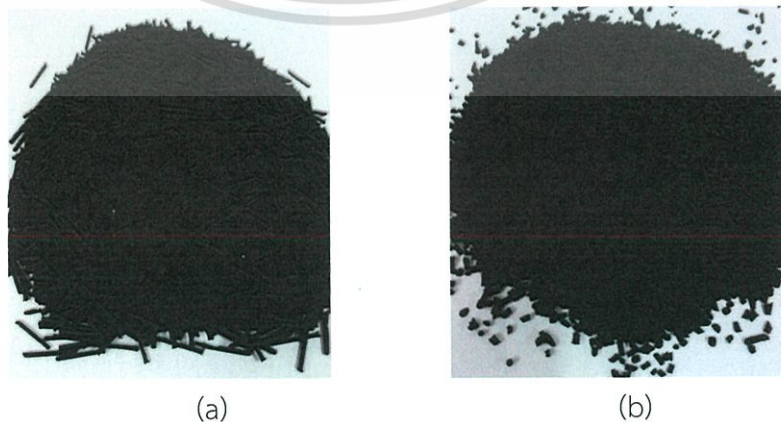
ตารางที่ 3.1 สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 1

สาร	สูตรที่ (ส่วนโดยน้ำหนัก, phr)			
	1	2	3	4
NR	100	100	100	100
AR - PVR	50	75	100	125
Wingstay	1	1	1	1
Naphthenic oil	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2
ZnO	4	4	4	4
Sulfur	2	2	2	2
MBTS	1	1	1	1
TMTD	0.5	0.5	0.5	0.5

หมายเหตุ *ปัจจัยศึกษา

3.3.2 ตอนที่ 2 ศึกษาผลของขนาดหน่วยยาง

บด PVR ด้วยเครื่องบดเชิงพาณิชย์ทำให้ PVR มีขนาดเล็กลง และร่อน PVR ด้วยตระแกรงขนาด 20 Mesh แสดงดังรูปที่ 3.2 จากนั้นทำการชั่งสารตามตารางที่ 3.1 ทั้งหมด 4 สูตร ได้แก่ 50, 75, 100 และ 125 phr ตามลำดับ และผสมสูตรยางเหมือนตอนที่ 1. แต่เปลี่ยนเป็น GR - PVR



รูปที่ 3.2 (a) AR - PVR และ (b) GR - PVR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ตอนที่ 3. ศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว

3.3.3.1 ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารออกซิไดซ์ซึ่ง เพื่อเพิ่มความขรุขระที่พื้นผิวและความสามารถเข้ากันได้กับยางธรรมชาติ ดังต่อไปนี้

ก. การปรับปรุงพื้นผิวด้วย HNO_3

- หาสภาวะที่เหมาะสมของการปรับปรุงพื้นผิว โดยทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารที่ใช้

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่เหมาะสมของการปรับปรุงพื้นผิวด้วย HNO_3

ความเข้มข้นของสารที่ใช้	อุณหภูมิที่ใช้	เวลาที่ใช้
5% HNO_3	อุณหภูมิห้อง	3 ชั่วโมง และสังเกตการเปลี่ยนแปลงทุกชั่วโมง
5% HNO_3	60 - 70°C	3 ชั่วโมง และสังเกตการเปลี่ยนแปลงทุกชั่วโมง
10% HNO_3	60 - 70°C	3 ชั่วโมง และสังเกตการเปลี่ยนแปลงทุกชั่วโมง
20% HNO_3	60 - 70°C	3 ชั่วโมง และสังเกตการเปลี่ยนแปลงทุกชั่วโมง

- เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้ว ทำการเตรียมสารละลาย HNO_3 เจือจาง โดยการปิเปตสารละลาย 65% HNO_3 ตามปริมาตรของแต่ละความเข้มข้นแล้วปรับปริมาตรเป็น 100 ml เขย่าให้สารเข้ากัน
 - นำ AR - PVR 10 g ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml ที่ตั้งอยู่ในบีกเกอร์น้ำแข็ง ทำการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก
 - หยดสารละลาย HNO_3 เจือจางลงในบีกเกอร์ PVR จนสารละลายท่วม PVR
 - ในกรณีที่ไมใช้ความร้อน ทำการปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3 hr. และสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของ PVR ทุกๆ ชั่วโมง โดยการถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง
 - ในกรณีที่ใช้ความร้อน จะให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 - 70°C พร้อมทำการปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3 hr. และสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของ PVR ทุกๆ ชั่วโมง โดยการถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง
 - เมื่อครบ 3 hr. ให้นำบีกเกอร์ PVR ออกจากแท่นปั่นกวน แล้วใช้กระดาษฟิคาปิดบีกเกอร์ และตั้งบีกเกอร์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 hrs.
 - นำ PVR มาล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าความเป็นกลาง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 hr.
 - นำ PVR ที่ได้มาทำการผสมกับยางธรรมชาติ โดยสูตรยางที่เลือกคือ 50 phr
 - ทำการชั่งสารเหมือนตารางที่ 3.3 และผสมสูตรยางเหมือนตอนที่ 1
- #### ข. การปรับปรุงพื้นผิวด้วย H_2O_2
- ใช้ 30% H_2O_2 ทำเช่นเดียวกับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด HNO_3 โดยใช้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 hr.
 - นำ PVR ที่ได้มาทำการผสมกับยางธรรมชาติ โดยสูตรยางที่เลือกคือ 50 phr
 - ทำการชั่งสารเหมือนตารางที่ 3.3 และผสมสูตรยางเหมือนตอนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 3.1

สาร	ปริมาณ (สัดส่วนโดยน้ำหนัก phr)
NR	100
AR - PVR treated	50
Wingstay	1
Naphthenic oil	5
Stearic acid	2
ZnO	4
Sulfur	2
MBTS	1
TMTD	0.5

หมายเหตุ * ปัจจัยศึกษา

3.3.3.2 ปรับปรุงพื้นผิวด้วยตัวทำละลาย โดยพิจารณาจากค่าการละลาย (Solubility parameter) ของตัวทำละลายที่ใกล้เคียงกับ PVR ซึ่งองค์ประกอบของ PVR คือยางธรรมชาติ (NR) ยางบิวตะไดอิน (BR) และยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) ค่าการละลายแสดงได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าการละลายของพอลิเมอร์ และตัวทำละลาย [25]

Polymer	Solubility parameter (cal cm ⁻³) ^{1/2}	Solvent	Solubility parameter (cal cm ⁻³) ^{1/2}
NR	8.1	Cyclohexane	8.2
BR	8.4	Xylene	8.8
SBR	8.4	Toluene	8.9

- เก็บ PVR ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 24 hr.
- ชั่ง PVR 10 g แล้วนำไปแช่ในโทลูอิน ไชโคลเฮกเซน และไซลีนที่อุณหภูมิห้อง
- ทำการชั่งและบันทึกน้ำหนักของ PVR ทุกวัน โดยใช้ทิชชูซับตัวทำละลายส่วนเกินก่อนชั่ง ทำเช่นนี้จนกระทั่งได้น้ำหนักของ PVR คงที่
- คำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

$$\text{จากสูตร } Q_{(t)} = \{M_t - M_i\} \times 100 / M_i$$

โดยที่ M_t คือน้ำหนักที่เวลา t

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M₁ คือน้ำหนักเริ่มต้น

- นำ PVR ที่มีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวมากที่สุดมาผสมกับยางธรรมชาติ โดยสูตรยางที่เลือกคือ 50 phr
- ทำการชั่งสารเหมือนตารางที่ 3.5 และผสมสูตรยางเหมือนตอนที่ 1

ตารางที่ 3.5 สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 3.2

สาร	ปริมาณ (สัดส่วนโดยน้ำหนัก phr)
NR	100
AR - PVR treated	50
Wingstay	1
Stearic acid	2
ZnO	4
Sulfur	2
MBTS	1
TMTD	0.5

หมายเหตุ * ปัจจัยศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)

หาลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมปาวด์ (Compound rubber) โดยใช้เครื่องวัดการเชื่อมโยง (MDR) ที่อุณหภูมิ 150°C ค่าแรงบิดที่ใช้คือ 100 เพื่อหาเวลาเริ่มเชื่อมโยง เวลาเชื่อมโยง อัตราการเชื่อมโยง ค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดสูงสุด

3.3.5 การศึกษาผลของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางที่ได้ (Mechanical properties)

3.3.5.1 การทดสอบการดึง (Tensile test)

การทดสอบการดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างรูปร่างดัมเบลล์ (Dumbbell shape) กำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

ความเร็วในการดึงยึด	500 mm/min
ความยาวเกจ	25 mm
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	1 kN
จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ	8 - 9 ชิ้นงาน

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ความแข็งแรงดึง (*Tensile strength*) เท่ากับความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุที่ได้รับเมื่อให้แรงดึง (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาจากสมการ

$$\text{ความแข็งแรงดึง} = F/A \quad (3.1)$$

เมื่อ F = แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดขาด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

2. โมดูลัสของยาง (*Rubber modulus*) เป็นค่าความเค้น (Stress) ที่เปอร์เซ็นต์การดึงยึด 100% (M100) และ 200% (M200)
3. เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (*% Elongation at break*) หาได้จากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด} = (l-l_0)/l_0 \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ l = ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน ณ จุดขาด (mm)

l_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm)

3.3.5.2 การทดสอบการฉีกขาด (Tear test)

การทดสอบการฉีกขาดด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM D624 โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างรูปร่างปีกนกตามมาตรฐาน ASTM die - C กำหนดสภาวะในการทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วในการดึงยึด	500 mm/min
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	1 kN
จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ	8 ชิ้นงาน

3.3.5.3 การทดสอบความแข็งกด (Hardness test)

นำชิ้นงานที่เตรียมได้มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดแบบน้ำหนักคงที่ (Dead load hardness tester) ชนิด shore A ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D2240 ซึ่งอ่านค่าความแข็งกดได้โดยตรงจากเครื่อง โดยตัวอย่างควรมีความหนาอย่างน้อย 6 mm รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย 4 ครั้งในการตรวจสอบต่อ 1 ชิ้นงานตัวอย่าง

3.3.6 การศึกษาผลของขนาดหน่วยยางเฉลี่ยโดยใช้โปรแกรม ImageJ®

นำ AR - PVR และ GR - PVR วางลงบนกระดาษกราฟแต่ละแผ่นให้มีการกระจายตัว จากนั้นทำการถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และหาขนาดเฉลี่ยของ PVR โดยใช้โปรแกรม ImageJ® ทำการเลือก PVR ที่มีภาพสมบูรณ์ที่สุด 50 เส้น โปรแกรมจะคำนวณขนาดของแต่ละเส้นออกมา จากนั้นนำมาหาขนาดเฉลี่ย

3.3.7 การศึกษาผลของสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ทำการเตรียมตัวอย่างจากชิ้นงานยางคอมปาวด์ และ AR - PVR ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Untreated) และ AR - PVR ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Treated) โดยชิ้นงานยางคอมปาวด์จะแช่ในไนโตรเจนเหลว และทำการหัก จากนั้นทำการตัดชิ้นงานเป็นสี่เหลี่ยม แล้วนำตัวอย่างทั้งหมดมาเก็บไว้ในเดซีเคเตอร์เพื่อลดความชื้น นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยตัดตัวอย่างลงบนสตัป และทำการเคลือบด้วยทองคำก่อนนำไปส่องตัวอย่าง โดยใช้กำลังขยาย 50 และ 200 เท่า สำหรับหน่วยยาง และใช้กำลังขยาย 30 และ 300 เท่า สำหรับชิ้นงานยาง

3.3.8 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้น

- ตัดยาง EPDM และซังสารเคมีต่างๆ ตามตารางที่ 3.6
- ทำการผสมยาง โดยเริ่มจากการนำยาง EPDM มาทำการบดให้ยางนิ่ม ที่อุณหภูมิประมาณ 70°C โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง จนกระทั่งยางพันรอบลูกกลิ้ง ทำการกรีดพืดยางจนกระทั่งยางนิ่มขึ้น ใช้เวลาประมาณ 5 นาที
- เติม AR - PVR ลงไป ตามด้วยสารเติมแต่ง ได้แก่ hisil, 4Q, napthenic oil, PEG - 4000, co - resin, ZnO, stearic acid และ TiO₂ ให้เสร็จภายในเวลา 10 นาที และทำการกรีดพืดยางต่อจนสารเคมีกระจายทั่วเนื้อยางอีก 5 นาที
- ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 5 มม. แล้วกรีดยางออกจากลูกกลิ้ง
- ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นสี่เหลี่ยมขนาด 5.08×5.08 cm. จำนวน 2 แผ่น นำมาวัดความหนืด โดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบหมุนนี้ กำหนดอุณหภูมิในการวัดความหนืดที่ 100°C โดยหาค่าความหนืด ML 1+4 (100°C) ของยางผสมสูตรก่อนการเชื่อมโยง
- ทำการผสมยางต่อด้วยการเติมสารเชื่อมโยง Sulfur และสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง ZDBC, TMTD, MBTS, DPG และ CBS กรีดพืดต่อใช้เวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 5 mm แล้วกรีดยางออกจากลูกกลิ้ง ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 5.08×5.08 cm จำนวน 1 แผ่นแล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยง เพื่อหาเวลาเชื่อมโยง และเวลาเริ่มเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 150°C

- ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้ใส่แม่แบบ (15.24×15.24 cm) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ใช้เวลาเท่ากับ เวลาเชื่อมโยง ($t_{c(90)}$) โดยเพิ่ม เวลาเชื่อมโยง อีก 20% สำหรับเวลานานขึ้นในการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่แบบและภายในชิ้นงานยาง

ตารางที่ 3.6 สูตรยาง EPDM ที่ใช้ในการขึ้นรูปบล็อกยางปูพื้น

สาร	ปริมาณ (สัดส่วนโดยน้ำหนัก phr)
EPDM	100
AR - PVR	125
Hisil	40
Naphthenic oil	20
Stearic acid	1
ZnO	5
4Q	200
PEG-4000	2.4
Co - resin	5
TiO ₂	5
Sulfur	1.5
ZDBC	1
TMTD	0.5
MBTS	1.5
DPG	1
CBS	1.5

ชั้นล่าง คือยางธรรมชาติ ผสมกับ AR - PVR ในปริมาณ 125 phr เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต โดยมีขั้นตอนการผสมเหมือนตอนที่ 1. ศึกษาผลของปริมาณหนวดยาง

หลังจากผสมเสร็จแล้วยางทั้ง 2 ชั้น จะถูกนำมาวางลงในแม่แบบบล็อกปูพื้นโดยใช้ชั้นยาง EPDM หนา 0.5 cm และชั้นยางธรรมชาติหนา 2 cm จากนั้นนำแม่พิมพ์เข้าเครื่องอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 30 นาที โดยจะต้องบีบแม่พิมพ์ 5 - 10 ครั้ง ก่อนที่จะปล่อยให้ยางเกิดการเชื่อมโยง เมื่อครบตามเวลาแล้วจึงนำบล็อกยางที่ได้ออกจากแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้แบ่งศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อสมบัติของยางออกเป็น 3 ตอน คือ

