

การพัฒนาแผ่นยางรองรางรถไฟจากยางคลอโรพรีนผสมยางธรรมชาติ

DEVELOPMENT OF RAIL PADS FROM CHLOROPRENE RUBBER (GR)  
AND NATURAL RUBBER (NR) BLENDS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

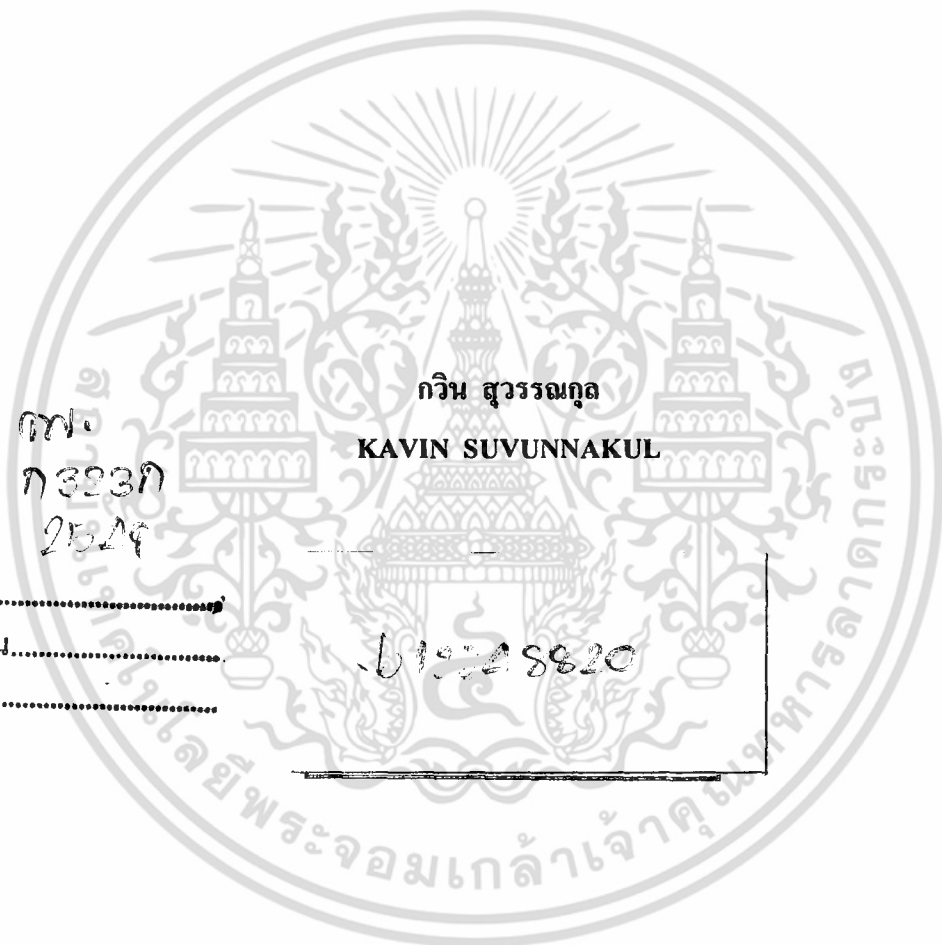
ISBN 974-15-2012-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



การพัฒนาแผ่นยางรองรางรถไฟจากยางคลอโรพรีนผสมยางธรรมชาติ

DEVELOPMENT OF RAIL PADS FROM CHLOROPRENE RUBBER (CR)  
AND NATURAL RUBBER (NR) BLENDS



กฟอ  
ก 323 ก  
2529

กวิน สุวรรณกุล

KAVIN SUVUNNAKUL

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี.....

619728820

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-2012-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DEVELOPMENT OF RAIL PADS FROM CHLOROPRENE RUBBER (CR)  
AND NATURAL RUBBER (NR) BLENDS**

**KAVIN SUVUNNAKUL**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2005  
ISBN 974-15-2012-3**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2005**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บัณฑิตวิทยาลัย**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

**หัวข้อวิทยานิพนธ์**      การพัฒนาแผ่นยางรองรางรถไฟจากยางคลอโรพรีนผสมยางธรรมชาติ  
DEVELOPMENT OF RAIL PADS FROM CHLOROPRENE RUBBER (CR)  
AND NATURAL RUBBER (NR) BLENDS

**ชื่อนักศึกษา**            นายกวิน สุวรรณกุล  
**รหัสประจำตัว**            45064400  
**ปริญญา**                    วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
**สาขาวิชา**                เทคโนโลยีพอลิเมอร์  
**อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์**      รศ.ดร.อิทธิพล            แจ่มชัด  
**อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม**      ดร.นุชนาฏ                    ณ ระนอง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จุฑารัตน์	ปรัชญาวารากร	คณบดี
ผศ.ดร.สุภารัตน์	รักชลธิ์	คณบดี
ดร.พงษ์ธร	แซ่ฮุย	คณบดี
รศ.ดร.อิทธิพล	แจ่มชัด	คณบดี
ดร.นุชนาฏ	ณ ระนอง	คณบดี

**วัน/เดือน/ปี ที่สอบ** 26 กันยายน 2548 เวลา 13.00 น. เป็นต้นไป  
**สถานที่สอบ** ณ ห้อง วท2-203

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว  
  
(ผศ.ดร.ฉวีพร เจริญสุข)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่...../.....เดือน.....พ.ศ.๒๕๔๘.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแผ่นยางรองรางรถไฟจากยางคลอโรพรีนผสมยางธรรมชาติ
นักศึกษา	นาย กวิน สุวรรณกุล
รหัสประจำตัว	45064400
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.นุชนาฏ ฅ ระนอง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสูตรยางที่เหมาะสม ในการผลิตแผ่นยางรองรางรถไฟ ซึ่งเตรียมจากยางผสมระหว่างยางคลอโรพรีน (CR) และยางธรรมชาติ (NR) โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางผสม เช่น อัตราส่วนของยางผสม CR/NR ปริมาณสารตัวเติมเขม่าดำ (CB) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และกำมะถัน ( $S_8$ ) เตรียมยางผสมสูตรด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งและเครื่องผสมระบบปิดอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส สมบัติต่างๆ ที่ทำการศึกษา ได้แก่ สมบัติเชิงกล ความทนทานต่อน้ำมัน ความต้านทานต่อโอโซน สัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลพลวัต จากผลการทดลอง แปรปริมาณเขม่าดำ (40 - 70 phr) พบว่ายางคลอโรพรีนที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด จากการศึกษาอัตราส่วนของยางผสม CR/NR ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสม CR/NR ต่ำกว่ายางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามค่ามอดูลัสและความแข็งกดของยางผสม CR/NR จะสูงกว่า ส่วนสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงด้อยลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของยางธรรมชาติ หลังทดสอบโอโซนพบว่ายางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 ไม่เกิดรอยแตกที่ผิวของยาง จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ด้วยเครื่อง AFM พบว่าการกระจายของวัฏภาคของผสมดีขึ้นเมื่อเติมเขม่าดำ ความไม่เข้ากันของยางผสม CR/NR ศึกษาจากการทดสอบด้วยเครื่อง DMTA เนื่องจากแสดงค่า  $T_g$  ที่ตำแหน่งเดิมเมื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์พบว่าสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงสูงขึ้น สมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน ส่วนสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงด้อยลง จากการศึกษาสูตรยางผสมที่เหมาะสมสำหรับใช้งานเป็นแผ่นยางรองรางรถไฟ ตามมาตรฐานการรถไฟแห่งประเทศไทย (ร.ฟ.ท.) คือ ยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 เขม่าดำ 60 phr แมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr และกำมะถัน 1 phr โดยราคาต้นทุนวัตถุดิบประมาณ 84 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และตั้งปรุงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	Development of Rail Pads from Chloroprene Rubber (CR) and Natural Rubber (NR) Blends
<b>Student</b>	Mr. Kavim Suvunnakul
<b>Student ID</b>	45064400
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Programme</b>	Polymer Technology
<b>Year</b>	2005
<b>Thesis advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud
<b>Thesis co-advisor</b>	Dr. Nuchanat Na-Ranong

### ABSTRACT

This research work was focused on rubber formulation for rail pads made from chloroprene rubber (CR) and natural rubber (NR) blends. Several factors affecting rubber properties were investigated, including CR/NR ratios, carbon black (CB) loading, magnesium oxide (MgO) and sulfur (S<sub>8</sub>). Rubber compounds were prepared by using two-roll mill and internal mixer and vulcanized by compression molding technique at 150 °C. Properties of the rubber samples were then studied, such as, mechanical properties, oil resistance, ozone resistance, morphology and dynamic mechanical properties. It was found that by varying CB loading (40-70 phr), the CR vulcanizates with 60 phr CB loading exhibited overall optimum mechanical properties. When CR/NR ratios of the blends were studied, it was revealed that tensile strength and elongation at break of the blends were deteriorated compared to those of the pure rubbers. However, rubber modulus and hardness of the blends were increased. Mechanical properties after aging were worsened especially the compounds with high NR loading. After ozone test, the CR/NR blends at 75/25 and 50/50 ratios were no crack at surface of rubber. From morphological study by AFM, it was revealed that good the dispersed blends. Immiscibility of the NR and CR rubbers in the blends was tested by DMTA and revealed the same positions of their T<sub>g</sub>. As the MgO loading was increased, mechanical properties of the blends both before and after aging had a trend to improve due to higher crosslink density. Insignificant changes in properties of the unaged rubbers were observed when sulfur loading was rised, whereas properties of the aged rubbers were worsen. As a result of this work, a blend formula with optimum properties for rail pad application according to the State Railway of Thailand Standard can be suggested as CR/NR blend of 75/25, CB 60 phr,

MgO 1 phr and S<sub>g</sub> 1 phr. An estimated cost for raw materials was 84 baht/kg which is an attractive price for domestic large-scale production.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะและช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร.นุชนาฏ ณ ระนอง เป็นอย่างสูงที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมและให้คำแนะนำ รวมทั้งช่วยเหลือด้านการทดสอบผลิตภัณฑ์ยาง ตลอดจนความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ และ ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยและกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.พงษ์ธร แซ่ฮุย ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.สมบัติ ธนะวันต์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่อง Atomic Force Microscope ที่มหาวิทยาลัยมหิดล

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักวิจัยและพัฒนาฯ กรมวิชาการเกษตร และภาควิชาเคมี สจล.ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับวิจัย

ขอขอบคุณบริษัทเอส เค พอลิเมอร์ อุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ยางคลอโรพรีนและสารเร่งเอทิลีนไทโอยูเรีย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดาและมารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

