

การศึกษาสารเพิ่มการยึดติดพีนอลิกสำหรับอุตสาหกรรมยาง

STUDY OF PHENOLIC TACKIFIERS FOR RUBBER INDUSTRY



นางสาวจิราภา
นางสาวพิทยาภรณ์
นางสาววิลาวัลย์

จำชัยภูมิ
ศรีสุขศรีสุกุล
สถาพรพานิช

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การศึกษาสารเพิ่มการยึดติดฟีนอลิกสำหรับอุตสาหกรรมยาง

STUDY OF PHENOLIC TACKIFIERS FOR RUBBER INDUSTRY



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF PHENOLIC TACKIFIERS FOR RUBBER INDUSTRY



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 เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสารเพิ่มการยึดติดพีนอลิกสำหรับอุตสาหกรรมยาง Study of Phenolic Tackifiers for Rubber Industry			
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจิราภา	จำชัยภูมิ	รหัสนักศึกษา	54050147
	นางสาวพิทยาภรณ์	ศรีสุขศิริสกุล	รหัสนักศึกษา	54050258
	นางสาววิลาวัลย์	สถาพรพานิช	รหัสนักศึกษา	54050272
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)			
ภาควิชา	เคมี			
ปีการศึกษา	2557			
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด			

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์ กรรมการ	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสารเพิ่มการยึดติดฟีนอลิกสำหรับอุตสาหกรรมยาง		
	Study of Phenolic Tackifiers for Rubber Industry		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจิราภา	จำชัยภูมิ	รหัสนักศึกษา 54050147
	นางสาวพิทยาภรณ์	ศรีสุขศิริสกุล	รหัสนักศึกษา 54050258
	นางสาววิลาวัลย์	สถาพรพานิช	รหัสนักศึกษา 54050272
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล	แจ้งชัด	

บทคัดย่อ

ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resins) เป็นสารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมยาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยางและยางรถยนต์ ปัจจุบันประเทศไทยต้องนำเข้าสารเพิ่มการยึดติดฟีนอลิกเรซินสำหรับอุตสาหกรรมยางจากต่างประเทศและมีราคาแพง งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากการสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ทางโครงสร้างที่ส่งผลต่อการใช้งาน ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล และปริมาณ Hexamethylenetetramine (HMTA) ที่ต่างกัน (0, 5 และ 10 phr) รวมทั้งการศึกษาแนวเปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Sirfen-BL302, Struktol-TH110 และ PSM-9450 หลังการสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซินชนิดต่างๆ แล้วทำการศึกษาผลต่างๆ ที่มีต่ออย่างผสมสูตร (สูตรหน้ายางรถยนต์ (Tread)) เตรียมตัวอย่างโดยการผสมยางกับสารเติมแต่งด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ทดสอบการยึดติดกับแผ่นโลหะด้วยเทคนิค Lab shear tests จากการทดลองพบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มการยึดติดเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง พบว่าน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไม่ทำให้ลักษณะการเชื่อมโยงแตกต่างกัน และจากการศึกษาสมบัติการยึดติด พบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มการยึดติดลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการยึดติดเพิ่มขึ้น เมื่อทำการศึกษาผลของปริมาณ HMTA (0-10 phr) พบว่าเมื่อปริมาณ HMTA เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เวลาที่เริ่มเชื่อมโยงลดลง ปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล แต่เมื่อปริมาณ HMTA ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการยึดติดเพิ่มขึ้น จากการเปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ พบว่าสารเพิ่มการยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและไม่เติม HMTA (Mw-LO) ให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดี มีประสิทธิภาพการยึดติดสูงสุด และสูงกว่าสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ : ฟีนอลิกเรซิน, สารเพิ่มการยึดติด, อุตสาหกรรมยาง, เฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีน

Title	Study of Phenolic Tackifiers for Rubber Industry		
Student	Miss Jirapa	Jachaiyaphum	Student ID 54050147
	Miss Phittayaporn	Srisuksirisukul	Student ID 54050147
	Miss Wilawan	Satapornpanit	Student ID 54050147
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Academic Year	2014		
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Ittipol	Jangchud	

ABSTRACT

Phenolic resins have been ones of the most widely used tackifiers in rubber industries, especially, rubber parts and tires. Nowadays, Thai manufacturers have to import expensive phenolic tackifiers. This work was focused on synthesis of phenolic resins and their structures affecting rubber properties. Studied phenolic structures included molecular weight (Mw) and effects of hexamethylenetetramine (HMTA) loading (0, 5 and 10 phr). Comparative studies of synthesized tackifiers compared with commercial tackifiers i.e., Sirfen BL-302, Struktol TH-110 and PSM-9450 were also carried out. Tread rubber compounds were used to study in this work. Rubber samples were compounded by using a two-roll mill and vulcanized into test samples by a compression molding machine. Lap shear test was used to determine adhesion between rubbers and metal sheets. It was found that mechanical properties of rubber vulcanizates were decreased as MW of phenolic resins was increased. However, phenolic tackifiers with different MWs showed insignificant effects to cure characteristics. Adhesion between rubbers and metal sheets had a trend to increase when MW of the resins was decreased. When HMTA was added into the resins, rubber compounds were cured faster. Mechanical properties were unchanged, but adhesion was better when HMTA loading was increased. By comparing the phenolic tackifiers in this work with commercial ones, it was found that low MW one without HMTA showed superior properties compared to others.

Keywords : Phenolic resin, Tackifiers, Rubber Industry, Hexamethylene tetramine (HMTA)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่อบรมสั่งสอน ให้ความรู้ คำปรึกษา ช่วยแก้ไขในส่วนที่ผิดพลาดให้ถูกต้อง พร้อมทั้งยังช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่อย่างดี จนทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ที่กรุณาสละเวลา มาเป็นกรรมการสอบโครงการพิเศษ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาแก้ไขโครงการพิเศษเล่มนี้ ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บริษัท ไทย จีซีไอ เรซิทอป จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์สถานที่ให้ไป ทำการศึกษาและสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน พร้อมทั้งสารเคมีและค่าใช้จ่ายที่จำเป็น

ขอขอบคุณ คุณอัศวิน แก้วกิติณรงค์ และ คณะ จากบริษัท ไทย จีซีไอ เรซิทอป จำกัด ที่ให้ความรู้เรื่องฟีนอลิกเรซิน และสอนวิธีการสังเคราะห์อีกด้วย พร้อมทั้งยังช่วยเหลือดูแล เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณขวัญใจ พูลสวัสดิ์ ที่ให้คำปรึกษาดูแล ให้คำแนะนำต่างๆ อย่างดี ตั้งแต่ทำ เริ่มโครงการพิเศษ จนโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณภุชณะ เกษประดิษฐ์ คุณสุดใจ สอนสะอาด และ คุณปราณี บุญวัฒน์ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ท่านอื่นๆ ในภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยอำนวยความสะดวก ให้แนะนำในการใช้เครื่องมือต่างๆ อย่างถูกต้อง รวมถึงเป็นธุระจัดหาสารเคมีที่จำเป็นต่อสำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง ภาควิชาเคมีทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ และ คำปรึกษาแนะนำ รวมถึงให้กำลังใจ

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ น้อง ที่เป็นกำลังใจอันอย่างยิ่ง คอยช่วยเหลือ อำนวยความสะดวก และให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านจนทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี

จิราภา

จำชัยภูมิ

พิทยาภรณ์

ศรีสุขศิริสกุล

วิลาวลัย

สถาพรพานิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยาง.....	5
2.2 สารเติมแต่ง (Additive).....	8
2.3 กระบวนการผลิตกัมมันต์ยาง.....	13
2.4 สารเพิ่มการยึดติด (Tackifier).....	16
2.5 กลไกการยึดติด (Mechanisms of adhesion).....	24
2.6 การทดสอบสมบัติต่างๆ.....	26
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
2.8 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 สารเคมีที่ใช้.....	31
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	32
3.3 การสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน.....	33
3.4 การทดสอบสมบัติของฟีนอลิกเรซิน.....	36
3.5 วิธีการทดลอง.....	38
3.6 ศึกษาสมบัติของยางเชื่อมโยง.....	40
3.7 ศึกษาสมบัติของสารเพิ่มการยึดติดกับยางเชื่อมโยง.....	43
3.8 สรุปปัจจัยที่ศึกษา.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	44
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ฟีนอลิกเรซิน.....	44
4.2 การศึกษาผลของสารเพิ่มการยึดติดในยางผสมสูตร.....	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 ผลจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ฟีนอลิกเรซิน.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ผลจากการศึกษาผลของสารเพิ่มการยึดติดในยางผสมสูตร.....	64
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	64
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก.....	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1.1 แสดงข้อมูลจากโครงการงานพิเศษปีการศึกษา 2556.....	2
2.1 การเปรียบเทียบลักษณะของเขม่าดำชนิดต่างๆ.....	9
3.1 สมบัติทางกายภาพของสารเพิ่มการยึดติดประเภทฟีนอลิกเรซิน.....	32
3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin).....	34
3.3 อัตราส่วนสารเคมีที่ได้ในการสังเคราะห์.....	36
3.4 สูตรยางผสมสูตรที่ใช้ในการศึกษาและลำดับและเวลาที่ใช้ในการผสมยาง.....	39
4.1 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานสารเพิ่มการยึดติด ตามมาตรฐาน Japanese Industrial Standards (JIS).....	46
4.2 แสดงค่าความหนืดมูนีและลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน.....	49
4.3 แสดงค่าความหนืดมูนีและลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติดที่มีปริมาณ Hexamethylenetetramine (HMTA) แตกต่างกัน.....	54
4.4 แสดงค่าความหนืดมูนีและลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์เปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่

หน้า

2.1	โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (cis-1,4 polyisoprene).....	6
2.2	โครงสร้างทางเคมีของยางบิวทาไดอิน (Butadiene rubber, BR).....	7
2.3	โครงสร้างทางเคมีของยางสไตรีนบิวทาไดอิน (Styrene butadiene rubber, SBR).....	7
2.4	โครงสร้างของขม่าดำ.....	8
2.5	โครงสร้าง TBBS.....	10
2.6	โครงสร้าง TMTD.....	10
2.7	การเชื่อมโยงโมเลกุล.....	13
2.8	โครงสร้างของยางดิบและยางเชื่อมโยงหรือยางสุก.....	13
2.9	ขั้นตอนการผลิตภัณฑ์ยาง.....	14
2.10	ลักษณะเรซินที่ได้จากธรรมชาติ.....	16
2.11	ลักษณะเรซินที่ได้จากการสังเคราะห์.....	17
2.12	โครงสร้างทางเคมีของ Rosin.....	17
2.13	กระบวนการเตรียม Hydrogenated rosin ester.....	18
2.14	ปฏิกิริยาของฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin)	18
2.15	โครงสร้างทางเคมีของฟีนอล (Phenol)	19
2.16	โครงสร้างทางเคมีของฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde).....	19
2.17	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ Resoles.....	20
2.18	โครงสร้างของเมทิลอลที่สามารถเกิดขึ้นได้.....	20
2.19	เกิดปฏิกิริยาได้พันธะอีเทอร์.....	21
2.20	เกิดปฏิกิริยาได้พันธะเมทิลีน.....	21
2.21	โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ Resoles.....	21
2.22	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ Novolac.....	22
2.23	โครงสร้างทางเคมีของ Hexamethylenetetramine (HMTA)	23
2.24	โครงสร้างของ Novolac เมื่อทำปฏิกิริยากับ HMTA ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น.....	23
2.25	ลักษณะการเกาะและการเปียก.....	24
2.26	ลักษณะการเกิดโมเลกุลเกี่ยวพัน.....	25
2.27	ลักษณะแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต.....	25
2.28	ลักษณะการเกิดพันธะเคมี.....	25
2.29	ลักษณะการเกิดการลีดเชิงกล.....	26
2.30	ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบแรงเฉือน.....	26
2.31	ลักษณะเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM)	27
3.1	แสดงกราฟขั้นตอนการสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน.....	33
3.2	การทดสอบหาจุดอ่อนตัว (Softening point)	36
3.3	เครื่องทดสอบหาความหนืด (Viscosity).....	36
3.4	การทดสอบหาจุดหลอมเหลว (Melting point).....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

3.5 การทดสอบหาระยะการไหล (Flow).....	37
3.6 การทดสอบหาเวลาที่เกิดการเชื่อมโยง (Gel time).....	37
3.7 การทดสอบหาค่าประกอบของน้ำในเรซิน (Water content).....	38
3.8 เครื่องวัดความหนืดมูนี่ (Mooney viscosity).....	40
3.9 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics).....	40
3.10 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้อานหมุน (Moving Die Rheometer, MDR).....	41
3.11 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM).....	42
3.12 เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบน้ำหนักคงที่ ชนิด shore A.....	42
3.13 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ทดลองสำหรับการทดสอบแรงฉีก.....	43
4.1 กราฟการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC.....	45
4.2 กราฟลักษณะการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติด ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน.....	50
4.3 กราฟการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงยึด (Tensile strength) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน.....	50
4.4 กราฟการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสที่ 300 % (M_{300}) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน.....	51
4.5 กราฟการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน.....	52
4.6 กราฟการเปรียบเทียบความแข็งกด (Hardness Shore A) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน.....	53
4.7 กราฟการเปรียบเทียบการยึดติดระหว่างยางกับแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน.....	53
4.8 กราฟลักษณะการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน.....	54
4.9 กราฟการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงยึด (Tensile strength) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดชนิดโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน.....	55
4.10 กราฟการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสที่ 300 % (M_{300}) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดชนิดโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน.....	56
4.11 กราฟการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดชนิดโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน.....	56
4.12 กราฟการเปรียบเทียบความแข็งกด (Hardness Shore A) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดชนิดโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน.....	57
4.13 กราฟการเปรียบเทียบการยึดติดระหว่างยางกับแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดชนิดโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.14 กราฟลักษณะการเชื่อมโยง (Cure curve)	
แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดเชิงพาณิชย์.....	59
4.15 กราฟการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงยึด (Tensile strength)	
แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดเชิงพาณิชย์.....	60
4.16 กราฟการเปรียบเทียบค่ามอดุลัสที่ 300 % (M_{300})	
แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดเชิงพาณิชย์.....	61
4.17 กราฟการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	
แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดเชิงพาณิชย์.....	61
4.18 กราฟการเปรียบเทียบความแข็งกด (Hardness)	
แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดเชิงพาณิชย์.....	62
4.19 กราฟการเปรียบเทียบการยึดติดระหว่างยางกับแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก	
แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดเชิงพาณิชย์.....	62



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย [1],[2]

ในปัจจุบันได้มีการนำเอาสารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) มาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดเป็นสารที่ช่วยให้วัสดุสองชิ้นยึดติดกันได้โดยใช้แรงกดต่ำในระยะเวลาสั้น ซึ่งสารเพิ่มการยึดติดเป็นสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางหรือเป็นสารเพิ่มความเหนียวให้กับวัสดุ โดยทั่วไปสารเพิ่มการยึดติดมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) สูง สารเพิ่มการยึดติดมีหลากหลายประเภท เช่น โรซิน (Rosins), เทอร์พีน (Terpene), อะลิฟาติก (Aliphatic), ไซโคลอะลิฟาติก (Cycloaliphatic), อะโรมาติกเรซิน (Aromatic resin) และฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin)

ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resins) เป็นสารเพิ่มการยึดติดชนิดหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมกันมาก เพราะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยึดติดของวัสดุในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ยางรถยนต์ หินเจีย สายพานลำเลียง เข็มขัดรถยนต์ กระจาดขั้วสายเคเบิล ฉนวนกันความร้อน แม่พิมพ์ทราย ท่อยาง เบรกและครัช เป็นต้น ซึ่งประเทศไทยได้มีการนำเข้าฟีนอลิกเรซินจากต่างประเทศเป็นจำนวนมากและราคาค่อนข้างสูง และเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการปลูกยางพารามากเป็นอันดับหนึ่งของโลก จึงมุ่งเน้นศึกษาการสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซินที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการนำเข้าจากต่างประเทศ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับโครงสร้างและสมบัติของฟีนอลิกเรซินที่ช่วยเพิ่มสมบัติการยึดติดในอุตสาหกรรมยาง เป็นต้น

ฟีนอลิกเรซินใช้เป็นสารเติมแต่ง (Additives) ในอุตสาหกรรมยาง ได้มีการจำแนกในหลายลักษณะขึ้นกับการใช้งานฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) สามารถใช้ได้ 2 รูปแบบ ได้แก่

1. เทอร์โมเซต (Thermoset) ทำหน้าที่คล้ายกับสารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids) และเพิ่มความแข็งแรงจะช่วยลดความเหนียวของยางผสมสูตรและทำให้สารภายในแม่พิมพ์ไหลได้ดีขึ้นเนื่องจากฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) เมื่อหลอมจึงเป็นตัวพาให้สารชนิดอื่นๆ หลอมได้เร็วขึ้นด้วย จึงช่วยลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการผลิต

2. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ทำหน้าที่คล้ายสารเพิ่มการยึดติดในยางสังเคราะห์ ซึ่งสารเพิ่มการยึดติดนี้จะช่วยเพิ่มสมบัติการยึดติดระหว่างยางกับวัสดุอื่นหรือระหว่างยางด้วยกันเอง และยังสามารถปรับระดับความเหนียวติด (Tackifiness) ได้ดี

จากการศึกษาโครงการพิเศษในหัวข้อเรื่อง “ผลของสารเพิ่มการยึดติดที่มีต่อสมบัติของยางเชื่อมโยง” ปีการศึกษา 2556 พบว่า มีการศึกษาสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์หลากหลายชนิด อย่างเช่น สารเพิ่มการยึดติดประเภทไฮโดรคาร์บอน ประเภทฟีนอลิก ซึ่งบางชนิดมีการเติมสารเชื่อมโยงสารเพิ่มการยึดติด เช่น Hexamethylenetetramine (HMTA) จากการทดลองพบว่า สารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์แต่ละชนิดส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characterization), สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติการยึดติด (Tackiness) ที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 1.1 งานวิจัยนี้จึงเลือกสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ที่มี HMTA ซึ่งได้แก่ Sirfen BL320 และ สารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ที่ไม่มี HMTA ซึ่งได้แก่ Struktol TH110 และ PSM-9450 ซึ่ง PSM-9450 เป็นสารเพิ่มการยึดติดที่นอกเหนือจากโครงการพิเศษ ปีการศึกษา 2556 เนื่องจากสนใจจึงนำมาศึกษามาทำการเปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดที่สังเคราะห์ขึ้น

ตารางที่ 1.1 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของสารเพิ่มการยึดติดตามมาตรฐาน Japanese Industrial Standards (JIS) ข้อมูลจากโครงการพิเศษปีการศึกษา 2556 ในหัวข้อเรื่อง “ผลของสารเพิ่มการยึดติดที่มีต่อสมบัติของยางเชื่อมโยง” [3]

Tackifiers	Types	Eeperimental			
		Flow (mm)	T _m (°C)	Gel time (s)	HMTA
Coumaron	ฟีนอลิกเรซิน	ไหลเกินกระจก	62	ไม่เกิดเจล	0.32
Hikorez	ไฮโดรคาร์บอนเรซิน	94	64	ไม่เกิดเจล	0.40
Koresin	ฟีนอลิกเรซิน	ไม่ไหล	64	ไม่เกิดเจล	0.31
Sirfen BL302	ฟีนอลิกเรซิน	35	60	70	8.89
SL	ฟีนอลิกเรซิน	ไหลเกินกระจก	69	ไม่เกิดเจล	0.33
Struktol TH110	ฟีนอลิกเรซิน	98	65	ไม่เกิดเจล	0.35

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซินที่ใช้เป็นสารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) ในอุตสาหกรรมยางที่ใช้ติดกับโลหะ เช่น ยางฉาบขอบยาง (Bead) หรือเข็มขัดรัดหน้ายาง (Belt) ในยางรถยนต์ โดยเน้นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยาง

- ศึกษาน้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มการยึดติดที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics), สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติการยึดติด (Tackiness)
- ศึกษาปริมาณของ Hexamethylenetetramine (HMTA) ในสารเพิ่มการยึดติดที่แตกต่างที่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics), สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติการยึดติด (Tackiness)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เพื่อเปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์และสารเพิ่มการยึดติดที่สังเคราะห์ขึ้น ที่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics), สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติการยึดติด (Tackiness)

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ทำการสังเคราะห์ตัวอย่างพีนอลิกเรซินชนิดต่างๆ ที่ใช้เป็นสารเพิ่มการยึดติดสำหรับยาง
3. ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ของพีนอลิกเรซิน ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลสูง (Mw H0), กลาง (Mw M0) และต่ำ (Mw L0)
4. ศึกษาผลของ Hexamethylenetetramine (HMTA) ของพีนอลิกเรซิน ซึ่งมีการเติมปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0, 5 และ 10 phr
5. เปรียบเทียบผลกับสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Sirfen BL302, Struktol TH110 และ PSM-9450 เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของพีนอลิกเรซินที่สังเคราะห์ขึ้นกับสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์
6. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของยางผสมสูตรที่เติมไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด สมบัติที่ศึกษา ได้แก่
 - Mooney viscosity ML 1+4 (100 °C)
 - Cure characteristics ทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงยาง โดยใช้เครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) มีการทดสอบ ดังนี้
 - Scorch time (t_{22}) เวลาที่ใช้เริ่มต้นในการเชื่อมโยงยาง
 - Cure time (t_{90}) เวลาที่ใช้สำหรับการเชื่อมโยงยาง
 - Cure rate index (CRI) คำนวณจาก Cure time และ Scorch time
 - Plateau modulus (M_{HF}) ค่าทอร์คสูงสุดที่ใช้ในการเชื่อมโยง
 - Mechanical properties โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ในการทดสอบ Tensile (ASTM D412)
 - Tensile strength
 - % Elongation at break
 - Rubber modulus (M300)
 - Testing for adhesion โดยทำการยึดติดยางกับแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก แล้วนำไปทดสอบการยึดติดด้วยวิธี Lab shear test (ASTM D1002)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้องค์ความรู้ที่ได้ มาใช้ในการพัฒนาสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์สำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ ให้มีสมบัติการยึดติดที่ดีขึ้น และมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์
2. ช่วยพัฒนาอุตสาหกรรมสารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) ในประเทศไทย
3. ช่วยลดต้นทุนให้กับอุตสาหกรรมยาง ลดการนำเข้าสารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) จากต่างประเทศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยาง

2.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) [4]

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง (*Hevea brasiliensis*) น้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber) ประมาณ 30 % แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 % เรียกว่า น้ำยางข้น (Concentrated latex) เมื่อเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมยางมือยางและยางอนามัย แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรีตได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็รีตยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 °C เป็นเวลา 3 วัน ก็จะได้ยางแผ่นรมควัน

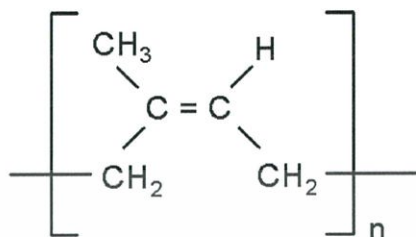
ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene มี Isoprene (C_5H_8) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15,000-20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน และเฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืดจะสามารถเกิดผลึกได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี ยางจึงมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance) สูง

2.1.1.1 สมบัติของยางธรรมชาติ

ลักษณะเด่นของยางธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูงเมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับมันหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติที่เยี่ยมด้านการเหนียวติดกัน ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิต ผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ ยางธรรมชาติยังมีสมบัติเด่นหลายประการที่ดีกว่ายางไอโซพรีนสังเคราะห์ เช่น ความยืดหยุ่น (Elasticity) ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

strength) ความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ความเหนียวติดกัน (Tack) ทำให้ยางธรรมชาติเหมาะกับการใช้งานที่ต้องรับแรงสูง แต่ยางธรรมชาติก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เช่น มีสีเข้มกว่ายางไอโซพรีนสังเคราะห์ทำให้ไม่เหมาะนำมาทำผลิตภัณฑ์ที่มีสีอ่อนและโปรตีนในยางธรรมชาติอาจก่อให้เกิดอาการแพ้จึงไม่เหมาะกับการนำมาผลิตผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (cis-1,4-polyisoprene) [4]

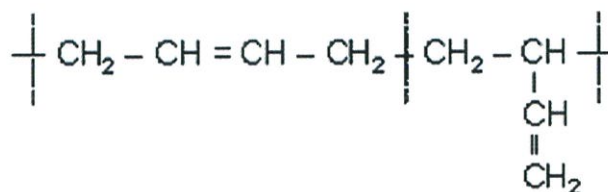
2.1.2 ยางสังเคราะห์ [5]

ยางเทียมหรือยางสังเคราะห์เป็นสารสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้นมาทดแทนยางธรรมชาติ โครงสร้างของยางสังเคราะห์คล้ายคลึงกับยางธรรมชาติและทำให้มีสมบัติใกล้เคียงกัน การผลิตยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตโมโนเมอร์และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ยางสังเคราะห์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่ชนิดของโมโนเมอร์ ถ้ายางสังเคราะห์ประกอบด้วยโมโนเมอร์ชนิดเดียวจะเรียกว่า โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) เช่น ยางบิวทาไดอีน (Butadiene Rubber, BR) หรือยางไอโซพรีน (Isoprene Rubber, IR) ยางสังเคราะห์บางชนิดอาจจะประกอบด้วยโมโนเมอร์มากกว่า 1 ชนิด เรียกว่า โคพอลิเมอร์ (Copolymer) เช่น ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR)

2.1.2.1 ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR) [5]