ตอนที่ 1. ศึกษาผลของปริมาณหน่วยยาง

ตอนที่ 2. ศึกษาผลของขนาดหน่วยยาง

ตอนที่ 3. ศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว

แบ่งออกเป็น

ตอนที่ 3.1 การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารออกซิไดซ์ซึ่ง

ตอนที่ 3.2 การปรับปรุงพื้นผิวด้วยตัวทำละลาย

4.1 ตอนที่ 1. ศึกษาผลของปริมาณหน่วยยาง

งานวิจัยนี้ได้นำหน่วยยาง (AR - PVR) ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตยางรถยนต์ มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยนำมาเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทที่ไม่ต้องการสมบัติเชิงกลที่สูงมาก เช่น ยางบล็อกปูพื้น พื้นยางนึม ฯลฯ ซึ่งปริมาณหน่วยยางที่เติมลงไปในยางธรรมชาติได้แก่ 50, 75, 100 และ 125 phr ตามลำดับ จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานยางและหาลักษณะการเชื่อมโยงและทดสอบสมบัติเชิงกล ดังนี้

ลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร

จากการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงพบว่า ตามทฤษฎีแล้วค่าความหนืดมูนนี่ ค่าแรงบิดต่ำสุด (M_L) และค่าแรงบิดสูงสุด (M_{HF}) ควรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ AR - PVR เนื่องจาก AR - PVR เป็นยางที่ผ่านการเชื่อมโยงมาแล้ว ทำหน้าที่คล้ายสารตัวเติม ทำให้ค่าความสามารถในการไหลของยางผสมสูตรลดลง เนื่องจากความหนืดของยางผสมสูตรเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะยางผสมสูตรที่เติม AR - PVR (CRAR) 125 phr ควรมีค่าความหนืดสูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณ AR - PVR มากที่สุด แต่จากผลการทดลองพบว่า ค่าความหนืดมูนนี่ ค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าขึ้นๆ ลงๆ เมื่อเพิ่มปริมาณ AR - PVR อาจมีสาเหตุมาจากการผสมที่ไม่ดี ทำให้เกิดการกระจายตัวของ AR - PVR ไม่ดี เนื่องจากใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งในการผสม แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 พบว่าจากรูป 4.1 (a) CRAR 50 phr จะเห็นว่า AR - PVR ที่มีลักษณะเป็นเส้นสีดำจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ มีเส้นสีดำกระจุกเพียงเล็กน้อยบางบริเวณ แต่จากรูปที่ 4.1 (b) CRAR 125 phr จะเห็นได้ว่า AR - PVR ที่มีลักษณะเป็นเส้นสีดำจะมีการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอ มีเส้นสีดำกระจุกกันปริมาณมากเกือบทุกบริเวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของ AR - PVR บนเมทริกซ์ของยาง หลังจากการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (a) CRAR 50 phr และ (b) CRAR 125 phr

ส่วนเวลาเริ่มเชื่อมโยง และเวลาเชื่อมโยง ของยางผสมสูตรตามทฤษฎีแล้ว ควรมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ AR - PVR ทั้งนี้อาจเนื่องจาก AR - PVR เป็นยางที่ผ่านการเชื่อมโยงมาแล้วและมีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบ จึงมีสมบัติการนำความร้อนที่ดีกว่ายางธรรมชาติที่ยังไม่ได้เชื่อมโยง เมื่อเพิ่มปริมาณ AR - PVR จึงทำให้ความสามารถในการนำความร้อนของยางผสมสูตรเพิ่มขึ้น ทำให้ยางเชื่อมโยงเร็วขึ้น [26] แต่จากผลการทดลองพบว่า CRAR 50 - 100 phr มีเวลาเริ่มเชื่อมโยง และเวลาเชื่อมโยงใกล้เคียงกัน อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการผสมที่ไม่ดี ส่งผลให้การกระจายตัวของ AR - PVR และสารเติมแต่งต่างๆ ไม่ดี ส่วน CRAR 125 phr มีเวลาเริ่มเชื่อมโยง และเวลาเชื่อมโยงต่ำที่สุดเนื่องจากมีปริมาณ AR - PVR มากที่สุด ซึ่งเป็นไปตามที่กล่าวมาข้างต้น

อัตราการเชื่อมโยง ควรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ AR - PVR เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ AR - PVR ควรทำให้ยางเชื่อมโยงเร็วขึ้น แต่จากผลการทดลองพบว่า CRAR 50 - 100 phr มีอัตราการเชื่อมโยงใกล้เคียงกัน ซึ่งมีเหตุผลเดียวกันกับเวลาเริ่มเชื่อมโยง และเวลาเชื่อมโยง ส่วน CRAR 125 phr มีอัตราการเชื่อมโยงมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณ AR - PVR มากที่สุด และ AR - PVR เป็นยางที่ผ่านการเชื่อมโยงมาแล้ว มีสมบัติการนำความร้อนที่ดี ทำให้ยางผสมสูตรเชื่อมโยงเร็วขึ้น

ตารางที่ 4.1 ผลของปริมาณ AR - PVR ที่มีต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยางธรรมชาติ

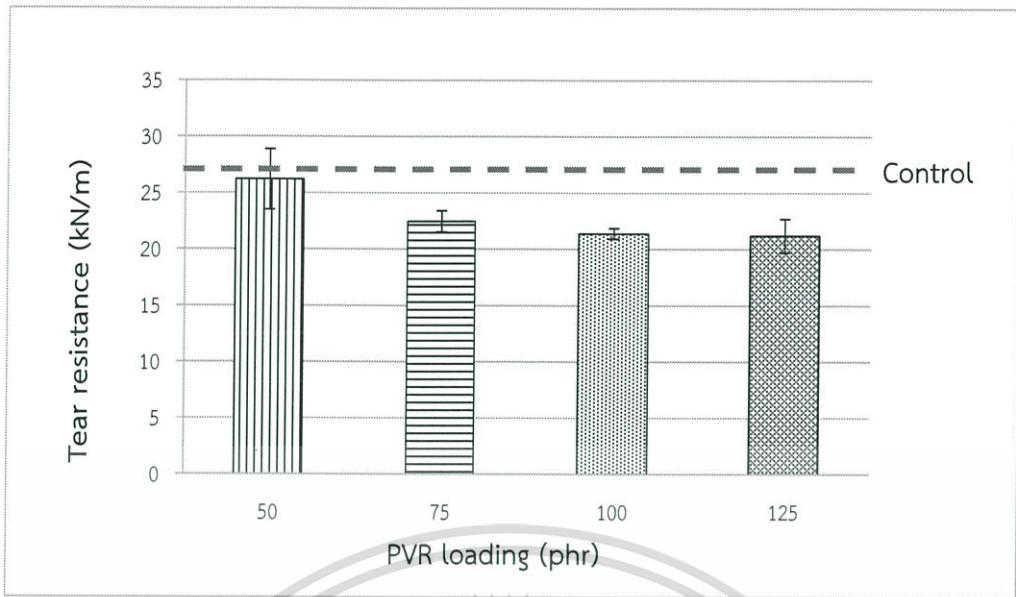
Cure characteristics	50 phr	75 phr	100 phr	125 phr
Mooney viscosity	20.4	16.3	28.1	25.1
Minimum torque, M_L (dNm)	2.0	3.0	4.3	4.0
Maximum torque, M_{HF} (dNm)	18.0	17.0	20.5	18.0
Scorch time, t_{s2} (min)	3.5	3.4	3.5	3.1
Cure time, $t_{c(90)}$, (min)	5.2	5.1	5.2	4.6
Cure Rate Index, CRI (min^{-1})	59.9	58.8	59.9	69.0

สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร

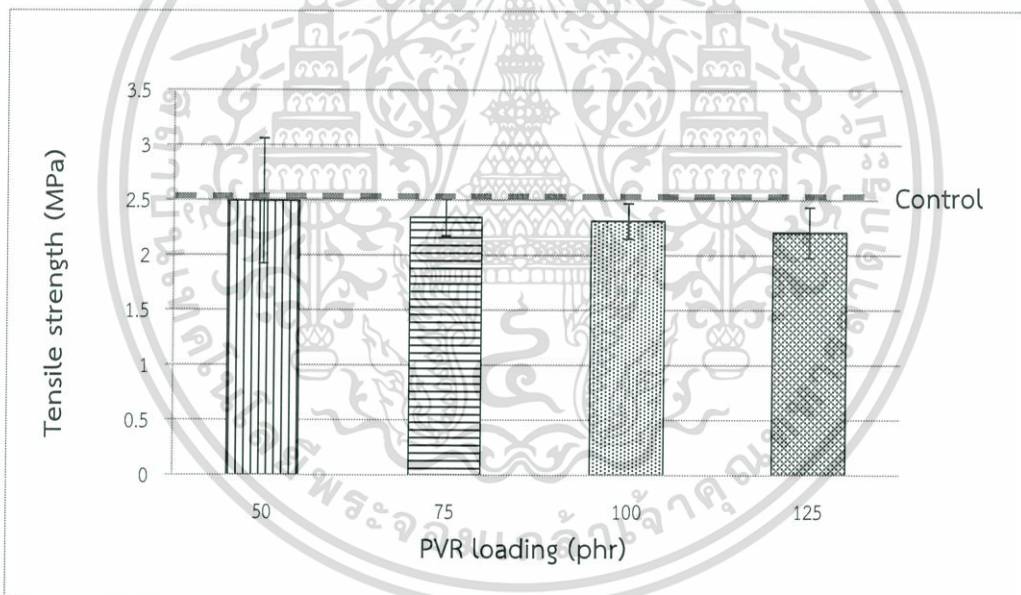
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลเมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมสูตรที่ไม่เติม AR - PVR (Control) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ AR - PVR ในยางผสมสูตรจาก 0 - 125 phr ทำให้ค่าความแข็งแรงฉีกขาด ค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดความยากในการผสม AR - PVR ปริมาณมาก ทำให้การกระจายตัวของ AR - PVR ไม่ดี โดยเฉพาะ CRAR 100 - 125 phr ซึ่งอาจทำให้การยึดเกาะระหว่าง AR - PVR กับเมทริกซ์ของยางไม่ดี เกิดเป็นช่องว่างและรอยตำหนิ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงฉีกขาด ค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง

จากการทดสอบค่าความแข็งแรงของวัสดุ ได้แก่ มอดูลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด 100 และ 200 พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ AR - PVR เนื่องจาก AR - PVR มีมอดูลัสสูงกว่าเมทริกซ์ยาง ส่งผลให้ความแข็งแรงวัสดุโดยรวมสูงขึ้น

ตามทฤษฎีค่าความแข็งแรงควรเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ AR - PVR เนื่องจากเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่จากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงของ CRAR 50 - 100 phr มีค่าใกล้เคียงกัน อาจมีสาเหตุมาจากการผสมที่ไม่ดี ทำให้เกิดการกระจายตัวของ AR - PVR ไม่ดี ส่วนค่าความแข็งแรงของ CRAR 125 phr มีค่าสูงสุดเป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากมีปริมาณ AR - PVR มากที่สุด

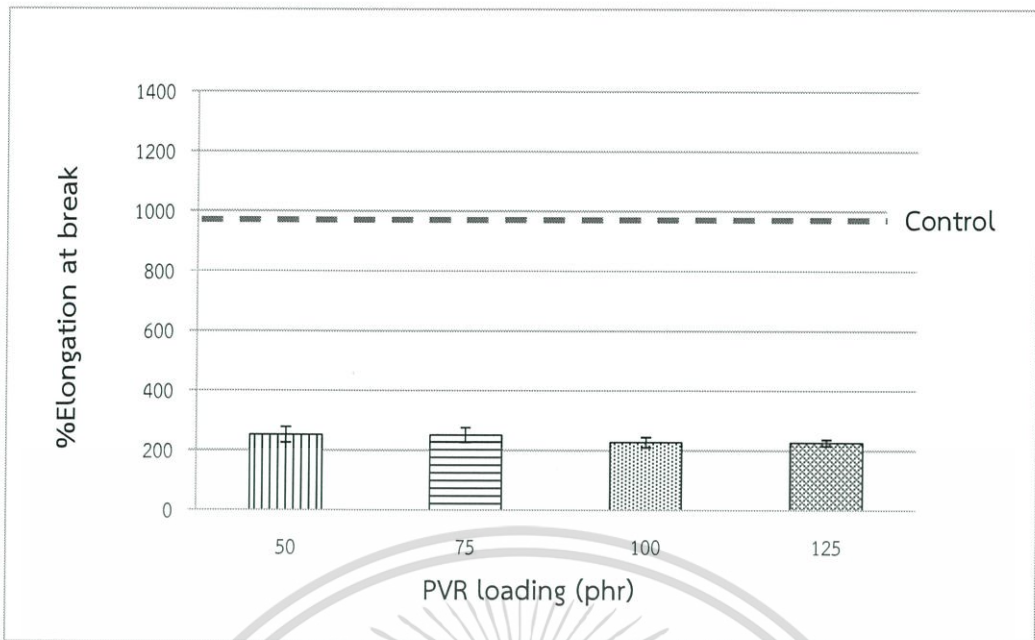


รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาดของ CRAR กับปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปในยางธรรมชาติ

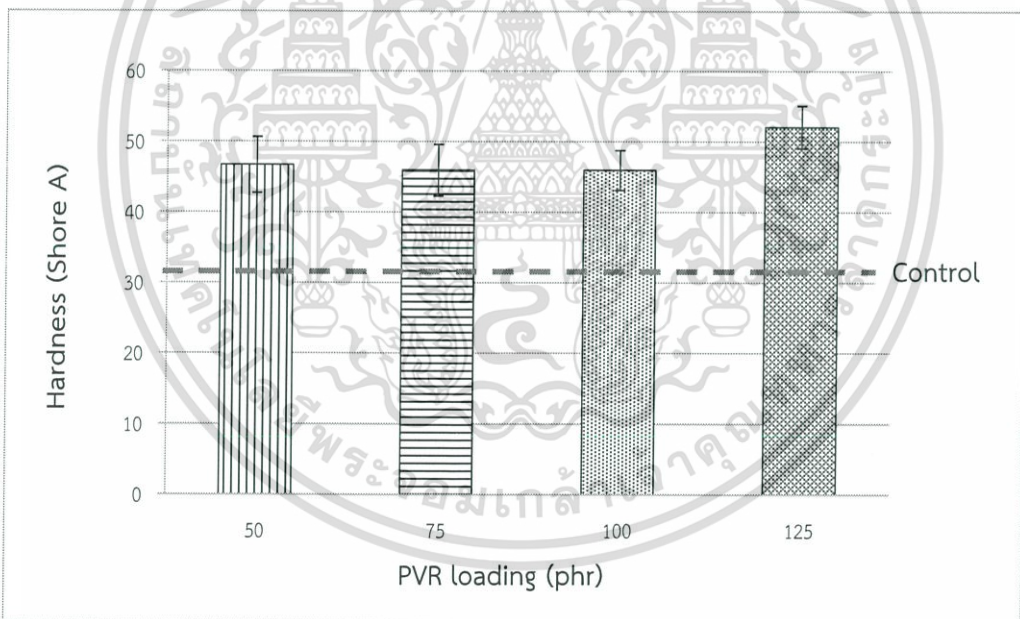


รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ CRAR กับปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปในยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