กวิน สุวรรณกุล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 ขางผสม.....	6
2.2 ขางธรรมชาติ.....	7
2.2.1 ขางแผ่นรมควัน.....	8
2.2.2 สมบัติของขางธรรมชาติ.....	9
2.2.3 สมบัติของขางเชื่อมโยง.....	10
2.3 ขางคลอโรพรีน.....	11
2.3.1 สมบัติของขางคลอโรพรีน.....	12
2.3.2 การใช้งานของขางคลอโรพรีน.....	13
2.4 การผสมขาง.....	14
2.5 สารเติมแต่งสำหรับขาง.....	17
2.5.1 สารเชื่อมโยง.....	17
2.5.2 สารเร่งปฏิกิริยา.....	18
2.5.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยา.....	19
2.5.4 สารตัวเติม.....	20
2.5.5 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ.....	22
2.5.6 พลาสติไซเซอร์.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.7 สารหน่วง.....	23
2.6 การทดสอบยาง.....	24
2.6.1 เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง.....	24
2.6.2 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่.....	26
2.6.3 การทดสอบความแข็งแรงกด.....	27
2.6.4 การทดสอบความต้านทานต่อโอโซน.....	28
2.6.5 การวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงกลพลวัต.....	29
2.6.6 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย Atomic Force Microscope.....	31
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>38</b>
3.1 ขางและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.3 วิธีการทดลอง.....	40
3.3.1 ขั้นตอนการผสมยางและเตรียมชิ้นทดสอบ.....	40
3.3.2 การบดผสมยางและสารเคมี.....	41
3.4 การทดสอบยางผสมสูตร.....	42
3.4.1 ความหนืดมูนนี่.....	42
3.4.2 เวลาเชื่อมโยงของยางผสมสูตร.....	43
3.4.3 การเชื่อมโยงยาง.....	43
3.4.4 ความแข็งแรงกด.....	43
3.4.5 สมบัติแรงดึง.....	43
3.4.6 การยุบตัวเนื่องจากแรงกด.....	45
3.4.7 การยืดตัวเนื่องจากแรงดึง.....	46
3.4.8 ความต้านทานต่อโอโซน.....	47
3.4.9 ความทนทานต่อน้ำมัน.....	47
3.4.10 สัณฐานวิทยา.....	47
3.4.11 สมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัต.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....</b>	<b>49</b>
4.1 การศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อสมบัติของยางคลอโรพรีน.....	49
4.1.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งของยางคลอโรพรีนที่มีปริมาณเขม่าดำต่างกัน.....	51
4.1.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งของยางคลอโรพรีนที่มีปริมาณเขม่าดำต่างกัน.....	54
4.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ.....	59
4.2.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR ต่างกัน.....	60
4.2.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR ต่างกัน.....	63
4.2.3 สันฐานวิทยาของยางผสม.....	68
4.2.4 ความต้านทานต่อโอโซนของยางผสม.....	71
4.2.5 สมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตของยางผสม.....	72
4.3 การศึกษาผลของปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีต่อยางผสม.....	74
4.3.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งของยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ ต่างกัน.....	75
4.3.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ ต่างกัน.....	78
4.3.3 ความทนทานต่อน้ำมันของยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน.....	83
4.4 การศึกษาผลของปริมาณกำมะถันที่มีต่อยางผสม.....	85
4.4.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งของยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณกำมะถันต่างกัน.....	85
4.4.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณกำมะถันต่างกัน.....	88
4.4.3 ความทนทานต่อน้ำมันของยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณกำมะถันต่างกัน.....	94
4.5 ศึกษาการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมที่มีกำมะถันต่างกัน.....	96
4.5.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งของยางผสม CR/NR 75/25, 60/40 และ 50/50 ที่มี ปริมาณกำมะถันต่างกัน.....	96
4.5.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR 75/25, 60/40 และ 50/50 ที่มี ปริมาณกำมะถันต่างกัน.....	99
4.5.3 ความทนทานต่อน้ำมันของยางผสม CR/NR 75/25, 60/40 และ 50/50 ที่มี ปริมาณกำมะถันต่างกัน.....	104
4.6 สรุปสูตรที่เหมาะสมและสมบัติของยางรองรางรถไฟ.....	106
4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ.....	107

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	108
5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางผสมระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ....	108
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	109
เอกสารอ้างอิง.....	111
ภาคผนวก.....	114
ภาคผนวก ก สมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตของยางผสม CR/NR.....	115
ภาคผนวก ข สันฐานวิทยาของยางผสม.....	118
ประวัติผู้เขียน.....	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สมบัติที่ต้องการสำหรับยางรองรถไฟ.....	4
2.1 การรายงานผลลักษณะรอยแตกเนื่องจากโอโซน.....	29
3.1 สมบัติบางประการของยางแผ่นรมควันชั้น 2 ที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.2 สมบัติบางประการของยางคลอโรพรีนที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.3 สมบัติบางประการของน้ำมันที่ใช้ทดสอบ.....	39
3.4 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาวิจัยต่างๆ.....	42
4.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซนที่มีความเข้มข้น โอโซน 50 pphm ยืด 20 % อุณหภูมิ 40 °C เวลา 72 ชั่วโมง.....	72
4.2 สมบัติของยางรองรถไฟที่ผลิตได้.....	106
4.4 การเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบสำหรับผลิตแผ่นยางรองรถไฟ ด้วยยางคลอโรพรีน และยางผสม CR/NR.....	107
5.1 การเปรียบเทียบระหว่างสมบัติของยางรองรถไฟที่ผลิตได้และมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.....	110

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	การก่อสร้างทางรถไฟสายใหม่.....1
1.2	โครงสร้างและส่วนประกอบของรางรถไฟ.....2
1.3	กราฟแสดงสถานการณ์ยางธรรมชาติของประเทศไทย.....3
2.1	โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (cis-1,4-Polyisoprene).....8
2.2	ประสิทธิภาพการบดขย้างยางธรรมชาติกับอุณหภูมิที่ใช้.....9
2.3	โครงสร้างทางเคมีของยางคลอโรพรีน (trans-1,4-Polychloroprene).....12
2.4	แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง.....16
2.5	กราฟการเชื่อมโยง แสดงผลของปริมาณกำมะถัน.....18
2.6	กราฟการเชื่อมโยงแสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยงแบบใช้สารเร่งและไม่ใช้สารเร่ง ปฏิกิริยารวมทั้งการเชื่อมโยงในอุดมคติ.....18
2.7	กราฟเชื่อมโยง.....25
2.8	เครื่องวัดความหนืดมูนนี่.....26
2.9	ลักษณะและรูปร่างของหัวกดตามมาตรฐานชนิดต่างๆ.....27
2.10	ชนิดของแรงที่ให้กับชั้นทดสอบ(a) แรงบิดขึ้นลงระหว่างสองคานยึด (b) แรงบิดในแนวตั้ง (c) แรงบิด และ(d) แรงเฉือน .....30
2.11	แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่อง AFM .....32
2.12	ผลของลักษณะและความแหลมของทิวที่มีต่อภาพจากเครื่อง AFM ของทิวแบบต่างๆ (a) ทิว (b) แหลมน้อย และ (c) แหลมมาก .....33
3.1	แผนผังการผสมและเตรียมชั้นทดสอบ.....41
3.2	ชั้นทดสอบรูปดัมเบลล์.....44
3.3	ลักษณะชั้นทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด.....46
3.4	เครื่องทดสอบ Atomic Force Microscope.....48
4.1	ยางรองรางรถไฟที่ใช้ในปัจจุบัน.....49
4.2	ความหนืดมูนนี่ (ML 1 + 4 (100 °C)) ของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ.....50
4.3	ค่าความแข็งแรงดึงของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ.....51
4.4	ค่าร้อยละการยึด ฉูดขาดของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ.....52
4.5	ค่ามอดุลัสที่ 100 % ของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ.....52
4.6	ค่าความแข็งกดของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ.....53
4.7	ผลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อสมบัติของยาง.....54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มเร่งของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ.....	55
4.9 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ.....	55
4.10 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ.....	56
4.11 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ.....	56
4.12 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ .....	57
4.13 ค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ.....	57
4.14 กราฟการเชื่อมโยงของยางคลอโรพรีน.....	58
4.15 ความหนืดมูนนี่ (ML(1+4) 100°C) ของยาง CR และยาง NR-5, NR-10, NR-15 และ NR-20 ที่ใช้เวลาดบย่อ 5, 10, 15, 20 นาที ตามลำดับ.....	59
4.16 ค่าความแข็งแรงดึง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	60
4.17 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	61
4.18 ค่ามอดูลัสที่ 100 % แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	61
4.19 ค่าความแข็งแรงกด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	62
4.20 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	63
4.21 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	64
4.22 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr...	62
4.23 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr...	63
4.24 ค่าร้อยละมอดูลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	65
4.25 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	66
4.26 ค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	66
4.27 ค่ามอดูลัสที่ 100 % หลังบ่มเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	68
4.28 AFM Micrographs ของยางผสม CR/NR ที่ไม่เติมเขม่าดำ พื้นที่สแกน 20 $\mu\text{m}$ อัตราเร็วสแกน 0.3 Hz รูปประเภท Phase image (a) 75/25 และ (b) 25/75.....	69
4.29 AFM Micrographs ของยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr พื้นที่สแกน 20 $\mu\text{m}$ อัตราเร็วสแกน 0.3 Hz รูปประเภท Phase image (a) 75/25 (b) 50/50 และ (c) 25/75.....	70
4.30 รอยแตกของยางผสม CR/NR เนื่องจากโอโซน ความเข้มข้น โอโซน 50 pphm ยืด 20 % อุณหภูมิ 40°C เวลา 72 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน (a) 75/25 (b) 50/50 และ (c) 25/75.....	71

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 ค่าปัจจัยการสูญเสีย (Loss factor, $\tan \delta$ ) ของยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr แปรอัตราส่วนยางผสม 75/25, 50/50 และ 25/75.....	73
4.32 กลไกการเชื่อมโยงยางคลอโรพรีนด้วยซิงก์ออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์.....	75
4.33 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์.....	76
4.34 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์.....	76
4.35 ค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์.....	77
4.36 ค่าความแข็งแรงกดของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์.....	77
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยงกับสมบัติบางประการของยาง.....	78
4.38 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มเร่งของยางผสมยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณ แมกนีเซียมออกไซด์.....	79
4.39 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณ แมกนีเซียมออกไซด์.....	79
4.40 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณ แมกนีเซียมออกไซด์.....	80
4.41 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณ แมกนีเซียมออกไซด์.....	80
4.42 ค่าร้อยละมอดูลัสที่ 100% ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณ แมกนีเซียมออกไซด์.....	81
4.43 ค่าการขยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณ แมกนีเซียมออกไซด์.....	81
4.44 ค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณ แมกนีเซียมออกไซด์.....	82
4.45 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR 75/25 ในน้ำมัน ASTM No 1 แปรปริมาณ แมกนีเซียมออกไซด์.....	83
4.46 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR 75/25 ในน้ำมัน ASTM No 3 แปรปริมาณ แมกนีเซียมออกไซด์.....	84
4.47 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปร ปริมาณกำมะถัน.....	86