ยางบิวทาไดอีนเป็นพอลิเมอร์ของบิวทาไดอีนที่มีการจัดเชื่อมต่อกันหลายแบบ เช่น แบบ cis-1,4 tran-1,4 หรือแบบ vinyl-1,2 ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยปกติยางบิวทาไดอีนจะไม่ถูกใช้ชนิดเดียวในการผลิตผลิตภัณฑ์เนื่องจากการบดผสมยางเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะเมื่อทำการบดยางโดยใช้ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ยางชนิดนี้จึงมักใช้บดผสมกับยางไม่มีขั้วชนิดอื่นๆ เช่น ยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีน ซึ่งยางบิวทาไดอีนมีสมบัติพิเศษ คือ มีความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance) สูงมาก แต่มีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ค่อนข้างต่ำ ถ้ายางบิวทาไดอีนผสมกับยางธรรมชาติหรือยางสไตรีนบิวทาไดอีนจะทำให้ได้ยางเชื่อมโยงที่มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ได้แก่ ความต้านทานการขัดถูดีขึ้น มีความยืดหยุ่นมากขึ้นและสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ ยางบิวทาไดอีนจึงถูกใช้ร่วมกับยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีนในการผลิตดอกยาง (Tread) ของยางรถยนต์ เพราะนอกจากจะทำให้ดอกยางมีความต้านทานต่อการขัดถูสูงขึ้น แล้วความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งานก็ต่ำลง ยางจะมีความต้านทานต่อการฉีกขาดในบริเวณร่องสูงขึ้นและที่สำคัญยังช่วยให้ยางรถยนต์มีสมบัติการเอ็กสทรูชันเป็นเอ็กสทรูชันที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูาตไหนไปเซประเยชนดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานการหมุนต่ำทำให้ประหยัดน้ำมัน ถ้าหากเติมยางบิวทาไดอินลงไปปริมาณมากเกินไปก็จะทำให้การเกาะถนนของล้อโดยเฉพาะในถนนที่เปียกต่ำจึงต้องผสมยางบิวทาไดอินในการผลิตโครงสร้าง (Carcass) แก้มยาง (Sidewall) และยางบริเวณโครงลวด (Bead)



1,4 Butadiene unit

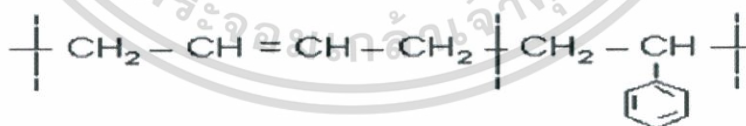
1,2 Butadiene unit

รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางบิวทาไดอิน (Butadiene Rubber, BR) [5]

2.1.2.2 ยางสไตรีนบิวทาไดอิน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) [6]

ยางสไตรีนบิวทาไดอินเกิดจากการโคพอลิเมอร์เซชันแบบสุมด้วยเทคนิคแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) หรือเทคนิคแบบสารละลาย (Solution polymerization) ระหว่างโมโนเมอร์สองชนิด คือ สไตรีนโมโนเมอร์กับบิวทาไดอินโมโนเมอร์ นอกจากนี้การจัดเรียงตัวของสายโมเลกุลยางสไตรีนบิวทาไดอินไม่เป็นระเบียบทำให้ไม่สามารถเกิดการตกผลึกได้เมื่อยางถูกดึงยึด จึงมีความทนต่อแรงดึงต่ำ ดังนั้นเมื่อนำมาใช้งานจำเป็นต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย

ยางสไตรีนบิวทาไดอินถือว่าเป็นยางสังเคราะห์ที่สำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในวงการอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากยางชนิดนี้มีการผลิตในปริมาณมากและราคาไม่แพงเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวทาไดอินมีคุณภาพสม่าเสมอกว่า มีสิ่งเจือปนน้อยกว่าและไม่ต้องบดยางให้มันก่อนการผสมสารเคมีในระหว่างกระบวนการผลิตเพราะยางชนิดนี้ถูกสังเคราะห์มาให้มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงมาก จึงมีความหนืดเหมาะสมที่ทำให้สารเคมีกระจายตัวได้อย่างดีและยางก็ไหลได้ง่ายในระหว่างการผลิตขึ้นรูป แต่ความยืดหยุ่นของยางสไตรีนบิวทาไดอินจะต่ำกว่าจึงใช้ผสมกับยางชนิดอื่นๆ



Butadiene unit

Styrene unit

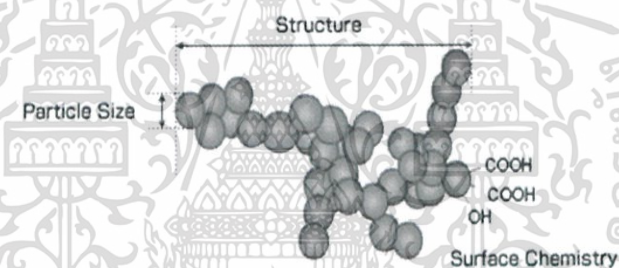
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของยางสไตรีนบิวทาไดอิน (Styrene Butadiene Rubber, SBR) [5]

2.2 สารเติมแต่ง (Additives) [7]

สารเติมแต่ง (Additives) คือ สารเคมีที่เติมเข้าไปในยางเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ตามต้องการ สารเติมแต่งมีหลายประเภทขึ้นกับความต้องการของผู้ผลิตและสมบัติของยางผสมสูตรที่ต้องการ เช่น สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารป้องกันไฟฟ้าสถิต สารป้องกันการติดไฟ เป็นต้น จุดประสงค์ของการใส่สารเติมแต่งนอกจากปรับปรุงสมบัติแล้วยังช่วยในการลดต้นทุนการผลิตและเพื่อช่วยในกระบวนการผลิต (Process ability) ให้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ง่ายขึ้น

2.2.1 เขม่าดำ (Carbonblack) [8]

เขม่าดำได้จากการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม มีสีดำ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-10 นาโนเมตร นิยมใช้เป็นสารเสริมแรงในอุตสาหกรรมยางเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของยางเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 เท่า มีความทนต่อการสึกหรอและช่วยลดต้นทุนการผลิตให้แก่ผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากเขม่าดำมีราคาถูกสามารถใส่เขม่าดำในยางได้ในปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) แต่การใช้เขม่าดำจะมีข้อเสีย คือ ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จะมีสีดำทำให้สีที่ไม่สวย ไม่เหมาะกับงานที่ต้องการความสวยงาม เช่น ยางรัดของ พื้นรองเท้า เป็นต้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเขม่าดำ [8]

กรรมวิธีการผลิตเขม่าดำ [7]

เขม่าดำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ ปัจจุบันได้มีการแบ่งประเภทของเขม่าดำ ออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. เฟอร์เนสแบล็ก (Furnace black)

เป็นเขม่าดำที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นแบบวงแหวนภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนที่มากเกินไป เขม่าดำชนิดเฟอร์เนสแบล็กมีโครงสร้างเป็นก้อนกลมติดกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า แอ็กกรีเกต (Aggregate) มีโครงสร้างมาก ขนาดเล็ก (ประมาณ 10-100 nm) เขม่าดำกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่นำไปใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางปัจจุบัน

2. ชาแนลแบล็ก (Channel black)

เป็นเขม่าดำที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติ เขม่าดำกลุ่มนี้มีมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิที่เล็กมาก เนื่องจากมีความเป็นกรดสูงทำให้เขม่าดำกลุ่มนี้มีฤทธิ์ในการหน่วงอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันของยางในระบบกำมะถัน

3. เทอร์มอลแบล็ก (Thermal black)

เป็นเขม่าดำที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติ เขม่าดำกลุ่มนี้มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิค่อนข้างใหญ่จึงมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงต่ำ

4. อะเซทีลีนแบล็ก (Acetylene black)

เป็นเขม่าดำที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซอะเซทีลีน เขม่าดำกลุ่มนี้มีควมบริสุทธิ์สูงกว่าเขม่าดำกลุ่มอื่นๆและมักนำไปใช้ในการผลิตยางนำไฟฟ้าเพราะเป็นกลุ่มที่มีโครงสร้างสูงมาก

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบลักษณะของเขม่าดำชนิดต่างๆ [7]

ลักษณะ	Furnace	Thermal	Channel
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size) (nm)	10-100	100-500	1-3
พื้นที่ผิว (Surface area (N ₂)) (m ² /g)	27-145	7-11	100-1125
การดูดซับน้ำมัน (Oil absorption) (ml/g)	0.67-1.55	0.32-0.47	1.0-6.0
ปริมาณสารระเหยได้ (Volatile matter) (%)	0.3-2.8	0.1-1.0	3.5-16.0
ปริมาณเถ้า (Ash) (%)	0.1-1.0	0.2-0.5	0-0.1
ปริมาณกำมะถัน (Sulfur) (%)	0.5-1.5	10	0-0.1
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.0-9.5	7-9	3-6

2.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerator)

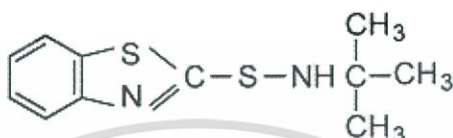
สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerator) หรือเรียกสั้นๆ ว่า สารเร่ง ซึ่งทำหน้าที่ช่วยสารเชื่อมโยงให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางและสารเชื่อมโยงเกิดได้เร็วขึ้น ลดระยะเวลาการเกิดการเชื่อมโยง (Cure time หรือ Vulcanization time) และใช้สารเชื่อมโยงน้อยลง นอกจากนี้ยังทำให้สมบัติเชิงกลของยางดีขึ้นด้วย การเลือกชนิดและปริมาณสารเชื่อมโยงจะขึ้นกับเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) และสมบัติของยางเชื่อมโยงที่ต้องการ โดยมักจะใช้สารเร่งมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน คือ สารเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ (Primary accelerator) และสารเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิ (Secondary accelerator) โดยสารเร่งทั้งสองจะเกิดปฏิกิริยาเสริมกันที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์ซินเนียจิสติก” (Synergistic effects) ทำให้ได้อัตราการเชื่อมโยงเกิดได้ดีกว่าการใส่สารเร่งเพียงตัวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerator) 2 ชนิด คือ

- TBBS (N-tert-butyl-2-benzothiazolesulfenamind)

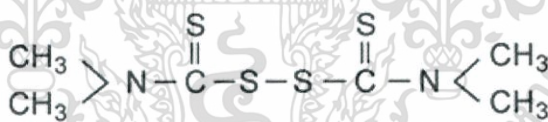
เป็นสารเร่งกลุ่มเบนโซไทอะโซลซัลฟีนามิด (Benzothiazolesulfenamide) สารเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ทำให้ยางมีระยะเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) ที่ยาวขึ้น แต่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงและให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ดังนั้นยางวัลคาไนซ์ที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นดีและมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง



รูปที่ 2.5 โครงสร้าง TBBS [9]

- TMTD (Tetramethylthiuram disulfide)

เป็นสารเร่งที่อยู่ในกลุ่มของไทูรัม (Thiurams) มีประสิทธิภาพในการเร่งอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงมากในขณะที่ให้ระยะเวลาเริ่มการเชื่อมโยงที่ยาวกว่าสารเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมตเล็กน้อย สารเร่งชนิดนี้เกิดปฏิกิริยาแล้วสามารถให้อะตอมของกำมะถันอะตอมเดี่ยวเพื่อเกิดการเชื่อมโยงแบบโมนอสัลฟิดิก (Monosulfidic linkage) นิยมใช้เป็นสารเร่งทุติยภูมิร่วมกับสารเร่งในกลุ่มซัลฟีนามิดและไทเอโซ นอกจากนี้สารเร่งชนิดนี้ไม่เลอะสีจึงใช้กับยางที่มีสีขาวได้โดยไม่เกิดการเปื้อน



รูปที่ 2.6 โครงสร้าง TMTD [10]

2.2.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นให้สารเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดียิ่งขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยาสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันที่นิยมใช้กันมากที่สุด สารกระตุ้นเมื่อใส่เข้าไปในยางในปริมาณที่เล็กน้อย จะทำให้ยางมีมอดุลัสสูงขึ้นช่วยไม่ทำให้สารประกอบยางติดกับลูกกลิ้งที่ใช้ในการบดผสมยาง ช่วยกระจายตัวของสารเคมีในเนื้อยาง ถ้าไม่ใส่สารกระตุ้นอาจไม่มีปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเกิดขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยา ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์และกรดสเตียริก โดยทั่วไปนิยมใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 2-5 phr ร่วมกับกรดสเตียริกในปริมาณ 1-2 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ใช้สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators) 2 ชนิด คือ

- **ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)**

เป็นสารที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป ส่วนมากมักใช้ซิงค์ออกไซด์ประมาณ 3-5 phr ถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็กสามารถลดปริมาณการใช้เหลือเพียง 1 phr ซึ่งจะทำให้ยางที่มีมอดุลัสสูงและยางมีลักษณะโปร่งใส

- **กรดสเตียริก (Stearic acid)**

เป็นกรดไขมันที่นิยมใช้เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยงมากที่สุดเพราะมีโมเลกุลยาว สำหรับพวกที่มีจุดหลอมเหลวต่ำจะทำให้ยางอ่อนตัวและพวกที่มีความอึดตัวต่ำจะทำให้สมบัติของยางหลังการบ่มแรงดีขึ้น เช่น สมบัติการต้านทานต่อรอยแตกเนื่องจากการหักงอ ปริมาณของกรดสเตียริกที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง โดยทั่วไปการผสมสารเคมีกับยางธรรมชาติจะใส่กรดสเตียริก 1-3 phr

2.2.4 สารแอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidant)

สารแอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidant) คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อทำหน้าที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ทำให้ยางมีอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น โดยทั่วไปสารแอนติออกซิแดนซ์สามารถแบ่ง 2 ประเภท ได้แก่ สารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดไม่เปื้อนสีและสารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดเปื้อนสี

ในงานวิจัยนี้ใช้สารแอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidant) 2 ชนิด คือ

- **Wingstay L**

เป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดไม่เปื้อนสี ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตมีอัตราการระเหยต่ำและสามารถกระจายตัวได้ดีในของเหลว นิยมใช้กับยางธรรมชาติและน้ำยาง

- **TMQ (2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline)**

เป็นสารที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เบนซีนและอะซิโตน แต่ไม่ละลายในน้ำและสารละลายได้เพียงเล็กน้อยในปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน นิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในยางโดยเฉพาะอุตสาหกรรมยางรถยนต์

2.2.5 สารแอนตี้โอโซนแนนท์ (Antiozonant)

สารแอนตี้โอโซนแนนท์ (Antiozonant) คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อป้องกันหรือลดการเกิดรอยแตกของยางจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับยางหรือเรียกว่า ปฏิกิริยาโอโซนชัน (Ozonation) สารแอนตี้โอโซนแนนท์ที่นิยมใช้ ได้แก่ สารประกอบพาราฟีนิลลีนไดเอมีน (Paraphenylenediamines, PPDs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6PPD (N-(1,3-Dimethylbutyl)-N-phenylenediamine)

เป็นสารแอนตี้ออกซิแดนท์ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นแอนตี้ออกซิแดนท์ควบคู่ไปด้วย นิยมใช้กับยางสังเคราะห์และยางธรรมชาติ สามารถช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพจากการด้า

2.2.6 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent หรือ Curing agent) [7]

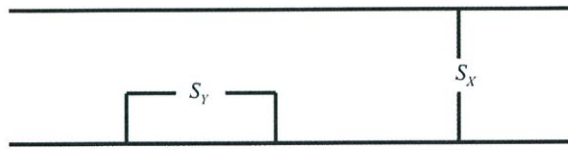
สารเชื่อมโยงทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงหรือสารวัลคาไนซ์เป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (Crosslink) เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้น ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่า การเชื่อมโยงหรือวัลคาไนซ์ (Vulcanization) การทำให้ยางเชื่อมโยงเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงยางที่อยู่ในสภาพที่ไม่คงตัวให้เป็นยางที่รักษารูปร่างได้ในลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งโดยใช้สารที่ทำให้ยางเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลบริเวณตำแหน่งพันธะคู่หรือตำแหน่งอื่นว่องไวต่อปฏิกริยา

สารที่ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงมี 3 ประเภท คือ กำมะถัน สารที่กำมะถัน และสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน แต่สารที่นิยมใช้เป็นสารเชื่อมโยงที่ใช้สำหรับยางธรรมชาติ คือ กำมะถัน ส่วนยางสังเคราะห์อื่นๆจะใช้สารที่ทำให้เชื่อมโยงแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของยาง การที่ยางเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้ยางมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป คือ

1. ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากเส้นตรงเป็นร่างแหหรือเป็นแบบสามมิติ โดยการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลทำให้ยางเปลี่ยนจากวัสดุพลาสติกไปเป็นวัสดุอิลาสติกสูงขึ้น
2. สมบัติทางกายภาพ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอและความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้น
3. เปลี่ยนสภาพของยางจากการละลายในตัวทำละลายเป็นยางที่ไม่ละลายในตัวทำละลายและไม่บวมตัว
4. มีความทนทานต่อความร้อน แสง เพิ่มขึ้นทำให้สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากขึ้น

กำมะถันเป็นสารที่ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงนิยมใช้มากที่สุดและใช้กับยางที่ไม่อิมัตวซึ่งมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล ได้แก่ ยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวทาไดอีน และยางไนไตรล์ เป็นต้น เมื่อใส่กำมะถันเข้าไปในยางแล้วให้ความร้อนจะเกิดการเชื่อมโยงขึ้น โดยกำมะถันเป็นตัวเชื่อมระหว่างโมเลกุลยาง โดยกำมะถันจะเชื่อมต่อกับโมเลกุลของยาง โดยทั่วไปถ้าการเชื่อมโยงเกิดในระบบที่มีสารตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพดี จำนวนอนุภาคกำมะถันควรมีค่าประมาณ 1 หรือ 2 และไม่มีโครงสร้างที่เป็นวง (Cyclic) หรือน้อยมาก แต่ถ้าเป็นระบบที่ไม่มีประสิทธิภาพจำนวนอนุภาคกำมะถันอาจมีค่าสูงถึง 8 และมีโครงสร้างที่เป็นวงเกิดขึ้นมากปริมาณกำมะถันที่รวมอยู่ในโครงสร้างร่างแหนี้ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการเชื่อมโยง (Coefficient of vulcanization) โดยปริมาณของกำมะถันที่ใช้ทั่วไปอยู่ในช่วง 1-3 phr

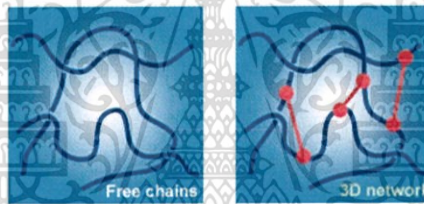
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การเชื่อมโยงโมเลกุล โดย S_x เป็นการเชื่อมโยงระหว่างสองโมเลกุล
 S_y เป็นการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลเดียวกัน [7]

2.3 กระบวนการผลิตยาง [10]

ยางที่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยงเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง ดึงยืดได้ง่ายและเมื่อแรงดึงที่กระทำนั้นหมดไป วัสดุชนิดนี้ก็จะกลับคืนสู่รูปร่างเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว แต่ยางดิบ (Raw rubber) หรือยางที่ยังไม่ได้ผ่านการแปรรูปจะมีความยืดหยุ่นต่ำ ไหล และเสียรูปร่างได้ง่าย จึงจำเป็นต้องแปรรูปยางดิบให้เป็นยางสุกหรือยางเชื่อมโยงโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันหรือปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Vulcanization reaction) ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากยางดิบที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก คือ อยู่ในสภาพที่สามารถไหลได้ง่ายไปเป็นยางเชื่อมโยงซึ่งไม่สามารถไหลได้ ซึ่งจะมีสมบัติเป็นเทอร์โมเซตเพราะปฏิกิริยาเชื่อมโยงจะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเกิดเป็นร่างแหสามมิติ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของยางดิบและยางเชื่อมโยงหรือยางสุก [11]

ยางที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้วจึงมีความยืดหยุ่นและมีเสถียรภาพทางรูปร่างสูงขึ้น การเชื่อมโยงยางจะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลต่างๆ สูงขึ้น ยางจะมีความสามารถในการรักษาสมบัติและรูปร่างที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำมากๆ ได้ดีขึ้นจึงทำให้สามารถนำยางที่เชื่อมโยงแล้วไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากได้และยางเชื่อมโยงที่ได้จะมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากสารเคมี โดยเฉพาะน้ำมันและตัวทำละลายสูงขึ้น การแปรรูปจากยางดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์ยางนั้นมีขั้นตอนหลักๆ 5 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง [11]

ขั้นตอนที่ 1 การออกสูตรเคมียาง

การออกสูตรเคมียางนับเป็นขั้นตอนแรกที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางและยังส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตด้วย สูตรการผสมเคมียางที่ดีนั้นจะต้องเป็นสูตรที่นอกจากจะทำให้ยางมีสมบัติที่ดีตรงตามที่ต้องการแล้ว ยังต้องเป็นสูตรที่ทำให้กระบวนการผลิตมีต้นทุนที่ต่ำด้วย การออกสูตรเคมียางจึงอาศัยความรู้เกี่ยวกับสมบัติและการใช้งานของยางแต่ละชนิดโดยละเอียด

ขั้นตอนที่ 2 การผสมเคมียาง

การผสมเคมียางเป็นขั้นตอนที่น่ายางและสารเคมีชนิดต่างๆที่เป็นองค์ประกอบในสูตรมาผสมรวมเข้าด้วยกันโดยเครื่องผสม ซึ่งอาจจะเป็นเครื่องผสมระบบเปิด เช่น เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) หรือเครื่องผสมระบบปิด เช่น เครื่องบานบุรี (Banbury internal mixer) ยางที่ผ่านการผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้วจะเรียกว่า “ยางคอมปาวด์ (Rubber compound)” การผสมเคมียางมีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติและคุณภาพของผลิตภัณฑ์เพราะหากสารเคมีที่เติมลงไปในยางกระจายตัวได้ไม่ดีก็จะส่งผลโดยตรงต่อความสม่ำเสมอทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนที่ 3 การขึ้นรูปยาง

หลังจากที่ยางและสารเคมีผสมเข้ากันได้เรียบร้อยแล้วยางคอมปาวด์ที่ผสมเสร็จแล้วก็จะถูกรีดให้เป็นแผ่นบางเพื่อระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการผสม จากนั้นนำแผ่นยางคอมปาวด์ไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปต่างๆ ดังนี้

- การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

การใช้แม่พิมพ์ (Mold) ขึ้นรูปยางเป็นการขึ้นรูปยางพร้อมๆกับการเชื่อมโยง โดยอาศัยความร้อนและแรงอัด การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เป็นวิธีการที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ต้องให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ก่อนที่จะนำยางไปใส่ในเบ้าพิมพ์เพราะความร้อนของแม่พิมพ์จะทำให้ยางมีความหนืดต่ำลง ยางจึงไหลเต็มเบ้าพิมพ์ได้ง่ายยิ่งขึ้นและเมื่อยางไหลเต็มเบ้าพิมพ์แล้วความร้อนจากแม่พิมพ์ก็จะทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงหรือทำให้ยางสุกก่อนที่จะเปิดแม่พิมพ์และแกะ

เอาผลิตภัณฑ์ยางออกจากแม่พิมพ์ การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์จะแบ่งออกเป็น 3 วิธีได้แก่ การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression mold) การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด (Transfer mold) และการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบฉีด (Injection mold) แต่โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมนิยมการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบกดอัดและแม่พิมพ์แบบฉีด

- **การขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดรีด (Extrusion)**

การขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดรีด เป็นการอัดให้ยางไหลผ่านหัวตาย (Die) ที่มีรูปร่างต่างๆ ตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีรูปร่างของภาพตัดขวางเหมือนกันตลอดแนวความยาว (รูปร่างของภาพตัดขวางของผลิตภัณฑ์จะเหมือนกับรูปร่างของตาย) ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ยางที่ขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคนี้ ได้แก่ ท่อยาง ยางหุ้มสายเคเบิล ยางขอบกระจก เป็นต้น

- **การขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเอนเดอร์ (Calender)**

เครื่องคาลเอนเดอร์ คือ เครื่องที่ประกอบด้วยชุดลูกกลิ้งจำนวน 3 ถึง 4 ลูกเรียงตัวกันในแบบต่างๆ โดยทั่วไปลูกกลิ้งแต่ละลูกจะทำจากเหล็กหล่ออย่างดีผิวหน้าขัดเรียบ ด้านในของลูกกลิ้งจะมีการเจาะรูให้เป็นโพรงเพื่อติดตั้งระบบทำความร้อนและความเย็นเช่นเดียวกับลูกกลิ้งที่ใช้ในการผสมยาง ส่วนระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแต่ละลูกก็สามารถปรับให้กว้างหรือแคบได้ตามต้องการ โดยทั่วไปเครื่อง คาลเอนเดอร์เหมาะสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นเรียบที่มีความหนาและความกว้างสม่ำเสมอ

ขั้นตอนที่ 4 การเชื่อมโยงยาง

การเชื่อมโยงยาง (Vulcanization) เป็นกระบวนการเปลี่ยนยางดิบให้เป็นยางที่คงตัวหรือยางที่รักษารูปร่างได้ในลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็ง โดยใช้สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลที่เรียกว่า เกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ตรงจุดที่วงไวต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ โดยทั่วไปจะนิยมใช้กำมะถันและเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเมื่อยางเกิดการเชื่อมโยงแล้วจะเปลี่ยนจากโครงสร้างจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ จึงทำให้ยางมีเสถียรภาพของรูปร่างและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

ขั้นตอนที่ 5 การตกแต่งผลิตภัณฑ์

หลังจากขั้นตอนของการขึ้นรูปและอบยางให้สุกเรียบร้อยแล้ว ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จะถูกนำไปผ่านขั้นตอนของการตกแต่ง (Trimming) ผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะนำไปบรรจุหีบห่อเพื่อจัดจำหน่ายต่อไป

2.4 สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) [12]

สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) เป็นสารที่ใส่ลงในยางเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างยางกับวัสดุอื่นหรือระหว่างยางด้วยกันเอง โดยใช้สารเพิ่มการยึดติดที่เรียกว่า เรซิน ซึ่งเป็นของแข็งหรือสารที่มีลักษณะกึ่งของแข็งมีโครงสร้างไม่เป็นผลึก ลักษณะทางกายภาพเมื่อมองด้วยตาเปล่าจะเห็นว่าโปร่งแสงหรือโปร่งใส นอกจากนั้นยังมีลักษณะที่เปราะแตกง่ายคล้ายแก้ว รวมทั้งสามารถติดไฟได้ โดยทั่วไปเรซินสามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์ อีเทอร์และสารละลายไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ แต่ไม่สามารถละลายได้ในน้ำ เมื่ออุณหภูมิสูงเรซินจะอ่อนตัวและอาจหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนสูงเพียงพอมีจุดอ่อนตัวในช่วง 50-150 องศาเซลเซียส นิยมใส่ในช่วง 1-10 phr ขึ้นกับชนิดของสารเพิ่มการยึดติดที่เลือกใช้และความสามารถในการยึดติดที่ต้องการ ซึ่งเรซินสามารถหาได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์