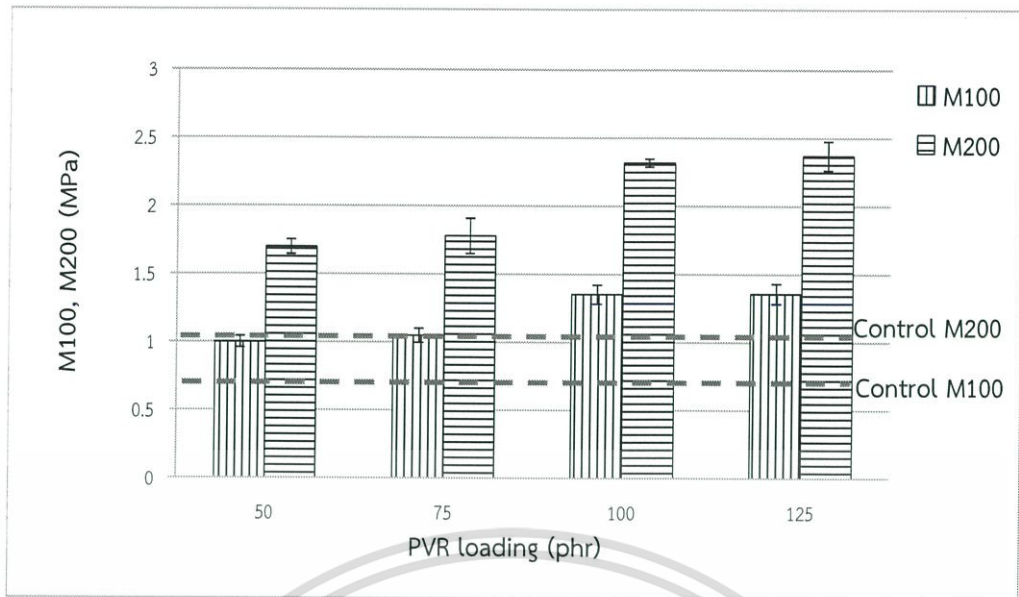


รูปที่ 4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของ CRAR กับ ปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปอย่างธรรมชาติ



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ CRAR กับปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปอย่างธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดิ่งยึด 100 และ 200 ของ CRAR กับปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปอย่างธรรมชาติ

การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

จากภาพสัณฐานวิทยาแสดงพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่เติม AR - PVR ปริมาณ 50 phr (รูปที่ 4.7) ไม่พบช่องว่างและรอยตำหนิบนชิ้นงานยาง แสดงว่าเมทริกซ์ยางและ AR - PVR มีการยึดเกาะกันที่ดี เนื่องจากองค์ประกอบของ AR - PVR คือยางที่ไม่มีขั้วเช่นเดียวกับเมทริกซ์ของยาง จึงไม่มีปัญหาความเข้ากันได้และการยึดเกาะ และยังมีกระจายตัวของ AR - PVR ที่สม่ำเสมอ ทำให้เมทริกซ์ยางสามารถห่อหุ้ม AR - PVR ได้ครอบคลุมทั้งหมด ส่งผลให้มีค่าสมบัติเชิงกลที่ดี แต่จากภาพสัณฐานวิทยาแสดงพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่เติม AR - PVR ปริมาณ 125 phr (รูปที่ 4.8) พบช่องว่างและรอยตำหนิบนชิ้นงานยาง เนื่องจากการมีปริมาณ AR - PVR มาก จะเกิดการผสมที่ไม่ดี ทำให้การกระจายตัวของ AR - PVR ไม่ดี และเมทริกซ์ยางไม่สามารถห่อหุ้ม AR - PVR ได้ครอบคลุมทั้งหมด ส่งผลให้มีค่าสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี ได้แก่ ความแข็งแรงฉีกขาด ค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดิ่งยึด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ AR - PVR

4.2 ตอนที่ 2 ศึกษาผลของขนาดหน่วยยาง

การศึกษาการใช้ขนาดหน่วยยางที่เหมาะสมในการใช้เป็นสารตัวเติม โดยทำการศึกษา 2 ขนาด คือหน่วยยางที่ผ่านการบด (GR - PVR) 20 Mesh และหน่วยยางที่ได้รับ (AR - PVR) และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณหน่วยยางเป็น 50, 75, 100, และ 125 phr ตามลำดับ จากนั้นศึกษา ลักษณะการเชื่อมโยงและทำการขึ้นรูปชิ้นงานยางและนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล

ลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร

ผลของลักษณะการเชื่อมโยง พบว่า CRAR มีเวลาเริ่มเชื่อมโยง และเวลาเชื่อมโยงน้อยกว่า CRGR ที่ทุกปริมาณ และยังมีความอัตราการเชื่อมโยงมากกว่าด้วย เนื่องจาก AR - PVR มีขนาดใหญ่กว่า GR - PVR ทำให้ AR - PVR สามารถส่งผ่านความร้อนได้ดีกว่า GR - PVR จึงใช้เวลาในการคงรูปน้อยกว่า สำหรับค่าความหนืดมูนนี่ ค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดสูงสุด พบว่ามีค่าขึ้นๆ ลงๆ เมื่อเพิ่มปริมาณ AR - PVR อาจมีสาเหตุมาจากการผสมที่ไม่ดี ทำให้เกิดการกระจายตัวของ AR - PVR ไม่ดี เนื่องจากใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งในการผสม แสดงค่าดังตารางที่ 4.2.

ตารางที่ 4.2 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางธรรมชาติที่มีปริมาณหน่วยยางได้รับ (AR - PVR) และหน่วยยางที่ผ่านการบด (GR - PVR) แตกต่างกัน

Cure characteristics	50 phr		75 phr		100 phr		125 phr	
	CRAR	CRGR	CRAR	CRGR	CRAR	CRGR	CRAR	CRGR
Mooney viscosity	20.4	19.8	16.3	22.3	28.1	26.0	25.1	35.3
Minimum torque, M_L (dNm)	2.0	1.5	3.0	2.8	4.3	1.0	4.0	3.8
Maximum torque, M_{HF} (dNm)	18.0	7.5	17.0	17.0	20.5	17.0	8.0	9.0
Scorch time, t_{s2} (min)	3.5	6.3	3.4	5.9	3.5	5.1	3.1	5.5
Cure time, $t_{c(90)}$ (min)	5.2	9.6	5.1	9.2	5.2	8.2	4.6	9.0
Cure Rate Index, CRI (min^{-1})	59.9	30.3	58.8	29.9	59.9	32.2	68.9	28.6

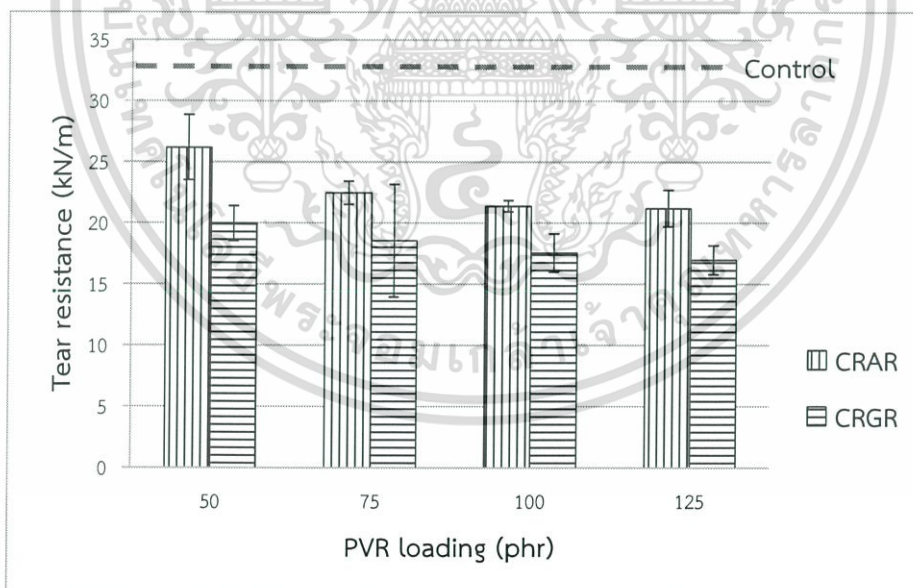
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร

ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า CRAR มีค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงฉีกขาด ค่าความแข็งกด โมดูลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด 100 และ 200 มากกว่า CRGR จึงพิจารณาจากการกระจายความเค้น และความเครียดที่บริเวณปลายเส้นใย เนื่องจาก AR - PVR จะมีลักษณะเป็นเส้นสั้น คล้ายเส้นใยสั้น โดยความเค้นเดือนมีค่าสูงสุดบริเวณปลายเส้นใย และมีค่าลดลงจนเกือบเป็นศูนย์บริเวณกลางเส้นใย ทำให้บริเวณปลายเส้นใยไม่สามารถรับแรงได้ ดังนั้นความเค้นจะเฉลี่ยแรงบริเวณกลางเส้นใย [27] เป็นผลให้ AR - PVR มีส่วนรับแรงมากกว่า GR - PVR เนื่องจาก AR - PVR มีสัดส่วนความเพริยว (Aspect ratio) มากกว่า GR - PVR ที่มีส่วนในการรับแรงน้อย เนื่องจาก GR - PVR ผ่านการบดจึงมีขนาดเล็กกลง แสดงดังตารางที่ 4.3 และสำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด พบว่า CRAR มีค่าต่ำกว่า CRGR เล็กน้อย เนื่องจาก CRAR มีค่าความแข็งแรงมากกว่า จึงดึงยืดได้น้อยกว่าที่ทุกปริมาณ

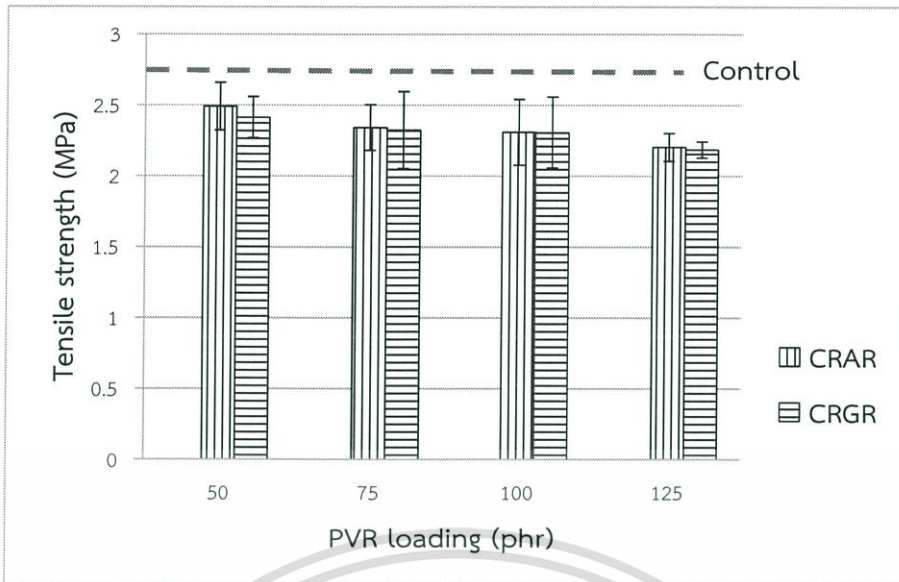
ตารางที่ 4.3 ขนาดเฉลี่ยของหน่วยยางที่ได้รับ (AR - PVR) และหน่วยยางที่ผ่านการบด (GR - PVR) จากโปรแกรม ImageJ®

Average size	AR - PVR (cm)	GR - PVR (cm)
Width	0.835	0.143
High	0.890	0.131

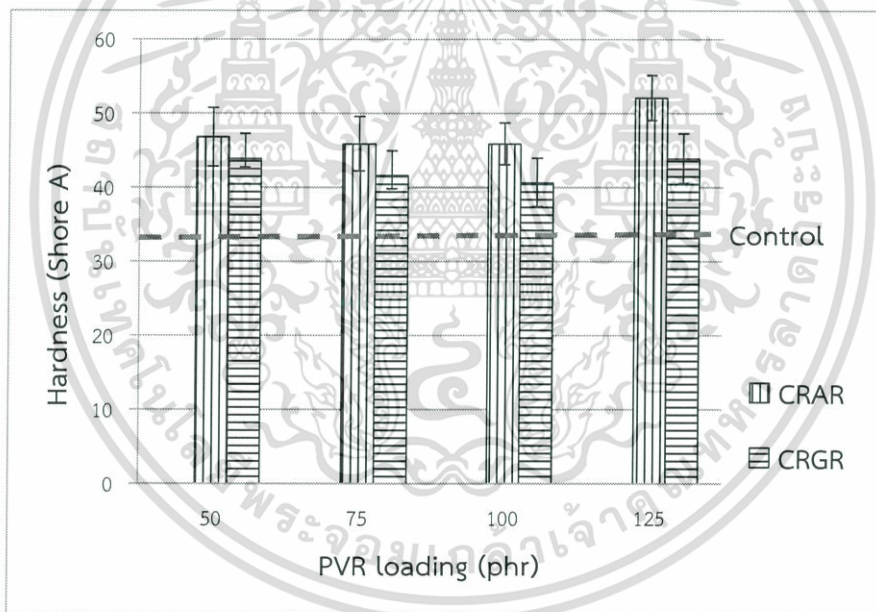


รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาดของ CRAR และ CRGR กับปริมาณ PVR ที่เติมลงไปในยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

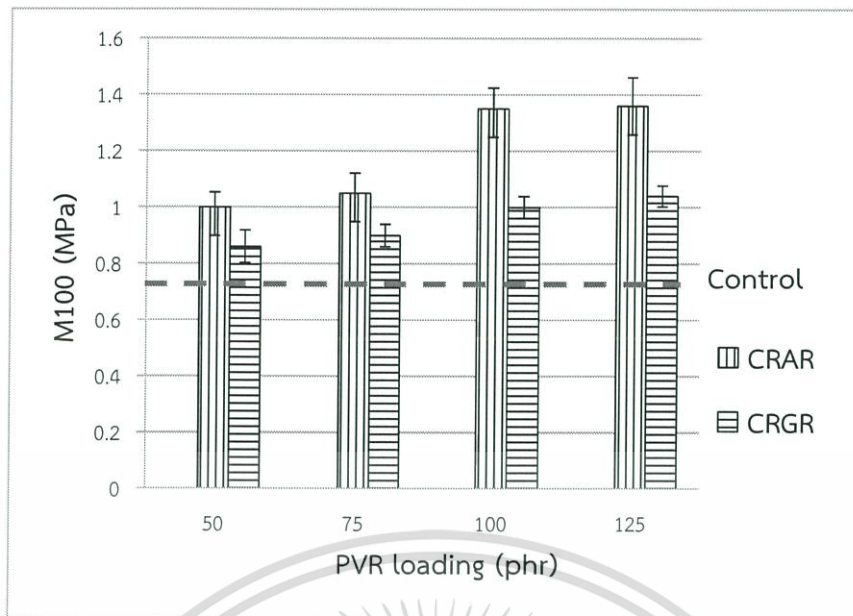


รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ CRAR และ CRGR กับปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปอย่างธรรมชาติ