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.48 ค่าร้อยละการขีด ฉ จุดขาดของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน.....	86
4.49 ค่ามอดูลัสที่ 100 % ของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน.....	87
4.50 ค่าความแข็งกดของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปร ปริมาณกำมะถัน.....	87
4.51 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน.....	89
4.52 ค่าร้อยละการขีด ฉ จุดขาดหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน.....	89
4.53 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน.....	90
4.54 ค่าร้อยละการขีด ฉ จุดขาดที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน.....	90
4.55 ค่ามอดูลัสที่ 100 % ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน.....	91
4.56 ค่าการขยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน.....	91
4.57 ค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน.....	92
4.58 โครงสร้างของยางเมื่อทำการเชื่อม โยงด้วยกำมะถัน (a) พันธะแบบ โม โนซัลฟิดิก ไดซัลฟิดิกและพอลิซัลฟิดิก (b) โครงสร้างแบบห้อย (c) โครงสร้างแบบวง.....	93
4.59 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr ในน้ำมัน ASTM No.1 แปรปริมาณกำมะถัน.....	94
4.60 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr ในน้ำมัน ASTM No.3 แปรปริมาณกำมะถัน.....	95
4.61 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปร ปริมาณกำมะถัน.....	96

## สารบัญรูป (ต่อ)

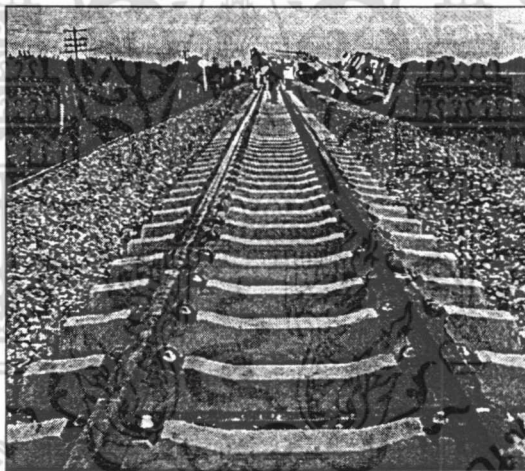
รูปที่	หน้า
4.62 ค่าร้อยละการขีด ฉ จุดขาดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน.....	97
4.63 ค่ามอดูลัสที่ 100 % ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปร ปริมาณกำมะถัน.....	97
4.64 ค่าความแข็งกดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณ กำมะถัน.....	98
4.65 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน.....	99
4.66 ค่าร้อยละการขีด ฉ จุดขาดหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน.....	100
4.67 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน.....	100
4.68 ค่าร้อยละการขีด ฉ จุดขาดที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน.....	101
4.69 ค่ามอดูลัสที่ 100 % ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน.....	101
4.70 ค่าการขยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน.....	102
4.71 ค่าการขีดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน.....	102
4.72 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 ในน้ำมัน ASTM No.1 แปรปริมาณกำมะถัน.....	104
4.73 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 ในน้ำมัน ASTM No.3 แปรปริมาณกำมะถัน.....	105

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การรถไฟแห่งประเทศไทย (ร.ฟ.ท.) เริ่มสถาปนาตั้งแต่วันที่ 26 มีนาคม 2439 ซึ่งตรงกับวันที่ พระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวเสด็จพระราชพิธีเปิดการเดินรถไฟเป็นครั้งแรก นับตั้งแต่นั้นมา มีการก่อสร้างขยายเครือข่ายเส้นทางรถไฟไปสู่ภูมิภาค เพื่อพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทางคมนาคมขนส่งและกระจายความเจริญไปสู่ภูมิภาคต่างๆ อย่างทั่วถึง ก่อให้เกิดการพัฒนาทางธุรกิจอย่างมีประสิทธิภาพให้สามารถทัดเทียมกับนานาชาติได้ ดังนั้นรัฐบาลจำเป็นต้องสนับสนุนด้านงบประมาณการลงทุนขยายเส้นทางรถไฟซึ่งในปัจจุบันยังมีโครงการก่อสร้างที่กำลังดำเนินการได้แก่ โครงการก่อสร้างทางคู่ขนานเมือง โครงการก่อสร้างเส้นทางสายใหม่ รวมระยะทางกว่า 1,000 กิโลเมตร [1] ตัวอย่างการก่อสร้างเส้นทางรถไฟสายใหม่ แสดงได้ดังรูปที่ 1.1

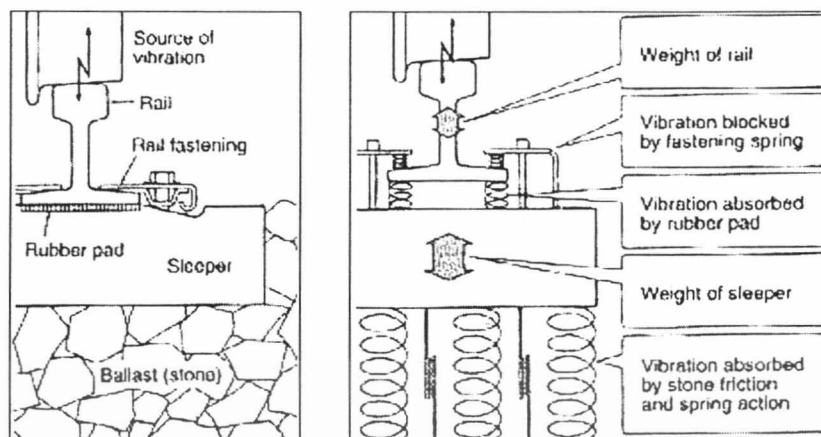


รูปที่ 1.1 การก่อสร้างทางรถไฟสายใหม่ [1]

เมื่อพิจารณาโครงสร้างและส่วนประกอบที่สำคัญในการก่อสร้างทางรถไฟ อันได้แก่ รางรถไฟ หมอน ขากรองรางและหมุดยึด แสดงดังรูปที่ 1.2 พบว่ารางและหมอนรถไฟอาจเกิดกระทบระหว่างกันทำให้ชำรุดเสียหาย หากไม่มีวัสดุมากรองรับ

ขากรองรางรถไฟ (Rail pads) คือ วัสดุที่สอดอยู่ระหว่างรางกับหมอนรถไฟเพื่อรองรับแรงสั่นสะเทือน (Vibration) ของขบวนรถไฟขณะวิ่งผ่านและช่วยรับน้ำหนักราง นอกจากนี้ยังช่วยยืดอายุการใช้งานและป้องกันการแตกร้าวของหมอนรถไฟซึ่งผลิตจากคอนกรีตเนื่องมาจากการกระทบกันระหว่างรางและหมอนรถไฟ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



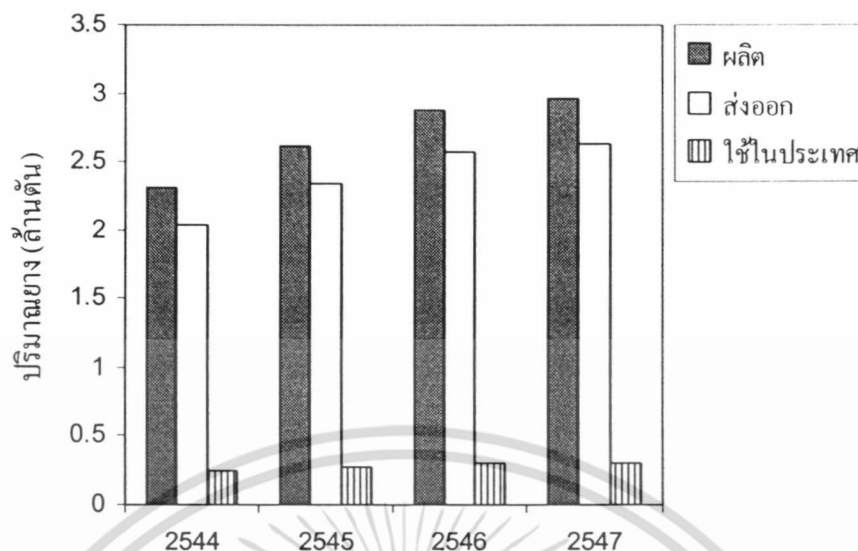
รูปที่ 1.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของรางรถไฟ [2]

ลักษณะและสมบัติที่สำคัญบางประการของยางรองรางรถไฟ ได้แก่ [2]

- สมบัติเชิงกลดี
- ทนทานต่อการเสื่อมสภาพ เช่น ความร้อน ออกซิเจนและ โอโซน
- ยืดหยุ่นและรองรับความสะเทือนดี
- สามารถรับน้ำหนักของรางรถไฟได้เป็นระยะเวลานาน
- ทนทานต่อน้ำมันพอลิโพรพิลีน

การรถไฟแห่งประเทศไทย (ร.ฟ.ท.) กำหนดให้ใช้ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber, CR) เป็นวัสดุในการผลิตแผ่นยางรองรางรถไฟ [3] เนื่องจากยางคลอโรพรีนมีสมบัติที่ดี คือ ความแข็งแรงดี ทนทานต่อน้ำมันและการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนทำให้นิยมใช้ทางด้านวิศวกรรมและประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง แต่มีข้อจำกัดบางประการเนื่องจากราคาค่อนข้างสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ [4] ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อลดการขาดดุลระหว่างประเทศและเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติ ทุกวันนี้อุตสาหกรรมยางได้พัฒนาเทคโนโลยี เช่น การใช้ยางผสม (Rubber blends) ในผลิตภัณฑ์ซึ่งมีวัตถุประสงค์ คือ ลดต้นทุนการผลิต จึงมีแนวคิดที่จะใช้ยางธรรมชาติเข้ามาทดแทนยางสังเคราะห์บางส่วน ในฐานะที่ประเทศไทยผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก โดยในปี พ.ศ. 2547 สามารถผลิตได้ประมาณ 2.96 ล้านตัน ขณะที่ปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศมีเพียง 3 แสนตัน [5] รูปที่ 1.3 แสดงสถานการณ์ยางธรรมชาติของประเทศไทย ซึ่งเห็นว่าปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศยังมีน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการส่งออกไปยังต่างประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 กราฟแสดงสถานการณ์ยางธรรมชาติของประเทศไทย [5]

ปัจจุบันมีการนำยางมาใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมการขนส่ง อุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งการใช้ยางเป็นผลิตภัณฑ์หรือส่วนประกอบต่างๆ ในผลิตภัณฑ์มีปริมาณมากและอุตสาหกรรมต่างๆ มีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่กำลังพัฒนาอย่างประเทศไทย ดังนั้นรัฐบาลควรให้การสนับสนุนผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ

ผู้วิจัยได้ศึกษาสูตรยางผสมระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ เพื่อใช้ผลิตแผ่นยางรองรางรถไฟ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ปริมาณเขม่าดำ อัตราส่วนยางผสม ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์และกำมะถัน สำหรับสมบัติที่ต้องการของยางรองรางรถไฟ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดูลัส ความแข็งกด ความทนทานต่อความร้อน ความต้านทานต่อโอโซน (Ozone resistance) ความทนทานต่อน้ำมัน (Oil resistance) การเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent set) การวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Thermal Analysis, DMTA) สัณฐานวิทยา (Morphology) เพื่อให้ได้สมบัติของวัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง โดยเฉพาะมาตรฐานของการรถไฟแห่งประเทศไทย (ร.ฟ.ท.) ดังตารางที่ 1.1 เป็นเกณฑ์กำหนดหรือมาตรฐานอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 สมบัติที่ต้องการสำหรับยางรองรางรถไฟ [3]

สมบัติเชิงกล	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง <sup>3</sup>
ความแข็งแรงดึง <sup>1</sup> (MPa)	11.77	9.81
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด <sup>1</sup> (%)	250	180
มอดุลัสที่ 100 % (MPa)	2.94 - 4.90	± 40 %
ความแข็งกด (Shore A)	65 - 80	-
ร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ <sup>1</sup> (%)	-	70
ร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ <sup>1</sup> (%)	-	60
การยุบตัวเนื่องจากแรงกด <sup>2</sup> (%)	-	30
การยืดตัวเนื่องจากแรงดึง <sup>2</sup> (%)	-	25

หมายเหตุ <sup>1</sup> ผลการทดลองที่ได้ต้องสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

<sup>2</sup> ผลการทดลองที่ได้ต้องต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

<sup>3</sup> การบ่มเร่ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C 96 ชั่วโมง

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาขงผสมสูตรที่เหมาะสมสำหรับใช้งานรองรางรถไฟ โดยเน้นสมบัติที่ได้ตามมาตรฐานของการรถไฟแห่งประเทศไทย
2. เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อขงผสม ได้แก่ อัตราส่วนขงคลอโรพรีนต่อขงธรรมชาติ และปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม
3. เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของขงผสมที่เตรียมได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อน

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขงผสมระหว่างขงคลอโรพรีนต่อขงธรรมชาติ (CR/NR) เช่น 100/0 75/25 50/50 25/75 และ 0/100
2. ศึกษาปริมาณของสารเคมีที่เหมาะสมในงานวิจัย ได้แก่ สารตัวเติมและสารเชื่อมโยง
3. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของตัวอย่างขงรถไฟที่เตรียมได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยา
4. วิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สูตรที่สามารถใช้ผลิตยางรองรางรถไฟที่มีต้นทุนการผลิตต่ำและใช้วัตถุดิบในประเทศ โดยเฉพาะยางธรรมชาติ
2. สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้และนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ หรือประยุกต์ใช้ทางผสมที่ได้กับผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น
3. ส่งเสริมปริมาณการใช้ยางธรรมชาติ ภายในประเทศให้มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ยางผสม [6-7]

ยาง (Rubbers) คือ วัสดุที่สามารถยืดตัวออกหรือเปลี่ยนรูปร่างได้มาก เมื่อได้รับแรงกระทำและสามารถหดกลับคืนให้มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับรูปร่างเดิมอย่างรวดเร็วเมื่อปล่อยแรง ซึ่งการนำยางดิบมาใช้ประโยชน์ต้องมาทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Crosslinking) หรือการวัลคาไนซ์ (Vulcanization) คือกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนโครงสร้างยางจากสายโซ่ตรงให้เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-Dimensional network) สมบัติของยางจะเปลี่ยนจากวัสดุที่มีความอ่อนนุ่ม นิ่มตัว ยืดหยุ่นต่ำ เหนียวติดและมีเสถียรภาพของรูปร่างต่ำให้กลายเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่างและทนทานต่ออุณหภูมิสูง

ยางเป็นวัสดุที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างหลากหลายในปัจจุบัน เนื่องจากยางมีสมบัติเด่น คือ สมบัติการยืดหด เหนียว ยืดหยุ่น การซึมผ่านของน้ำและก๊าซต่ำ ซึ่งยางแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาผ่านกระบวนการผลิตอาจจะได้สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ไม่ครบถ้วน ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิธีการผลิตและประยุกต์ใช้ยางผสมมาโดยลำดับ

ยางผสม (Rubber blends) คือ การนำยางอย่างน้อย 2 ชนิดมาผสมกันเพื่อให้ได้วัสดุชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติดีขึ้นและลดต้นทุนการผลิต บางครั้งยางผสมช่วยแก้ปัญหาด้านกระบวนการผลิตของยางบางชนิดได้ เช่น เหนียวติดลูกกลิ้งทำให้สารเคมีกระจายตัวไม่ดี อย่างไรก็ตามการผสมยางเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์จะต้องมีความเข้าใจในวิธีการผสมและผลของสารเติมแต่ง เนื่องจากยางแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่าง เช่น ระดับความอืดตัวและลักษณะความเป็นขี้วในโครงสร้างที่แตกต่างกัน

ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้ยางผสมในการทำผลิตภัณฑ์ ได้แก่

1. อัตราส่วนและชนิดยาง
2. วิธีการและประสิทธิภาพการผสม
3. การกระจายตัวของสารเติมแต่ง เช่น สารตัวเติม (Filler) พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) และสารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent)

วิธีการผสมยางส่วนใหญ่ที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง คือ การใช้เครื่องมือที่โรงงานผสมยางและสารเคมีใช้ ได้แก่ เครื่องผสมแบบระบบเปิด (External mixer) เช่น เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) หรือเครื่องผสมแบบระบบปิด (Internal mixer) สำหรับในขั้นตอนกระบวนการผสมยาง ควรบดยางทั้งสองชนิดให้มีความหนืดใกล้เคียงกันก่อนที่จะผสมเพื่อให้ยางทั้งสองชนิดเข้ากันได้ดีขึ้น ตัวอย่างการผสมยางที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ยางธรรมชาติผสมกับ

ยางสังเคราะห์ ยางสังเคราะห์ผสมกับยางสังเคราะห์หรือยางผสมกับพลาสติก สำหรับงานวิจัยนี้ขอกล่าวถึงการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์และยางสังเคราะห์ผสมกับยางสังเคราะห์

### 1. การผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ (Natural and Synthetic rubber blends)

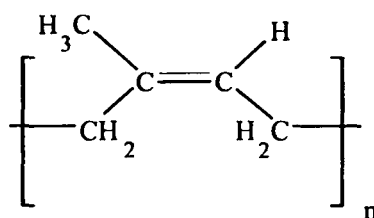
ยางธรรมชาติมีลักษณะทางเคมีเป็น โมเลกุลที่ไม่แสดงขั้ว ทำให้ผสมกับยางสังเคราะห์ชนิดที่ไม่แสดงขั้วได้ดีกว่าชนิดที่แสดงความเป็นขั้ว เช่น ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (Styrene butadiene rubber, SBR) ยางบิวตะไดอิน (Butadiene rubber, BR) เป็นต้น ซึ่งการผสมในลักษณะนี้ทำให้สมบัติเด่นของยางสังเคราะห์แต่ละชนิดช่วยเสริมให้กับยางธรรมชาติ เช่น ด้านทานการสึกหรอหรือทนทานต่อการเสื่อมสภาพดีขึ้น ส่วนสมบัติเด่นของยางธรรมชาติที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพแก่ยางสังเคราะห์ เช่น ความแข็งแรงดีขึ้น เพิ่มการยึดติดระหว่างกระบวนการประกอบชิ้นส่วน

### 2. ยางสังเคราะห์ผสมกับยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber blends)

การผสมยางสังเคราะห์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เนื่องด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพ โดยประสานสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดสำหรับยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติความเป็นขั้วสูง เช่น ยางไนไตรล์ เมื่อนำมาผสมกับยางชนิดอื่นได้ในปริมาณจำกัด บางครั้งมีการผสมยางธรรมชาติลงไปเพื่อลดการเหนียวติดลูกกึ่งและต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง ยางไนไตรล์ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ต่ำสามารถผสมกับยางสไตรีนบิวตะไดอินได้ในปริมาณมากเพื่อให้สมบัติทางกายภาพดีขึ้น ตัวอย่างเช่น ทนทานต่อการบวมตัวเมื่อสัมผัสกับสารละลาย

## 2.2 ยางธรรมชาติ [4,8-9]

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ ซิส 1,4 พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-Polyisoprene, PI) ได้จากธรรมชาติ เช่น ต้นยางพารา หรือชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Hevea brasiliensis* ในน้ำยางธรรมชาติมีปริมาณพอลิไอโซพรีนประมาณ 35 % โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารประกอบเคมีที่ไม่ใช่ยาง เช่น โปรตีน ไขมันและเกลีโอนินทรีย์ 5 % และน้ำ 60 % โดยน้ำหนัก ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างสายโซ่ยาว น้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) ซ้ำๆ กัน มาเชื่อมต่อเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.1



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

อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ของยางธรรมชาติประมาณ  $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$  มีสมบัติการกระดอนตัวสูงและการคืบ (Creep) ต่ำ ยางธรรมชาติสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางและหลากหลาย การใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติต้องแปรรูปน้ำยางดิบให้อยู่ในรูปแบบอื่นเพื่อความสะดวกในการใช้งาน ขนย้ายและการเก็บรักษา ได้แก่ ยางแห้ง (Dry rubber) และน้ำยางข้น (Concentrated latex) เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยนี้ขอก้าวถึงยางแห้งในรูปของยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheets, RSS) นำมาพิจารณาแยกเกรดหรือชั้น 6 ชั้นตามลักษณะความสม่ำเสมอของสีความแห้ง ความสะอาด ปริมาณฟองอากาศและสิ่งสกปรกเจือปนเมื่อแยกชั้นแล้วยางจะถูกอัดเป็นก้อน (Bale) ก้อนละ 100 กิโลกรัมหรือ 113 กิโลกรัม (250 ปอนด์) โดยเคลือบก้อนยางด้วยแป้ง (Talc) เพื่อป้องกันยางติดกัน

### 2.2.1 ยางแผ่นรมควัน

ข้อบังคับว่าด้วยมาตรฐานคุณภาพและการบรรจุหีบห่อยางธรรมชาติ จัดแบ่งยางแผ่นรมควันเป็น 6 ชั้นคือ [10]

1. ยางแผ่นรมควันชั้น 1 พิเศษ (No.1X RSS) เป็นยางแผ่นรมควันที่มีการควบคุมการผลิตอย่างเข้มงวด ก้อนยางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยของยางถูกรมควันมากเกินไป แผ่นยางต้องแห้งดี สะอาด รมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

2. ยางแผ่นรมควันชั้น 1 (No.1 RSS) ก้อนยางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยของยางถูกรมควันมากเกินไป แผ่นยางต้องแห้งดี สะอาด รมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