2.4.1. เรซินธรรมชาติ [13]

เรซินธรรมชาติ คือ เรซินที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งส่วนใหญ่จะพบเห็นในรูปของเหลวที่มีลักษณะเป็นหยดก้นกลมๆ คล้ายหยดน้ำตาไหลซึมผ่านออกมาทางรอยแตกหรือรอยกรีดของเปลือกไม้ เช่น จากต้นสน (Pine) หรือต้นเฟอร์ (Firs) เป็นต้น หลังจากที่ยางที่ไหลซึมออกมานี้เกิดการแห้งตัวจนกลายเป็นของแข็งที่สามารถนำไปใช้งานได้จะเรียกเรซินนี้ว่า เรซินธรรมชาติ โดยทั่วไปจะมีลักษณะโปร่งแสงและมีสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลเข้ม มีเสถียรภาพต่ำเนื่องมาจากความไม่อิ่มตัว (Unsaturation) แต่สามารถปรับปรุงเสถียรภาพได้โดยการใช้สารเคมีที่หลากหลาย รวมถึงการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) ไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) และไดเมอร์ไรเซชัน (Dimerization) ในปัจจุบันได้มีการนำเอาเรซินธรรมชาติไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมมากมาย เช่น อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมตกแต่งภาชนะ สารเพิ่มการยึดติดเหล่านี้มีสมบัติการยึดติดที่ดีกับพอลิเมอร์เกือบทุกชนิด เช่น ยางธรรมชาติ (NR), เอทิลีนไวไนลอะซีเตต (EVA), ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) และอะคริลิก (Acrylics)



รูปที่ 2.10 ลักษณะเรซินที่ได้จากธรรมชาติ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2. เรซินสังเคราะห์ [12]

เรซินสังเคราะห์ คือ เรซินที่ได้จากการสังเคราะห์ที่มีลักษณะทางกายภาพหรือมีสมบัติคล้ายเรซินที่ได้จากธรรมชาติ มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดที่สามารถแข็งตัวได้ มีสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลเข้ม ตัวอย่างเรซินสังเคราะห์ ได้แก่ ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Phenol-formaldehyde resin) หรือฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin)

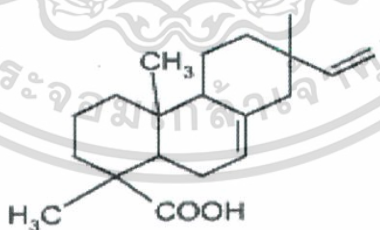


รูปที่ 2.11 ลักษณะเรซินที่ได้จากการสังเคราะห์ [12]

สามารถแบ่งประเภทของสารเพิ่มการยึดติดได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่ [14]

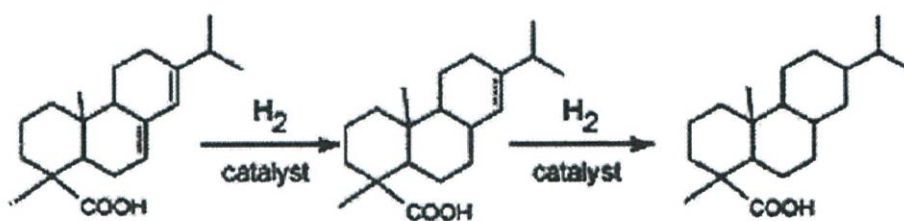
1. Rosin resins
2. Hydrocarbon resins
3. Terpene resins
4. Phenolic resin

1. **Rosin resins** เป็นสารที่ใช้เป็นสารเพิ่มการยึดติด (Tackifier) สำหรับอุตสาหกรรมกาว ซึ่งมีอยู่ 3 ชนิดที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน คือ Gum rosin, Wood rosin และ Tall oil rosin สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์หลายชนิด แต่ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวภายในเนื้อกาวลดลง โมเลกุลของ Rosin มีความเสถียรต่ำเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีไม่อิ่มตัว



รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของ Rosin [14]

การทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน Rosin ได้เป็น Hydrogenated rosin resin จะเพิ่มความอิ่มตัวให้กับโครงสร้างและเพิ่มความเสถียรได้



รูปที่ 2.13 กระบวนการเตรียม Hydrogenated rosin ester [14]

2. Hydrocarbon resins เรซินสำหรับใช้งานอุตสาหกรรมกาวแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ

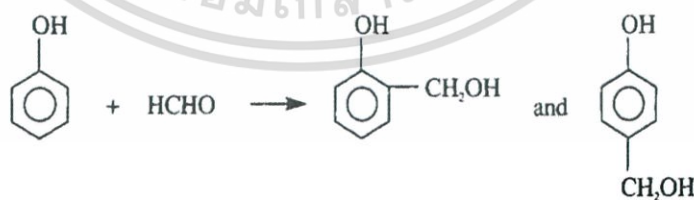
- C5 Aliphatic resins
- C9 Aromatic resins
- C5/C9 Aliphatic / Aromatic resins

สำหรับการผลิต C5 Aliphatic resins และ C9 Aromatic resins เกิดการแตกออกของ naphtha

3. Terpene resins แหล่งกำเนิดมาจากไม้และพืชจำพวกมะนาว โดยมีการเตรียมโดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้ $AlCl_3$

4. Phenolic resins [15] ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) หรือฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน (Phenol formaldehyde resin) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1907 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเบลเยียม ชื่อเบคเคแลนด (Baekeland) ด้วยเหตุนี้ฟีนอลิกเรซินที่จำหน่ายในครั้งแรกจึงมีชื่อทางการค้าว่า “Bakelite”

ฟีนอลิกเรซินได้รับการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยางค่อนข้างมากเพราะการเติมฟีนอลิกเรซินจะช่วยปรับปรุงสมบัติในกระบวนการผลิตทำให้ยางคอมปาวด์ไหลได้ง่าย มีความเหนียวติดสูงขึ้น และทำให้สารตัวเติมผสมเข้ากันอย่างได้ดีขึ้นและยังช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางและโลหะ ซึ่งฟีนอลิกเรซินเป็นเรซินที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction) ระหว่างฟีนอลและฟอร์มัลดีไฮด์ที่ตำแหน่ง Ortho และ Para (ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 4, 6) ทำให้ต่อกับฟอร์มัลดีไฮด์ได้ 3 ตัวเกิดเป็น Hydroxymethyl phenol

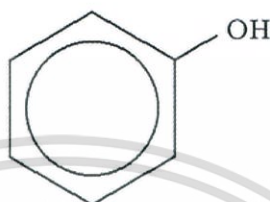


รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาของฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Phenol [17]

ฟีนอล (Phenol) เป็นสารประกอบอะโรมาติกที่ผลิตได้จากสารประกอบอะโรมาติกชนิดอื่นๆ เช่น เบนซีน โทลูอีน เป็นสารที่ถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์เคมีหลายชนิด ฟีนอลมีสูตรเคมี C_6H_5OH เป็นสารประกอบที่มีหมู่ hydroxyl (OH) ต่อกับกลุ่มอะโรมาติก มีสถานะเป็นของแข็งสีขาวอ่อน มวลโมเลกุลเท่ากับ 94.01 กรัม/โมล สามารถละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ และกรดอะซิติก หากมีหมู่อื่นแทนที่หมู่ OH หรือมาเกาะกับวงแหวนของฟีนอล เช่น CH_3 หรือ Cl จะได้เป็นอนุพันธ์ของฟีนอล ซึ่งเรียกตามหมู่แทนที่ที่มาเกาะ

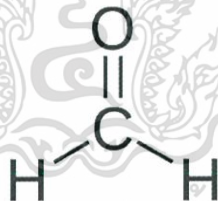


รูปที่ 2.15 โครงสร้างทางเคมีของฟีนอล (Phenol) [17]

ประโยชน์ฟีนอล สารฟีนอลมีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี, อุตสาหกรรมพลาสติก, สารเคมีในการเกษตร, อุตสาหกรรมผลิตยา, อุตสาหกรรมสารฆ่าเชื้อโรค และน้ำยาทำความสะอาด เป็นต้น

- Formaldehyde [18]

ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรโครงสร้างคือ CH_2O มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิห้อง ลักษณะใสไม่มีสี มีกลิ่นฉุนและเกิดการระคายเคือง เมื่ออยู่ในรูปของสารละลายจะเรียกว่า “ฟอร์มาลีน”



รูปที่ 2.16 โครงสร้างทางเคมีของฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) [18]

ประโยชน์ของ Formaldehyde เนื่องจากสมบัติการติดยึดที่ดีเยี่ยมของฟอร์มาลดีไฮด์ มันจึงถูกผลิตเป็นกาวสำหรับติดยึดวัสดุต่างๆ เพราะว่ามีสมบัติการติดยึดที่ดีและยังราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

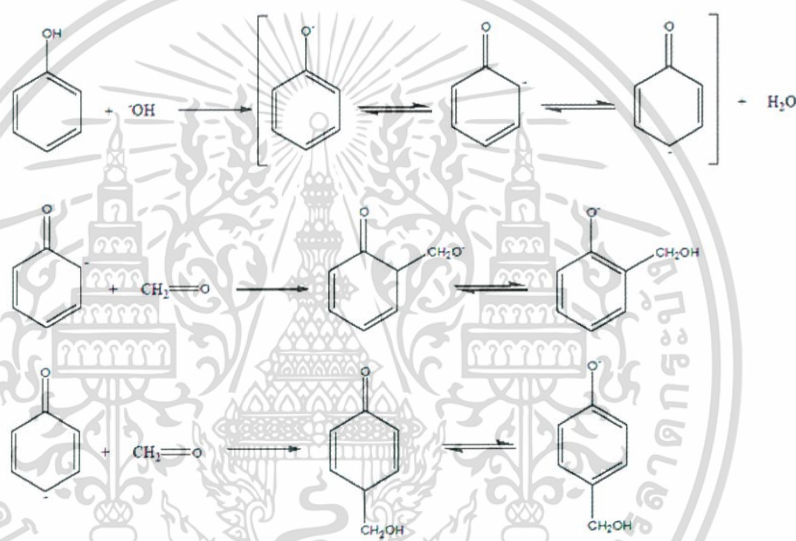
โดยปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน ได้แก่ สัดส่วนของฟีนอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาและสภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น อุณหภูมิ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อลักษณะโครงสร้างของเรซิน

โดยทั่วไปแล้วแบ่งฟีนอลิกเรซินเป็น 2 ชนิด คือ

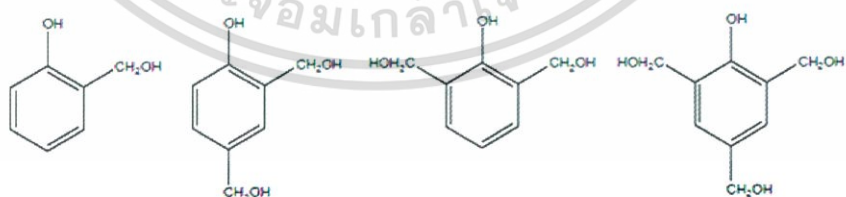
1. รีโซลเรซิน (Resole resin) [16],[19]

รีโซลเรซินจะใช้เป็นสารวัลคาไนซ์สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการนำไปใช้งานภายใต้สภาวะที่ได้รับความร้อนหรือความดันไอสูงๆ เช่น ถุงลมนิรภัย และยางเทอร์โมพลาสติก

รีโซลเรซินเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง Phenol กับ Formaldehyde ที่มากเกินพอ (ปกติอัตราส่วนประมาณ 1:1.5) โดยใช้ตัวเร่ง (Catalyst) ที่เป็นตัวต่าง เช่น Ammonia หรือ Sodium hydroxide ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดที่ตำแหน่งออร์โธ (Ortho) และพารา (Para) ของสารฟีนอลเนื่องจากมีฟอร์มัลดีไฮด์มากเกินพอ จึงสามารถเกิดหมู่เมทิลอลได้หลากหลาย ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ Resoles [19]

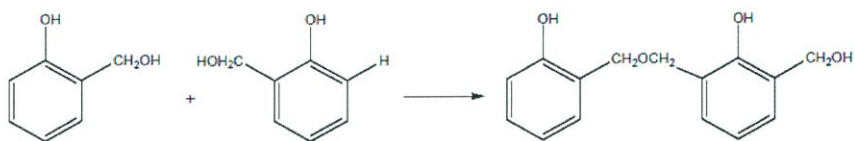


รูปที่ 2.18 โครงสร้างของเมทิลอลที่สามารถเกิดขึ้นได้ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

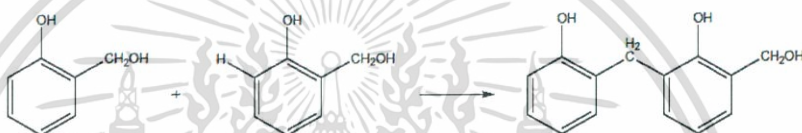
หมู่ไฮดรอกซิลของเมทิลอลจะว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ 2 แบบ ได้แก่

- ไฮดรอกซี (-OH) ของอีโมเลกุลเมทิลอล ได้พันธะอีเทอร์ (-O-)



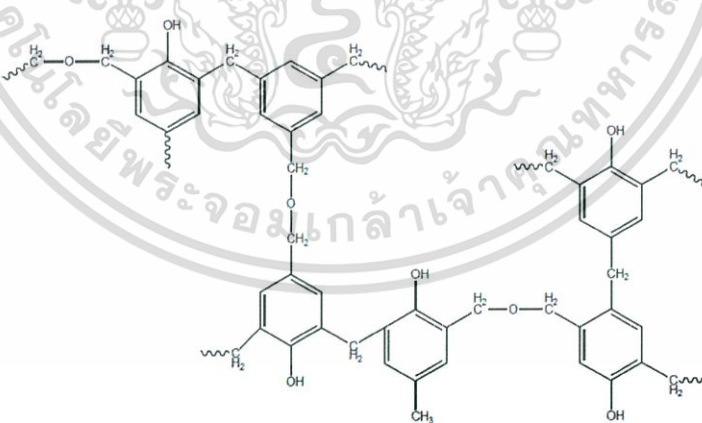
รูปที่ 2.19 เกิดปฏิกิริยาได้พันธะอีเทอร์ [19]

- ไฮโดรเจน (-H) ของอีโมเลกุลเมทิลอลได้พันธะเมทิลีน (-CH₂-)



รูปที่ 2.20 เกิดปฏิกิริยาได้พันธะเมทิลีน [19]

และเนื่องจากการสังเคราะห์รีโซลเรซินมีหมู่เมทิลอลมากเกินไป เมื่อให้ความร้อนต่อไปจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสม รีโซลสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Crosstlink) เกิดเป็นพอลิเมอร์แบบเทอร์โมเซต (Thermoset) ได้



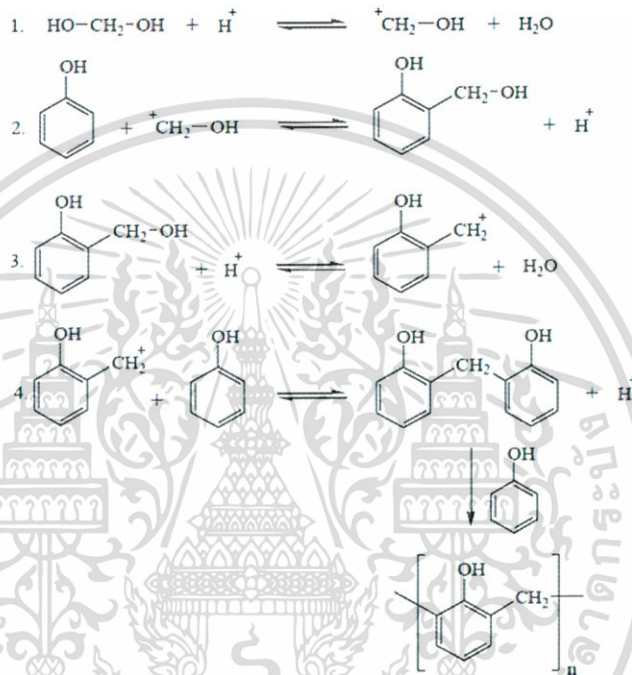
รูปที่ 2.21 โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ Resoles [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โนวอลแลกเรซิน (Novolac resin) [16], [19]

โนวอลแลกเรซินจะใช้เป็นสารที่ช่วยทำให้ยางเหนียวติดดีขึ้น แต่ถ้าโนวอลแลกเรซินถูกทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยเรซินที่ให้หมู่เมทิลีน โนวอลแลกเรซินที่ได้จะทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงให้แก่ยาง

โนวอลแลกเรซินเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง Phenol กับ Formaldehyde ที่อัตราส่วน 1.25:1 โดยใช้ตัวเร่งที่เป็นกรด เช่น HCl หรือ Oxalic acid ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดที่ตำแหน่งออร์โธ (Ortho) และพารา (Para) ของสารฟีนอล แต่เนื่องจากโนวอลแลกเรซินใช้ฟอร์มัลดีไฮด์ในปริมาณที่น้อย โอกาสที่จะเกิดพันธะอีเทอร์จึงมีน้อย มีเพียงพันธะเมทิลีนเท่านั้น

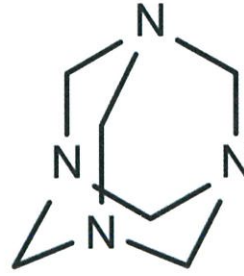


รูปที่ 2.22 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ Novolac [19]

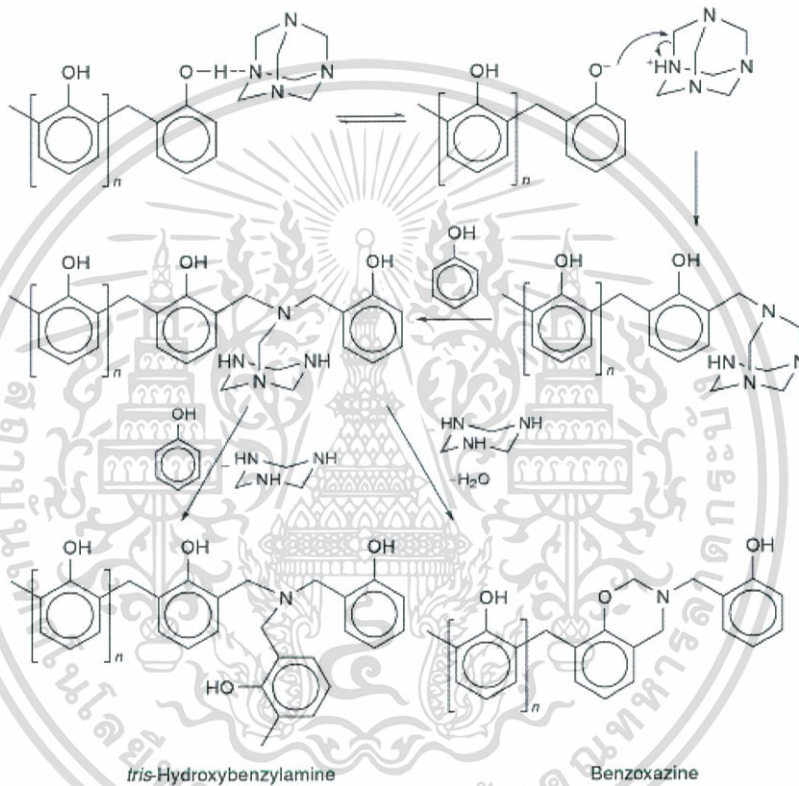
การทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลในกรณีของโนวอลแลค [20]

การทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลในกรณีของโนวอลแลคไม่สามารถกระทำโดยเหมือนในกรณีของรีโซลเนื่องจากว่าโครงสร้างของโนวอลแลคนั้นจะไม่มีหมู่ CH_2OH อิสระที่เกาะอยู่บนวงแหวนเบนซีน (เนื่องจากโนวอลแลคมีการใช้ฟอร์มัลดีไฮด์ในปริมาณที่จำกัด) ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลจึงต้องอาศัยการเติมสาร Curing agent เช่น Hexamethylenetetramine (HMTA) หรือ $[(\text{CH}_2)_6\text{N}_4]$ ประมาณ 5 – 15 % ลงไป แล้วให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงและทำให้ได้โครงสร้างแบบร่างแหที่มีทั้ง Methylene bridges และ Benzylamine bridges เชื่อมโยงระหว่างวงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 โครงสร้างทางเคมีของ Hexamethylenetetramine (HMTA) [21]



รูปที่ 2.24 โครงสร้างของ Novolac เมื่อทำปฏิกิริยากับ HMTA ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น [22]

ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการเลือกใช้สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) [23]

- ความสามารถในการเข้ากันได้กับเรซินเนื้อขาว (Compatibility)
- โครงสร้าง (Structure) ความมีขั้ว (Polarity)
- น้ำหนักโมเลกุล (MW) และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD)
- จุดหลอมเหลว (T_m) และความยากง่ายในการผสม
- ความเหนียวติดที่ต้องการ (ความเหนียวติดช่วงต้น (Initial tack) และความเหนียวติดขณะใช้งาน (Final tack))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กลไกการยึดติด (Mechanisms of adhesion) [24],[25]

ทฤษฎีของกลไกการยึดติดมี 5 แบบ ดังนี้

2.5.1 การเกาะและการเปียก (Adsorption and wetting)

เป็นการยึดติดด้วยแรงกระทำอ่อนๆระหว่างการเปียกตัวของของเหลวไปบนพื้นของของแข็งหรือวัสดุ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waal) ซึ่งแรงกระทำที่เกิดขึ้นเกิดได้จากความเป็นกรด-ด่าง หรือความสามารถในการเปียกผิวของของเหลบบนผิวสัมผัสของวัสดุ



รูปที่ 2.25 ลักษณะการเกาะและการเปียก [25]

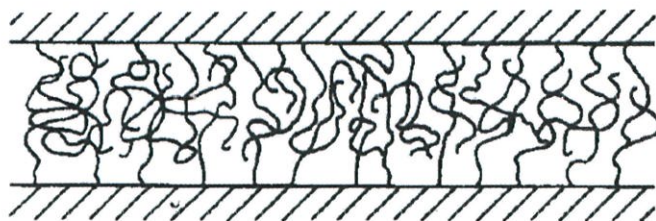
2.5.2 โมเลกุลเกี่ยวพัน (Interdiffusion)

เป็นการยึดติดที่เกิดจากโมเลกุลของสายโซ่ที่ยังสามารถเคลื่อนที่ได้ โมเลกุลจึงสามารถเคลื่อนที่เข้าหากันและเกิดการเกี่ยวพันกัน (Entanglement) ซึ่งความแข็งแรงยึดเกาะ (Bond strength) ขึ้นกับปริมาณโมเลกุลที่พันกัน ความแข็งแรงสายโซ่และระดับการพันกัน โดยการเกิดโมเลกุลเกี่ยวพันกันนี้สามารถเพิ่มปริมาณตัวทำละลาย เพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์และการเคลือบพื้นผิวด้วยพอลิเมอร์ เช่น ใช้ไพรเมอร์ (Primer) เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกี่ยวพันกัน คือ

- เวลาที่ใช้
- อุณหภูมิ
- น้ำหนักโมเลกุล
- ความมีขี้ของโมเลกุล

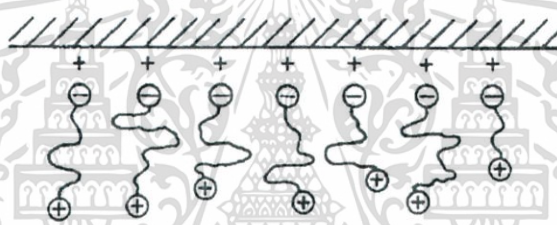
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ลักษณะการเกิดโมเลกุลเกี่ยวพัน [25]

2.5.3 แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction)

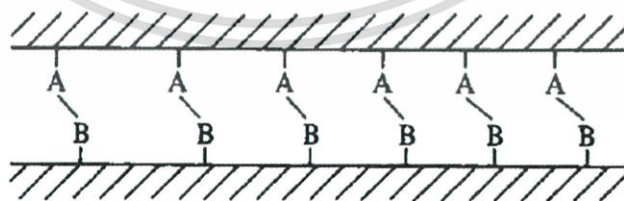
เป็นแรงยึดที่เกิดจากพื้นผิวของวัสดุสองชนิดที่มีประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (ฝั่งหนึ่งมีประจุบวก อีกฝั่งหนึ่งมีประจุลบ) ความแข็งแรงของการยึดเกาะขึ้นกับความหนาแน่นของประจุ เช่นการยึดติดของพอลิเมอร์กับโลหะ โดยอิเล็กตรอนจากโลหะจะเคลื่อนย้ายไปยังพอลิเมอร์เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ต่างกันและเกิดการยึดติดกันที่ดีขึ้น



รูปที่ 2.27 ลักษณะแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต [25]

2.5.4 พันธะเคมี (Chemical bonding)

เป็นแรงยึดระหว่างสองพื้นผิวที่มีหมู่ฟังก์ชันเคมีต่างกันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็นพันธะใหม่ยึดระหว่างสองพื้นผิว ซึ่งพันธะเคมีที่เกิดขึ้นมักจะมีหลากหลายรูปแบบ ความแข็งแรงจึงขึ้นกับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น โดยพันธะที่แข็งแรงจะทำให้เกิดการยึดติดที่แข็งแรง

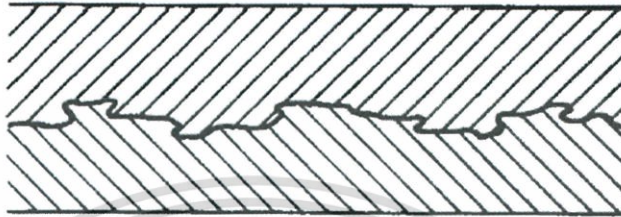


รูปที่ 2.28 ลักษณะการเกิดพันธะเคมี [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 การล็อกเชิงกล (Mechanical interlocking or Keying)

เป็นแรงยึดเชิงกลที่เกิดจากการที่ช่องเหลว เช่น กาว เรซิน เป็นต้น ไหลเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างหรือในบริเวณที่มีความขรุขระบนพื้นผิวของวัสดุแล้วเกิดการแข็งตัวทำให้ล๊อคติดอยู่บริเวณที่ขรุขระ ซึ่งความแข็งแรงของการยึดติดชนิดนี้ขึ้นกับความขรุขระของพื้นผิววัสดุ ถ้ามีความขรุขระมากก็จะสามารถแทรกตัวเข้าไปแทนที่ได้มากทำให้เกิดการยึดติดที่ดียิ่งขึ้น