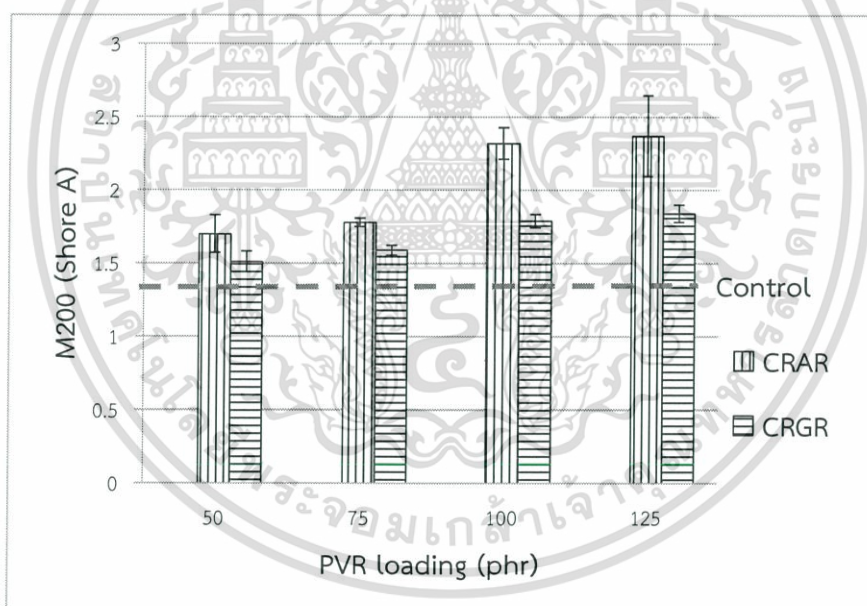


รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ CRAR และ CRGR กับปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปอย่างธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

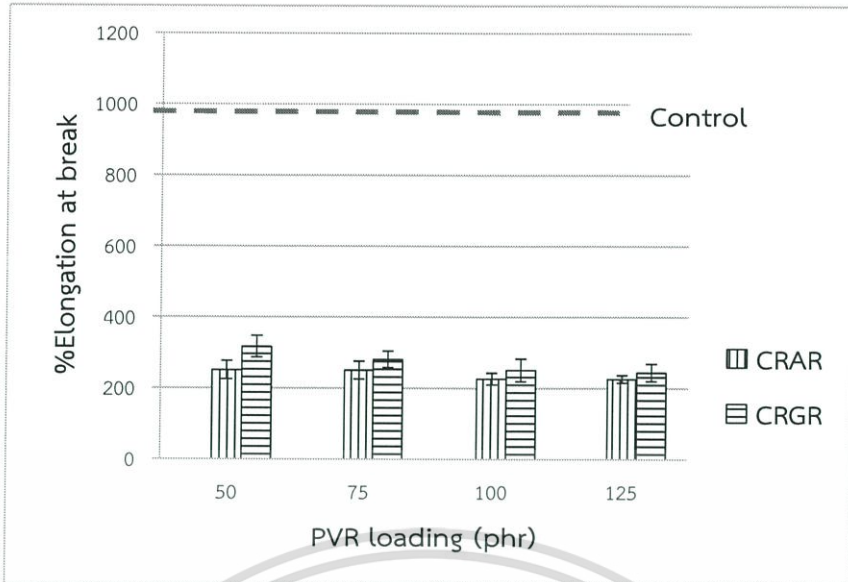


รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดิงยัด 100 ของ CRAR และ CRGR กับปริมาณ PVR ที่เติมลงไปอย่างธรรมชาติ



รูปที่ 4.13 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดิงยัด 200 ของ CRAR และ CRGR กับปริมาณ PVR ที่เติมลงไปอย่างธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของ CRAR และ CRGR กับปริมาณ PVR ที่เติมลงไปอย่างธรรมชาติ

4.3 ตอนที่ 3 ศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว

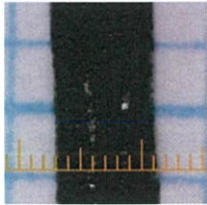
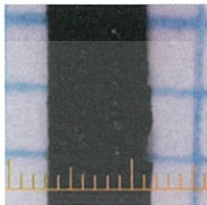
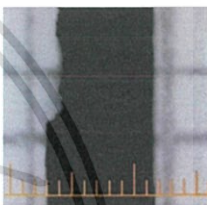
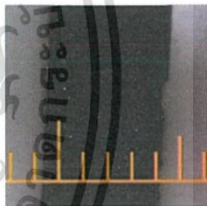
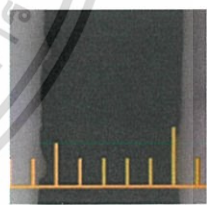
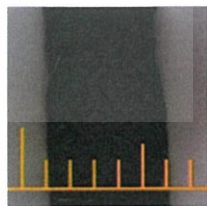
ในขั้นตอนนี้จะทำการทดลองปรับปรุงพื้นผิว AR - PVR เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพความเข้ากันได้ของหน่วยยางกับยางธรรมชาติ โดยการนำหน่วยยางมาปรับปรุงพื้นผิว สำหรับการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ตอน คือการปรับปรุงผิวหน่วยยางด้วยสารออกซิไดซ์ซึ่ง (Oxidizing agent) ได้แก่ HNO_3 และ H_2O_2 เพื่อให้พื้นผิวหน่วยยางมีความขรุขระ และเกิดการยึดติดเชิงกลกับยางธรรมชาติ ตอนที่สองคือ การปรับปรุงผิวหน่วยยางด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมเพื่อเปลี่ยนแปลงพื้นผิวหน่วยยาง ทำให้โครงสร้างเกิดการบวมตัว และเกิดการยึดติดแบบแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion)

4.3.1 การปรับพื้นผิวด้วยสารออกซิไดซ์ซึ่ง

ก. การปรับปรุงพื้นผิวหน่วยยางด้วย HNO_3

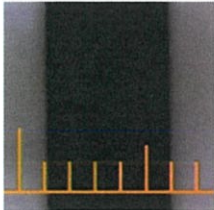
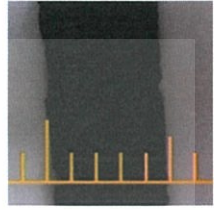
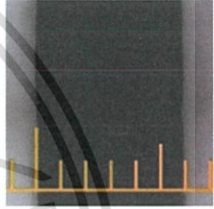
เบื้องต้นจะทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงผิวหน่วยยางด้วย HNO_3 ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด HNO_3

สภาวะของ HNO_3	ลักษณะหนวดยางหลังปั่นกวาน	% น้ำหนัก ที่หายไป	รูปแสดงพื้นผิวหนวดยางหลัง การปั่นกวาน
20% HNO_3 ปั่นกวานที่อุณหภูมิ 60 - 70°C	1 hr : ผิวหนวดยางขรุขระ และมีความแข็งด้าน เมื่อดึงยืดจะแตกเป็นเกล็ด สารละลายสีส้มอ่อน	63.69 %	
	2 hr : ผิวหนวดยางขรุขระมากขึ้น และแข็งด้าน เมื่อดึงยืดจะแตกเป็นเกล็ด พบผงสีดำในสารละลาย		
	3 hr : ผิวหนวดยางขรุขระมากขึ้น เมื่อดึงยืดจะแข็งเปราะ และหลุดออกเป็นผงสีดำ พบผงสีดำปริมาณมากในสารละลายๆ มีสีน้ำตาลส้ม		
5% HNO_3 ปั่นกวานที่อุณหภูมิ 60 - 70°C	1 hr : ผิวหนวดยางมีความขรุขระเล็กน้อย สารละลายมีสีส้มเหลืองอ่อน	2.15 %	
	2 hr : ผิวหนวดยางมีความขรุขระเล็กน้อย ผิวด้านนอกมีความด้าน เมื่อดึงยืดจะแตกเป็นเกล็ดขนาดเล็ก สารละลายมีสีส้มอมน้ำตาล		
	3 hr : ผิวหนวดยางมีความขรุขระเพิ่มขึ้น และแข็งด้าน เมื่อดึงยืดจะแตกเป็นเกล็ดขนาดเล็ก สารละลายมีสีส้มอมน้ำตาลเข้ม		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด HNO_3 (ต่อ)

สภาวะของ HNO_3	ลักษณะหนวดยงหลังปั่นกวาน	% น้ำหนัก ที่หายไป	รูปแสดงพื้นผิวหนวดยงหลัง การปั่นกวาน
5% HNO_3 ปั่นกวานที่ อุณหภูมิห้อง	1 hr : ยังไม่พบความขรุขระที่ผิว หนวดยงอย่างชัดเจน ผิวไม่ด้าน เปรอะ และไม่แตกเป็นเกล็ดเมื่อดึง ยืด สารละลายใส	0.11%	
	2 hr : ยังไม่พบความขรุขระที่ผิว หนวดยงอย่างชัดเจน ผิวไม่เปรอะ และไม่แตกเป็นเกล็ดเมื่อดึงยืด สารละลายใส		
	3 hr : ยังไม่พบความขรุขระที่ผิว หนวดยงอย่างชัดเจน ผิวไม่ด้าน เปรอะ และไม่แตกเป็นเกล็ดเมื่อดึง ยืด สารละลายใสสีส้ม		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. การปรับปรุงพื้นผิวหน่วยยางด้วย 30% H₂O₂

ตารางที่ 4.5 การหาสถานะที่เหมาะสมในการปรับปรุงพื้นผิวด้วย H₂O₂

สถานะของ H ₂ O ₂	ลักษณะหน่วยยางหลังป่นกวน	% น้ำหนักที่หายไป	รูปแสดงพื้นผิวหน่วยยางหลังการป่นกวน
30% H ₂ O ₂ ป่นกวนที่อุณหภูมิห้อง	1 hr : ยังไม่พบความขรุขระที่ผิวหน่วยยางอย่างเด่นชัด หน่วยยางสามารถดึงยึดได้ดีโดยไม่มีแตกเปราะที่ผิว สารละลายใส	1.53%	
	2 hr : หน่วยยางมีความขรุขระเล็กน้อย หน่วยยางสามารถดึงยึดได้ดีโดยไม่มีแตกเปราะที่ผิว สารละลายใส		
	3 hr : หน่วยยางมีความขรุขระเล็กน้อย หน่วยยางสามารถดึงยึดได้ดีโดยไม่มีแตกเปราะที่ผิว สารละลายใส		

สรุปสถานะของสารออกซิไดซ์ซึ่งที่เลือกใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวหน่วยยาง

- 5% HNO₃ ป่นกวนนาน 1 ชม. ที่อุณหภูมิ 60 - 70 °C

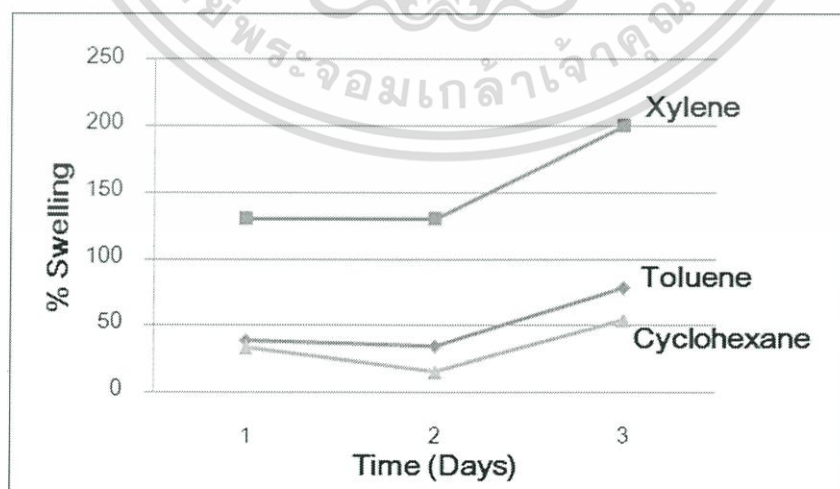
- 30% H₂O₂ ป่นกวนนาน 2 ชม. ที่อุณหภูมิห้อง

เนื่องจากทั้งสองสถานะที่เลือกใช้ทำให้พื้นผิวหน่วยยางมีการเสื่อมสภาพน้อยที่สุด โดยมีความขรุขระที่พื้นผิว และแข็งดำน้อยที่สุด เมื่อทดสอบการดึงยึดด้วยมือสัมผัสจะไม่แตกเป็นเกล็ด แต่หากใช้เวลาในการป่นกวนมากกว่านี้อาจทำให้หน่วยยางเกิดการเสื่อมสภาพมากขึ้น และส่งผลให้การยึดติดกับยางธรรมชาติลดลง

4.3.2 การปรับพื้นผิวด้วยตัวทำละลาย

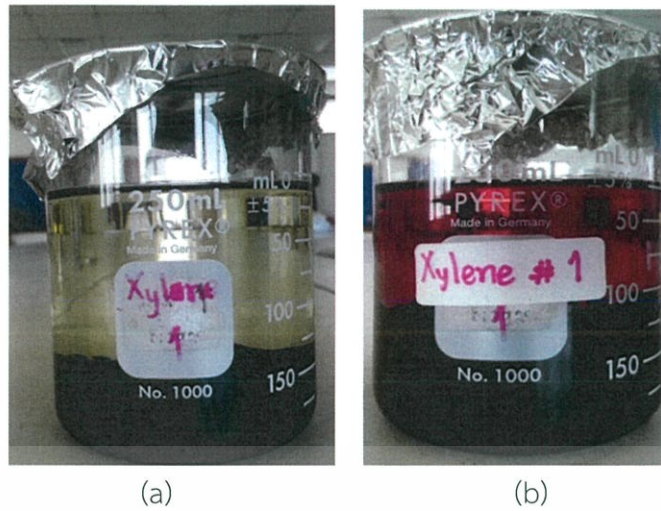
หน่วยยาง คือส่วนเดียวกับหน้ายางมีองค์ประกอบของยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวตะไดอิน และยางบิวตะไดอิน โดยหน่วยยางจากกระบวนการผลิตยังเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์ ทำให้ส่วนที่ยังไม่เชื่อมโยงในโครงสร้างเกิดการบวมตัวในตัวทำละลายได้ จึงเลือกปรับพื้นผิวหน่วยยางด้วยตัวทำละลาย