3. ยางแผ่นรมควันชั้น 2 (No.2 RSS) ก้อนยางแต่ละก้อนมีเชื้อราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 5 % ปราศจากร่องรอยของการรมควัน ไม่สม่ำเสมอมีฟองอากาศบ้าง แผ่นยางต้องแห้งดี สะอาดและไม่มีจุดต่างของสิ่งสกปรก

4. ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (No.3 RSS) ก้อนยางแต่ละก้อนมีเชื้อราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 10 % ปราศจากร่องรอยของการรมควัน ไม่สม่ำเสมอมีฟองอากาศบ้าง แผ่นยางต้องแห้งดี สะอาดและไม่มีสิ่งแปลกปลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

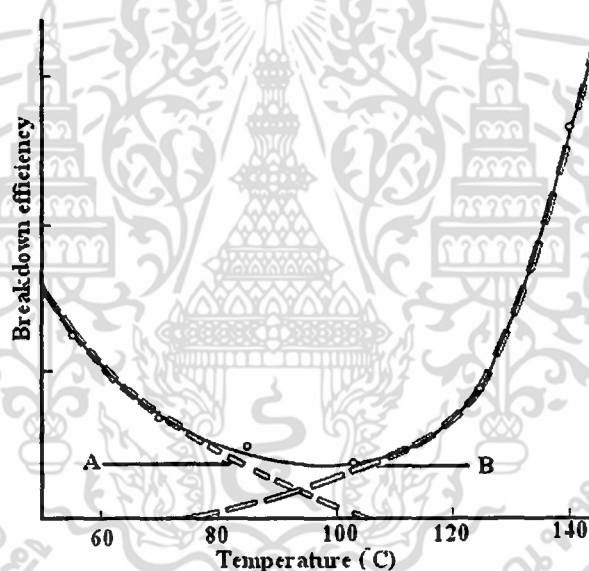
5. ยางแผ่นรมควันชั้น 4 (No.4 RSS) ก้อนยางแต่ละก้อนมีเชื้อราขึ้นบ้างแต่ต้องไม่เกิน 20 % มีฟองอากาศและร่องรอยการรมควันไม่สม่ำเสมอปานกลาง แผ่นยางต้องแห้งดี สะอาดและไม่มีสิ่งแปลกปลอม

6. ยางแผ่นรมควันชั้น 5 (No.5 RSS) ก้อนยางมีเชื้อราขึ้นแต่ต้องไม่เกิน 30 % แผ่นยางมีจุดต่างฟองอากาศและร่องรอยการรมควันที่ไม่สม่ำเสมอมีขนาดใหญ่

### 2.2.2 สมบัติของยางธรรมชาติ

#### 1. การบดและการผสมสารเคมี

ยางธรรมชาติโดยทั่วไปมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการเก็บรักษานาน แม้ว่าเป็นยางธรรมชาติชนิดเกรดความหนืดคงที่ (Constant viscosity rubbers) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบดยาง (Mastication) ก่อนผสมสารเคมี แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นข้อเสียเปรียบของยางธรรมชาติ ในขณะที่ยางสังเคราะห์สามารถนำไปผสมสารเคมีได้โดยไม่ต้องบดยาง



รูปที่ 2.2 ประสิทธิภาพการบดยางธรรมชาติกับอุณหภูมิที่ใช้ [9]

จากรูปที่ 2.2 พบว่าที่อุณหภูมิต่ำเกิดแรงเฉือนระหว่างยางและเครื่องผสม ประสิทธิภาพในการตัดสายโซ่เกิดเนื่องจากแรงเฉือนทำให้น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดลดลง ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นยางจะนิ่มและอ่อนตัว แรงเฉือนระหว่างยางและเครื่องผสมลดลงทำให้ประสิทธิภาพในการตัดสายโซ่เริ่มลดลง อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิผสมสูงกว่า 100 °C ประสิทธิภาพในการตัดสายโซ่ดีขึ้น ซึ่งเกิดเนื่องจากการเสื่อมสภาพ (Degradation) ด้วยความร้อน ดังนั้นการบดยางธรรมชาติไม่ควรกระทำที่อุณหภูมิสูงเพราะนอกจากทำให้ประสิทธิภาพในการผสมลดลงแล้ว ยังทำให้ยางเสื่อมสภาพได้ง่าย

ดังนั้นการบดขยี้ๆ กันหลายครั้งทำให้ยางผสมสูตรที่ได้ นิ่มเกินความต้องการ ซึ่งปัญหาการแปรรูปจะตามมา เช่น สารเคมีกระจายตัวได้ไม่ดีในยางที่นิ่มเกินไปหรือเกิดอากาศขังอยู่ในยางขณะขึ้นรูปทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหาย

## 2. การเชื่อมโยง

ยางธรรมชาติเชื่อมโยงได้รวดเร็วที่อุณหภูมิปานกลาง ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ทำให้ใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ในปริมาณน้อยได้ อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติจะเสื่อมสภาพได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง ( $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ดังนั้นไม่ควรใช้เวลาเชื่อมโยงนานเกินไปซึ่งอาจทำให้สมบัติเชิงกลของยางลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง มอดูลัส ร้อยละการยืด ณ จุดขาด

### 2.2.3 สมบัติของยางเชื่อมโยง

#### 1. ความแข็ง

ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยงแล้วยังสามารถปรับปรุงให้มีความแข็งต่างๆ กันได้ ตั้งแต่ยางที่มีความนิ่มมากจนกระทั่งได้ยางที่มีความแข็งมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางที่มีความแข็งสูง ซึ่งทำโดยการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมหรือกำมะถัน ยางผสมสูตรที่มีปริมาณกำมะถัน 10 - 20 phr ทำให้มีความแข็งคล้ายหนังเทียม ขณะที่ความแข็งแรงดึงต่ำและเสื่อมสภาพง่าย

#### 2. ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

ยางธรรมชาติเกิดผลึกได้เมื่อดึง (Strain-induced crystallization) ทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงและต้านทานการฉีกขาดสูง ข้อดีของยางธรรมชาติ คือ มีความเหมาะสมในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความบาง นิ่มและแข็งแรง เช่น ถุงมือผ่าตัด ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย สายยางยืด นอกจากนั้นยางธรรมชาติยังสามารถใช้สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing filler) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความแข็งแรงเป็นสมบัติหลัก ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ยางรองพื้นรถ ยางปูพื้น ยางรองขาเก้าอี้ เป็นต้น ซึ่งยางธรรมชาติได้เปรียบด้านต้นทุนการผลิตและสามารถใช้สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) ที่มีราคาแพง เช่น เขม่าดำ หรือซิลิกา ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงสูง

#### 3. ความสามารถในการยืด (Elongation)

ยางธรรมชาติที่ผ่านการเชื่อมโยงจะยืดสูงและคืนตัวได้ดี ในขณะที่ขบวนการยืดของยางลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมและพันธะเชื่อมโยง ซึ่งข้อดีของยางธรรมชาติเนื่องจากการยืดตัวสูงทำให้นิยมผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานในการยืดและแข็งแรงสูง เช่น ถุงมือ ถุงยางอนามัย

#### 4. ความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength)

ยางธรรมชาติมีความสามารถในการเกิดผลึกเมื่อดึง ทำให้มีความต้านทานการฉีกขาดสูงกว่ายางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ ยกเว้น ยางพอลิยูรีเทนที่เชื่อมโยงเกิดพันธะไฮโซไซยานเนต ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความต้านทานการฉีกขาดของยางเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารตัวเติมชนิดเสริมแรง

### 5. การกระดอนตัวของยางธรรมชาติ (Damping)

ยางธรรมชาติกระดอนตัวสูงกว่ายางชนิดอื่น ยกเว้น ยางบิวตะไดอิน (Butadiene rubber) เพียงชนิดเดียวที่มีการกระดอนตัวสูงกว่ายางธรรมชาติ ในขณะที่การกระดอนตัวลดลงของยางลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม โดยทั่วไปยางธรรมชาติเมื่อได้รับแรง พลังงานจะสูญเสียไว้ในยางต่ำ ซึ่งยางธรรมชาติสามารถผลิตเป็นดอกยางของรถบรรทุกที่มีความหนาและถ่ายเทความร้อนต่ำได้

### 6. การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature)

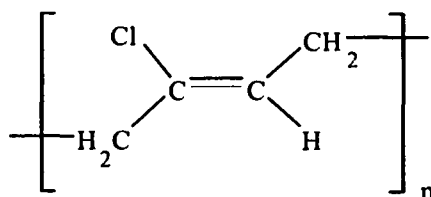
ยางธรรมชาติสามารถห้ก่งอที่อุณหภูมิต่ำได้ดี เนื่องจากมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ  $-73^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นยางธรรมชาติมีสถานะยาง (Rubbery state) ที่อุณหภูมิต่ำ ดีกว่ายางสังเคราะห์ทั่วไป ยกเว้น ยางบิวตะไดอินและยางซิลิโคน เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำในช่วงเวลาสั้นๆ ได้ดีและสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม โดยการเติมน้ำมันลงในยางธรรมชาติ

### 7. ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)

ยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยกัมมะถัน ได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามพันธะคู่ใน โครงสร้างจะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายต่อออกซิเจนและโอโซน อาจกล่าวได้ว่าการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ ไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการความทนทานต่อความร้อนและบรรยากาศที่มีโอโซน ซึ่งการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่อออกซิเจน (Antioxidant) และสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่อโอโซน (Antiozonant) ช่วยให้ผลิตภัณฑ์ยางทนทานดีขึ้น

## 2.3 ยางคลอโรพรีน [4,7-9,11]

ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber, CR) เป็นยางสังเคราะห์ที่ผลิตใช้มาเป็นระยะเวลานาน และนิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ trans-1,4-Polychloroprene เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของคลอโรพรีนหรือ (2-chloro-1,3-butadiene) โดยโครงสร้างทางเคมีของยางคลอโรพรีน แสดงดังรูปที่ 2.3 ในโครงสร้างยางคลอโรพรีนมีพันธะคู่ไม่อิ่มตัวคล้ายกับยางธรรมชาติ แต่ยางคลอโรพรีนมีสมบัติทนทานต่อการเสื่อมสภาพดี เนื่องจากอะตอมของคลอรีนซึ่งมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity, EN) สูงจะอยู่ใกล้พันธะคู่ จึงช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาจากโอโซนหรือออกซิเจนในบรรยากาศ ชื่อทางการค้าของยางคลอโรพรีนที่รู้จักกันดี คือ นีโอพรีน (Neoprene<sup>®</sup>) ซึ่งผลิตโดยบริษัทดูปองท์



**รูปที่ 2.3** โครงสร้างทางเคมีของยางคลอโรพรีน (trans-1,4-Polychloroprene) [4]

ลักษณะทางกายภาพของยางคลอโรพรีนเป็นก้อนสีเหลืองอ่อนหรือสีเทาเงิน ความหนาแน่นประมาณ 1.23 - 1.25 g/cm<sup>3</sup> อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ - 50 °C มีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ทนทานต่อน้ำมัน โอโซนและดินฟ้าอากาศ ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ทำให้ยางคลอโรพรีนนิยมนำใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง

ยางคลอโรพรีนที่นิยมนำใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

**1. ยางคลอโรพรีนชนิดที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ (Sulfur - modified)**

ยางคลอโรพรีนชนิดที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ สามารถเชื่อมโยงได้รวดเร็วโดยไม่ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยาแต่ไม่สามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน ส่วนสมบัติทางกายภาพของยางชนิดนี้ เช่น ความต้านทานการฉีกขาด ต้านทานการหักงอและกระดองตัวดี

**2. ยางคลอโรพรีนชนิดที่มีเมอร์แคปแทนเป็นองค์ประกอบ (Mercaptan - modified)**

ยางคลอโรพรีนชนิดที่มีเมอร์แคปแทนเป็นองค์ประกอบ สามารถเก็บรักษาได้นาน โดยสมบัติทางกายภาพไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ยางมีสมบัติทนต่อความร้อนดีและยุบตัวเนื่องจากแรงกดต่ำ สำหรับการเชื่อมโยงยางชนิดนี้ต้องใช้ร่วมกับสารเร่ง

**2.3.1 สมบัติของยางคลอโรพรีน**

**1. การแปรรูป (Processing)**

ข้อจำกัดของยางคลอโรพรีนชนิดที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ คือ ความเหนียวของยางเพิ่มขึ้นเมื่อต้องเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานและมีโอกาสที่ยางเชื่อมโยงก่อนกำหนดหรือสกอร์ช (Scorch) ซึ่งสามารถสังเกตการเสื่อมสภาพของยางได้จากสียางเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีคล้ำ โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตส่วนใหญ่จะเกิดความร้อนเพิ่มสูงขึ้นขณะผสม ทำให้ยางผสมสูตรหรือยางคอมปาวด์ (Compound rubber) มีโอกาสเกิดสกอร์ชง่าย ดังนั้นไม่ควรใช้อุณหภูมิผสมสูงเกินไป และมีการควบคุมอุณหภูมิอย่างเหมาะสม ซึ่งยางชนิดนี้ไม่มีปัญหาในด้านกระบวนการผลิต เช่น การอัดรีด (Extrusion) หรืออัดขึ้นรูป (Compression molding) เนื่องจากยางคลอโรพรีนเป็นยางที่มีความแข็งแรงก่อนเชื่อมโยง (Green strength) สูงและมีสมบัติการเหนียวดีดี

## 2. การเชื่อมโยง (Vulcanization)

### 1) ระบบเชื่อมโยง

อะตอมคลอรีน (Chlorine, Cl) ในโครงสร้างยางคลอโรพรีนทำหน้าที่ช่วยลดความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของพันธะคู่ จึงไม่สามารถเชื่อมโยงด้วยกำมะถันได้ แต่จำเป็นต้องใช้สารเชื่อมโยงชนิดอื่น โดยทั่วไประบบที่นิยมในอุตสาหกรรมมากที่สุด คือ การใช้สารผสมระหว่างซิงก์ออกไซด์ (ZnO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

ในกรณีของการเชื่อมโยงยางคลอโรพรีนชนิดที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ โดยปกติไม่นิยมใช้สารเร่ง ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ Tetramethylthiuram disulfide (TMTD) หรือ Benzothiazyl disulfide (MBTS) ในปริมาณเล็กน้อยเพื่อเป็นสารหน่วงไม่ให้เกิดการสกรอซ สำหรับยางคลอโรพรีนชนิดที่มีเมอร์แคปแทนเป็นองค์ประกอบ นิยมใช้สารเร่งเอทิลีน ไทโอยูเรีย (Ethylene-thiourea, ETU)

### 2) ระบบสารตัวเติมและพลาสติกไซเซออร์

ยางคลอโรพรีนสามารถเกิดผลึกได้เมื่อดึง (Strain - induced crystallization) คล้ายยางธรรมชาติ ดังนั้นยางคลอโรพรีนที่ไม่ผสมสารตัวเติมจึงมีความแข็งแรงดึงและต้านทานการฉีกขาดที่ดี สำหรับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงนิยมใช้เซมาค้ำ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความสวยงามใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม นอกจากนี้ยังทำให้มีความต้านทานการฉีกขาดดี

การเลือกพลาสติกไซเซออร์สำหรับยางคลอโรพรีนต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ เนื่องจากเหตุที่ว่าคลอโรพรีนเป็นยางที่มีขั้วทำให้ผสมกับน้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) และน้ำมันแนฟทานิก (Naphthanic oil) ได้ในปริมาณที่จำกัด แต่ไม่ควรเลือกใช้น้ำมันพาราฟิน (Paraffinic oil) ซึ่งปกติแล้วยางคลอโรพรีนที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณมากและมีความหนืดสูง ถ้าจำเป็นต้องใช้น้ำมันสูงกว่า 25 phr ควรใช้น้ำมันอะโรมาติก

### 3) ระบบป้องกันการเสื่อมสภาพของยางคลอโรพรีน

อะตอมคลอรีน โมเลกุลของยางคลอโรพรีน ซึ่งช่วยลดความว่องไวของพันธะคู่ในโครงสร้างทำให้ยางคลอโรพรีนทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนดีกว่ายางธรรมชาติ และยางสไตรีนบิวตะไดอิน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไม่นิยมใช้ยางคลอโรพรีนผลิตเป็นฉนวนไฟฟ้า เนื่องจากยางชนิดนี้มีสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Electric insulator properties) ต่ำกว่ายางประเภทไฮโดรคาร์บอนทั่วไป

### 2.3.2 การใช้งานของยางคลอโรพรีน

ยางคลอโรพรีนเป็นยางที่ใช้ในด้านวิศวกรรม (Engineering rubber) เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม สำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตจากยางคลอโรพรีน ได้แก่ ท่อยาง สายพาน ซีล ยางรองคอสพาน ปลูกหุ้มสายเคเบิลและข้อต่อสายไฟฟ้า

## 2.4 การผสมยาง [4]

การผสมยาง (Rubber compounding) เป็นขั้นตอนการผสมยางดิบที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยงกับสารเคมีที่จำเป็นของยาง องค์ประกอบสำคัญของยางผสมสูตร ได้แก่

1. ยาง เป็นองค์ประกอบหลักสามารถเลือกใช้ในหลายรูปแบบ เช่น ยางดิบ ยางมาสเตอร์เบช (Masterbatch rubber) หรือยางผสมสูตรสำเร็จ ยางผสมเขม่าดำ ยางรีเคลม (Reclaimed rubber) หรือ ยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer)

2. สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agents) ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางสายโซ่ตรงให้เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ โดยเกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง เช่น กำมะถัน เปอร์ออกไซด์ ออกไซด์ของโลหะ

3. สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเร็วขึ้น ทำให้เวลาการเชื่อมโยงลดลง การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้นและใช้สารเชื่อมโยงปริมาณน้อยลง

4. สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) หรือคิกเกอร์ (Kicker) ทำหน้าที่กระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง เกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับสารเร่งปฏิกิริยา ทำให้สารเร่งมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น อัตราเร็ว การเชื่อมโยงสูง เวลาเชื่อมโยงลดลง

5. สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนให้กับผลิตภัณฑ์ยาง สารตัวเติมบางชนิดสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับยางด้วย เช่น เขม่าดำ ซิลิกา

6. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) ทำหน้าที่ลดการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากสภาวะแวดล้อมและช่วยในการเก็บรักษาหรือการใช้งาน

7. พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) คือ สารที่เติมลงในยางเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยาง

8. สารเติมแต่งอื่นๆ (Miscellaneous ingredients) เพื่อเพิ่มสมบัติบางประการ เช่น

- สารหน่วง (Retarders) เติมเพื่อป้องกันการสกรอช ขณะเก็บรักษาหรือระหว่างกระบวนการผลิตทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงช้าลงและมีเวลาเพียงพอในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

- สารให้สี (Colorants) ทำหน้าที่เปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ยาง ให้มีสีสันสวยงาม

- สารให้ฟอง (Blowing agent) ใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุน เช่น โฟม

- สารให้กลิ่น (Odorants) เป็นสารที่เติมลงไปในการ เพื่อให้มีกลิ่นหอมหรือระงับกลิ่นของยาง

- สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) ช่วยเพิ่มสมบัติการยึดติดที่ผิวหน้ายาง ให้เหนียวและยึดติดกับวัสดุอื่นหรือยางได้ดีขึ้น

ขั้นตอนแรกในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ก่อนกระบวนการผลิตจำเป็นต้องออกสูตรยาง (Rubber formulation) คือ กำหนดชนิด ปริมาณยางและสารเติมแต่งต่างๆ ที่ผสมเป็นยางผสมสูตร ซึ่งมีผลโดยตรงกับสมบัติต่างๆ ของยาง