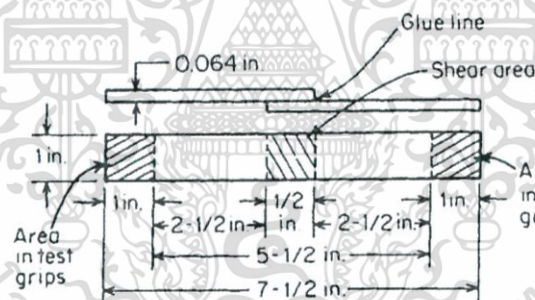


รูปที่ 2.29 ลักษณะการเกิดการล็อกเชิงกล [25]

2.6 การทดสอบสมบัติต่างๆ [25]

- การทดสอบการยึดติด (Adhesive testing) โดยใช้วิธีแรงเฉือน (Lap shear test)

- ASTM D1002



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบแรงเฉือน [26]

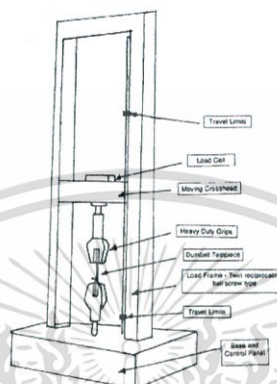
ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบการยึดติด

- ความเร็วดึง ควรใช้ตามมาตรฐาน ASTM
- ความหนาและระยะติดของยางกับแผ่นเหล็กเคลือบตีบุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทดสอบสมบัติเชิงกล โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง [26]

เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) สามารถใช้ที่จับ (Grips) หลายลักษณะขึ้นกับชนิดของวัสดุและผู้ทดสอบ เช่น Wedge grips, Pneumatic grips, Eccentric roller grips



รูปที่ 2.31 ลักษณะเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) [26]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จันจิรา แส่นเจริญ และคณะ [3] ได้ศึกษาชนิดของสารเพิ่มการยึดติดทางการค้าที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของยาง สารเพิ่มการยึดติดที่ทำการศึกษาคือ ได้แก่ Coumaron resin G90, Hikorez R-1100s, Koresin, Sirfen BL-302, SL-1801 และ Struktol TH110 นอกจากนี้ยังศึกษาผลของปริมาณสารเพิ่มการยึดติด (0-7 phr) รวมทั้งการบ่มเร่ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 0-408 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเพิ่มการยึดติดแต่ละตัวที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของยาง เช่น ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล ความแข็งแรงยึดติดกับวัสดุอื่นในยางรถยนต์ ได้แก่ ลวดทองเหลืองเส้นใหญ่ทำปัด (Bead), ลวดทองเหลืองเส้นเล็กทำเข็มขัดรัดหน้ายาง (Belt) และเส้นใยไนลอนทำเส้นใยพลาซ (Ply) จากการทดสอบการยึดติดกับวัสดุพบว่า ฟีนอลิกเรซินมีประสิทธิภาพในการยึดติดดีกว่าไฮโดรคาร์บอนเรซินจากการศึกษาผลของปริมาณสารเพิ่มการยึดติด (0-7 phr) พบว่าเมื่อปริมาณของสารเพิ่มการยึดติดมีปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยึดติดเพิ่มมากขึ้นและจากการศึกษาประสิทธิภาพการยึดติดภายหลังการบ่มเร่งที่ 70°C นาน 408 ชั่วโมง พบว่าถ้าใส่สารเพิ่มการยึดติด 3 phr ประสิทธิภาพในการยึดติดจะต่ำลง แต่ถ้าใช้ 7 phr ประสิทธิภาพการยึดติดจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F.Taheri-Behrooz และคณะ [27] ศึกษาโนคอมโพลิตที่ใส่ฟีนอลิกเรซิน ซึ่งนาโนคอมโพลิตประกอบด้วยซิลิกา 1, 2 และ 3 wt% มีค่า Young's Modulus เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นยกเว้น 3 wt% สำหรับนาโนคอมโพลิตที่ประกอบด้วยซิลิกา 1 และ 2wt% มีค่า Young's Modulus เพิ่มขึ้น 7% และ 12.5% แต่ 3 wt% มีค่า Young's Modulus ลดลง 13.5% และ 2.7% จากการศึกษาสามารถหาค่าความต้านทานรอยขีดข่วน ความต้านทานการขีดถู และเสถียรภาพทางความร้อน จากนั้นนำไปทดสอบความแข็งกดพบว่าเมื่อปริมาณนาโนคอมโพลิตเพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งกดเพิ่มขึ้น

N.A. Darwish และคณะ [28] ศึกษาสารที่ช่วยทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างยางธรรมชาติและแผ่นทองเหลืองโดยใส่ดินขาวที่ความเข้มข้นต่างๆ กันผสมเข้าไปในยางแล้วเปรียบเทียบกับ Manobond พบว่าดินขาวเกิดการยึดเกาะที่ดีกว่า ในขั้นตอนการผสมยาง ประกอบด้วย Resorcinol, formaldehyde resin, Silica, Hexamethylenetetramine, ดินขาวกับ Resin-iron chelate ในอัตราส่วน 2:1 ผสมโดยใช้เครื่อง Two-roll mill ยางเกิดการเชื่อมโยงที่ 152°C จากการทดสอบสมบัติการไหลที่ความแตกต่างระหว่าง Manobond กับ Kaolin พบว่าดัชนีการเชื่อมโยงของ Manobond เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แต่ดินขาวไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบ T-shape, Tensile test, Hardness พบว่าจากการทดสอบสมบัติเชิงกลมีค่า Modulus ของ Manobond ในช่วงต้นลดลง และค่า Modulus เพิ่มเมื่อ 1.0 phr แสดงว่าเกิดการยึดเกาะไม่ดีนักแต่ดินขาวมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าที่ 1.0 phr ให้ค่า Modulus สูงที่สุด และให้ค่า Tensile strength ที่ดีกว่า Manobond

A.Shojaei และ M. Faghilhi [29] ได้ศึกษาความสามารถของ Oganoclay (OC) ในการเพิ่มประสิทธิภาพของคุณสมบัติและเสถียรภาพทางความร้อนของ Styrene Butadiene Rubber (SBR)/Phenolic resin (PH) โดยการทดลองนี้ศึกษาเปรียบเทียบกันระหว่าง SBR/OC และ SBR/OC/PH จากการทดลองเห็นว่าปริมาณของ OC 0.5 phr Crosslinking density ของ SBR เพิ่มขึ้นแต่ Crosslinking density ลดลงเมื่อปริมาณของ OC เพิ่มจาก 7.5 – 30 phr Crosslinking density ของ SBR/PH/OC แนวโน้มคล้ายกับ SBR/OC แต่ที่มี PH ให้ Crosslinking density ที่สูงกว่า จากการทดสอบสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบ SBR/OC กับ SBR/PH ค่า Tensile strength ของ SBR/OC และ SBR/PH/OC เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ OC สูงถึง 7.5 phr ดังนั้นจึงเห็นว่าเมื่อเติม OC คุณสมบัตินี้เชิงกลของ SBR/OC มากกว่า SBR/PH/OC และจากการทดลองพบว่าการรวมตัวกันของ OC สามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนได้ และเมื่อเติม OC ลงใน SBR/PH พฤติกรรมที่แตกต่างกัน T_m ของ SBR/PH/OC เท่ากับของ SBR/PH ยกเว้นที่ OC เท่ากับ 30 phr เพิ่มขึ้นและอัตราการสลายตัวก็จะเพิ่มขึ้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อเติม OC ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและการรวมตัวของ OC กับ PH ทำให้ค่าอัตราการสลายตัวทางความร้อนสูง

M.H. Choi และคณะ [30] ได้ศึกษาสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของเรซินฟีนอลิกที่ถูกปรับปรุงโดยการทดลองนี้ได้นำ Diacid ใส่เข้ามาเพื่อปรับปรุงความเปราะของ Phenolic resin โดยที่แยกศึกษา 2 ส่วน ส่วนแรกศึกษาหาปริมาณของ Diacid ที่เหมาะสมในการปรับปรุง Phenolic resin โดยผสม Phenolic resin และ sebacic acid (DA8) เข้าด้วยกันแล้วสังเกตผลของปริมาณที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลผลการทดลองได้ค่า Tensile strength, Toughness และ Elongation at break ของ PFDA8 เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ DA8 ไม่เกิน 0.0014 mol และเมื่อดูสัณฐานวิทยาของ PFDA8 ถ้าใส่ DA8 มากกว่า 0.0014 mol มีการแยกวัฏภาคของส่วนที่เป็นผลึกเกิดขึ้น จึงสรุปได้ว่าปริมาณของ Diacid ที่เหมาะสมคือ 0.0014 mol และส่วนที่สองศึกษาหาความยาวของสายโซ่ของ Diacid ที่เหมาะสมโดยที่ปริมาณของ Diacid คือ 0.0014 mol ทดสอบสมบัติ Tensile และ Flexural ได้ค่า Tensile strength และ Toughness ค่อยๆ เพิ่มขึ้นถ้าสายโซ่ของ Diacid ยาว 2 ถึง 6 ส่วนค่า Elongation at break สูงที่สุดเมื่อสายโซ่ยาวเท่ากับ 8 แต่ค่า Tensile modulus ค่อยๆ ลดลงอย่างสม่ำเสมอค่า Flexural และ Maximum strain สูงที่สุดเมื่อสายโซ่ยาวเท่ากับ 6 และค่า Flexural modulus และเมื่อดูสัณฐานวิทยาของ PFDA6-14 เป็นเนื้อเดียวกันจึงสรุปได้ว่าความยาวของสายโซ่ของ Diacid ที่เหมาะสมนั้นเท่ากับ 6

Charoen Nakason และคณะ [31] ได้ศึกษาสมบัติการไหลของ Maleated natural rubber (MNR)/Polypropylene (PP) ผสมกับ Phenolic modified polypropylene (Ph-PP) และ Polypropylene-g-maleic anhydride (PP-g-MA) โดยเตรียม MNR จากยางธรรมชาติกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ด้วยกระบวนการหลอมเหลวภายใต้แรงเฉือนสูง ส่วน PP-g-MA และ Ph-PP สังเคราะห์ด้วยวิธีการหลอมเหลว อัตราส่วนระหว่าง MNR/PP ที่ใช้เท่ากับ 60/40 เตรียมด้วยกระบวนการผสมหลอมเหลว แล้วใช้ PP-g-MA และ Ph-PP ในปริมาณที่ต่างกัน คือ 3, 5, 10, 15 และ 20 % โดยน้ำหนักของ PP จากนั้นนำไปทดสอบการไหลพบว่า ความหนืดสูงสุดที่ปริมาณของ PP-g-MA และ Ph-PP เท่ากับ 0-5 % โดยน้ำหนักของ PP เมื่อเพิ่มปริมาณของของผสมมากกว่า 5 % โดยน้ำหนักของ PP สมบัติการไหลมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างส่วนที่สัมผัสพื้นผิวของวัฏภาค ทำให้ความเครียดเพิ่มมากขึ้นจึงนำไปสู่การลดขนาดของวัฏภาค PP ที่กระจายในเมทริก MNR อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณของของผสมเกินกว่าความเข้มข้นของไมเซลล์ที่เกิดจากการรวมในเมทริกของ MNR จึงทำให้ Shear stress และ Shear viscosity ลดลงเพราะไมเซลล์ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) ในพอลิเมอร์หลอมเหลว และแสดงสมบัติเป็น Pseudoplastic ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ปริมาณที่เหมาะสมในการผสม PP-g-MA กับ Ph-PP ที่ 5 % โดยน้ำหนักของ PP

2.8 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- สารเพิ่มการยึดติดแต่ละประเภทจะส่งผลต่อความหนืดและสมบัติเชิงกลต่างกัน
- นาโนคอมโพสิตที่ประกอบด้วยซิลิกา 1, 2 wt% มีค่า elastic modulus เพิ่มขึ้น แต่ 3wt% มี elastic modulus ลดลง
- ความเปราะของฟีนอลิกเรซินสามารถปรับปรุงได้โดยการผสมกับ Flexible diacid ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเล็ก
- เสถียรภาพทางความร้อนของยางสไตรีนบิวทาไดอีนสามารถปรับปรุงได้โดยการผสมกับฟีนอลิกเรซินและยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของความหนาแน่นเชื่อมโยง (crosslink density) ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอยู่ 2 ส่วน ซึ่งส่วนแรกคือ ศึกษาการสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน โดยสังเคราะห์ให้มีขนาดของน้ำหนักโมเลกุลสูง (Mw H0), กลาง (Mw M0) และต่ำ (Mw L0) และเติมสารเชื่อมโยงสารเพิ่มการยึดติด (Hexamethylenetetramine (HMTA)) ตั้งแต่ 0-10 phr และส่วนที่สองคือ ศึกษาสมบัติของยางผสมสูตร โดยผสมยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR), ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene Butadiene Rubber, SBR), ยางบิวทาไดอีน (Butadiene Rubber, BR), สารเติมแต่งต่างๆ และสารเพิ่มการยึดติดที่ต้องการศึกษาตามชนิดและปริมาณที่กำหนด จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางผสมสูตรตามปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ของยางผสมสูตร, สมบัติเชิงกล (Mechanical properties), และสมบัติการยึดติด (Tackiness) กับแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก โดยทดสอบแรงเฉือน (Lap shear)

3.1.สารเคมีที่ใช้

1. Phenol
2. Formaldehyde
3. Metal Salt
4. 50% Sodium Hydroxide
5. ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) เกรดยางแท่ง (STR L5)
บริษัท ไทยฮั้ว รับเบอร์ จำกัด
6. ยางเอสบีอาร์ (Styrene Butadiene Rubber, SBR) เกรด 1712
บริษัท บีเอสที อีลาสโตเมอร์ จำกัด
7. ยางบีอาร์ (Butadiene Rubber, BR) เกรด 268
บริษัท เอ็กซ์ซอล โมบิลเคมีคอล จำกัด
8. เขม่าดำ (Carbon black) เกรด N330
บริษัท ไทยคาร์บอน จำกัด
9. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เกรดการค้า
บริษัท จักรवालเคมี จำกัด
10. กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า
บริษัท P.T. Cisadane Raya Chemicals จำกัด
11. TMQ เกรดการค้า
บริษัท บีเอ็ม เบนเมเยอร์ จำกัด
12. 6PPD เกรดการค้า
บริษัท Double A Plus Intertrade จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. WingstayL เกรดการค้า
บริษัท OMNOVA Solution จำกัด
14. TBBS เกรดการค้า
บริษัท Flexsys N.V. จำกัด
15. TMTD เกรดการค้า
บริษัท Taminco N.V.
16. กำมะถัน (Surfer) เกรดการค้า
บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด
17. สารเพิ่มการยึดติด (Tackifier)
บริษัท Thai GCI Resitop จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพของสารเพิ่มการยึดติดประเภทฟีนอลิกเรซิน

สารเพิ่มการยึดติด	ลักษณะทางกายภาพ
1. Mw H0	ผงสีเหลือง
2. Mw M0	ผงสีเหลือง
3. Mw L0	ผงสีเหลือง
4. Mw L5	ผงสีเหลือง
5. Mw L10	ผงสีเหลือง
6. Sirfen BL302	ผงสีเหลือง
7. Struktol TH110	เม็ดสีส้มถึงน้ำตาล
8. PSM-9450	ผงสีเหลือง

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต บริษัท Thai GCI Resitop จำกัด

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดก้นกลมสี่คอ
2. ไบคอน
3. Heater
4. Condenser
5. Vacuum Pump
6. Thermometer
7. ปริมาณเครื่องแก้ว
8. เครื่อง เจลเพอร์มีเอชันโครมาโตกราฟี (Gel Permeation Chromatograph, GPC)
9. เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)
รุ่น LRM 200 บริษัท แล็บเทค เอ็นจิเนียร์ จำกัด
10. เครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine)
รุ่น For LP-2020 บริษัท แล็บเทค เอ็นจิเนียร์ จำกัด

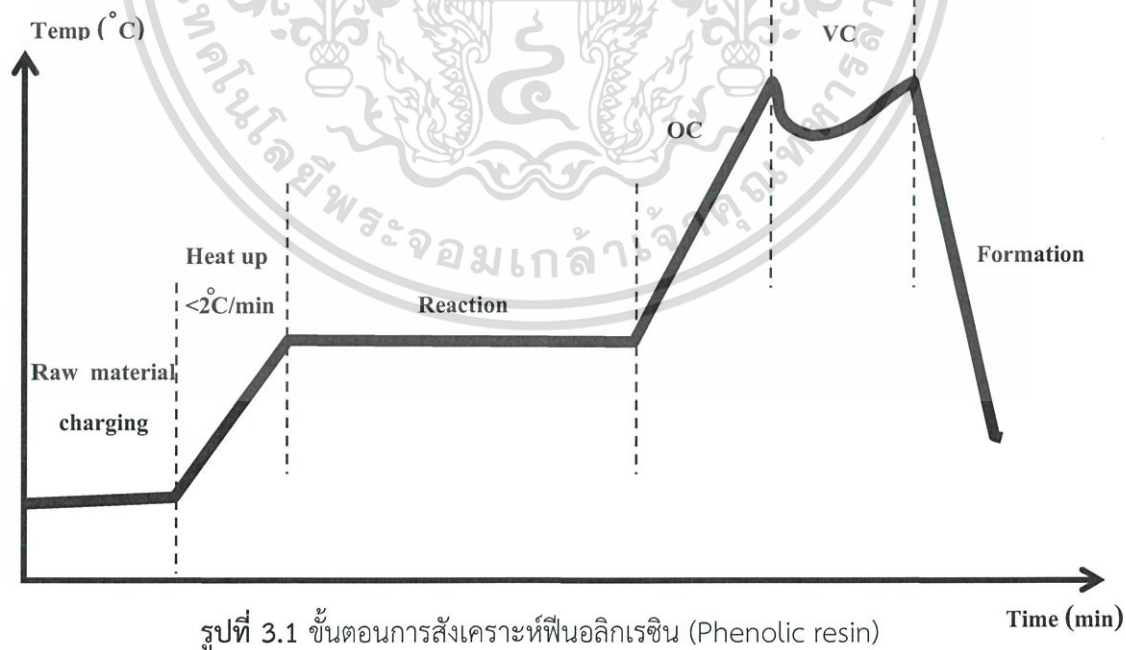
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Moonney viscometer)
รุ่น SMV-201 บริษัท ซิมัดซี จำกัด
12. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้งานหมุน (Moving Die Rheometer ; MDR)
รุ่น II F150 บริษัท นิชิโก โทวอจิ จำกัด
13. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine ; UTM)
รุ่น LR 5 K บริษัท ลอยด์อินสทรูเมนต์ จำกัด
14. เครื่องวัดความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester)
รุ่น SE-104DC บริษัท เอเอสฟาร์เอส พี เอ จำกัด
15. แม่แบบ (Mold) ขนาด 12 x 12 cm² หนา 2 mm
16. แม่แบบตัดรูปต้มเบล
17. แผ่นเหล็กเคลือบตีบุก มีขนาด 25 mm X 150 mm X 0.2 m

3.3 การสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน (Synthesis phenolic resin)

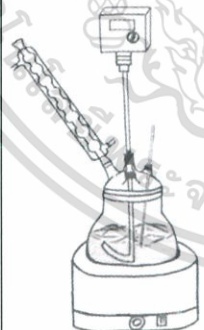
การสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซินมีทั้งหมด 5 ขั้นตอนดังนี้

1. Raw materials charging
2. Heat up
3. Reaction
4. Open condensation (OC)
5. Vacuum condensation (VC)
6. Formation

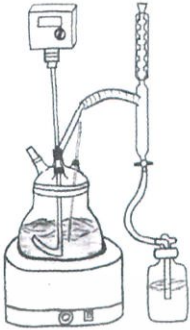

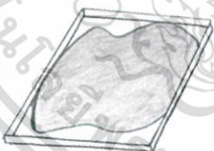


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin)

ขั้นตอน	วิธีการสังเคราะห์	สิ่งควบคุม	หมายเหตุ	
1.Raw materials charging		ชั่งสารตั้งต้นและสารเร่งปฏิกิริยาตามตารางที่ 3.3 แล้วใส่สารลงในขวดก้นกลมสี่คอ	น้ำหนักของสารตั้งต้นและสารเร่งปฏิกิริยา	-
2.Heat up		ปั่นกวนและให้อุณหภูมิไปเรื่อยๆเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา	Heat rate <math>< 2^{\circ}\text{C}/\text{min}^*</math> จนถึง 100°C	เกิดปฏิกิริยาการคายความร้อน
3.Reaction		มี 2 ขั้นตอน 1.เกิดการละลายของ Para-formaldehyde 2.จะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นอย่างช้าๆ โดยอุณหภูมิอยู่ในช่วง 100°C เป็นเวลา 200-300 นาที	อุณหภูมิ และ เวลา T_{bp} -Reflex	เกิดปฏิกิริยาการคายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอน	วิธีการสังเคราะห์	สิ่งควบคุม	หมายเหตุ
4.Open Condensation (OC)**		ให้ความร้อนจนถึงช่วง 150°C – 200°C เพื่อให้สารบริสุทธิ์และเข้มข้นมากขึ้น	อุณหภูมิ 100°C=น้ำ ออกจากระบบ 180°C=Free phenol—เกิดการสลายตัว
5.Vacuum Condensation (VC)		ลดความดันด้วยระบบสุญญากาศเพื่อเพิ่มแรงกดดัน (Driving force) ในการดึงน้ำออกจากระบบและทำให้สารมีความบริสุทธิ์มากขึ้น	น้ำหนักของน้ำ (Water) ที่ระเหยออกไป น้ำและฟินอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา
6.Formation		ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการต้มเดือดเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์แล้วให้เทเรซินลงในภาชนะเพื่อขึ้นรูปและลดอุณหภูมิของเรซินลงกระทั่งถึงจุดแข็งตัว	น้ำหนักของน้ำ (Water) ที่ระเหยออกไป -

* เพื่อความปลอดภัยจึงต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้มีความร้อนเกิดขึ้นในระบบมากเกินไป

** ต้มไปเรื่อยๆจนถึง 150 - 200 °C เพื่อระเหยเอา น้ำหรือโมเลกุลอื่นๆ ออกเพื่อให้สารบริสุทธิ์และเข้มข้นมากขึ้น

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์

สารเคมีที่ใช้	Quality (g)
1. Phenol	1000.00
2. Formaldehyde	204.45
3. Metal Salt	5.00
4. 50% Sodium Hydroxide	21.45

3.4 การทดสอบสมบัติของพีนอลิกเรซิน

3.4.1 Softening point by ring & ball method

หาจุดอ่อนตัวและมวลโมเลกุลของสารเพิ่มการยึดติดทางอ้อมทำได้ โดยนำสารเพิ่มการยึดติดมาหลอมใส่วงแหวน จากนั้นวางในอ่างน้ำมันพาราฟินที่ควบคุมอุณหภูมิ 120 °C และมีโลหะทรงกลมน้ำหนัก 10 กรัมวางอยู่บนวงแหวน และให้อุณหภูมิไปจนกระทั่งโลหะทรงกลมหล่นลงมา จากนั้นอ่านอุณหภูมิที่ได้ในหน่วยองศาเซลเซียส (Degree Celsius)



รูปที่ 3.2 การทดสอบหาจุดอ่อนตัว (Softening Point)

3.4.2 Viscosity by Ostwald viscometer

เป็นมาตรวัดความหนืดของเหลวที่มีปริมาตรที่แน่นอนและคงที่ ของเหลวจะถูกใส่ลงในหลอดแก้วรูปตัวยู ของเหลวจะถูกดันขึ้นไปในหลอดจนเหนือขีดที่ใช้วัดตรงข้อของกระเปาะ เมื่อปล่อยให้ของเหลวไหลลงจะวัดเวลาการไหล (Flow time) ของของเหลว โดยจับเวลาที่ของเหลวไหลผ่านขีดวัดด้านบนจนถึงขีดวัดด้านล่างนำเวลาการไหลที่ได้ไปคำนวณหาความหนืดต่อไป



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบหาความหนืด (Viscosity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 Melting point by SMP 30 model

หาจุดหลอมเหลวและมวลโมเลกุลของสารเพิ่มการยึดติด คือ อุนหภูมิที่สารเพิ่มการยึดติด สามารถเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวเมื่อได้รับความร้อน



รูปที่ 3.4 การทดสอบหาจุดหลอมเหลว (Melting point)

3.4.4 Flow by metal mold, Molding machine and thermostatic oven

ศึกษาค่าระยะการไหลของสารเพิ่มการยึดติด วัดความสามารถในการไหลตัวของสารเพิ่มการยึดติดเมื่อได้รับความร้อน ณ สภาวะที่กำหนด แล้วอัดสารเพิ่มการยึดติดเป็นเม็ดทรงกระบอก แล้วนำไปวางบนแผ่นกระจก จากนั้นอบเป็นเวลา 3 นาที ที่อุณหภูมิ 125 °C แล้วเอียงแผ่นกระจก ทำมุม 30° ทิ้งไว้ 20 นาที วัดค่าความยาวของสารเพิ่มการยึดติดที่ไหลได้ในหน่วยมิลลิเมตร



รูปที่ 3.5 การทดสอบหาระยะการไหล (Flow)

3.4.5 Gel time by hotplate

หาค่าเวลาในการเกิดเจล โดยวางสารเพิ่มการยึดติดบน Hotplate ที่อุณหภูมิ 150 °C แล้วใช้เกียงกดบัสลงบนเนื้อสารเพิ่มการยึดติด จนกว่าสารเพิ่มการยึดติดเกิดการเชื่อมโยงโดยเปลี่ยนจาก Thermoplastic เป็น Thermoset



รูปที่ 3.6 การทดสอบหาเวลาที่เกิดการเชื่อมโยง (Gel time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.6 Water content by Karl Fischer titrator–metrohm

หาปริมาณของน้ำในสารเพิ่มการยึดติด ทำได้โดยการไทเทรตแบบ Karl-Fischer โดยใช้ตัวทำละลาย Methanol : Water : Resin (1 : 2 : 1) ซึ่งสามารถใช้หาได้ทั้งตัวอย่างที่มีความชื้นและปริมาณน้ำที่อยู่ในช่วง ppm สารตัวอย่างที่ใช้ควรจะเป็นของเหลวหรือของแข็งที่สามารถละลายได้หรือน้ำสามารถระเหยออกมาโดยใช้ความร้อนหรือการสกัด



รูปที่ 3.7 การทดสอบหาองค์ประกอบของน้ำในสารเพิ่มการยึดติด (Water content)