จากการทดสอบเพื่อหาตัวทำละลายที่เหมาะสมกับหน่วยยาง โดยเลือกตัวทำละลายที่ใช้จากการเปรียบเทียบค่าการละลายระหว่างตัวทำละลาย กับองค์ประกอบของหน่วยยางพบว่า Xylene, Toluene และ Cyclohexane มีค่าการละลายที่ใกล้เคียงกับยางทั้ง 3 ชนิด เมื่อนำ AR - PVR แช่ในตัวทำละลายเป็นเวลา 3 วัน พบว่า Xylene ทำให้ AR - PVR เกิดการบวมตัวมากกว่า Toluene และ Cyclohexane ตั้งแต่วันแรกที่ทดลองมากถึง 2 เท่า พิจารณาผลได้จากเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในรูปที่ 4.14 ดังนั้นตัวทำละลายที่เหมาะสมคือ Xylene โดยจะทำการแช่เป็นเวลา 1 วัน เนื่องจากหากใช้เวลามากกว่านี้ จะทำให้ผิวของหน่วยยางเกิดการละลาย และทำให้หน่วยยางมีโครงสร้างที่นิ่มเกินไป เนื่องจากองค์ประกอบของหน่วยยางทั้ง 3 ชนิด และตัวทำละลายไม่มีขั้วเช่นเดียวกัน มีดัชนีการละลายใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 3.4 เมื่อแช่หน่วยยาง ตัวทำละลายจะแทรกเข้าไปที่ชั้นผิวนอกของหน่วยยางจากนั้นจะซึมทะลุลงไปในโครงสร้างของหน่วยยางเรื่อยๆ จนทำให้โครงสร้างหน่วยยางที่ยังไม่ผ่านการเชื่อมโยงเกิดการบวมตัวและมีความนิ่มมากขึ้น โดยการละลายจะเริ่มจากผิวด้านนอกของหน่วยยาง โดยโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่ไม่เกิดการเชื่อมโยงจะมีความสามารถในการไหลได้ดีกว่าจะละลายออกไปได้ง่าย การสังเกตผลดูได้จากตัวทำละลายจะมีสีที่เข้มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการบวมตัว ดังรูปที่ 4.16 (a) ซึ่งแช่เป็นเวลา 1 วัน และรูปที่ 4.16 (b) ซึ่งแช่เป็นเวลา 3 วัน และเมื่อนำตัวทำละลายมาระเหยจะพบของเหลวนั้นติดอยู่ที่บีกเกอร์ ซึ่งของเหลวนั้นคือ ของผสมระหว่างตัวทำละลาย และหน่วยยางที่ละลายออกมาซึ่งไม่สามารถทำการระเหยได้เมื่อให้อุณหภูมิ ณ จุดเดือดของตัวทำละลาย นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้จากการซับหน่วยยางด้วยทิชชูก่อนซึ่งน้ำหนัก ซึ่งการซับหน่วยยางในวันที่ 2 จะเห็นเป็นแผ่นสีน้ำตาลออกมาจากหน่วยยาง ซึ่งเป็นผลมาจากการละลายที่พื้นผิว ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการแช่หน่วยยางใน Xylene คือ 1 วัน



รูปที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของหน่วยยางในแต่ละตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 สีของ Xylene ที่เปลี่ยนไปเมื่อนำหนวดยางมาแช่ (a) แช่เป็นเวลา 1 วัน และ (b) แช่เป็นเวลา 3 วัน

ลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร

จากการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงพบว่า การปรับปรุงผิว AR - PVR ทั้ง 2 ตอน ทำให้ยางผสมสูตรมีความหนืดลดลงเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ปรับปรุงผิว AR - PVR โดยการปรับปรุงด้วย Xylene จะทำให้ยางผสมสูตรมีความหนืดต่ำสุด พิจารณาได้จากค่าความหนืดมูนิ ค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดสูงสุดที่มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจาก Xylene เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนคล้ายน้ำมันอะโรมาติกที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ดังนั้น Xylene จึงทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไซเซอร์ทำให้ยางนิ่มมากขึ้น และหนืดลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับปรุงผิวด้วย H_2O_2 และ Xylene จะทำให้ยางมีอัตราการเชื่อมโยง และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงที่ใกล้เคียงกับยางสูตรที่ไม่ปรับปรุงผิว AR - PVR จากข้อมูลนี้จึงสันนิษฐานได้ว่าการปรับปรุงผิวด้วย H_2O_2 และ Xylene ไม่ช่วยเพิ่มความสามารถในการเชื่อมโยงยางให้เร็วขึ้น อีกทั้งสูตรที่ปรับปรุงผิวด้วย HNO_3 ยังใช้เวลาในการเชื่อมโยงนานเพิ่มขึ้นซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการมีกรดตกค้างที่พื้นผิวหนวดยาง ซึ่งสารที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะหน่วงปฏิกิริยาเชื่อมโยงทำให้อัตราเร็วในการเชื่อมโยงลดลงพิจารณาได้จากตารางที่ 4.6

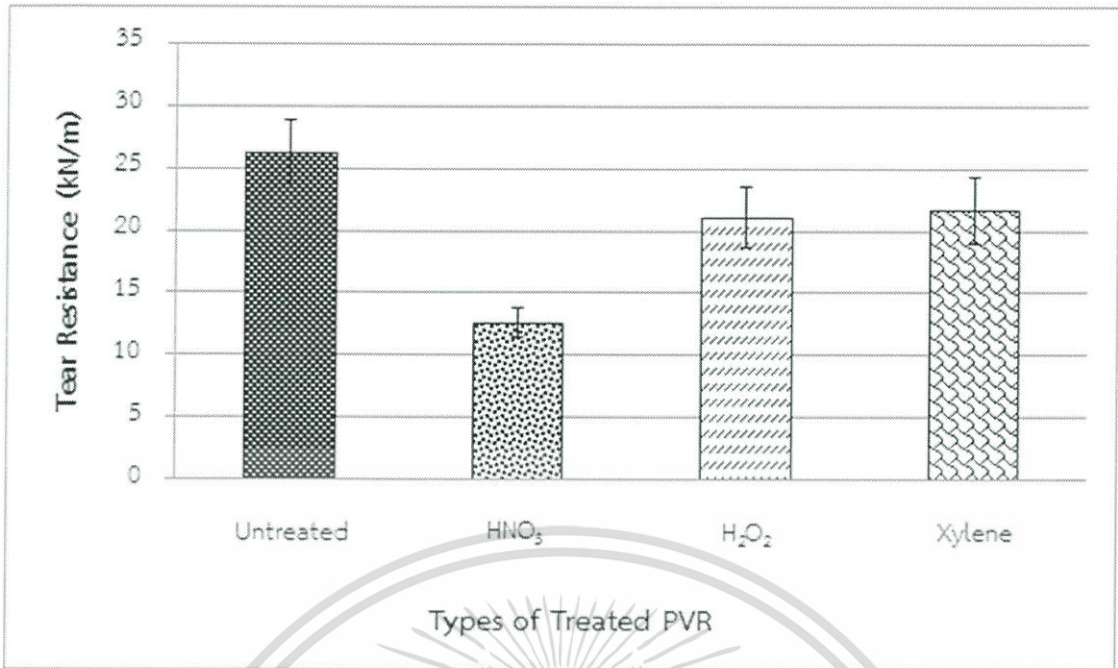
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางสูตรที่ใช้หนวดยางชนิดปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว

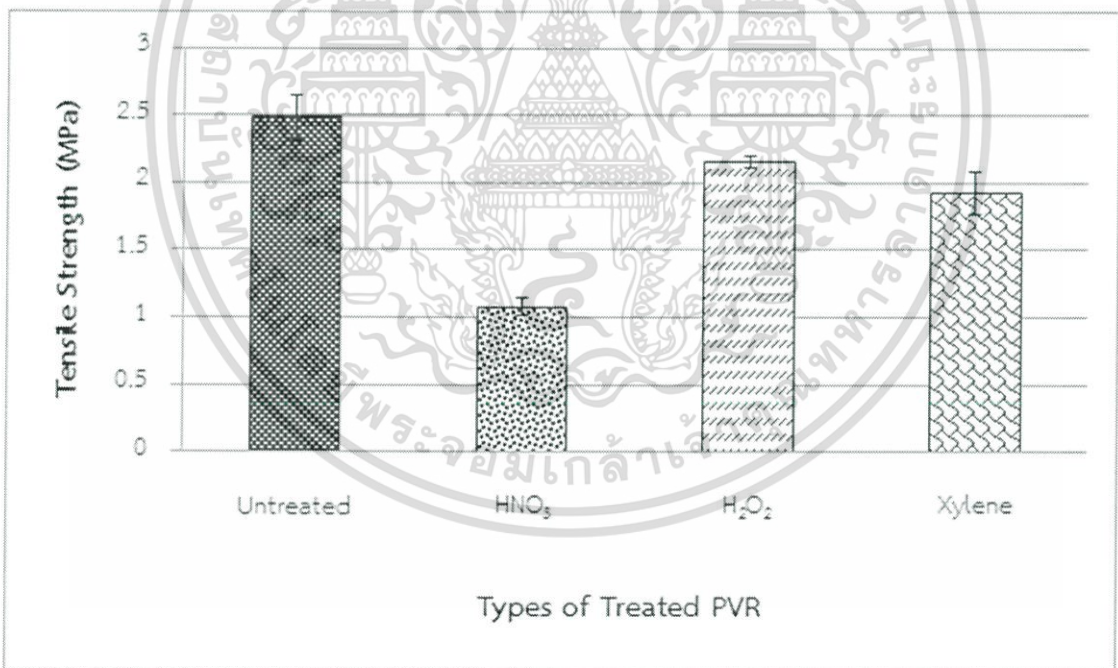
Cure characteristics	Types of treated PVR			
	Untreated	5% HNO ₃	30% H ₂ O ₂	Xylene
Mooney viscosity	20.4	14.1	17.5	7.8
Minimum torque, M _L (dNm)	2.0	1.0	1.2	0.8
Maximum torque, M _{HF} (dNm)	18.0	14.9	19.2	10.0
Scorch time, t _{s2} (min)	5.2	7.3	5.5	5.0
Cure time, t _{C(90)} (min)	3.5	4.5	3.5	3.2
Cure rate index, CRI (min ⁻¹)	59.9	36.2	49.3	55.3

สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวกับสมบัติที่เกิดจากการแตกหัก ได้แก่ ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาด จะมีค่าที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือการปรับปรุงผิวหนวดยางด้วยสารออกซิไดซ์ซึ่ง และตัวทำละลาย จะทำให้ชิ้นงานยางทนต่อแรงดึง และแรงฉีกขาดได้น้อยกว่าสูตรที่ใช้หนวดยางที่ไม่ปรับปรุงผิว โดยเฉพาะการปรับปรุงผิวหนวดยางด้วย 5% HNO₃ จะทำให้ชิ้นงานยางทนต่อแรงดึงได้น้อยที่สุด พิจารณาได้จากรูปที่ 4.17 – 4.18 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของหนวดยาง เนื่องจากการปรับปรุงผิวด้วยสารออกซิไดซ์ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังรูปที่ 4.26 อ้างอิงได้จากงานวิจัยที่ศึกษาก่อนหน้านี้ [12] และขณะทำการอบหนวดยางเพื่อไล่ความชื้นมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะช่วยให้หนวดยางเกิดการเสื่อมสภาพได้มากขึ้น โดยหนวดยางจะมีความแข็งด้านที่พื้นผิว และเมื่อดึงยืดจะแตกเป็นเกล็ด เมื่อนำมาผสมกับยางธรรมชาติจึงทำให้ชิ้นงานยางทนต่อแรงดึงได้ลดลง นอกจากนี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากการปรับปรุงผิวหนวดยางด้วย 5% HNO₃ ทำให้ยางผสมสูตรเกิดการเชื่อมโยงซ้ำ ทำให้ชิ้นงานยางมีพันธะที่ถูกละลาย หรือมีความหนาแน่นเชื่อมโยงที่ต่ำกว่า จึงสามารถใช้แรงปริมาณน้อยกว่า เพื่อทำให้ยางเปลี่ยนรูป ชิ้นงานยางที่ได้จึงไม่ทนต่อแรงดึง สำหรับการปรับปรุงผิวหนวดยางด้วย Xylene ทำให้ชิ้นงานยางทนต่อแรงดึงได้ลดลงเช่นกัน เนื่องจากตัวทำละลายแทรกเข้าไปในโครงสร้างของหนวดยางจนเกิดการบวมตัวและทำให้หนวดยางนิ่มลง อีกทั้งอาจเกิดการละลายที่พื้นผิวหนวดยาง ทำให้ความสามารถในการยึดเกาะกับยางธรรมชาติลดลง ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยาง

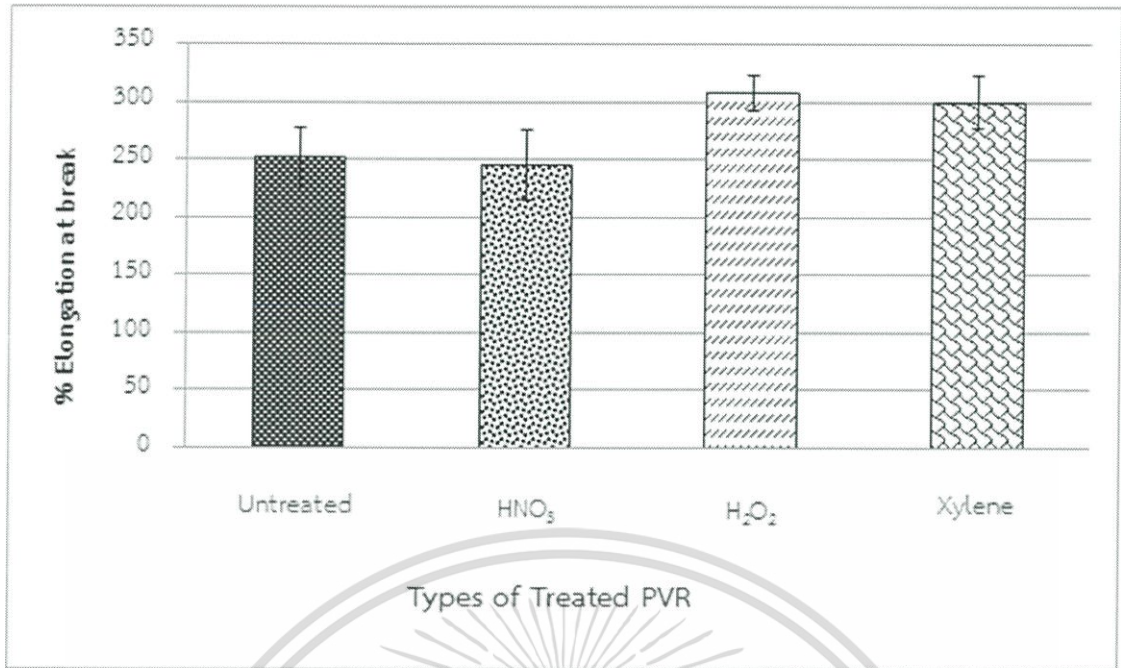


รูปที่ 4.17 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติความแข็งแรงฉีกขาดของชิ้นงานยางสูตรที่ปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว AR - PVR