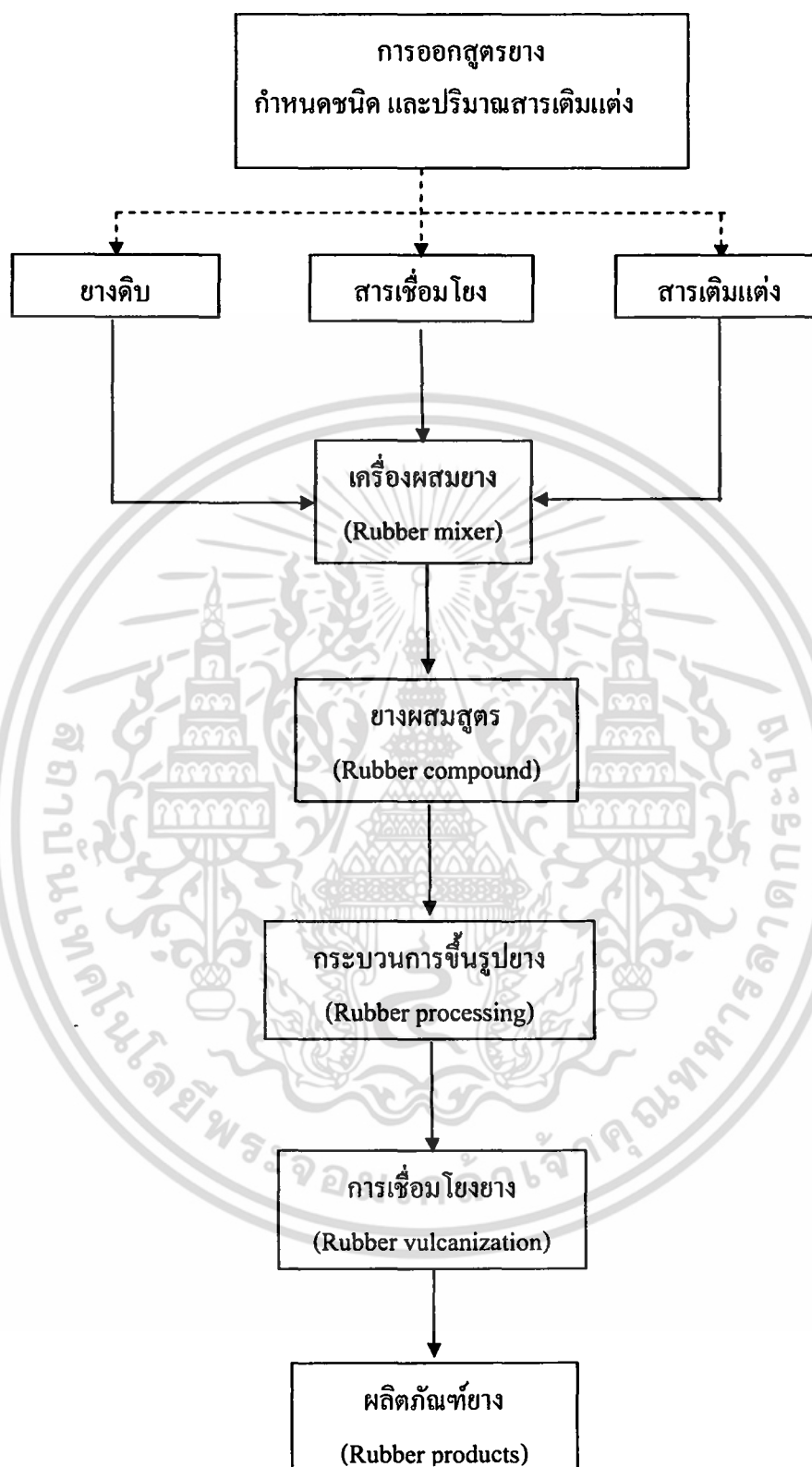
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- การกำหนดสัดส่วนปริมาณของสารต่างๆ ในสูตรยางกำหนดด้วย (Parts per Hundred of Rubber) หรือส่วนในร้อยส่วนของยาง
- ปกตินิยมเขียนสูตรยาง เรียงตามลำดับการผสมยาง เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน
- น้ำหนักรวมของยางผสมสูตร สามารถใช้ในการคำนวณต้นทุนการผลิตต่อน้ำหนักยาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 สารเติมแต่งสำหรับยาง [4,11-13]

### 2.5.1 สารเชื่อมโยง

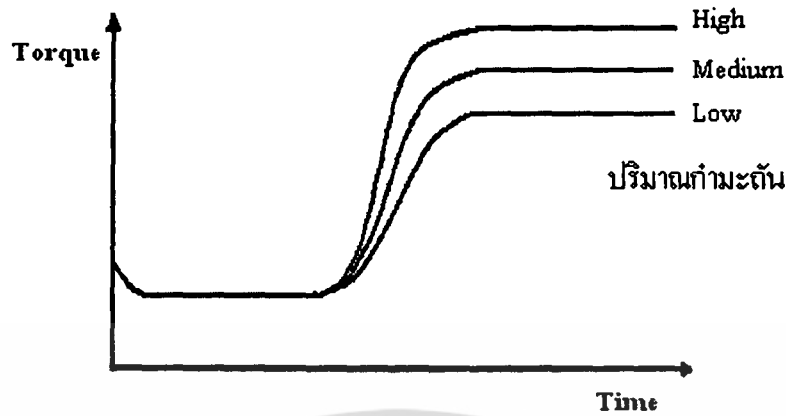
สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) คือ สารที่เติมลงในยางแล้วสามารถเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่ตรงเป็น โครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-Dimensional network) เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางเพื่อปรับปรุงข้อดีของยาง คือ ความยืดหยุ่นต่ำ อ่อน นิ่ม มีเสถียรภาพต่อรูปร่างต่ำกลายเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ยืดหยุ่นสูง เสถียรภาพต่อรูปร่างและทนอุณหภูมิสูง

สารเชื่อมโยงแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่

1. กำมะถัน (Sulfur)
2. สารให้กำมะถัน (Sulfur donor)
3. สารเปอร์ออกไซด์ (Peroxide)
4. ซีลีเนียม (Selenium ) และเทลลูเรียม (Tellurium)
5. สารอื่นๆ เช่น โลหะออกไซด์ (Metal oxide) ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin)

ปฏิกิริยาเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ยางคือ พันธะเชื่อมโยง 1 พันธะในทุกๆ 200 หน่วย โครงสร้างโมโนเมอร์ของยาง (Monomer units) หรือยางมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมโยง (Molecular weight between crosslink,  $M_c$ ) ประมาณ 8,000 ถึง 12,000 g/mol ปริมาณการเชื่อมโยงของยางนิยมนิยามได้โดยใช้ “องศาการเชื่อมโยง” (Degree of crosslink) หรือความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) สัมพันธ์กับจำนวนพันธะเชื่อมโยงในหนึ่งหน่วยปริมาตรของยาง

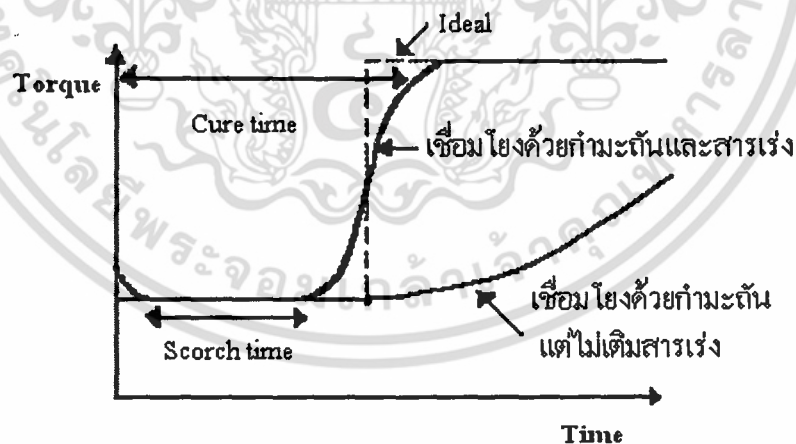
การเพิ่มปริมาณกำมะถันลงในยางแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง ส่งผลให้องศาการเชื่อมโยงสูงและแนวโน้มเกิดการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟดิก (Polysulfidic) มากขึ้น ซึ่งองศาการเชื่อมโยงมีผลต่อสมบัติของยาง เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อน ผลของปริมาณกำมะถันที่มีต่อกราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงดังรูปที่ 2.5 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน ส่งผลให้เวลาสกอรัชลดลง ในขณะที่ความแข็งแรงดึง ความแข็งกดและมอดูลัสของยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากองศาการเชื่อมโยงที่เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 2.5 กราฟการเชื่อม โยง แสดงผลของปริมาณกำมะถัน [4]

### 2.5.2 สารเร่งปฏิกิริยา

สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) คือ สารที่เติมในยางแล้วทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Cure rate) เร็วขึ้น ลดเวลาเชื่อม โยง (Cure time) รวมทั้งทำให้การเชื่อม โยงมีประสิทธิภาพมากขึ้นและใช้ปริมาณกำมะถันน้อยลง แสดงดังรูปที่ 2.6 พบว่าการใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียวเกิดการเชื่อม โยงได้ แต่ต้องใช้เวลาานานมากถึงจะเชื่อม โยงอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากกำมะถันมีอัตราเร็วการเชื่อม โยงต่ำ ขณะที่การใช้สารเร่งปฏิกิริยาช่วยเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาและลดเวลาเชื่อม โยงอย่างมาก



รูปที่ 2.6 กราฟการเชื่อม โยง แสดงความแตกต่างของการเชื่อม โยงแบบใช้สารเร่งและไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งการเชื่อม โยงในอุดมคติ [4]

จากรูปที่ 2.6 แสดงกราฟการเชื่อม โยง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Torque) กับเวลาที่ได้จากเครื่องวัดการเชื่อม โยงยางเพื่อศึกษาเวลาการขึ้นรูปที่เหมาะสม โดยจุดที่แรงบิดเพิ่มขึ้นสัมพันธ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับจุดเริ่มเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงซึ่งความหนืดของยางผสมสูตรหรือแรงบิดของจานหมุนเพิ่มขึ้น เกิดเนื่องจากโครงสร้างยางเปลี่ยนจากสายโซ่ตรงเป็นร่างแหสามมิติ ทำให้ทราบเวลาเริ่มเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time) พึ่งสังเกตว่ายางสามารถเคลื่อนที่หรือไหลได้ก่อนถึงเวลาสกอร์ช ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ต้องการไหลของยาง เช่น การฉีดขึ้นรูป การอัดขึ้นรูปจะต้องทำให้เป็นรูปร่างที่ต้องการก่อนถึงเวลาสกอร์ช

### 1. ชนิดของสารเร่งปฏิกิริยา

โดยทั่วไปสารเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ด้วยกันหลายชนิดและสารเร่งแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างกัน เช่น เวลาสกอร์ช อัตราเร็วการเชื่อมโยง การละลายในยาง จึงควรเลือกชนิดสารเร่งที่เหมาะสมเนื่องจากมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามการใช้สารเร่งสำหรับอุตสาหกรรมยางบางครั้งจะต้องใช้มากกว่าหนึ่งชนิดซึ่งสารเร่งที่ใช้ในปริมาณมากกว่าเรียกว่า “สารเร่งปฐมภูมิ” (Primary accelerators) ส่วนสารเร่งที่ใช้ปริมาณน้อยกว่าเรียกว่า “สารเร่งทุติยภูมิ” (Secondary accelerators)

### 2. หลักการใช้สารเร่งปฏิกิริยา

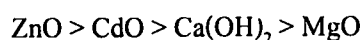
- 1) เนื่องจากสารเร่งที่ใช้มีปริมาณน้อย ส่วนใหญ่นิยมผลิตเป็นผง ซึ่งอาจเกิดการสูญเสียสารเร่งระหว่างการผสมได้ ดังนั้นควรใช้งานอยู่ในรูปเม็ดหรือมาสเตอร์แบช
- 2) ควรเติมสารเร่งเป็นลำดับหลังสุดเพื่อป้องกันการสกอร์ช
- 3) ไม่ควรเติมสารเร่งมากเกินไปเพราะทำให้เกิดการแพร่หรือบลูม (Bloom) ของสารเร่งและก่امةดันออกมาที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ยาง

### 2.5.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยา

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) คือ สารที่เติมเพื่อเร่งอัตราการเชื่อมโยงยางให้เกิดเร็วขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์และทำให้มอดุลัสของยางสูงขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

#### 1. สารอนินทรีย์

สารกระตุ้นประเภทอนินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นพวกโลหะออกไซด์ เช่น แคดเมียมออกไซด์ (CdO) ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ความว่องไวของสารกระตุ้นปฏิกิริยา เรียงลำดับดังนี้