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การเตรียมยางเชื่อมโยง

1. ชั่งยางและสารเคมี ตามตารางที่ 3.4
2. ผสมยาง โดยใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ที่อุณหภูมิห้องทำการกรีดและพับยาง (Cut and Fold) อย่างต่อเนื่องเพื่อให้สารกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกัน
3. ตัดแผ่นยางที่ทำการผสมสารถึงลำดับที่ 10 เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ $50 \times 50 \text{ mm}^2$ จำนวน 2 แผ่น เพื่อไปวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) โดยเครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) ที่อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทดสอบ 4 นาที [ML 1+4(100°C)]
4. ใส่ส่วนผสมลำดับที่ 11 ถึง 13 ซึ่งก็คือตัวเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerator) และสารเชื่อมโยง (Curing agent) โดยใช้เวลาผสม 5 นาที จากนั้นรีดยางออกมาเป็นแผ่น
5. ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ $50 \times 50 \text{ mm}^2$ จากนั้นนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้งานหมุน (Moving Die Rheometer) ที่อุณหภูมิ 150°C ทอร์ก 100 kgf.cm เพื่อหาเวลาก่อนการเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) เวลาเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) และดัชนีการเชื่อมโยง (Cure Rate Index, CRI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 สูตรยางผสมสูตรที่ใช้ในการศึกษาน้ำหนักโมเลกุล ปริมาณของHexamethylenetetramine (HMTA) และเปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์กับสารเพิ่มการยึดติดที่สังเคราะห์ขึ้น และเวลาที่ใช้ในการผสม [3]

ลำดับ	ส่วนประกอบ	phr*	เวลา (นาที)
1	NR	20.0	1
2	SBR	82.5	2
3	BR	20.0	2
4	Carbon black	60.0	15
5	ZnO	3.0	
6	Steric acid	2.0	
7	TMQ	1.0	
8	6PPD	2.5	
9	WingstayL	1.0	
10	Tackifiers	0,5	5
11	TBBS	1.0	
12	TMTD	0.3	
13	S	1.8	

*หมายเหตุ phr ย่อมาจาก part per hundred of rubber

3.5.1.1 ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ของสารเพิ่มการยึดติดที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการยึดติดของยางเชื่อมโยง

ทำการผสมเช่นเดียวกับตอนที่ 3.5.1 โดยใช้สารเพิ่มการยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) ต่างกัน (น้ำหนักโมเลกุลสูง, กลาง, และต่ำ) เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติการยึดติด

3.5.1.2 ศึกษาผลของ Hexamethylenetetramine (HMTA) ของสารเพิ่มการยึดติดที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการยึดติดของยางเชื่อมโยง

ทำการผสมเช่นเดียวกับตอนที่ 3.5.1 โดยใช้สารเพิ่มการยึดติดที่มี HMTA 0, 5 และ 10 phr เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติการยึดติด

3.5.1.3 การเปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการยึดติดของยางเชื่อมโยง

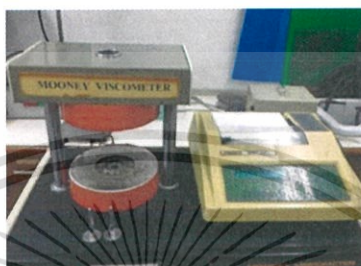
ทำการผสมเช่นเดียวกับตอนที่ 3.5.1 โดยใช้สารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติการยึดติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ศึกษาสมบัติของยางเชื่อมโยง

3.6.1 การทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)

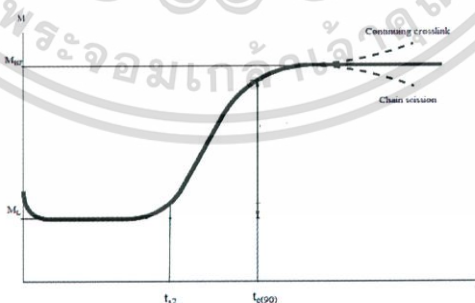
การหาค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ตามมาตรฐาน ASTM D1646 โดยตั้งอุณหภูมิของเครื่อง Mooney viscosity ที่ 100°C ใช้จานหมุนขนาดใหญ่ (L size) เวลาในการอุ่นยาง 1 นาที และเวลาในการทดสอบ 4 นาที [ML 1+4(100°C)] โดยความหนาของยาง คือ 10 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ทำการหุ้มยางด้วยพลาสติกก่อนนำเข้าทดสอบ



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)

3.6.2 การหาเวลาเชื่อมโยงยางผสมสูตร (Cure time)

โดยใช้เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบโรตารี่จานหมุน (Moving Die Rheometer, MDR) มาตรฐาน ASTM D2084 วิธีการทดสอบคือตัดยางผสมสูตรเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดประมาณ $50 \times 50 \text{ mm}^2$ วางบนโรเตอร์ ทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C ทอร์ก 100 kgf.cm ปิดแผ่นอัดลง จากนั้นเปิดเครื่องให้โรเตอร์หมุนบิดไป-มาทำมุม 1 องศา เครื่องจะบันทึกค่าทอร์กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการทดสอบ ซึ่งสามารถบันทึกและคำนวณค่าต่างๆ ได้แก่ ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque, M_L), แรงบิดสูงสุด (Maximum torque, M_H), เวลาก่อนการเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}), เวลาเชื่อมโยง (Cure time, $t_{C(90)}$) และดัชนีการเชื่อมโยง (Cure Rate Index, CRI)



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย t_{s2} คือ เวลาเป็นนาทีที่แรงบิดเพิ่มขึ้น 2 หน่วยจากค่าแรงบิดต่ำสุด
 $t_{c(90)}$ คือ เวลาเป็นนาทีที่แรงบิดเพิ่มขึ้น 90% ของค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้น ($M_H - M_L$)
 โดย $t_{c(90)}$ คำนวณจาก

$$t_{c(90)} = ML + [90(M_H - M_L)/100]$$

CRI คือ ดัชนีการเชื่อมโยง คำนวณจาก

$$CRI = 100/(t_{c(90)} - t_{s2})$$



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบโรจานหมุน (Moving Die Rheometer, MDR)

3.6.3 ทดสอบสมบัติเชิงกล

3.6.3.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

เครื่องที่ใช้ทดสอบคือเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UMT) มาตรฐาน ASTM D412 โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell shape) โดยกำหนดสภาวะการทดสอบ ดังนี้

ความเร็วที่ใช้ดึง	500	mm/min
ระยะทดสอบ (Gauge length)	35	mm
โหลดเซลล์ (Load cell)	5	kN
จำนวนตัวอย่างทดสอบ	6	ชิ้น

- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) หรือค่าความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง คำนวณจาก

$$\text{Tensile strength (MPa)} = F/A$$

เมื่อ F คือ แรงดึงสูงสุด ณ จุดขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (mm^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) คำนวณจาก

$$\text{Elongation at break (\%)} = 100 \times [(L - L_0) / L_0]$$

เมื่อ L คือ ความยาวสุดท้าย ณ จุดขาด (mm)

L_0 คือ ความยาวเริ่มต้น (mm)

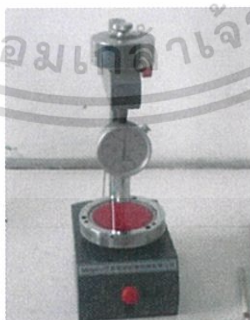
- ค่ามอดูลัสของยาง (Rubber modulus, M_{300}) คือ ค่าความเค้น (Stress) ที่ เปอร์เซ็นต์ความเครียด 300 %



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM)

3.6.3.2 การทดสอบความแข็งกด (Hardness test)

ทดสอบโดยเครื่องทดสอบความแข็งกดแบบน้ำหนักคงที่ (Dead load hardness tester) ชนิด shore A มาตรฐาน ASTM D2240 ชั้นงานที่ทดสอบต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 mm กดชั้นงานค้างไว้เป็นเวลา 3 วินาที โดยทำการกดชั้นงานอย่างน้อย 15 จุดต่อ 1 ชั้นงาน



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบน้ำหนักคงที่ชนิด shore A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ศึกษาสมบัติของสารเพิ่มการยึดติดกับยางเชื่อมโยง

3.7.1. การทดสอบแรงเฉือน (Lap shear test)

การทดสอบแรงเฉือนจะทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UMT) ตามมาตรฐาน ASTM D 1002 โดยเตรียมแผ่นเหล็กเคลือบติบูกที่มีขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น นำยางที่จะทดสอบมาแปะติดบนแผ่นเคลือบติบูกแล้วประกบด้วยแผ่นเหล็กเคลือบติบูกอีกแผ่นเตรียมตัวอย่างจำนวน 6 ชิ้น และนำไปวัดสมบัติการยึดติดโดยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ สภาวะที่ทำการทดสอบ คือ

โหลดเซลล์ (Load Cell)	1	kN
ความเร็ว (Speed)	1.3	mm/min
ระยะทดสอบ (Gauge Length)	220	mm



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบแรงเฉือน

3.8 สรุปปัจจัยที่ศึกษา

1. ทำการสังเคราะห์ตัวอย่างพีนอลิกเรซินที่สามารถใช้เป็นสารเพิ่มการยึดติดสำหรับยาง
2. ศึกษาน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight), ผลของ Hexamethylenetetramine (HMTA) และเปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์กับพีนอลิกเรซินชนิดปรับปรุงที่ทำให้ยางมีประสิทธิภาพในการยึดติดที่ดีที่สุด
3. ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงยาง (Cure characteristics), สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติการยึดติด (Tackiness) กับแผ่นเหล็กเคลือบติบูก

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซินที่ใช้เป็นสารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) ในอุตสาหกรรมยาง เช่น ยางติดกับโลหะ โดยเน้นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยาง เช่น น้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มการยึดติดที่ต่างกัน ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลสูง (Mw H0), กลาง (Mw M0) และต่ำ (Mw L0) และปริมาณของ HMTA ตั้งแต่ 0, 5 และ 10 phr สามารถแสดงผลวิจัยได้ ดังนี้

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ฟีนอลิกเรซิน

จากการสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซินที่สภาวะต่างๆ เพื่อให้ได้สารประกอบฟีนอลิกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน รวมทั้งมีการศึกษาผลของการใช้ HMTA เมื่อสังเคราะห์ได้แล้วจึงนำมาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารเพิ่มการยึดติดที่สังเคราะห์ขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Struktol TH110, Sirfen BL302 และ PSM 9450

4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC)

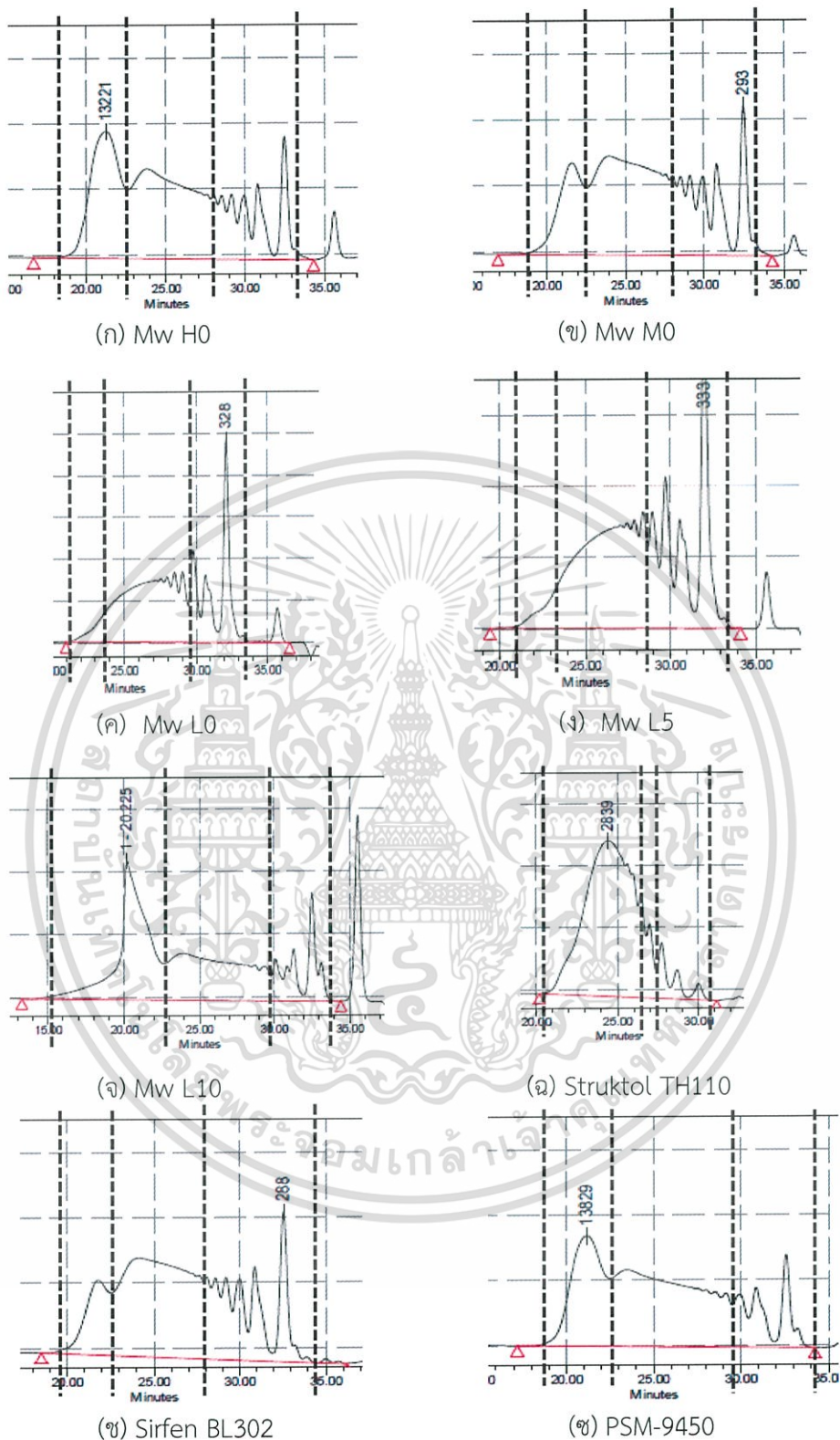
เทคนิค GPC เป็นวิธีการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (Polydispersity index : PDI) ของสารเพิ่มการยึดติด โดยใช้ Tetrahydrofuran (THF) เป็นตัวละลาย จากโครมาโตแกรม (Chromatogram) แสดงถึงการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มการยึดติด โดยแบ่งเป็นส่วนของโมเลกุลขนาดใหญ่และโมเลกุลขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1-ก, 4.1-ข และ 4.1-ค เป็นการเปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดที่น้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ได้แก่ Mw H0, Mw M0 และ Mw L0 พบว่าปริมาณของน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำของ Mw H0 มีค่าสูงกว่า Mw M0 และ Mw L0 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Mw L0) ที่มีปริมาณ HMTA แตกต่างกัน ปริมาณ 0, 5 และ 10 phr แสดงดังรูปที่ 4.1-ค, 4.1-ง และ 4.1-จ พบว่าปริมาณของ HMTA ส่งผลต่อปริมาณของน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำของสารเพิ่มการยึดติด โดยปริมาณของน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำของ Mw L10 มีค่าสูงกว่า Mw L0 และ Mw L5 แสดงว่า Mw L10 ถูกเชื่อมโยงด้วย HMTA จึงส่งผลให้ปริมาณของน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สูงที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ได้แก่ Struktol TH110, Sirfen BL302 และ PSM-9450 จากรูปที่ 4.1-ฉ พบว่าปริมาณของน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำของ Struktol TH110 มีค่าสูงแสดงว่าเป็นสารเพิ่มการยึดติดที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่มาก จากรูปที่ 4.1-ซ พบว่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ Sirfen BL302 มีค่าใกล้เคียงกับ Mw M0 และจากรูปที่ 4.1-ซ พบว่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ ของ PSM-9450 มีค่าใกล้เคียงกับ Mw H0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กราฟ GPC แสดงการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มการยึดติดชนิดต่างๆ (ก) Mw H0, (ข) Mw M0, (ค) Mw L0, (ง) Mw L5, (จ) Mw L10, (ฉ) Struktol TH110, (ช) Sirfen BL-302 และ (ซ) PSM-9450

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 สมบัติต่างๆ ของสารเพิ่มการยึดติดประเภทฟีนอลิกเรซิน ตามมาตรฐาน JIS

การทดสอบตามมาตรฐาน Japanese Industrial Standards (JIS) ซึ่งมีการทดสอบต่างๆ ได้แก่ จุดอ่อนตัว (Softening point), ความหนืด (Viscosity), ปริมาณของน้ำในเรซิน (Water content), จุดหลอมเหลว (Melting point), ค่าระยะการไหล (Flow) และค่าเวลาในการเกิดเจล (Gel time) โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานสารเพิ่มการยึดติด ตามมาตรฐาน Japanese Industrial Standards (JIS)

ชนิด	สมบัติ					
	Softening point (°C) ^[a]	Viscosity (cP) ^[b]	Water content (%) ^[c]	Melt Point (°C) ^[d]	Flow (mm) ^[e]	Gel time (sec) ^[f]
Mw H0	103.0	46.0	0.36	75	ไหลเกิน กระจก	N/A
Mw M0	101.5	30.2	0.34	70	ไหลเกิน กระจก	N/A
Mw L0	89.0	14.3	0.23	67	ไหลเกิน กระจก	N/A
Mw L5	N/A	14.3	0.23	68	>140	>278
Mw L10	N/A	14.3	0.23	68	111	124
Sirfen BL302	N/A	28.24	3.79	60	35	70
Struktol TH110	105.0	N/A	N/A	65	98	N/A
PSM-9450	91.5	55.7	0.32	69	ไหลเกิน กระจก	N/A

หมายเหตุ : [a] Softening point by Ring & ball method
 [b] Viscosity by Ostwald viscometer
 [c] Water Content by Karl Fischer Titrator–Metrohm
 [d] Melting Point by SMP 30 model
 [e] Flow by Metal Mold , Molding Machine and Thermostatic Oven
 [f] Gel time by Hotplate

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบหาค่าจุดอ่อนตัวพบว่า Struktol TH110 มีค่าจุดอ่อนตัวสูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณของน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีค่าสูงที่สุด แสดงว่า สารเพิ่มการยึดติดมีโมเลกุลขนาดใหญ่ในปริมาณมาก จึงทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเคลื่อนที่ของสายโซ่สูง ในทางตรงกันข้าม Mw L0 ซึ่งมีปริมาณของน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีค่าต่ำสุด แสดงว่าสารเพิ่มการยึดติดมีโมเลกุลขนาดเล็กปริมาณมาก จึงใช้อุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของสายโซ่ต่ำ และจากการวิเคราะห์หาค่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC ดังรูปที่ 4.1-ก และ รูปที่ 4.1-ข พบว่า Mw H0 และ PSM-9450 มีรูปแบบการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่ใกล้เคียงกัน แต่ค่าจุดอ่อนตัวของ Mw H0 มีค่าสูงกว่า PSM-9450 คาดว่าเป็นผลมาจากขั้นตอนการสังเคราะห์ Mw H0 อาจมีปริมาณพินอลมากกว่า PSM-9450 จึงทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยากเนื่องจากมีวงอะโรมาติกมาก ส่วนสารเพิ่มการยึดติดชนิด Mw L5, Mw L10 และ Sirfen BL302 ไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากมี HMTA ที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดการเชื่อมโยง จึงทำให้สายโซ่เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติจนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้

จากการทดสอบหาค่าความหนืด พบว่า Mw H0 มีค่า Viscosity ต่ำกว่า PSM-9450 คาดว่าเป็นผลมาจากขั้นตอนการสังเคราะห์ Mw H0 อาจมีตัวทำละลายตกค้างจากการเกิดปฏิกิริยา จึงส่งผลต่อค่าความหนืดให้ลดต่ำลง ส่วนสารเพิ่มการยึดติดชนิด Mw M0 และ Sirfen BL302 มีค่าความหนืดใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับปริมาณของน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.1-ข และ รูปที่ 4.1-ค และสารเพิ่มการยึดติดชนิด Mw L0, Mw L5, Mw L10 มีค่าความหนืดใกล้เคียงกันและต่ำที่สุด เนื่องจากเป็นสารเพิ่มการยึดติดที่มีโมเลกุลขนาดเล็กมากกว่าสารเพิ่มการยึดติดชนิดอื่นและสารเชื่อมโยงสารเพิ่มการยึดติด (HMTA) ยังไม่เกิดปฏิกิริยา

จากการทดสอบหาปริมาณของน้ำในสารเพิ่มการยึดติด (Water content) พบว่า Mw H0, Mw M0, Mw L0, Mw L5, Mw L10 และ PSM-9450 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่พบว่า Sirfen BL302 มีปริมาณของน้ำในสารเพิ่มการยึดติดสูงที่สุด คาดว่าน้ำที่พบเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction) ของสารเพิ่มการยึดติดเนื่องจากเก็บไว้เป็นเวลานาน ส่วน Struktol TH110 ไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดไม่ละลายในตัวทำละลาย (Methanol : H₂O)

จากการทดสอบหาค่าจุดหลอมเหลว พบว่าสารเพิ่มการยึดติดที่สังเคราะห์ ได้แก่ Mw H0, Mw M0, Mw L0, Mw L5 และ Mw L10 มีค่าสูงกว่าสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Sirfen-BL302, Struktol TH 110 และ PSM-9450 คาดว่าสารเพิ่มการยึดติดที่สังเคราะห์ขึ้นมีการใช้ปริมาณสารตั้งต้นพินอลมากกว่าสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ เนื่องจากโครงสร้างของพินอลเป็นวงอะโรมาติก จึงทำให้ต้องใช้อุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงกว่าสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์

จากการทดสอบค่าระเหยการไหล พบว่าสารเพิ่มการยึดติดชนิด Mw H0, Mw M0, Mw L0 และ PSM-9450 มีค่าระเหยการไหลสูงมากจนไม่สามารถระบุค่าได้ แสดงถึงค่าความหนืดที่ต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดไม่เกิดการเชื่อมโยง แต่ Struktol TH110 สามารถระบุค่าระยะเวลาไหลได้ เนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดชนิดนี้มีส่วนของสารโมเลกุลใหญ่ในปริมาณที่มากกว่าสูตรข้างต้น จึงส่งผลให้มีความหนืดที่สูงขึ้นและสามารถหาค่าระยะเวลาไหลได้ ส่วนสารเพิ่มการยึดติดที่มีการเติม HMTA ได้แก่ Mw L5, Mw L10 และ Sirfen BL302 (มีองค์ประกอบของ HMTA) พบว่าปริมาณ HMTA ส่งผลให้ค่าระยะเวลาไหลลดลง แสดงถึงค่าความหนืดที่สูงมากขึ้น โดย Sirfen BL302 มีค่าระยะเวลาไหลต่ำที่สุด ซึ่งคาดว่ามีการเติมสาร HMTA ในปริมาณที่มาก

จากการทดสอบหาค่าเวลาการเกิดเจล พบว่าสารเพิ่มการยึดติดชนิด Mw H0, Mw M0, Mw L0, Struktol TH110 และ PSM-9450 ไม่สามารถหาค่าเวลาการเกิดเจลได้ เนื่องจากไม่มีสารเชื่อมโยง HMTA ส่วนสารเพิ่มการยึดติดที่มีการเติม HMTA ได้แก่ Mw L5, Mw L10 และ Sirfen BL302 พบว่าปริมาณ HMTA ส่งผลให้ใช้ค่าเวลาการเกิดเจลเร็วขึ้น โดย Sirfen BL302 มีค่าเวลาการเกิดเจลเร็วที่สุด ซึ่งเป็นผลจากการเชื่อมโยงของ HMTA กลไกการเชื่อมโยงของ HMTA ในสารเพิ่มการยึดติด แสดงดังรูปที่ 2.24

4.2 การศึกษาผลของสารเพิ่มการยึดติดในทางผสมสูตร

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองสารเพิ่มการยึดติดในทางผสมสูตร โดยใช้สารเพิ่มการยึดติด ได้แก่ Sirfen BL302, Strukitol TH110, PSM-9450, Mw H0, Mw M0, Mw L0, Mw L5 และ Mw L10 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านการยึดติด โดยควบคุมปริมาณที่ใช้ที่ 5 phr นอกจากศึกษาสมบัติการยึดติดแล้ว ยังทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของยางภายหลังจากการเติมสารเพิ่มการยึดติดลงไป เช่น ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และลักษณะการเชื่อมโยงยาง (Cure characteristics) และสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ในการนำเสนอผลการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 3 ตอน ดังนี้

4.2.1 การศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ของสารเพิ่มการยึดติดที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการยึดติดของยางเชื่อมโยง

จากการศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) โดยใช้สารเพิ่มการยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) ต่างกัน ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลสูง (Mw H0), กลาง (Mw M0) และต่ำ (Mw L0) เพื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกลและสมบัติการยึดติด ซึ่งสารเพิ่มการยึดติดที่ดีเมื่อผสมเข้าไปในยางไม่ควรหน่วงการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง เพราะอาจทำให้ผู้ผลิตต้องใช้เวลาในการปรับปรุงสูตรยาง เช่น เพิ่มสารเชื่อมโยง และอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามถ้าสารเพิ่มการยึดติดทำให้เกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้นก็จะทำให้ผู้ผลิตลดต้นทุนได้ โดยการลดปริมาณสารเร่งการเชื่อมโยง (Accelerators) ที่มีราคาแพง

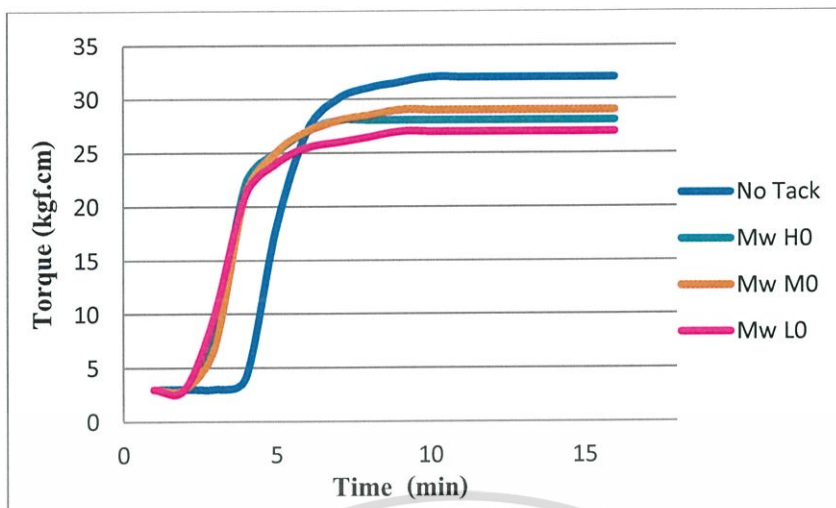
จากการทดลองพบว่าสารเพิ่มการยึดติดทั้ง 3 ชนิด ส่งผลต่อความหนืดมูนนี่และลักษณะการเชื่อมโยง ดังตารางที่ 4.2