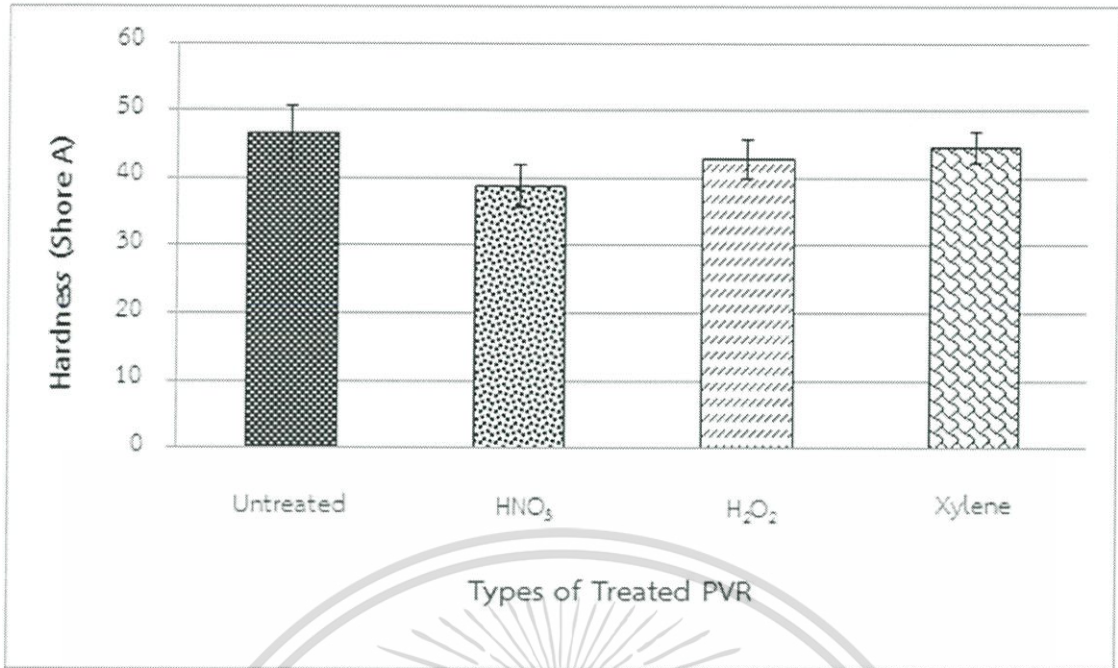
รูปที่ 4.18 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติความแข็งแรงดึงของชิ้นงานยางสูตรที่ปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว AR - PVR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

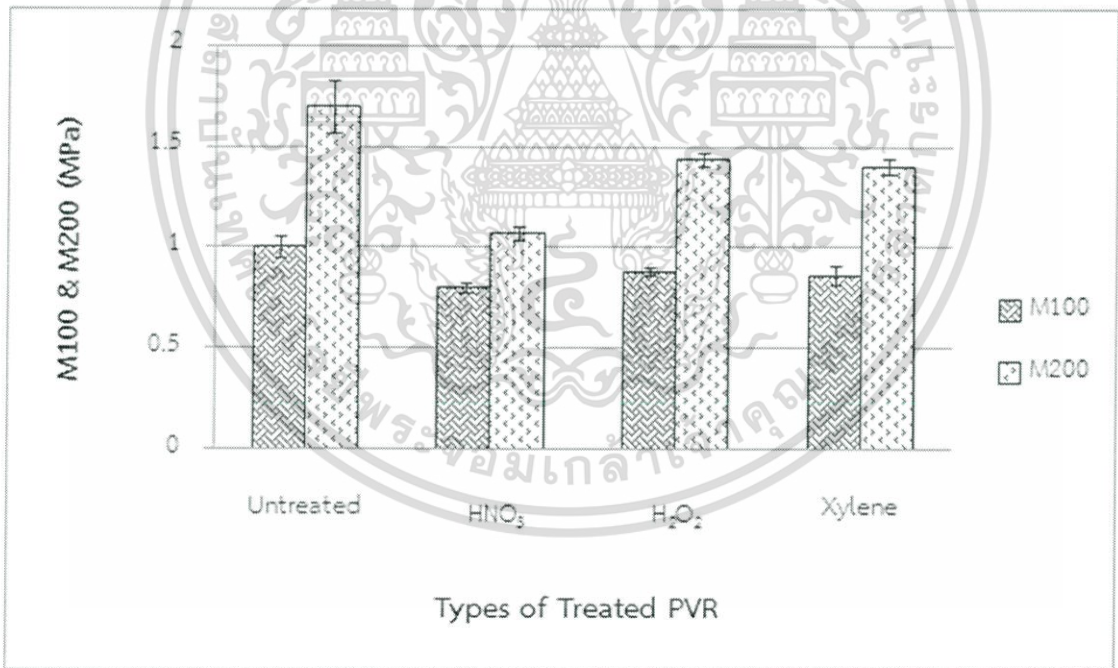


รูปที่ 4.19 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของชิ้นงานยางสูตรที่ปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว AR - PVR

ผลจากการทดสอบความแข็งแรงของยาง เช่น ค่ามอดูลัสที่ M100 และ M200 และความแข็งกด จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความแข็งแรงดึงนั่นคือ การปรับปรุงผิวหนวดยางด้วยสารออกซิไดซ์ซิง และตัวทำละลายจะทำให้ชิ้นงานยางมีความแข็งแรงต่ำกว่าชิ้นงานสูตรที่ไม่ปรับปรุงผิวหนวดยาง โดยการปรับปรุงผิวหนวดยางด้วย 30% H₂O₂ และ Xylene จะทำให้ชิ้นงานยางมีความแข็งที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่การปรับปรุงผิวหนวดยางด้วย 5% HNO₃ จะทำให้ชิ้นงานยางมีความแข็งต่ำที่สุด ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องจากการปรับปรุงหนวดยางด้วย 30% H₂O₂ และ Xylene ที่มีอัตราการเชื่อมโยงที่ใกล้เคียงกัน จึงน่าจะมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงพอกๆ กัน ทำให้ชิ้นงานยางมีความแข็งที่ใกล้เคียงกัน อีกทั้งยางผสมสูตรที่เติมหนวดยางที่บวมตัวใน Xylene เมื่อทำการอัดขึ้นรูปจะมีการให้ความร้อนเพื่อให้ยางเชื่อมโยง ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการระเหยออกของ Xylene ทำให้ชิ้นงานยางมีความแข็งที่ใกล้เคียงกับสูตรที่เติมหนวดยางที่ปรับปรุงหนวดยางด้วย 30% H₂O₂ เพราะ Xylene มีจุดเดือดที่ 136 - 145 °C แต่การอัดขึ้นรูปยางจะใช้อุณหภูมิที่ 150°C ในขณะที่การปรับปรุงด้วย 5% HNO₃ จะใช้เวลาในการเชื่อมโยงมากกว่าเล็กน้อย ชิ้นงานยางจึงมีความแข็งที่ต่ำกว่า



รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของชิ้นงานยางสูตรที่ปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว AR - PVR

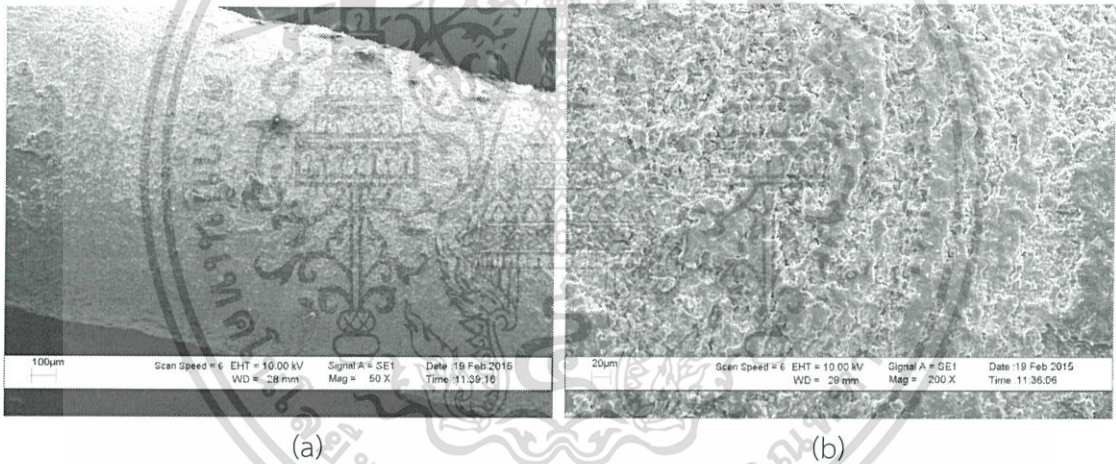


รูปที่ 4.21 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การตั้งยัด 100 และ 200 ของ ชิ้นงานยางสูตรที่ปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว AR - PVR

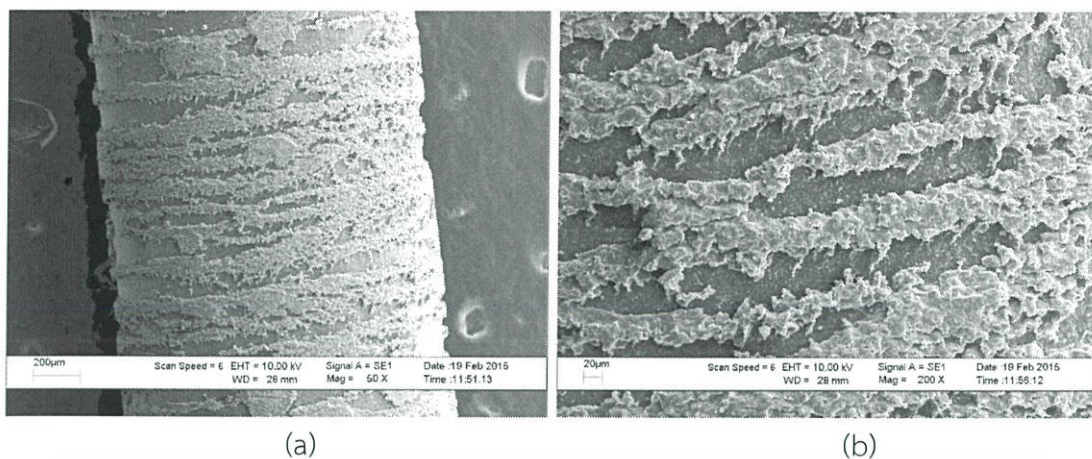
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

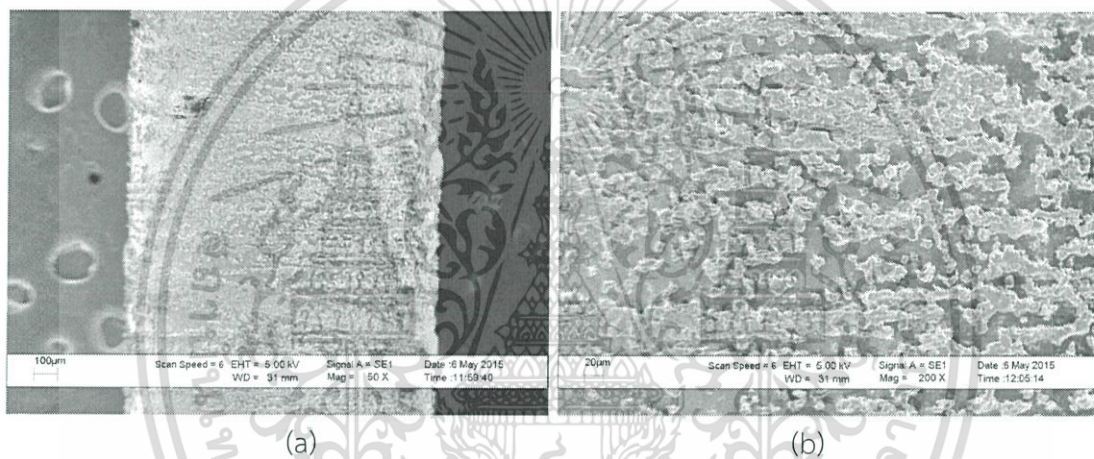
จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของ AR - PVR พบว่า การปรับปรุงผิวด้วยสารออกซิไดซ์ซึ่งทำให้ผิวหนวดยางปรากฏเป็นผิวที่ขรุขระกระจายปนกับพื้นผิวเรียบ ดังรูปที่ 4.23 – 4.24 ซึ่งเป็นผลจากการหลุดหายไปของเนื้อยาง ซึ่งอาจมีผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังรูปที่ 4.26 ทำให้ความสามารถในการยึดติดเชิงกลกับยางธรรมชาติลดลง โดยการปรับปรุงผิวด้วย HNO_3 จะทำให้ผิวหนวดยางมีร่องที่เกิดจากการกัดกร่อนที่ลึกกว่า และมีพื้นผิวเรียบเป็นบริเวณกว้างกว่าการปรับปรุงผิวด้วย H_2O_2 ในขณะที่หนวดยางที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวจะพบความขรุขระที่สม่ำเสมอ และมีโพรงขนาดเล็ก ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งจะช่วยให้ยึดติดเชิงกลกับยางธรรมชาติได้ดี เพราะมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่าซึ่งจะสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของยางสูตรที่ไม่ปรับปรุงผิว AR - PVR ที่มีค่าสูงกว่าสูตรที่ปรับปรุงพื้นผิว AR - PVR อีกทั้งการปรับปรุงผิวด้วยสารออกซิไดซ์ซึ่ง จะทำให้หนวดยางเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งถึงแม้ว่าหนวดยางจะมีความขรุขระ แต่การเสื่อมสภาพของยางจะทำให้ความสามารถในการยึดติดเชิงกลจะลดลง สำหรับภาพสัณฐานวิทยาของการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Xylene พิจารณาได้จากรูปที่ 4.25 พบว่า มีการหลุดหายไปของผิวบางส่วน เนื่องจากเกิดการละลายของหนวดยางที่พื้นผิว ซึ่งพิจารณาได้จากสีของตัวทำละลายที่เข้มข้นเมื่อเทียบกับลักษณะเดิมของตัวทำละลาย ส่งผลทำให้ยึดติดกับยางธรรมชาติได้ต่ำลงเมื่อเทียบกับหนวดยางที่ไม่ปรับปรุงผิว