จากตารางที่ 4.2 พบว่ายางที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติดมีค่าความหนืดมูนนี่ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด (No Tack) อาจเนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิทดสอบ ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) จะเริ่มหลอมและแทรกตัวเข้าไปภายในช่องว่างระหว่างสายโซ่ของยาง ส่งผลให้สายโซ่ของยางขยับได้ง่ายขึ้น ค่าความหนืดมูนนี่จึงลดต่ำลงเพียงเล็กน้อย และจากการเปรียบเทียบเมื่อเติมสารเพิ่มการยึดติดที่น้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน พบว่า Mw L0 มีค่าความหนืดมูนนี่ที่สูงกว่า Mw H0 และ Mw M0 ตามลำดับ เนื่องจาก Mw L0 เป็นสารเพิ่มการยึดติดที่มีโมเลกุลขนาดเล็กปริมาณมากจึงเกิดการกระจายตัวและเคลื่อนที่ของสายโซ่ได้ดี

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนืดมูนนี่และลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน

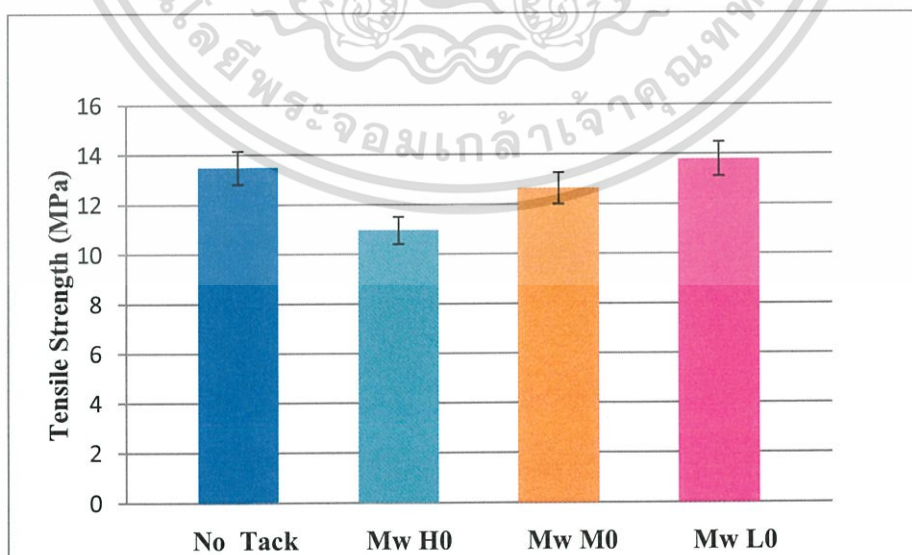
สารเพิ่มการยึดติด	Mooney ML 1+4 (100°C)	Torque (kgf.cm)		Scorch time, t_{s2} (min.sec)	Cure time t_{c90} (min.sec)	Cure rate index CRI (min^{-1})
		M_L	M_H			
No Tack	52.60	3	32	4.20	6.10	52.63
Mw H0	41.40	3	27	2.90	4.50	62.50
Mw M0	48.40	3	29	3.00	5.30	43.48
Mw L0	50.20	3	27	2.70	5.20	40.00

จากรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบยางที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติดกับยางที่เติมสารเพิ่มการยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกัน ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลสูง (Mw H0), กลาง (Mw M0) และต่ำ (Mw L0) พบว่าเวลาที่เริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) ของยางที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติดเกิดเร็วกว่ายางที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด อาจเนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดตระกูลฟีนอลิกเรซินสามารถทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงได้ สารเพิ่มการยึดติดยังส่งผลต่อค่าทอร์คสูงสุดด้วย เนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดเป็นประเภทฟีนอลิกเรซินเมื่อได้รับความร้อนแล้วอาจเกิดการหน่วงปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของระบบก้ำมะถันโดยจะเข้าจับกับก้ำมะถันที่เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระขณะที่ได้รับความร้อนในกระบวนการเชื่อมโยง ส่งผลให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ของยางลดลง



รูปที่ 4.2 กราฟลักษณะการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันเทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด

จากรูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบยางที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกัน ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลสูง (Mw H0), กลาง (Mw M0) และต่ำ (Mw L0) พบว่าค่าความแข็งแรงดึง มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด เนื่องจากเมื่อเติมสารเพิ่มการยึดติดเข้าไปในยาง ส่งผลให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างยางกับสารเพิ่มการยึดติด และจากการเปรียบเทียบเมื่อเติมสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน พบว่าเมื่อสารเพิ่มการยึดติดมีน้ำหนักโมเลกุลสูง (Mw H0) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูง อาจทำให้สารเพิ่มการยึดติดเกิดการหลอมที่ไม่สมบูรณ์ จึงส่งผลให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างยางกับสารเพิ่มการยึดติดและเกิดการกระจายตัวได้ไม่ดี จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของ Mw H0 ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ Mw M0 และ Mw L0



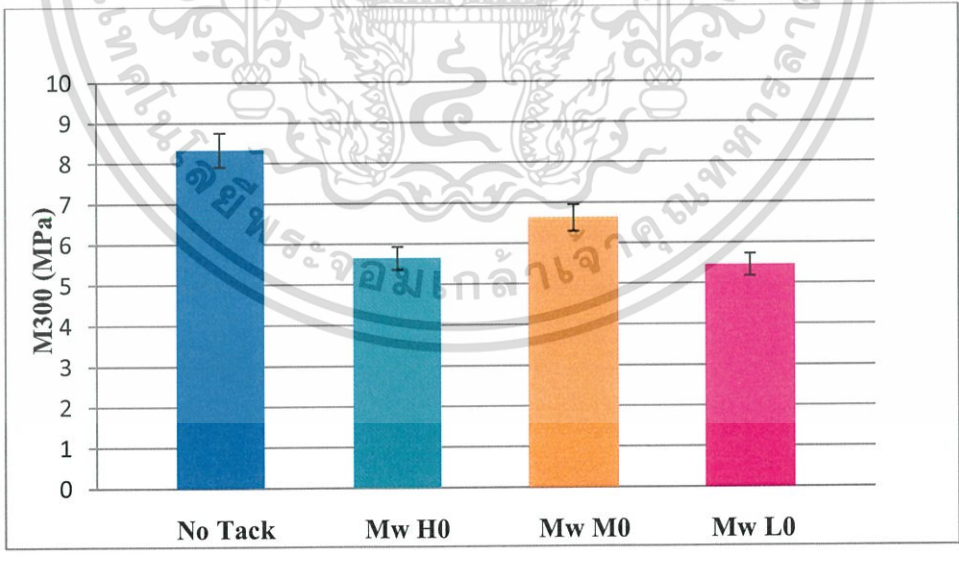
รูปที่ 4.3 กราฟการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันเทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

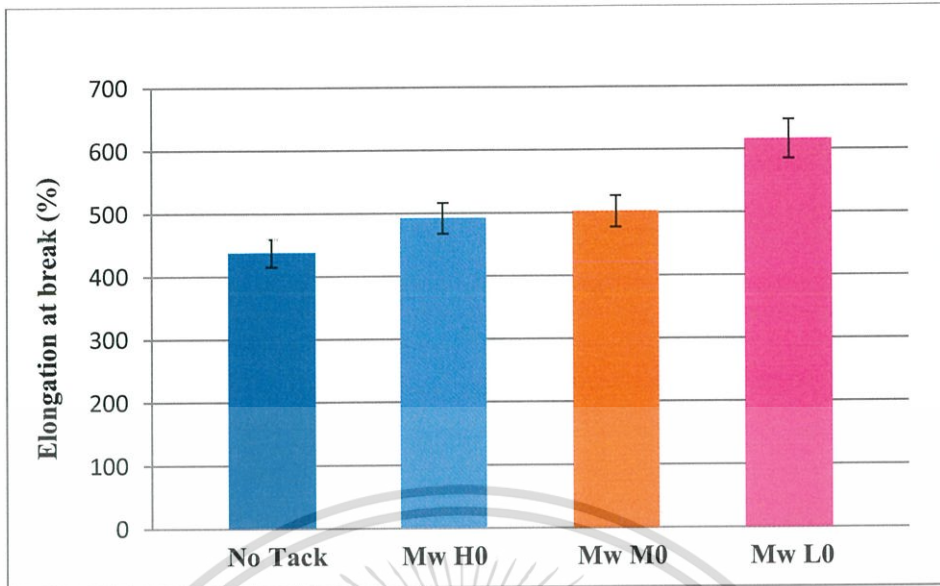
จากรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลสูง (Mw H0), กลาง (Mw M0) และต่ำ (Mw L0) พบว่าค่ามอดูลัสที่ 300 (M_{300}) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด เนื่องจากเมื่อเติมสารเพิ่มการยึดติดเข้าไปในยางทำให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างยางกับสารเพิ่มการยึดติดจึงส่งผลให้ค่ามอดูลัส 300 (M_{300}) มีแนวโน้มลดลง โดยสารเพิ่มการยึดติดที่น้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไม่ส่งผลต่อค่ามอดูลัสที่ 300 (M_{300}) อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดที่เติมไม่ได้มีปริมาณที่มากพอที่จะทำให้ค่ามอดูลัสที่ 300 (M_{300}) เกิดการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.5 พบว่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด เนื่องจากเมื่อเติมสารเพิ่มการยึดติดจะส่งผลให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ของยางลดลง ความสามารถในการดึงยึดของสายโซ่จึงสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน พบว่า Mw L0 มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) สูงที่สุด เนื่องจาก Mw L0 มีโมเลกุลขนาดเล็กปริมาณมาก กระจายตัวได้ดี จึงเกิดการแยกวัฏภาคของยางกับสารเพิ่มการยึดติดน้อยกว่าสารเพิ่มการยึดติดชนิดอื่นๆ

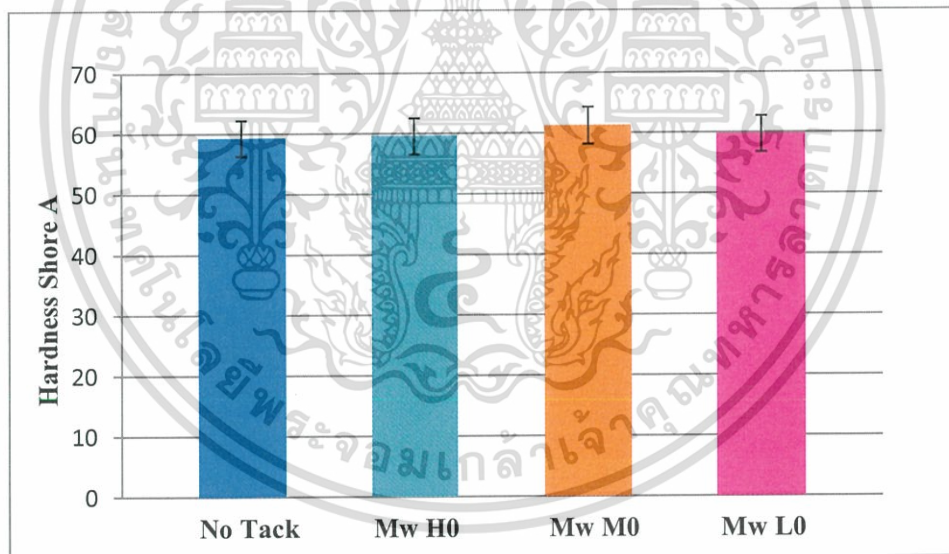
จากรูปที่ 4.6 พบว่าสารเพิ่มการยึดติดที่น้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไม่ทำให้ค่าความแข็งกด (Hardness shore A) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดที่เติมไม่ได้มีปริมาณที่มากพอที่จะทำให้มีความแข็งกดมากขึ้น



รูปที่ 4.4 กราฟการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสที่ 300 % (M_{300}) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันเทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด



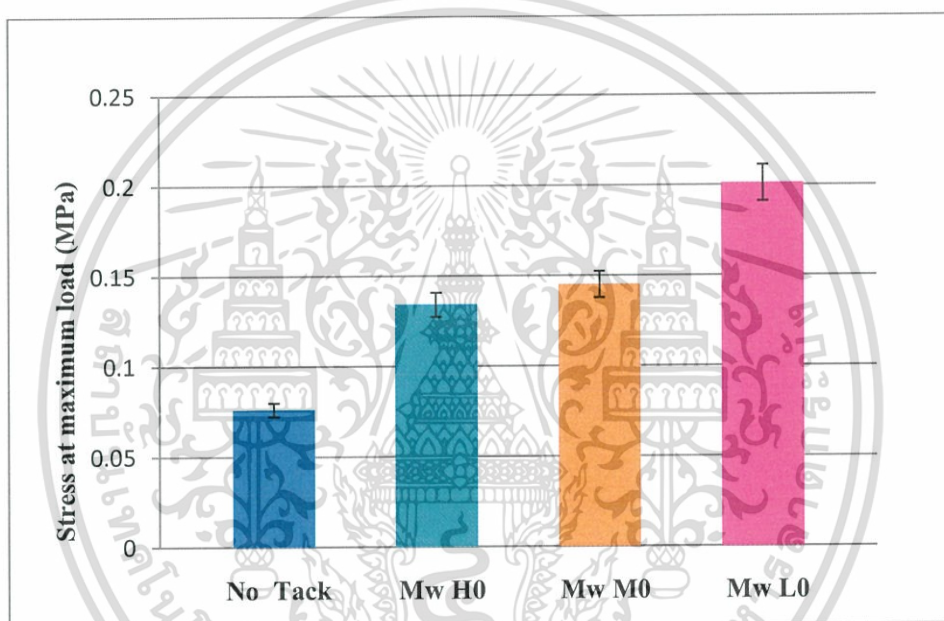
รูปที่ 4.5 กราฟการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันเทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด



รูปที่ 4.6 กราฟการเปรียบเทียบความแข็งกด (Hardness Shore A) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันเทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักรโมเลกุลที่ต่างกัน ได้แก่ น้ำหนักรโมเลกุลสูง (Mw H0), กลาง (Mw M0) และต่ำ (Mw L0) พบว่าประสิทธิภาพการยึดติดระหว่างยางกับแผ่นเหล็กเคลือบตีบุก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด เนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดนั้นเป็นสารประเภทฟีนอลิกเรซิน ซึ่งมีความเป็นขี้จากวงอะโรมาติกจึงส่งผลให้ยางผสมสูตรมีความเป็นขี้ด้วย จึงเกิดการยึดติดกับแผ่นเหล็กเคลือบตีบุกได้ดีกว่ายางที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักรโมเลกุลที่ต่างกัน พบว่า Mw L0 จะมีประสิทธิภาพการยึดติดระหว่างยางกับแผ่นเหล็กเคลือบตีบุกสูงที่สุด เนื่องจาก Mw L0 เป็นสารเพิ่มการยึดติดที่มีโมเลกุลขนาดเล็กปริมาณมากจึงเกิดการกระจายตัวในยางได้ค่อนข้างดี จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการยึดติดกับแผ่นเหล็กเคลือบตีบุกสูงที่สุด



รูปที่ 4.7 กราฟการเปรียบเทียบการยึดติดระหว่างยางกับแผ่นเหล็กเคลือบตีบุก แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดที่มีน้ำหนักรโมเลกุลที่ต่างกันเทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด

4.2.2 การศึกษาผลของ HMTA ของสารเพิ่มการยึดติดที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการยึดติดของยางเชื่อมโยง

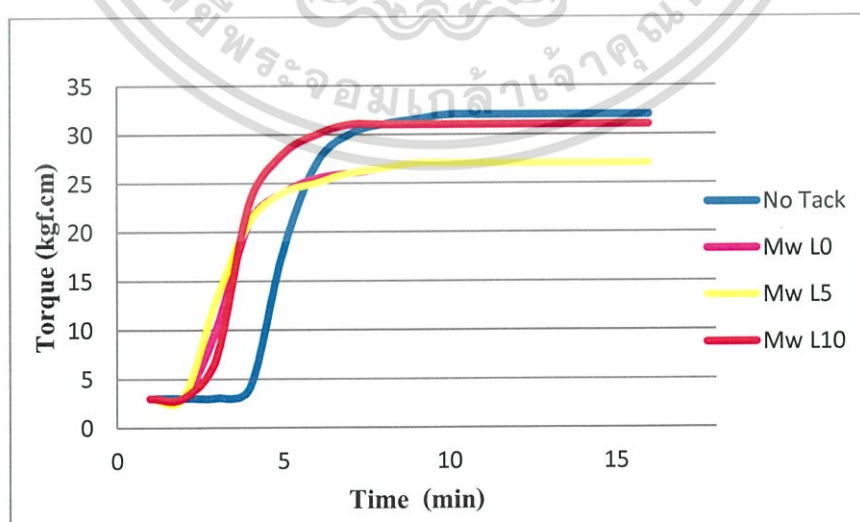
จากการศึกษาสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักรโมเลกุลต่างกัน พบว่าชนิดน้ำหนักรโมเลกุลต่ำ (Mw L0) ให้ผลการยึดติดกับแผ่นเหล็กเคลือบตีบุกสูงที่สุด จึงนำมาศึกษาผลของปริมาณ HMTA เนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดเป็นฟีนอลิกประเภทโนโวแลก ซึ่งไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงได้ด้วยตัวเอง จึงต้องเติม HMTA มาทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงสารเพิ่มการยึดติดเพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ

จากการศึกษาผลของ HMTA ของสารเพิ่มการยึดติด โดยใช้สารเพิ่มการยึดติดที่มี HMTA ปริมาณ 0, 5 และ 10 phr เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติการยึดติดจากการทดลองพบว่าสารเพิ่มการยึดติดทั้ง 3 ชนิด ส่งผลต่อความหนืดมูนนี้และลักษณะการเชื่อมโยง ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.8

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน โดยมีปริมาณ 0, 5 และ 10 phr พบว่าปริมาณ HMTA 5 phr ส่งผลให้เวลาที่เริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) เร็วกว่ายางที่เติมสารเพิ่มการยึดติดที่มีปริมาณ HMTA 0 และ 10 phr เนื่องจาก HMTA ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงสารเพิ่มการยึดติด จึงทำให้เวลาที่เริ่มการเชื่อมโยง (Scorch time) เกิดเร็วขึ้น และจากค่าทอร์กสูงสุดพบว่า Mw L10 มีค่าทอร์กสูงสุดสูงกว่า Mw L5 และ Mw L0 (Mw L10 มีค่าใกล้เคียงกับยางที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด) เนื่องจาก Mw L10 มีปริมาณ HMTA ที่มาก ซึ่ง HMTA ช่วยให้สารเพิ่มการยึดติดเกิดการเชื่อมโยงได้เร็วขึ้น จึงทำให้ระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันมีโอกาสเกิดการเชื่อมโยงได้มากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ของยางมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนืดมูนนี้และลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติดที่มีปริมาณ Hexamethylenetetramine (HMTA) แตกต่างกัน

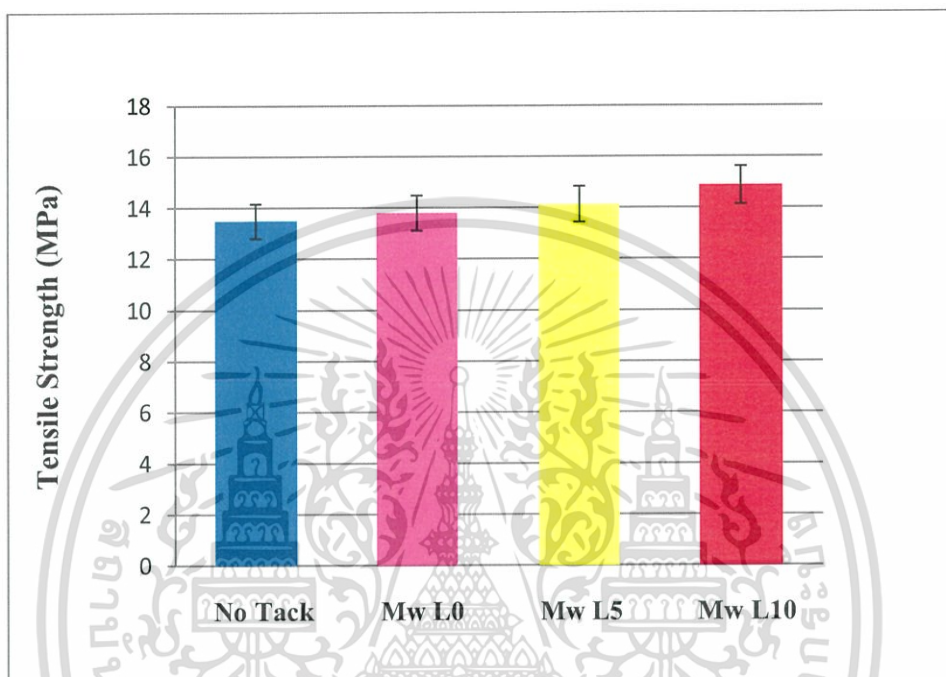
สารเพิ่มการยึดติด	Mooney ML 1+4 (100°C)	Torque (kgf.cm)		Scorch time, t_{s2} (min.sec)	Cure time t_{c90} (min.sec)	Cure rate index CRI (min^{-1})
		M_L	M_H			
No Tack	52.60	3	32	4.20	6.10	52.63
Mw L0	50.20	3	27	2.70	5.20	40.00
Mw L5	48.60	3	27	2.40	5.00	38.46
Mw L10	48.75	3	31	3.00	5.60	38.46



รูปที่ 4.8 กราฟลักษณะการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน

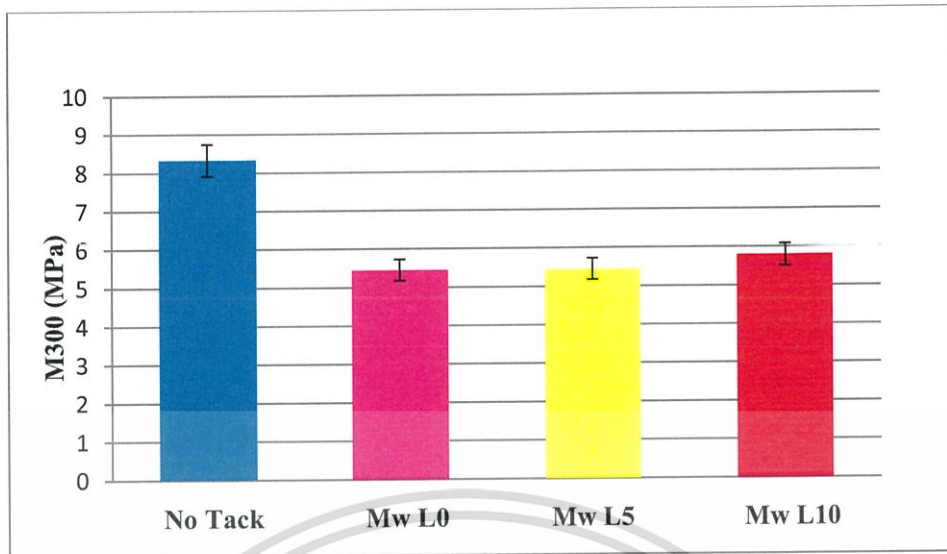
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดชนิดน้ำหนักรโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน โดยมีปริมาณ 0, 5 และ 10 phr พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดเป็นชนิดน้ำหนักรโมเลกุลต่ำเหมือนกันและเมื่อปริมาณ HMTA เพิ่มขึ้นทำให้สารเพิ่มการยึดติดเกิดการเชื่อมโยงได้มากขึ้น แต่สารเพิ่มการยึดติดที่เติมไม่ได้มีปริมาณที่มากพอ ค่าความแข็งแรงดึงจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

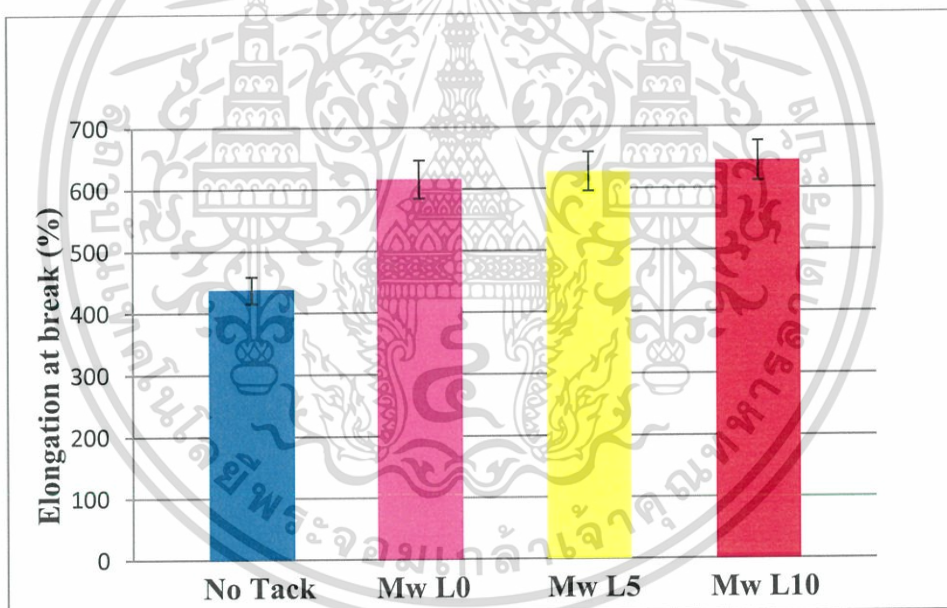


รูปที่ 4.9 กราฟการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดชนิดโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.10 - 4.12 แสดงการเปรียบเทียบผลของปริมาณ HMTA ของสารเพิ่มการยึดติดชนิดน้ำหนักรโมเลกุลต่ำที่ต่างกัน โดยมีปริมาณ 0, 5 และ 10 phr พบว่าค่ามอดูลัสที่ 300 (M_{300}), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่าความแข็งกด (Hardness shore A) มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปริมาณของสารเพิ่มการยึดติดและ HMTA ที่เติมในยางผสมสูตรไม่ได้มีปริมาณที่มากพอที่ทำให้สมบัติดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

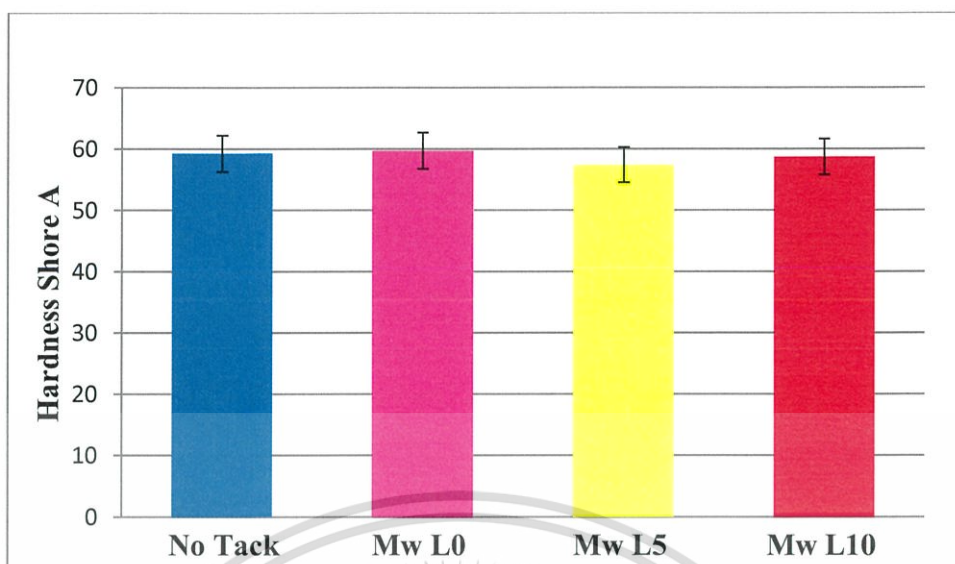


รูปที่ 4.10 กราฟการเปรียบเทียบค่ามอดุลัสที่ 300 % (M_{300}) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดชนิดโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน



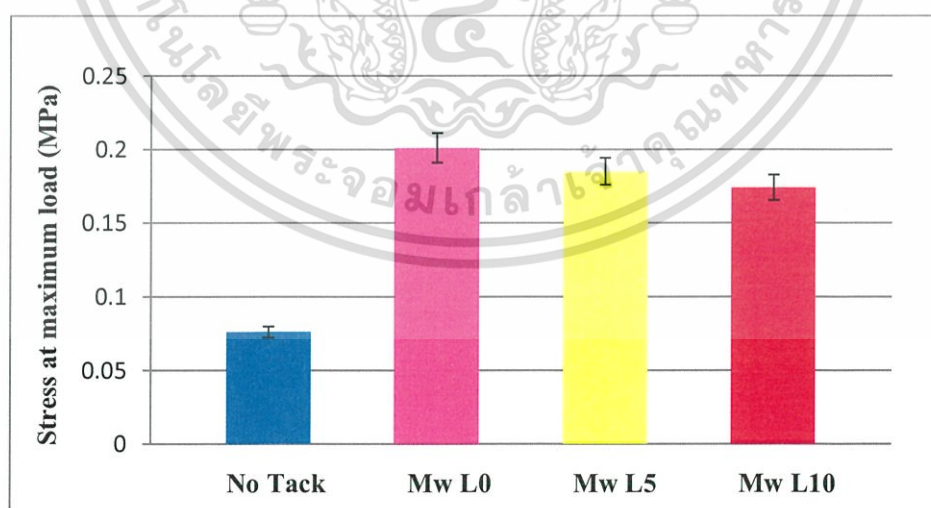
รูปที่ 4.11 กราฟการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดชนิดโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟการเปรียบเทียบความแข็งกด (Hardness Shore A) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดชนิดโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดชนิดน้ำหนัโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน โดยมีปริมาณ 0, 5 และ 10 phr พบว่าประสิทธิภาพการยึดติดระหว่างยางกับแผ่นเหล็กเคลือบตีบุกมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณของ HMTA เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจาก HMTA เป็นสารเชื่อมโยงสารเพิ่มการยึดติด เมื่อเติมลงไปได้อย่างผสมสุตรและให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยง ขณะนั้นสารเพิ่มการยึดติดถูกเชื่อมโยงด้วย HMTA ทำให้สารเพิ่มการยึดติดเคลื่อนที่ได้ยาก ทำให้ไม่สามารถไหลแทรกตัวเข้าสัมผัสกับผิวโลหะได้ดี จึงทำให้ประสิทธิภาพการยึดติดลดลง



รูปที่ 4.13 กราฟการเปรียบเทียบการยึดติดระหว่างยางกับแผ่นเหล็กเคลือบตีบุก แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดชนิดโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกันเทียบกับยางเชื่อมโยงที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การศึกษาผลของการเปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการยึดติดของยางเชื่อมโยง

จากการศึกษาโครงการพิเศษในหัวข้อเรื่อง “ผลของสารเพิ่มการยึดติดที่มีต่อสมบัติของยางเชื่อมโยง” ปีการศึกษา 2556 พบว่า มีการศึกษาสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์หลายชนิด เช่น สารเพิ่มการยึดติดประเภทไฮโดรคาร์บอน ประเภทฟีนอลิก รวมทั้งสารเพิ่มการยึดติดที่มี HMTA และไม่มี HMTA ซึ่งสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์แต่ละชนิดส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characterization), สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติการยึดติด (Tackiness) ที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้จึงเลือกสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ที่มี HMTA ซึ่งได้แก่ Sirfen BL320 และสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ที่ไม่มี HMTA ซึ่งได้แก่ Struktol TH110 และ PSM-9450 มาทำการเปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดที่สังเคราะห์ขึ้น

จากการศึกษาผลของการเปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดที่สังเคราะห์ ได้แก่ สารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักโมเลกุลต่ำและไม่มี HMTA (Mw L0) กับสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ โดยใช้สารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Struktol TH110, Sirfen BL302 และ PSM-9450 เพื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกลและสมบัติการยึดติด จากการทดลองพบว่าสารเพิ่มการยึดติดส่งผลต่อความหนืดมูนีและลักษณะการเชื่อมโยง ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.14

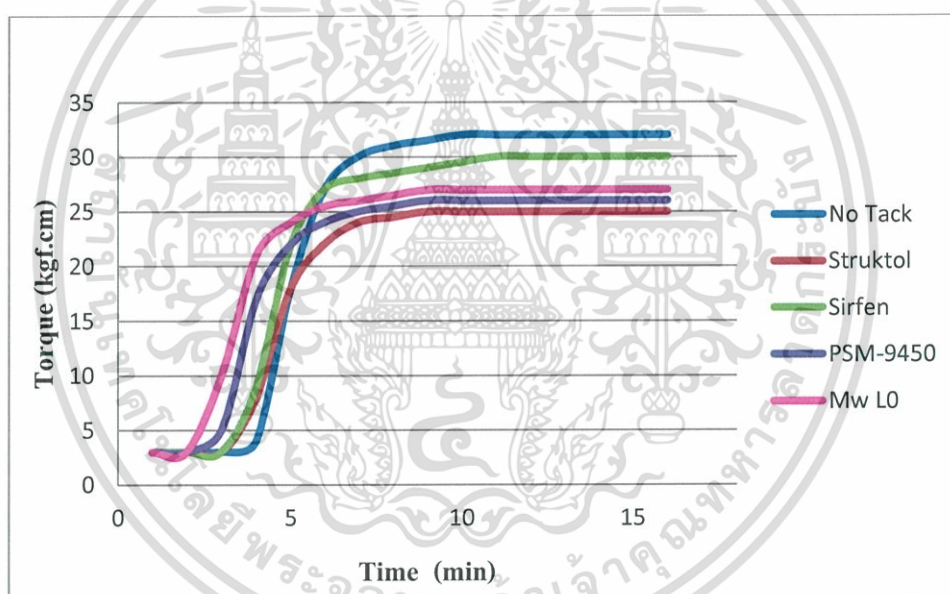
จากตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบอย่างผสมสูตรที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์กับสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักโมเลกุลต่ำและไม่มี HMTA (Mw L0) พบว่า Sirfen BL302 มีค่าความหนืดมูนีต่ำที่สุด เนื่องจาก Sirfen BL302 เป็นสารเพิ่มการยึดติดที่มีการเติม HMTA เมื่อ HMTA ได้รับความร้อนอาจเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติส่งผลให้สายโซ่ของยางยับตัวได้ยากขึ้น ค่าความหนืดมูนีจึงต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนืดมูนีและลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์เปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักโมเลกุลต่ำและไม่มี HMTA (Mw L0)

สารเพิ่มการยึดติด	Mooney ML 1+4 (100°C)	Torque (kgf.cm)		Scorch time, t_{s2} (min.sec)	Cure time t_{c90} (min.sec)	Cure rate index CRI (min^{-1})
		M_L	M_H			
No Tack	52.60	3	32	4.20	6.10	52.63
Mw L0	50.20	3	27	2.70	5.20	40.00
Sirfen BL302	45.25	3	30	3.50	6.50	33.33
Struktol TH110	48.70	3	25	3.70	6.60	34.48
PSM-9450	48.60	3	26	3.00	5.70	33.33

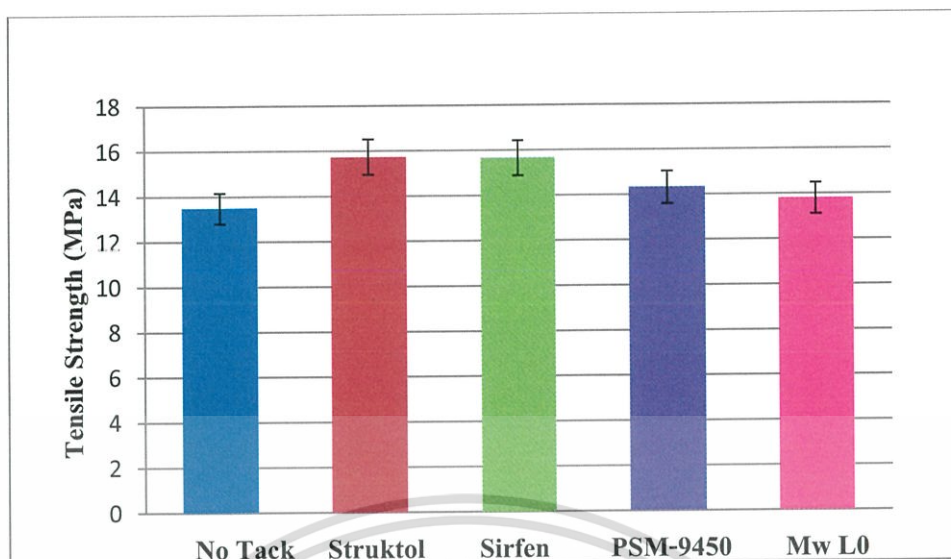
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Struktol TH110, Sirfen BL302 และ PSM-9450 กับสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักรโมเลกุลต่ำและไม่มี HMTA (Mw L0) พบว่าเวลาที่เริ่มการเชื่อมโยง (Scorch time) ของ Mw L0 เกิดเร็วที่สุด เนื่องจาก Mw L0 มีอัตราส่วนฟีนอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ที่มากกว่าสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ จึงทำให้สายโซ่ของยางขยับตัวได้ยากกว่า ความหนืดจึงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น (Torque สูงขึ้น) ส่วน Struktol-TH110 และ Sirfen BL302 มีอัตราส่วนฟีนอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับ Mw L0 และจากค่าทอร์กสูงสุดพบว่า Sirfen BL302 มีค่าสูงใกล้เคียงกับยางที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด เนื่องจาก Sirfen BL302 มีการเติม HMTA จึงเกิดการเชื่อมโยงของสารเพิ่มการยึดติดได้มาก ส่งผลให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ของยางสูงขึ้น และส่วน Struktol TH110 พบว่าค่าทอร์กสูงสุดต่ำที่สุดเนื่องจาก Struktol TH110 ไม่มีการเติม HMTA จึงทำให้สารเพิ่มการยึดติดไม่เกิดการเชื่อมโยงและเมื่อให้ความร้อนกำมะถันเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระจึงเลือกที่จะทำปฏิกิริยากับฟีนอลมากกว่าตำแหน่งพันธะคู่ของยาง ส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงยางลดลง



รูปที่ 4.14 กราฟลักษณะการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดเชิงพาณิชย์ เปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักรโมเลกุลต่ำ (Mw L0)

จากรูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Struktol TH110, Sirfen BL302 และ PSM-9450 กับสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักรโมเลกุลต่ำและไม่มี HMTA (Mw L0) พบว่า Mw L0 มีค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำที่สุด คาดว่า Mw L0 อาจมีอัตราส่วนของฟีนอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์มากกว่าสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ ซึ่งคาดว่าฟีนอลไปขัดขวางการเชื่อมโยงของยาง ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงลดลง

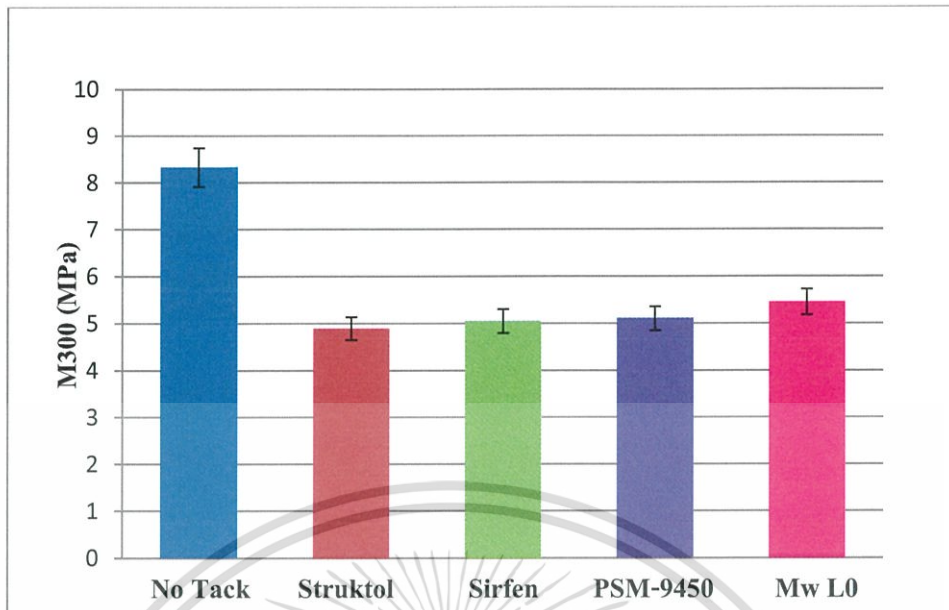


รูปที่ 4.15 กราฟความแข็งแรงดึง (Tensile strength) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดเชิงพาณิชย์ เปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักรโม่เลกุลต่ำ (Mw L0)

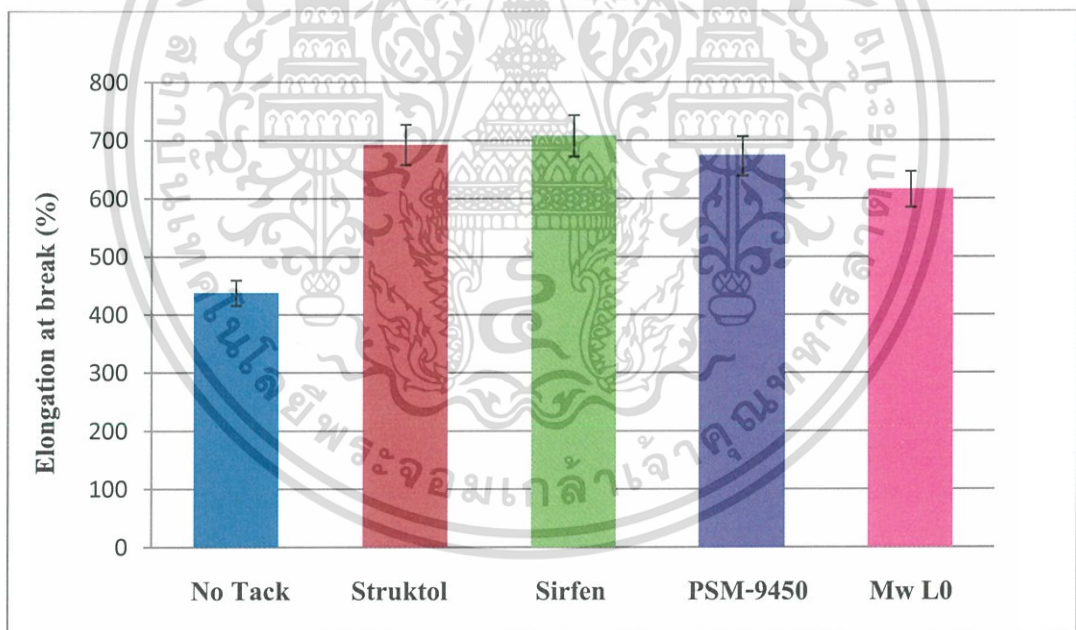
จากรูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Struktol TH110, Sirfen BL302 และ PSM-9450 กับสารเพิ่มการยึดติดที่สังเคราะห์ขึ้น ได้แก่ น้ำหนักรโม่เลกุลต่ำและไม่มี HMTA (Mw L0) พบว่าไม่ส่งผลต่อค่ามอดูลัสที่ 300% (M300) อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดที่เติมลงไปโดยไม่ได้มีปริมาณมากพอที่ส่งผลต่อสมบัติของยาง

จากรูปที่ 4.17 พบว่า Struktol TH110 และ Sirfen BL302 มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) สูงใกล้เคียงกันเนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดทั้งสองมีอัตราส่วนพีนอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ที่น้อย ส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาได้ต่ำลง ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ของยางจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงมาก ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด จึงมีค่าสูงกว่า Mw L0

จากรูปที่ 4.18 พบว่าสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์และสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักรโม่เลกุลต่ำ และไม่มี HMTA (Mw L0) ไม่ทำให้ค่าความแข็งกด (Hardness shore A) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารเพิ่มการยึดติดที่ใส่ไม่ได้มีปริมาณที่มากพอที่จะทำให้มีความแข็งกดมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

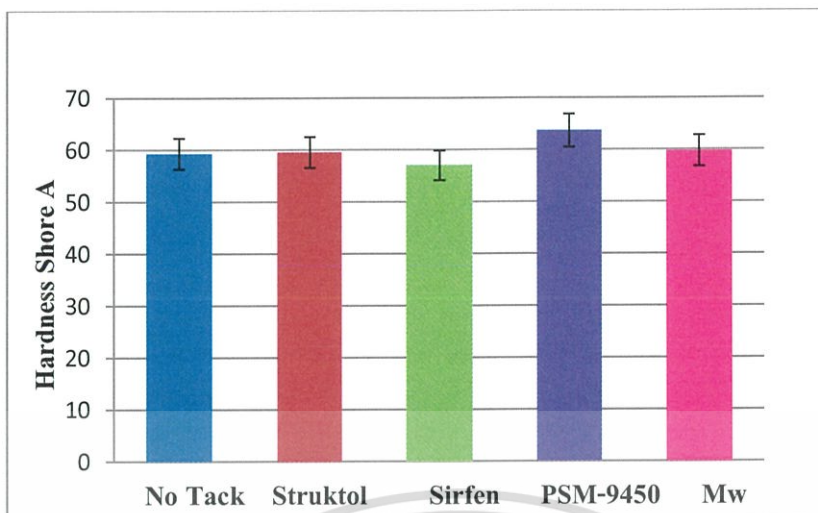


รูปที่ 4.16 กราฟค่ามอดูลัสที่ 300 - % (M_{300}) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดเชิงพาณิชย์เปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักรีดต่ำ (Mw L0)



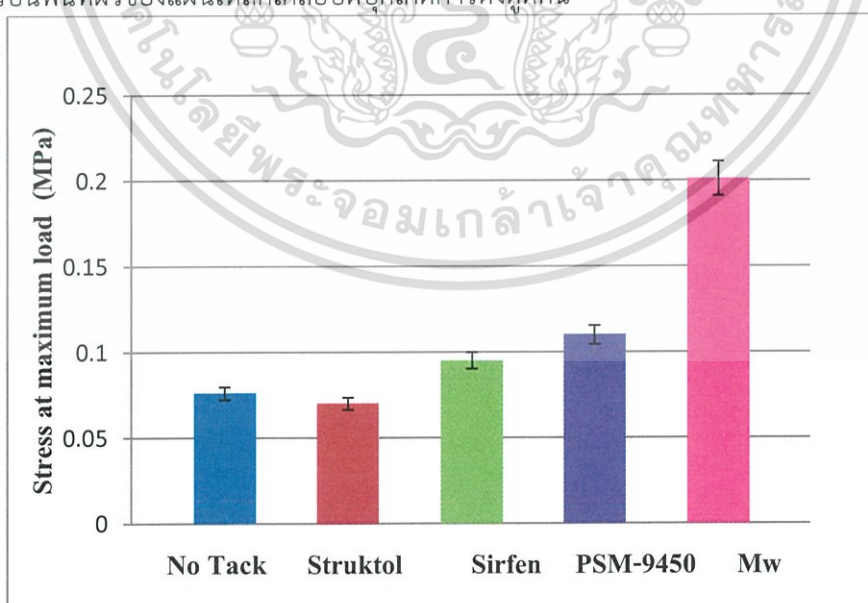
รูปที่ 4.17 กราฟเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดเชิงพาณิชย์เปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักรีดต่ำ (Mw L0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟความแข็งกด (Hardness Shore A) แสดงผลของการใช้สารเพิ่มยึดติดเชิงพาณิชย์ เปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักรโม่เลกุลต่ำ (Mw L0)

จากรูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Struktol TH110, Sirfen BL302 และ PSM-9450 กับสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักรโม่เลกุลต่ำและไม่มี HMTA (Mw L0) พบว่า Mw L0 ให้ประสิทธิภาพการยึดติดกับแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกสูงที่สุด เนื่องจาก Mw L0 เป็นสารเพิ่มการยึดติดที่มีโมเลกุลขนาดเล็กในปริมาณที่มากกว่าสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ จึงสามารถกระจายตัวมาบนผิวหน้าของยางได้ค่อนข้างดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพการยึดติดกับแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกสูงที่สุด กลไกการยึดติดระหว่างยางที่เติมสารเพิ่มการยึดติดกับแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก คาดว่าเป็นแบบแรงดึงดูดระหว่างขั้ว ซึ่งในที่นี้คือขั้วในโครงสร้างของสารเพิ่มการยึดติดและขั้วบนพื้นที่ผิวของแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกเกิดการดึงดูดกัน



รูปที่ 4.19 กราฟประสิทธิภาพการยึดติดระหว่างยางกับแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก แสดงผลของการใช้สารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์เปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดน้ำหนักรโม่เลกุลต่ำ (Mw L0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางเชื่อมโยง โดยเริ่มจากการสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซินและการพิสูจน์เอกลักษณ์ จากนั้นทำการศึกษา

- เปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มการยึดติดที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลสูง (Mw H0), กลาง (Mw M0) และต่ำ (Mw L0)
- เปรียบเทียบปริมาณของ Hexamethylenetetramine (HMTA) โดยมีปริมาณ 0, 5 และ 10 phr
- เปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Strukitol TH110, Sirfen BL302 และ PSM-9450

จากนั้นทำการศึกษสมบัติของยาง ได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics), สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติการยึดติด (Tackiness) กับโลหะ โดยการทดสอบแรงเฉือน (Lap shear) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 ผลจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ฟีนอลิกเรซิน

5.1.1 การวิเคราะห์หาการกระจายน้ำหนักโมเลกุล

จากการวิเคราะห์หาการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มการยึดติดทั้ง 8 ชนิด โดยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC) พบว่า

- เปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดที่น้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน พบว่าปริมาณของน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำของ Mw H0 มีค่าสูงกว่า Mw M0 และ Mw L0
- เปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Mw L0) ที่มีปริมาณ HMTA แตกต่างกัน พบว่าปริมาณของ HMTA ส่งผลต่อปริมาณของน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำของสารเพิ่มการยึดติด โดยอัตราส่วนของน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำของ Mw L10 มีค่าสูงกว่า Mw L0 และ Mw L5
- เปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ได้แก่ Struktol TH110, Sirfen BL302 และ PSM-9450 พบว่าปริมาณของน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำของ Struktol TH110 มีค่าสูง ส่วน PSM-9450 และ Sirfen BL302 มีรูปแบบการกระจายน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกับ Mw H0 และ Mw M0 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ทดสอบสมบัติต่างๆ ของสารเพิ่มการยึดติดประเภทฟีนอลิกเรซินตามมาตรฐาน JIS

การทดสอบตามมาตรฐาน Japanese Industrial Standards (JIS) ได้แก่ การทดสอบหาจุดอ่อนตัว (Softening point), ความหนืด (Viscosity), ปริมาณของน้ำในสารเพิ่มการยึดติด (Water content), วัตถุนหุมิหลอมเหลว (Melting point), การวัดระยะเวลาไหล (Flow) และเวลาที่เกิดการเชื่อมโยง (Gel time) เพื่อดูสมบัติต่างๆ ของสารเพิ่มการยึดติดที่อาจส่งผลให้สารเพิ่มการยึดติดแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการยึดติดที่แตกต่างกัน โดยสารเพิ่มการยึดติดที่มีโมเลกุลใหญ่ส่งผลต่อค่าจุดอ่อนตัวและความหนืดให้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนสารเพิ่มการยึดติดที่มีปริมาณของฟีนอลที่มากส่งผลให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวให้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนสารเพิ่มการยึดติดที่มีการเติมสารช่วยให้เกิดการเชื่อมโยง (HMTA) ส่งผลต่อระยะเวลาไหลและเวลาที่เกิดการเชื่อมโยงให้มีแนวโน้มลดลง

5.2 ผลจากการศึกษาผลของสารเพิ่มการยึดติดในทางผสมสูตร

- จากการเติมสารเพิ่มการยึดติดที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน พบว่าสารเพิ่มการยึดติดส่งผลต่อความหนืดมุนนี้, ค่าทอร์คสูงสุด, ค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัส 300 มีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ถ จุดขาด และประสิทธิภาพการยึดติดกับแผ่นโลหะเคลือบตีบุกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

- จากการเติมสารเพิ่มการยึดติดที่มีปริมาณ HMTA ที่แตกต่างกัน พบว่า HMTA ส่งผลต่อความหนืดมุนนี้, ค่าทอร์คสูงสุด, ค่ามอดูลัส 300 และประสิทธิภาพการยึดติดกับแผ่นโลหะเคลือบตีบุกมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ถ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

- จากการเปรียบเทียบสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์และสารเพิ่มการยึดติดที่สังเคราะห์ขึ้น พบว่าสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์ส่งผลต่อค่าความหนืดมุนนี้, ค่ามอดูลัส 300 และประสิทธิภาพการยึดติดให้มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดที่สังเคราะห์ขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยึด ถ จุดขาด ของสารเพิ่มการยึดติดเชิงพาณิชย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสารเพิ่มการยึดติดที่สังเคราะห์ขึ้น

จากงานวิจัยนี้พบว่าสารเพิ่มการยึดติดประเภทฟีนอลิกเรซินสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านการยึดติดระหว่างยางกับแผ่นโลหะเคลือบตีบุกได้ดีกว่าอย่างที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มการยึดติด ซึ่งสารเพิ่มการยึดติดแต่ละชนิดทำให้ยางมีลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากโครงสร้าง น้ำหนักโมเลกุล (ขนาดเล็ก, ขนาดใหญ่) การกระจายน้ำหนักโมเลกุล ปริมาณ HMTA และสภาพขั้วที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นโครงสร้างและสมบัติของสารเพิ่มการยึดติดกับวัสดุที่ต้องการ จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการยึดติดที่สูง

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยเป็นการศึกษาสารเพิ่มการยึดติดที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางเชื่อมโยงสามารถสรุปข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป ดังนี้

- ศึกษาอายุการใช้งานที่เหมาะสมโดยให้ความร้อนที่ระยะเวลาที่แตกต่างกัน
- ปรับเปลี่ยนวัสดุที่นำมาทดสอบสมบัติการยึดติด เช่น โลหะชนิดอื่นๆ เช่น เหล็ก อลูมิเนียม หรือทดสอบการยึดติดกับยาง เช่น ยางบิวทิล ยางธรรมชาติ
- เพิ่มวิธีการทดสอบอื่นๆ เพื่อทำให้ความสามารถในการเห็นผลชัดเจนยิ่งขึ้น เช่น Peel test เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C.M. Blow. “Rubber Technology and Manufacture” 1st ed. London , Boston : Cox & Wyman Ltd, Fakenham, Norfolk ,1971
- [2] อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์. “Engineering Materials” เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2012
- [3] สุจันจิรา และคณะ “Effects of Tackifiers on Rubber Vulcanizate Properties” โครงการพิเศษหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556
- [4] Science news. “Natural rubber” [Online]. Available: <http://www.electron.rmutphysics.com/science-news,2014>
- [5] พงษ์ธร แซ่ฮุย. “ชนิดของยางและการใช้งาน” [online]. Available: <http://www.rubbercenter.org/files/technologys.pdf,2014>
- [6] พงษ์ธร แซ่ฮุย. “ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน” [online]. Available: <http://rubber.oie.go.th/box/Article/21039/1.สมบัติทั่วไปของยางสังเคราะห์.pdf,2014>
- [7] อิทธิพล แจ่มชัด. “เทคโนโลยียาง”. เอกสารประกอบการสอน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554
- [8] Mitsubishi Chemical “Carbon Black” [Online]. Available: <http://www.carbonblack.jp/en/cb/tokusei.html, 2006>
- [9] Asahi carbon. “Carbon blank properties” [Online]. Available: http://www.ashicarbon.co.jp/global_site/product/cb/characteristic.html,2013
- [10] พงษ์ธร แซ่ฮุย. สารเคมียาง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2548
- [11] พงษ์ธร แซ่ฮุยและเสวียง เกื่อนบุญ. “ยางกับการประยุกต์ใช้งาน” [Online]. Available: http://www.dockyard.navy.mi.th/doced/Homepage/sontetset_files/varasan_dock56/16.pdf
- [12] พงษ์ธร แซ่ฮุยและวินัสรินทร์ อินทร์ติยะ. “เรซินที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง” [Online]. Available: <http://www.rubbercenter.org/informationcenter/file/magazine2.pdf, 2014>
- [13] สมาคมการพิมพ์ไทย. “เรซินธรรมชาติ” [Online]. Available: <http://www.thaiprint.org/thaiprint, 2014>
- [14] เอกสารและงานวิจัย. “กาว” [Online]. Available: http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2289/7/271661_ch2.pdf, 2014
- [15] ดารณี เจริญสุข. “การประยุกต์ใช้ฟีนอลิกในอุตสาหกรรมยาง” [Online]. Available: <http://www.rubbercenter.org/informationcenter/file/magazine-19.pdf, 2014>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] อธิพิล แจ้งซัด. “เรซินที่ใช้ในอุตสาหกรรมสี.” กรุงเทพฯ. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยียาง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [17] Siamchemi “Phenol” [Online]. Available: <http://www.siamchemi.com/ฟีนอล>, 2013
- [18] บริษัท อีเทอนัล เรซิน จำกัด. “Urea formaldehyde adhesive resin for wood” [Online]. Available:http://forprod.forest.go.th/forprod/Tips/Silvicebook/Forest_Discuss/Group2/G2_t22.pdf
- [19] ณัฐวิฑิต์ งามวงศ์น้อย “Modofocation of Natural Rubber by Anacardic-formaldehyde Resin” วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2554
- [20] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. “การสังเคราะห์เทอร์โมเซต.” กรุงเทพฯ. เอกสารประกอบการสอนวิชาการสังเคราะห์เทอร์โมเซต คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [21] About education “Hexamine - Hexamethylenetetramine or HMTA Chemical Structure” [Online]. Available:<http://chemistry.about.com/od/factsstructures/ig/Chemical-Structures---H/Hexamine.htm#step-heading>, 2014
- [22] LiteSpeed Web Server “Novolac” ” [Online]. Available: <http://www.iranpour.ir/storage1/image1/polymer/HMTA/>,2013
- [23] อธิพิล แจ้งซัด. “สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers).” กรุงเทพฯ. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยียาง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [24] วรวิฑิต์ โควิรัตน์ และคณะ. “การยึดติดของแผ่นไม้ยางพาราบนผิวไม้พลาสติก WPC.” โครงการพิเศษหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554
- [25] อธิพิล แจ้งซัด. “กลไกการยึดติด (Mechanisms of Adhesion). กรุงเทพฯ” เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยียาง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [26] อธิพิล แจ้งซัด. “การทดสอบของกาว (Adhesive Test)”.กรุงเทพฯ. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยียาง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [27] F. Taheri-Behrook B.Memar Maher and M.M. Shokrieh “Mechanical properties modification of a thin file phenolic resin filled with nano silica particles”.Computational Materials Science 96(2015)411-415
- [28] N.A. Darwish และคณะ “A novel promoter for enhancing adhesion between natural rubber and brass-plated steel cords” International Journal Of Adhesion & Adhesive 40(2013)135-144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] Akbar Shojaei and Morteza Faghihi. "Physico-mechanical properties and thermal stability of thermoset nanocomposites base on styrene-butadiene rubber/phenolic resin blend" *Materials Science and Engineering A* 527(2010)917-926
- [30] Min Ho Choi, Ho Yun Byun and In Jae Jung. "The effect of chain length of flexible diacid on morphology and mechanical property of modified phenolic resin" *Polymer*.38(2012)38-44
- [31] Charone Nakason, Sitisaiyidah Saiwari, Azizon Kaesaman. "Rheological properties of maleated natural rubber/polypropylene blend with phenolic modified polypropylene and polypropylene-g-maleic anhydride compatibilizers" *Polymer Testing*.25(2006)413-423



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

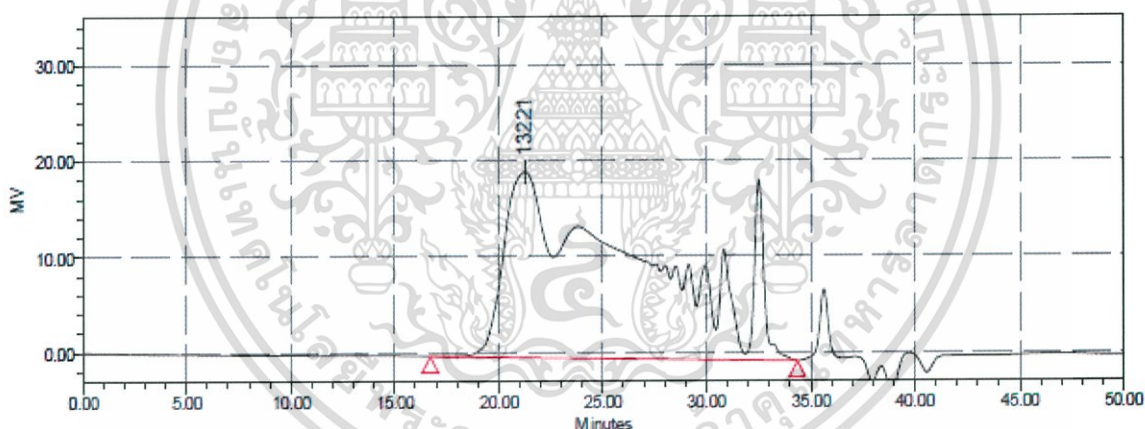


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

โครมาโตแกรม (Chromatogram) แสดงน้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มการยึดติดชนิดต่างๆ ได้แก่ Mw H0, Mw M0, Mw L0, Mw L5, Mw L10, PSM-9450, Sirfen BL302 และ Struktol TI110 โดยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC)

SAMPLE INFORMATION			
Sample Name:	PS-2470i_0PHR	Acquired By:	System
Sample Type:	Broad Unknown	Sample Set Name	06042015
Vial:	1:A,2	Acq. Method Set:	Phenolic resin 23022015
Injection #:	1	Processing Method	Average Novolac
Injection Volume:	20.00 ul	Channel Name:	410
Run Time:	50.0 Minutes	Proc. Chnl. Descr.:	410
Date Acquired:	4/6/2015 5:09:25 PM ICT		
Date Processed:	4/9/2015 1:06:58 PM ICT		



GPC Results

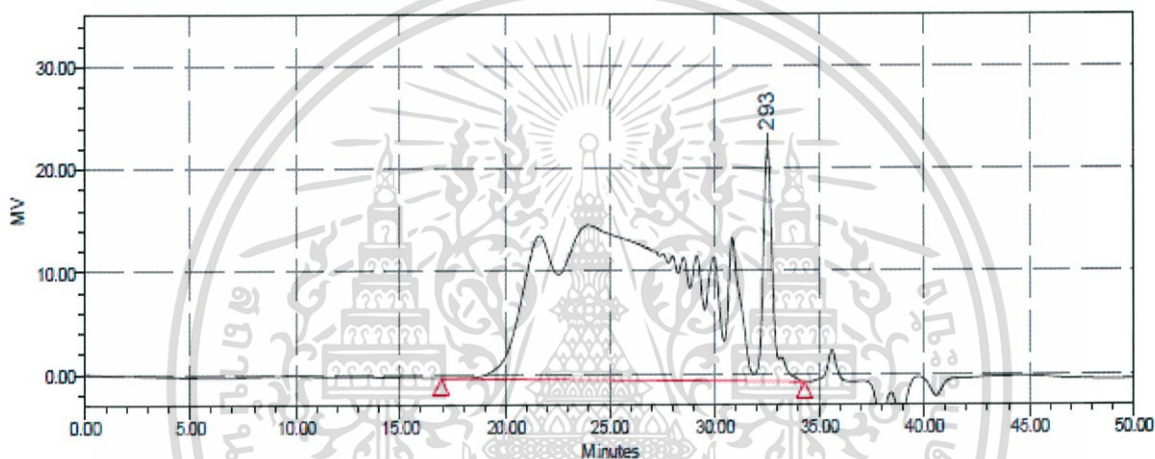
	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Mz/Mw	Mz+1/Mw	Area ($\mu\text{V}^2\text{sec}$)	Polydispersity
1	1162	4581	13221	10826	14134	2.319650	3.085575	8534142	3.942609

รูปที่ ก-1 Mw H0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAMPLE INFORMATION

Sample Name:	PS-9512i_0PHR	Acquired By:	System
Sample Type:	Broad Unknown	Sample Set Name	06042015
Vial:	1:A,4	Acq. Method Set:	Phenolic resin 23022015
Injection #:	1	Processing Method	Average Novolac
Injection Volume:	20.00 ul	Channel Name:	410
Run Time:	50.0 Minutes	Proc. Chnl. Descr.:	410
Date Acquired:	4/6/2015 6:50:09 PM ICT		
Date Processed:	4/9/2015 1:10:55 PM ICT		



GPC Results

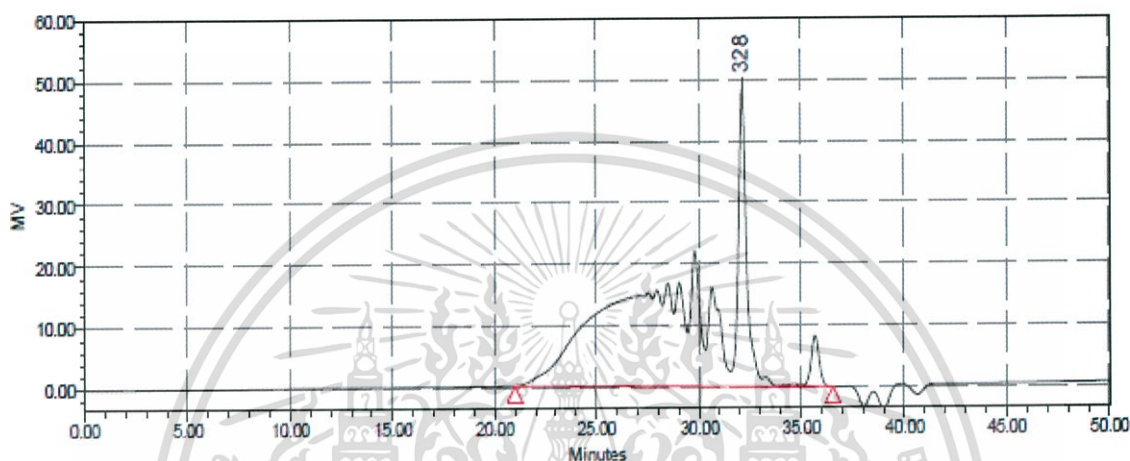
	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Mz/Mw	Mz+1/Mw	Area ($\mu\text{V}^2\text{sec}$)	Polydispersity
1	1017	3367	293	8436	12396	2.505469	3.681522	8679215	3.311161

รูปที่ ก-2 Mw M0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAMPLE INFORMATION

Sample Name:	PSM-9212i Lot.150131-4-P4	Acquired By:	System
Sample Type:	Broad Unknown	Sample Set Name:	24022015
Vial:	1:A,2	Acq. Method Set:	Phenolic resin 23022015
Injection #:	1	Processing Method:	Novolac
Injection Volume:	20.00 ul	Channel Name:	410
Run Time:	50.0 Minutes	Proc. Chnl. Descr.:	410
Date Acquired:	2/24/2015 3:57:16 PM ICT		
Date Processed:	2/25/2015 11:00:56 AM ICT		



GPC Results

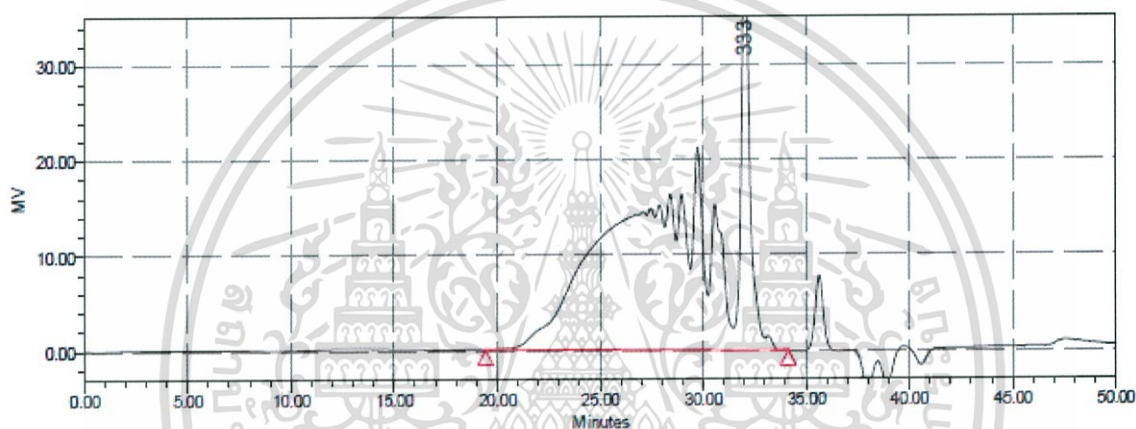
Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Mz/Mw	Mz+1/Mw	Area ($\mu\text{V}^2\text{sec}$)	Polydispersity	
1	695	1298	328	2624	4435	2.021393	3.416388	7846523	2.182999

รูปที่ ก-3 Mw L0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: PSM-9212_5PHR	Acquired By: System
Sample Type: Broad Unknown	Sample Set Name: 06042015
Vial: 1.A,6	Acq. Method Set: Phenolic resin 23022015
Injection #: 1	Processing Method: Average Novolac
Injection Volume: 20.00 ul	Channel Name: 410
Run Time: 50.0 Minutes	Proc. Chnl. Descr.: 410
Date Acquired: 4/6/2015 8:30:53 PM ICT	
Date Processed: 4/9/2015 1:16:14 PM ICT	



GPC Results

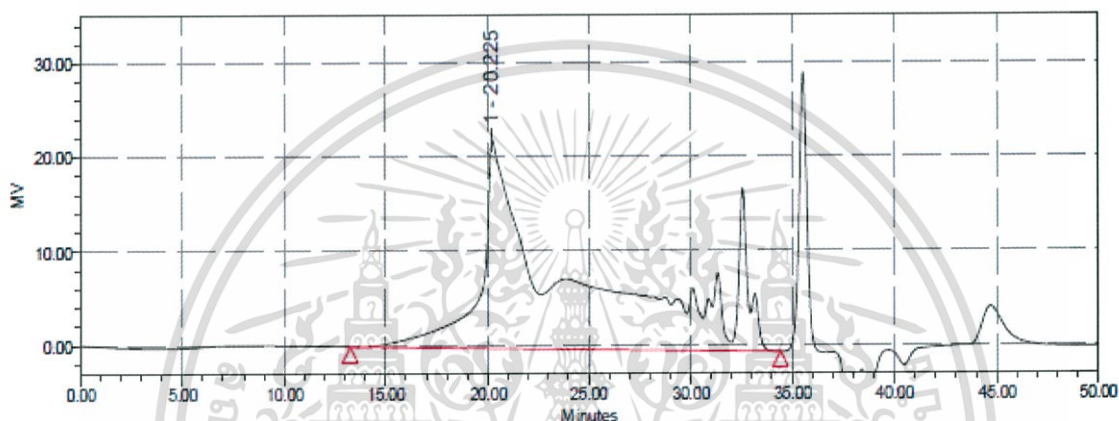
	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Mz/Mw	Mz+1/Mw	Area ($\mu\text{V}^2\text{sec}$)	Polydispersity
1	798	1452	333	3208	611	2.210288	4.209614	7488444	1.973407

รูปที่ ก-4 Mw L5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: PSM-9200i neu+HMTA10 PHR	Acquired By: System
Sample Type: Broad Unknown	Sample Set Name: 17032015
Vial: 1:B,3	Acq. Method Set: Phenolic resin 23022015
Injection #: 1	Processing Method: Average Novolac
Injection Volume: 20.00 ul	Channel Name: 410
Run Time: 50.0 Minutes	Proc. Chnl. Descr.: 410
Date Acquired: 3/17/2015 11:17:36 PM ICT	
Date Processed: 4/9/2015 1:04:41 PM ICT	



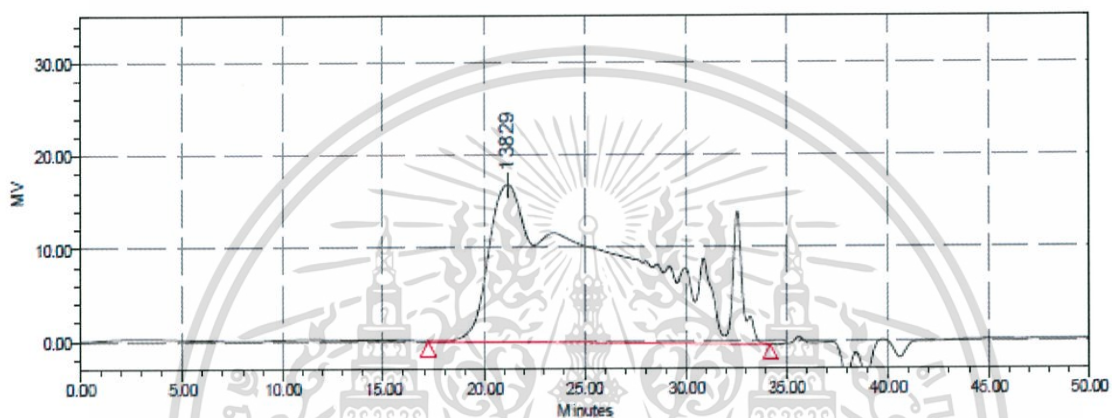
GPC Results

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Mz/Mw	Mz+1/Mw	Area ($\mu V \cdot sec$)	Polydispersity
1	994	4988		12071	15341	2.420049	3.075576	6664939	5.019139

รูปที่ ก-5 Mw L10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAMPLE INFORMATION			
Sample Name:	PSM-9450_0PHR	Acquired By:	System
Sample Type:	Broad Unknown	Sample Set Name	06042015
Vial:	1:A,5	Acq. Method Set:	Phenolic resin 23022015
Injection #:	1	Processing Method	Average Novolac
Injection Volume:	20.00 ul	Channel Name:	410
Run Time:	50.0 Minutes	Proc. Chnl. Descr.:	410
Date Acquired:	4/6/2015 7:40:31 PM ICT		
Date Processed:	4/9/2015 1:12:59 PM ICT		



GPC Results

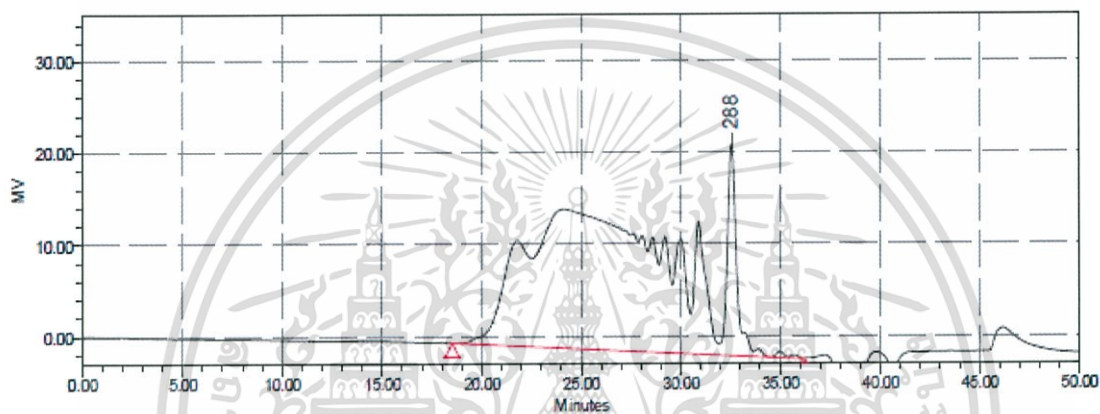
	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Mz/Mw	Mz+1/Mw	Area (μV*sec)	Polycispersity
1	1150	4622	13829	10570	14108	2.337802	3.120051	7838021	3.930391

รูปที่ ก-6 PSM-9450

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: Srifen	Acquired By: System	Sample Set Name: 03062015
Sample Type: Broad Unknown	Sample Method Set: Phenolic resin 23022015	Processing Method: Average Novolac
Vial: 1:A,7	Channel Name: 410	Proc. Chnl. Descr.: 410
Injection #: 1		
Injection Volume: 20.00 ul		
Run Time: 50.0 Minutes		
Date Acquired: 6/3/2015 2:24:03 PM ICT		
Date Processed: 6/4/2015 11:40:28 AM ICT		



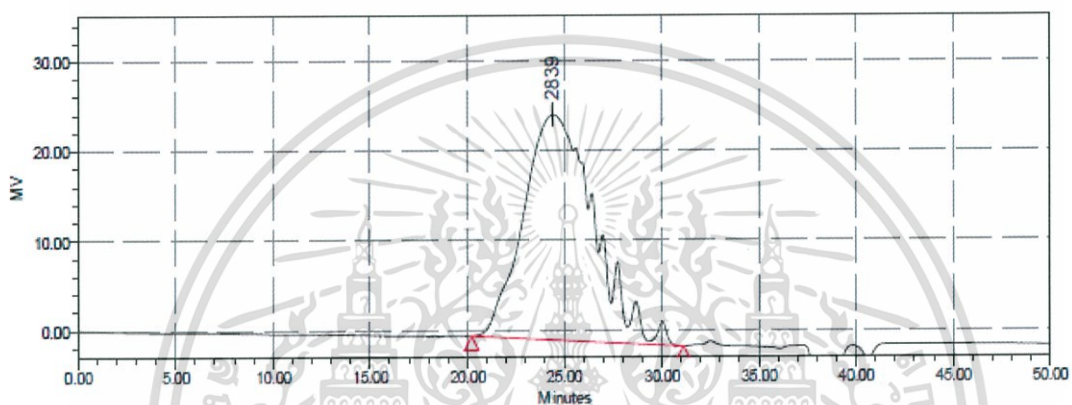
GPC Results

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Mz/Mw	Mz+1/Mw	Area ($\mu\text{V}^2\text{sec}$)	Polydispersity
1	963	2853	288	7093	10971	2.488653	3.846121	8476004	2.094617

รูปที่ ก-7 Srifen

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAMPLE INFORMATION			
Sample Name:	Struktol	Acquired By:	System
Sample Type:	Broad Unknown	Sample Set Name	03062015
Vial:	1:A,6	Acq. Method Set:	Phenolic resin 23022015
Injection #:	1	Processing Method	Average Novolac
Injection Volume:	20.00 ul	Channel Name:	410
Run Time:	50.0 Minutes	Proc. Chnl. Descr.:	410
Date Acquired:	6/3/2015 1:33:40 PM ICT		
Date Processed:	6/4/2015 11:39:50 AM ICT		



GPC Results

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Mz/Mw	Mz+1/Mw	Area ($\mu V \cdot sec$)	Polydispersity
1	2129	3121	2839	4680	6795	1.469250	2.176870	6341524	1.465094

รูปที่ ก-8 Struktol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้