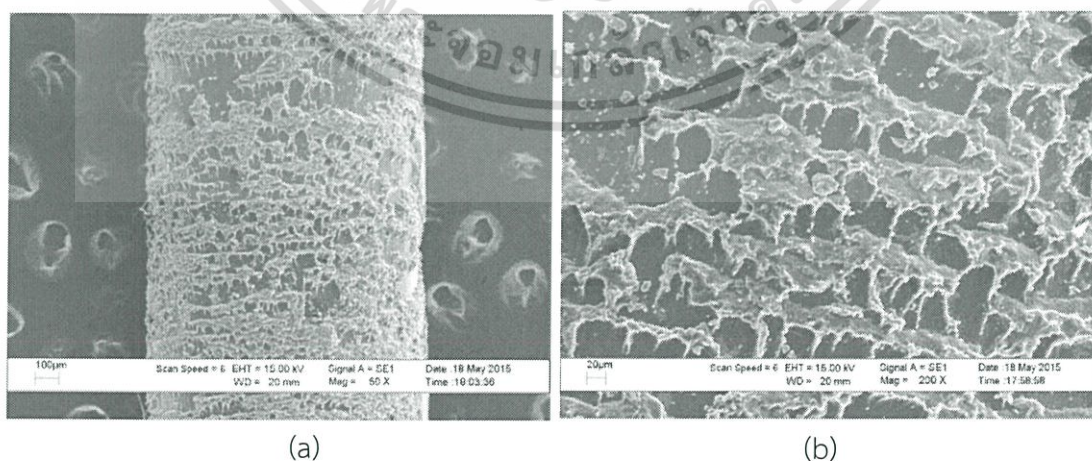
รูปที่ 4.22 ภาพสัณฐานวิทยาของ AR - PVR ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว (a) กำลังขยายต่ำ (50 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (200 เท่า)



รูปที่ 4.23 ภาพสัณฐานวิทยาของ AR - PVR ที่ปรับปรุงผิวด้วย 5% HNO_3 (a) กำลังขยายต่ำ (50 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (200 เท่า)



รูปที่ 4.24 ภาพสัณฐานวิทยาของ AR - PVR ที่ปรับปรุงผิวด้วย 30% H_2O_2 (a) กำลังขยายต่ำ (50 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (200 เท่า)



รูปที่ 4.25 ภาพสัณฐานวิทยาของ AR - PVR ที่ปรับปรุงผิวด้วย Xylene (a) กำลังขยายต่ำ (50 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (200 เท่า)

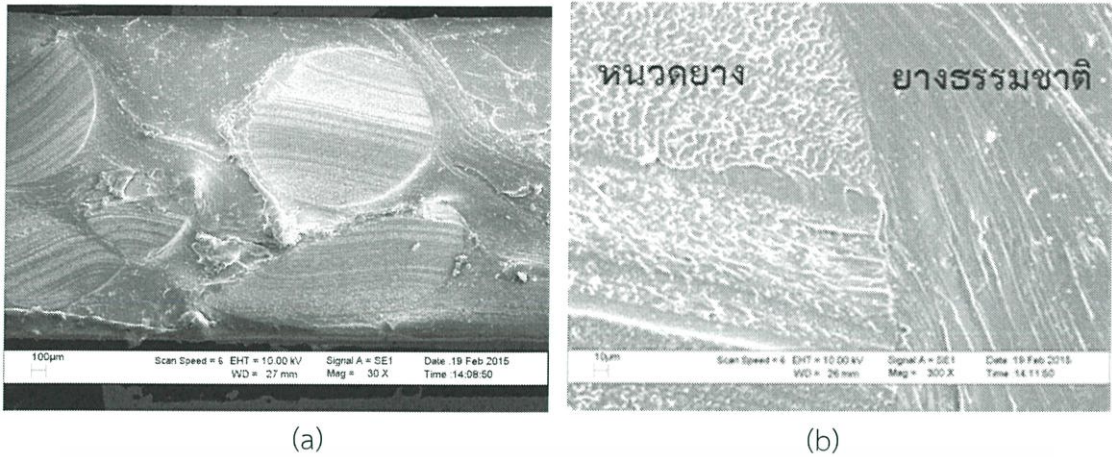
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ยางจะมีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน โดยเฉพาะยางมีโครงสร้างที่ไม่อิมมิตัวซึ่งว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยเฉพาะกับออกซิเจน (O_2) และโอโซน (O_3) นอกจากนี้ปฏิกิริยายังสามารถถูกเร่งได้เมื่อมีความร้อน แสง หรือความชื้นมาเกี่ยวข้อง ซึ่งการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นมีทั้งแบบเชื่อมโยงซึ่งจะทำให้ยางมีความแข็งเปราะมากขึ้น และการเสื่อมสภาพแบบสายโซ่ขาด ซึ่งจะทำให้ยางนิ่มขึ้นและมีความแข็งลดลง ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของหน่วยยางอาจเกิดได้ทั้งการออกซิเดชันที่เร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเอง และการออกซิเดชันเนื่องจากสารออกซิไดซ์ซึ่ง ตัวอย่างปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางธรรมชาติแสดงได้ ดังรูปที่ 4.26 หากอ้างอิงจากงานวิจัยที่ศึกษา [12,17] พบว่าหลังจากนำผงยางบดมาผ่านการปรับปรุงผิวด้วย 30% H_2O_2 และ 60% HNO_3 และนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่าการปรับปรุงผิวด้วย 30% H_2O_2 จะพบพีคที่ตำแหน่ง 1710 cm^{-1} และ 1720 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการสั่นของหมู่คาร์บอนิล และการปรับปรุงผิวด้วย 60% HNO_3 จะพบพีคที่ตำแหน่ง 1382 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกถึงหมู่ $N-N=O$ และนอกจากนี้แถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นพันธะคู่ จะมีความเข้มที่ลดลงเนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพของยาง



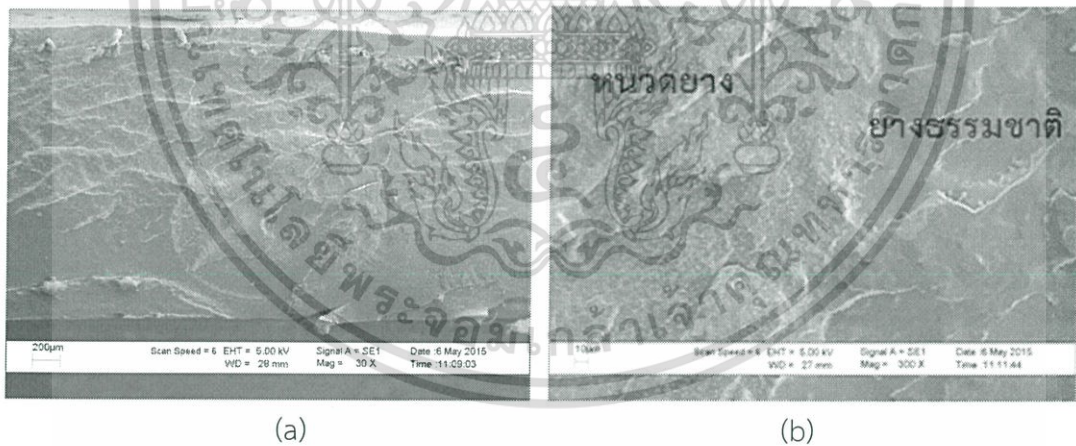
รูปที่ 4.26 สมการปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางธรรมชาติ [28]

จากการศึกษาพื้นผิวหน้าตัดชิ้นงานยางพบว่า ผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่เติมหน่วยยางที่ไม่ปรับปรุงผิวที่ 50 phr จะไม่เรียบเสมอทั้งชิ้นงาน และจะพบเป็นลักษณะของหน่วยยางโผล่ขึ้นมาสูงกว่าเนื้อยางเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 300 เท่าจะพบว่าทั้ง PVR และยางเกิดการยึดติดที่ไม่พบช่องว่างระหว่างผิวสัมผัส



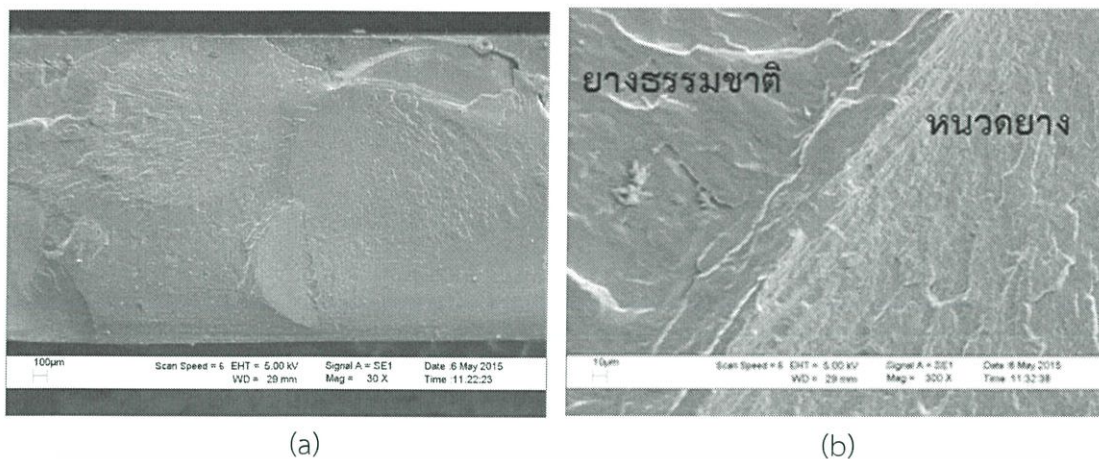
รูปที่ 4.27 ภาพสัณฐานวิทยา แสดงพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่เติม AR - PVR ที่ไม่ปรับปรุงผิว ปริมาณ 50 phr (a) กำลังขยายต่ำ (30 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (300 เท่า)

จากรูปที่ 4.28 – 4.30 ซึ่งศึกษาพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่ปรับปรุงผิวหน่วยยาง พบว่า ชิ้นงานยางที่ปรับปรุงผิวหน่วยยางด้วย H_2O_2 และ Xylene จะมีการแตกหักแบบ Cohesive failure โดยผิวหน้าตัดที่เกิดจากการหักมีความเรียบมากกว่าการปรับปรุงด้วย HNO_3 และไม่พบการไหลของ เส้นหน่วยยาง แสดงให้เห็นว่าการยึดติดระหว่างหน่วยยางกับเมทริกซ์ยางเกิดได้ดี พิจารณาได้จาก รูปที่กำลังขยายบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นผิวสูงขึ้น พบว่าไม่มีรอยบกพร่องระหว่างพื้นผิวทั้ง 3 ชิ้นงาน



รูปที่ 4.28 ภาพสัณฐานวิทยา แสดงพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่ปรับปรุงผิว AR - PVR ด้วย 5% HNO_3 (a) กำลังขยายต่ำ (30 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (300 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ภาพสัณฐานวิทยา แสดงพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่ปรับปรุงผิว AR - PVR ด้วย 30% H_2O_2 (a) กำลังขยายต่ำ (30 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (300 เท่า)

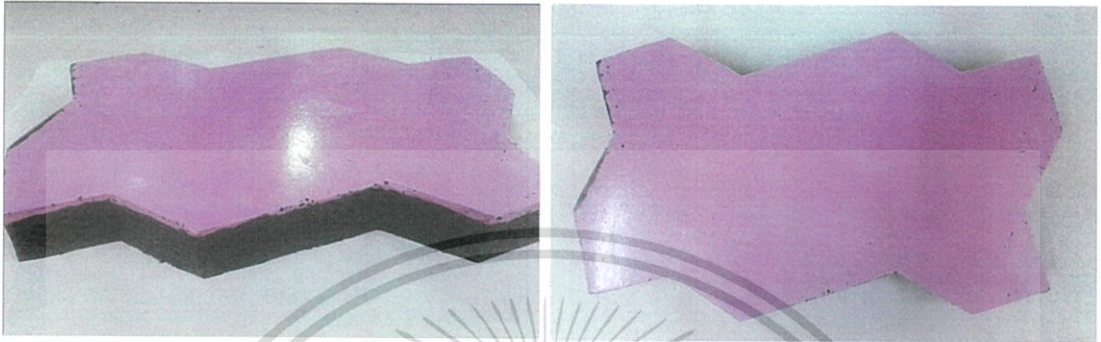


รูปที่ 4.30 ภาพสัณฐานวิทยา แสดงพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานยางที่ปรับปรุงผิว AR - PVR ด้วย Xylene (a) กำลังขยายต่ำ (30 เท่า) และ (b) กำลังขยายสูง (300 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ตัวอย่างการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

การขึ้นรูปยางบล็อกปูพื้น โดยทำการขึ้นรูปเป็นสองชั้น ชั้นบนจะใช้เป็นยาง EPDM ผสมกับ PVR เนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อสภาวะอากาศ และเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย เนื่องจากมีพื้นที่ระคายเคืองปริมาณมาก ในการทดลองขึ้นรูปบล็อกยางปูพื้นนี้ จึงเลือกใช้ยางชั้นบนเป็นยาง EPDM เพื่อให้ยางบล็อกปูพื้นที่ได้มีความคงทนต่อสภาพอากาศ และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.31 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยางบล็อกปูพื้น (Rubber block)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบยางปูพื้น

ตารางที่ 4.7 ชั้นยาง EPDM ผสมกับ PVR

สารเคมี	phr	ราคาวัตถุดิบ (บาท/กก.)	ราคาสูตรยาง (บาท/กรัม)
EPDM 3072 EM	100	110	11
AR - PVR	50	1.50	0.075
Hisil 255G grade UR - T	40	35	1.4
4Q	200	3	0.6
Naphthenic oil	20	156.25	3.125
PEG - 4000	2.4	380	0.912
Koresin	5	600	3
ZnO	5	34.5	0.173
Stearic acid	1	37	0.037
TiO ₂	5	93	0.465
ZDBC	1	230	0.23
TMTD	0.5	126	0.063
MBTS	1.5	180	0.27
CBS	1.5	148	0.222
DPG	1	180	0.18
Sulfur	1.5	16	0.024
Total	435.4	2330.25	21.776

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ชั้นยางธรรมชาติผสมกับ PVR

สารเคมี	phr	ราคาวัตถุดิบ (บาท/กก.)	ราคาสูตรยาง (บาท/กรัม)
NR	100	61.75	6.175
AR - PVR	50	1.5	0.075
Wingstay	1	310	0.31
Naphthenic oil	5	156.25	0.781
Stearic acid	2	37	0.074
ZnO	4	34.5	0.138
Sulfur	2	16	0.032
MBTS	1	180	0.18
TMTD	0.5	126	0.063
Total	165.5	923	7.828

สำหรับตัวอย่างชิ้นงานยางบล็อกปูพื้นรูปตัวหนอน 1 ชั้น ขนาด 13x24x2.5 cm³ (40 ก้อน/m²) จะมีน้ำหนักประมาณ 670 g ราคาต้นทุน 33 บาท/ก้อน ซึ่งยางบล็อกปูพื้น 1 ก้อน ประกอบด้วยยางชั้น EPDM มีน้ำหนัก 130 g ราคาต้นทุน 7 บาท และชั้นยางธรรมชาติ มีน้ำหนัก 550 g ราคาต้นทุน 26 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองที่แบ่งออกเป็น 3 ตอน จึงสามารถสรุปผลการทดลองได้เป็น 3 ตอน ดังนี้

5.1.1 ตอนที่ 1. ศึกษาผลของปริมาณหน่วยยาง

จากการศึกษาผลของปริมาณ AR - PVR ที่เติมลงไปใ้ในยางผสมสูตร 0 - 125 phr พบว่า ลักษณะการเชื่อมโยงของ CRAR ได้แก่ ค่าความหนืดมูนนี้ ค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดสูงสุดมีค่า ขึ้นๆ ลงๆ เมื่อเพิ่มปริมาณ AR - PVR ส่วนเวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงของ CRAR 50 - 100 phr จะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วน CRAR 125 phr มีเวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงน้อยที่สุด และอัตราการเชื่อมโยงของ CRAR 50 - 100 phr จะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วน CRAR 125 phr มีอัตราการเชื่อมโยงมากที่สุด จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของ CRAR พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ AR - PVR ทำให้ค่าความแข็งแรงฉีกขาด ความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเล็กน้อย ส่วนค่าความแข็งของวัสดุ ได้แก่ โมดูลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด 100 และ 200 จะมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความแข็งกดของ CRAR 50 - 100 phr จะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วน CRAR 125 phr มีค่าความแข็งกดสูงสุด ดังนั้นงานวิจัยนี้ปริมาณ AR - PVR ที่เหมาะสมที่เติมลงไปใ้ในยางผสมสูตรคือ 50 phr เนื่องจากมีค่าสมบัติเชิงกลสูงกว่าสูตรอื่นๆ รวมทั้งในขั้นตอนการผลิตสามารถทำได้ง่าย เนื่องจากปริมาณหน่วยยางไม่มากเกินไป

5.1.2 ตอนที่ 2. ศึกษาผลของขนาดหน่วยยาง

การศึกษผลของขนาด PVR ระหว่างแบบ AR - PVR และ GR - PVR ที่เติมลงไปใ้ในยางผสมสูตร พบว่าลักษณะการเชื่อมโยงยาง ได้แก่ ค่าความหนืดมูนนี้ ค่าแรงบิดต่ำสุด และ ค่าแรงบิดสูงสุด พบว่ามีค่าขึ้นๆ ลงๆ เมื่อเพิ่มปริมาณ PVR ส่วนเวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยง พบว่า CRAR จะมีเวลาเริ่มเชื่อมโยง และเวลาเชื่อมโยงน้อยกว่า CRGR ที่ทุกปริมาณ และยังมีค่าอัตราการเชื่อมโยงมากกว่าด้วย จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า CRAR มีค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด ความแข็งกด ค่าโมดูลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่ 100 และ 200 สูงกว่า CRGR ที่ทุกปริมาณ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาขนาดของ AR - PVR แทนการใช้ GR - PVR เนื่องจากทำให้ยางผสมสูตรมีค่าลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น รวมถึงช่วยลดขั้นตอนในการผลิต เนื่องจากไม่ต้องทำการบด และช่วยลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ตอนที่ 3. ศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว

จากการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารออกซิไดซ์ซึ่ง ได้แก่ HNO_3 และ H_2O_2 และผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยตัวทำละลาย ได้แก่ Xylene พบว่าอย่างผสมสูตรที่ปรับปรุงผิว AR – PVR ด้วย Xylene หลังจากผสมเป็นยางคอมปาวด์แล้ว จะได้อย่างที่มีความนิ่มมากที่สุด ในขณะที่การปรับปรุงผิว AR – PVR ด้วยสารออกซิไดซ์ซึ่ง ทำให้ยางผสมสูตรมีความหนืดลดต่ำกว่าสูตรที่ไม่ปรับปรุงผิว AR – PVR เล็กน้อย สำหรับการศึกษาผลของลักษณะการเชื่อมโยง พบว่าอย่างผสมสูตรที่เติม AR – PVR ที่ปรับปรุงผิวด้วย H_2O_2 และ Xylene ใช้เวลาในการเชื่อมโยงที่ใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิว AR – PVR เมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว พบว่าการปรับปรุงผิว AR – PVR ทั้ง 2 วิธี ทำให้ยางผสมสูตรมีค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด ความแข็งแรงกด ค่ามอดูลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่ 100 และ 200 ต่ำกว่าสูตรที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิว AR – PVR ดังนั้นการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น ยางบล็อกปูพื้น พื้นยางนิ่ม ฯลฯ ในทางอุตสาหกรรม จึงควรเลือกใช้ AR – PVR ที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิว เนื่องจากมีค่าสมบัติเชิงกลดีกว่า AR – PVR ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว หรืออาจทำการศึกษาหาสภาวะการปรับปรุงพื้นผิวที่เหมาะสมต่อไป เพื่ออาจจะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางผสมสูตรที่ประกอบไปด้วย AR – PVR มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และเหมาะกับการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองมีข้อเสนอแนะซึ่งจะสามารถปรับปรุงอย่างผสมสูตรที่ประกอบไปด้วย PVR ให้มีสมบัติดีขึ้น ดังนี้

- การศึกษาโดยใช้เครื่องผสมที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง เช่น เครื่องผสมแบบระบบปิด
- การศึกษาการปรับเปลี่ยนยางหลักที่ใช้ในยางผสมสูตร เช่น การใช้ยางรีเคลม (Reclaimed rubber) แทนการใช้ยางธรรมชาติ เพื่อลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากยางรีเคลม มีราคาถูกกว่ายางธรรมชาติ
- การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงพื้นผิว PVR ต่อไป เพื่ออาจจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่าง PVR กับเมทริกซ์ของยาง ทำให้ยางผสมสูตรมีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันวิจัยยาง และ Department of Statistics. 2558. “ยางพารา.”
[Online]. Available : <http://www.agricentralthailand.com>.
- [2] ชวดี คำครุฑ ให้สัมภาษณ์, 16 กุมภาพันธ์ 2558. หทัยรัตน์ ดนตรีรส ผู้สัมภาษณ์.
“ปริมาณหนวดยางเหลือทิ้งจาก บริษัท โยโกฮามา ไทร์ แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด.” ทาง
โทรศัพท์
- [3] ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย. 2558. “เทคโนโลยีการออกสูตรยางเคมี.”
[Online]. Available : <http://www.rubbercenter.org/files/rtec/compound-RTEC.pdf>.
- [4] พงษ์ธร แซ่ฮุย และชาคริต สิริสิงห. 2550. “ยาง : กระบวนการผลิต และการทดสอบ.”
กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (MTEC).
- [5] อธิธิพล แจ้งชัด. 2542. “เทคโนโลยียาง.” เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยียาง.
กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง.
- [6] S. Chuenarrom. 2558. “ส่วนประกอบของน้ำยาง.”
[Online]. Available : <http://rubberdigest.com/?p=98>.
- [7] พรชนก กังวีระนนท์. 2551. “โครงการพิเศษเรื่องการเชื่อมขวางโมเลกุลยางธรรมชาติที่ถูก
ตัดแปลงเป็นยางคลอริเนตโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารเชื่อมขวาง.” สาขาวิชา
วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [8] Virtual Education in Rubber Technology. 2558. “Rubber Chemistry.”
[Online]. Available : https://www.tut.fi/ms/muo/vert/5_rubber_chemistry.
- [9] ดร.รชนี พัทธวรารกร. 2558. “สารเคมียาง.”
[Online]. Available : http://epg.science.cmu.ac.th/induschem/member-detail.php?member_id=33.
- [10] R. Siamakhu. 2558. “มาซ่าแหละยาง.”
[Online]. Available : <http://amphawamax.blogspot.com>.
- [11] Department of International Trade Thailand. 2558. “อุตสาหกรรมยางรถยนต์.”
[Online]. Available : <http://dit-km.myreadyweb.com/article/topic-41910.html>.
- [12] Bridgestone (Thailand) Co., Ltd. 2558. “กระบวนการผลิตยางรถยนต์.”
[Online]. Available : http://bridgestone.co.th/swf/tire-process_mc.swf.
- [13] Deestone Co., Ltd. 2558. “กระบวนการผลิต.”
[Online]. Available : <http://www.deestone.com/WhyDeestone/Production.aspx#VY6kOBvtmko>.
- [14] วรเวทย์ กาญจนานันท์. 2555. “โครงการพิเศษเรื่องผลของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ต่อ
สมบัติของฟิล์มและการยึดติดของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.” สงขลา : สาขาวิชาเทคโนโลยี
บรรจุภัณฑ์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] H. Ismail, R. Nordin and A. M. Noor. 2001. "Cure Characteristics, Tensile Properties and Swelling Behaviour of Recycled Rubber Powder - Filled Natural Rubber Compounds." *Polymer Testing*. 21(5) : 565 - 569.
- [16] A. A. Yehia, M. A. Mull, M. N. Ismail, Y. A. Hefny and E. M. Abdel - Bary. 2003. "Effect of Chemically Modified Waste Rubber Powder as a Filler in Natural Rubber Vulcanizates." *Journal of Applied Polymer Science*. 93(1) : 30 - 36.
- [17] U. S. Ishiaku, C. S. Chong and H. Ismail. 1999. "Cure Characteristics and Vulcanizate Properties of a Natural Rubber Compound Extened with Convuluted Rubber Powder." *Polymer Testing*. 19(5) : 507 - 521.
- [18] L. S. Montagna and R. M. C. Santana. 2012. "Influence of Rubber Particle Size on Properties of Recycled Thermoplastics Containing Rubber Tyre Waste." *Plastics : Rubber and Composites*. 41(6) : 256 - 262.
- [19] M. S. Sobhy, M. M. M. Mahdy, M. A. K. El - Fayoumi and E. M. Abdel - Baryb. 1996. "Effect of Waste Rubber Powder in SBR Formulations on the Swelling of Different Organic Solvents." *Polymer Testing*. 16(4) : 349 - 362.
- [20] D. S. Ogunniyi and M. Mureyani. 2001. "Properties of Rubber Compounds Containing Powdered Vulcanized Waste." *Iranian Polymer Journal*. 10(3) : 143 - 147.
- [21] X. Colom, F. Carrillo and J. Canavate. 2006. "Composites Reinforced with Reused Tyres: Surface Oxidant Treatment to Improve the Interfacial Compatibility." *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*. 38(1) : 44 - 50.
- [22] S. Li, J. Lamminmäki and K. Hanhi. 2004. "Effect of Ground Rubber Powder on Properties of Natural Rubber." *Macromolecular Symposia*. 216(1) : 209 - 216.
- [23] S. Li, J. Lamminmäki and K. Hanhi. 2005. "Improvement of Mechanical Properties of Rubber Compounds Using Waste Rubber/Virgin Rubber." *Polymer Engineering and Science*. 45 : 1239 - 1246.
- [24] S. C. Han and M. H. Han. 2001. "Fracture Behavior of NR and SBR Vulcanizates Filled with Ground Rubber Having Uniform Paricle Size." *Applied Polymer Science*. 85 : 2491 - 2500.
- [25] J. A. Brydson. 1988. "Rubber Materials and Their Compounds." London : Elsevier Science Pubilshers Ltd.
- [26] กรรณิกา หัตถะปะนิตย์ และพงษ์ธร แซ่ฮุย. 2552. "วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง." [Online]. Available : <http://rubbercenter.org/informationcenter/file/magazine8.pdf>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] อธิธิพล แจ้จ้งซัด. 2558. “พอลิเมอร์คอมโพสิต.” เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [28] M. Edge, N. S. Allen, R. G. Sanchez and C. M. Liauwa. 1998. “The Influence of Cure and Carbon Black on the High Temperature Oxidation of Natural Rubber I. Correlation of Physico - Chemical Changes.” Polymer Degradation and Stability. 64(2) : 197 - 205



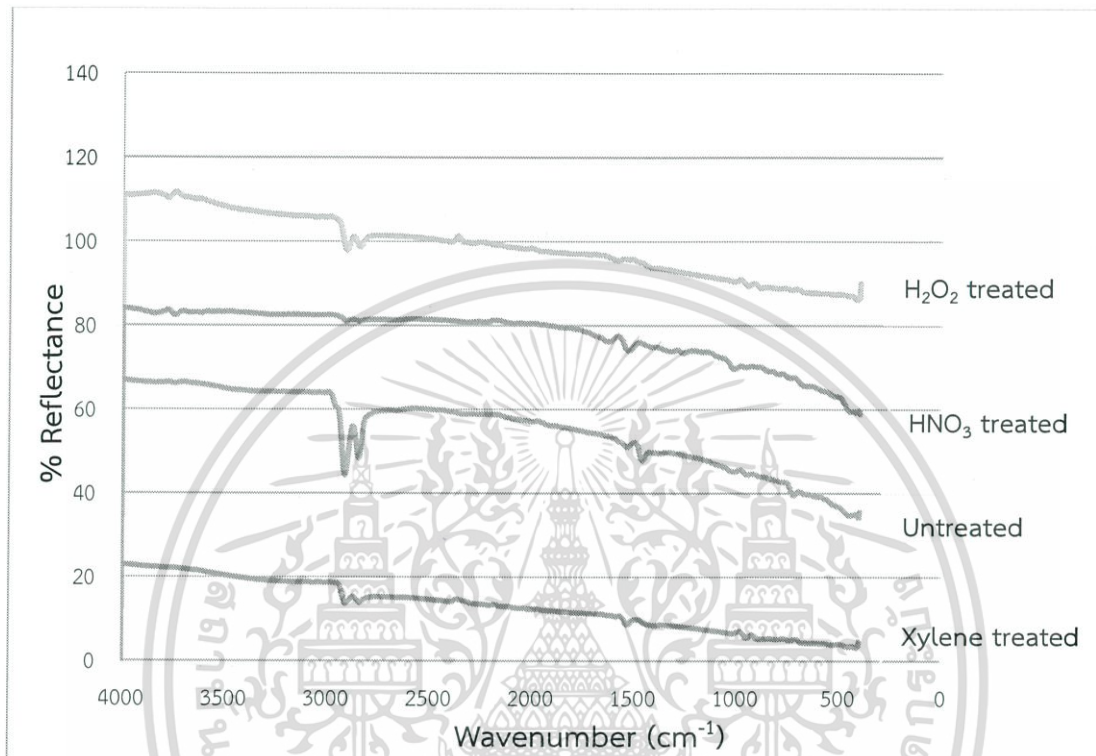
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

กราฟแสดงการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR - FTIR)



จาก IR spectra ของ PVR ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย HNO₃, H₂O₂ และ Xylene ไม่พบพีคของ หมู่ฟังก์ชันใดๆ เกิดขึ้น นอกจากพีคของ C - H stretching ที่ 3,000 cm⁻¹ แสดงให้เห็นว่าการยึดเกาะกันของยางธรรมชาติ กับ PVR ไม่ได้เกิดการยึดเกาะเนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้