ซิงก์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นที่นิยมใช้กันทั่วไป แต่เป็นสารที่มีราคาค่อนข้างแพง เนื่องจากความถ่วงจำเพาะประมาณ 5.57 ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงการใช้ในปริมาณมาก ซึ่งปกติแล้วนิยมใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิงก์ออกไซด์ในปริมาณ 3-5 phr สำหรับเกรดของซิงก์ออกไซด์แบ่งได้ตามความบริสุทธิ์ขึ้นกับปริมาณตะกั่วที่ปนเปื้อนอยู่ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ปริมาณตะกั่วน้อย (White seal) และปริมาณตะกั่วมาก (Red seal) ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ยางมีสีดำสามารถใช้ซิงก์ออกไซด์ที่มีปริมาณตะกั่วมากได้ในทางตรงข้ามกรณีที่มีสีอ่อนสวยงานจะใช้ซิงก์ออกไซด์ที่มีปริมาณตะกั่วน้อย

## 2. สารอินทรีย์

สารกระตุ้นประเภทอินทรีย์ที่สำคัญ ได้แก่ กรดสเตียริก ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$ ) กรดลอริก ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$ ) กรดปาล์มิติก ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$ ) เป็นต้น สำหรับกรดสเตียริกเป็นกรดไขมันที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งปริมาณกรดไขมันที่ใช้ขึ้นกับชนิดของยาง ถ้ายางชนิดใดมีกรดไขมันอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องเติมหรือใช้ในปริมาณน้อย โดยทั่วไปในการผสมสารเคมีกับยางธรรมชาติใช้กรดสเตียริกประมาณ 1-3 phr

### 2.5.4 สารตัวเติม

หน้าที่ของสารตัวเติม มีดังนี้

- เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของยาง
- ช่วยให้การแปรรูปง่ายขึ้น
- ลดการบวมตัวในน้ำมัน
- เพิ่มการนำไฟฟ้า
- เพิ่มอายุการใช้งานของยาง
- ลดต้นทุน

สารตัวเติม แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มปริมาณ ลดต้นทุนการผลิต และเสริมแรงทำให้ความแข็งแรงของยางสูงขึ้น สารตัวเติมประเภทนี้ ได้แก่ เขม่าดำ ซิลิกา เป็นต้น
2. สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว แต่ไม่เสริมแรงให้กับยาง สารตัวเติมประเภทนี้ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว เป็นต้น

สารตัวเติมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

#### 1) เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่สำคัญและมีปริมาณการใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากราคาถูก เพิ่มความแข็งแรงให้กับยางและช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปยางให้ง่ายขึ้น เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล ลดการหดตัวและการบิดเบี้ยวของผลิตภัณฑ์ แต่มีข้อเสีย คือ ผลิตภัณฑ์ยางที่เติมเขม่าดำมีสีดำ ตัวอย่างที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้เขม่าดำ ได้แก่ ยางรถยนต์ สายพาน เป็นต้น

เขม่าดำ แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

- เขม่าดำชนิดเฟอร์เนส (Fumace black) เป็นเขม่าดำที่มีปริมาณการใช้สูงซึ่งผลิตจากปฏิกิริยาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันเชื้อเพลิงหรือก๊าซ ในบรรยากาศที่มีออกซิเจนมากเกินพอ ลักษณะของเขม่าดำเป็นก้อนกลมติดอยู่เป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ มีโครงสร้างสูง (High structure) พื้นผิวของเขม่าดำเป็นกลางหรือต่ำเล็กน้อย ขนาดเล็กประมาณ 10 - 100 nm
- เขม่าดำชนิดเทอร์มอล (Thermal black) เกิดจากกระบวนการแตกตัวของน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนบริเวณผิวร้อนภายในเตาเผาอุณหภูมิสูง ลักษณะเขม่าดำเป็นก้อนกลม มีโครงสร้างและพื้นที่ผิวน้อย ขนาดใหญ่ประมาณ 100 - 500 nm
- เขม่าดำชนิดชันแนล (Channel black) เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติที่ตะเกียงเผาเกิดเขม่าสะสมที่ผิวภายในท่อเหล็ก พื้นที่ผิวมากและเป็นกรดขนาดเล็กมาก ประมาณ 1-3 nm

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติในการเสริมแรงของเขม่าดำ

- ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ขนาดอนุภาคของเขม่าดำแปรผกผันกับพื้นที่ผิวจำเพาะคือสารตัวเติมยังมีขนาดเล็กก็ยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงยิ่งสูงทำให้ยางมีความแข็งแรงและทนทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น
- โครงสร้าง (Structure) ของเขม่าดำมีผลต่ออย่างมากต่อสมบัติของยาง ซึ่งส่วนใหญ่มีผลด้านการแปรรูป เนื่องจากเขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงกระจายในยางดีกว่าเขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำ
- เคมีของพื้นผิว (Surface chemistry) เนื่องจากโครงสร้างของเขม่าดำประกอบด้วย คาร์บอนร้อยละ 90-99 ที่เหลือเป็นออกซิเจนและไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังมีกำมะถันปนอยู่เล็กน้อยซึ่งมีผลต่ออัตราการเชื่อมโยง
- ความเป็นรูพรุน (Porous) ของเขม่าดำมีผลต่ออัตราการเชื่อมโยงเพราะรูพรุนจะดูดสารเร่งเข้าไปทำให้อัตราเชื่อมโยงลดลง

## 2) ดินขาว (Kaolin)

ดินขาวเป็นสารตัวเติมที่ได้จากการขุดแร่ดินขาวแล้วผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ นิยมใช้รองจากเขม่าดำเนื่องจากราคาถูก หาง่ายและเพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานเป็นสารตัวเติมได้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมยาง พลาสติก เซรามิก กาว แต่มีข้อเสีย คือ ความหนาแน่นค่อนข้างสูง เมื่อเติมในปริมาณมากทำให้ผลิตภัณฑ์ยางหนักขึ้น

## 3) ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมที่ไม่ใช่สีดำชนิดอื่น เนื่องจากซิลิกาช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยางให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความต้านทานการฉีกขาด ลดความร้อนสะสม เพิ่มความต้านทานการขูดถู สำหรับการใช้งานของซิลิกานิยมใช้ร่วมกับสารคู่ควบ (Coupling agent) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัสดุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.5 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ

การเสื่อมสภาพ (Degradation) ของยางเกิดเนื่องจากโมเลกุลถูกทำให้เปลี่ยนแปลงโดยสิ่งเร้าต่างๆ เช่น ออกซิเจน โอโซน ด้วยสาเหตุที่การเสื่อมสภาพของยางเกิดขึ้นช้ามากถ้าไม่มีตัวเร่งแต่ในสภาวะปกติที่มีแสงแดด ความร้อนและความไม่บริสุทธิ์ของโลหะ ล้วนเป็นปัจจัยเร่งที่ทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น โดยทั่วไปการเสื่อมสภาพของยางเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ ดังนี้

- เสื่อมสภาพตามธรรมชาติ
- เสื่อมสภาพเนื่องจากมีโลหะหนักปะปนในยาง
- เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน
- เสื่อมสภาพเนื่องจากแสงแดด
- เสื่อมสภาพเนื่องจากการหักงอไปมา
- เสื่อมสภาพเนื่องจากบรรยากาศ

สารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือสารป้องกันการเสื่อมสภาพจากออกซิเจนหรือแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) และสารป้องกันการเสื่อมสภาพจากโอโซนหรือแอนติโอโซนแนนท์ (Antiozonant)

1. สารแอนติออกซิแดนท์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดเป็อนสี (Staining antioxidant) เป็นสารประกอบเอมีน (Amine) หรืออนุพันธ์ของเอมีนมีประสิทธิภาพในการป้องกันออกซิเดชัน อย่างไรก็ตามแอนติออกซิแดนท์ประเภทนี้มักจะเป็อนลงบนผลิตภัณฑ์ยางทำให้ไม่สวยงาม ซึ่งนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีดำ
- สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดไม่เป็อนสี (Non-Staining antioxidant) เป็นสารประกอบฟีนอล (Phenol) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ยางทั่วไปที่ไม่ใช่สีดำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสีสวยและไม่เปลี่ยนสีผลิตภัณฑ์ยาง

2. แอนติโอโซนแนนท์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- สารประกอบ p-Phenylene Diamine (PPD) สารแอนติโอโซนแนนท์ชนิดนี้ นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ N-Isopropyl-N'-Phenyl-p-Phenylene Diamine (IPPD) เป็นได้ทั้งแอนติออกซิแดนท์และแอนติโอโซนแนนท์ แต่มีข้อเสีย คือ ผลิตภัณฑ์ยางเกิดการเป็อนสี
- ขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin wax) เมื่อเติมขี้ผึ้งลงในยางผสมสูตร ขี้ผึ้งจะซึมออกมาที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนทำปฏิกิริยากับยาง

### 2.5.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) คือ สารที่เติมเพื่อเพิ่มความนิ่มให้แก่ยางและช่วยลดความเหนียวในกระบวนการผลิตซึ่งพลาสติไซเซอร์จะแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free volume) ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ง่ายขึ้นและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ

คล้ายแก้วลดลง โดยทั่วไปการเรียกชื่อของพลาสติกไซเซออร์แตกต่างกันขึ้นกับหน้าที่และปริมาณการใช้งานดังนี้

- Processing aid คือ พลาสติกไซเซออร์ที่ใช้ปริมาณไม่เกิน 5 phr
- Softener คือ พลาสติกไซเซออร์ที่ใช้ในปริมาณ 5-15 phr
- Extender คือ พลาสติกไซเซออร์ที่ใช้ปริมาณมากกว่า 15 phr

หน้าที่ของพลาสติกไซเซออร์ คือ

1. ช่วยให้การกระบวนการแปรรูปง่ายขึ้น
2. เปลี่ยนแปลงสมบัติความนิ่มหรือความแข็งของยาง
3. ลดต้นทุน
4. ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดีขึ้น
5. ลดพลังงานในกระบวนการขึ้นรูปยาง

พลาสติกไซเซออร์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่

1. น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum oils) เป็นน้ำมันที่เข้ากันได้ดีกับยาง ลดความหนืดลง ไม่ระเหยและสีไม่ตก น้ำมันประเภทนี้ทำให้สมบัติของยางมีผลตรงกันข้ามกับการใช้สารตัวเติม คือ ทำให้ความแข็งและมอดูลัสลดลง น้ำมันที่ใช้กับยางประกอบด้วย คาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามก็มีกำมะถัน ออกซิเจนและไนโตรเจนปนอยู่เล็กน้อย ด้วยเหตุที่น้ำมันมีโครงสร้างของคาร์บอนและไฮโดรเจนแตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

- น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) หมายถึง น้ำมันที่มีพันธะคู่ สีคล้ำ ความหนืดสูงมาก
- น้ำมันแนฟทาติก (Naphthanic oil) หมายถึง น้ำมันที่ไม่มีพันธะคู่ ความหนืดปานกลาง
- น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic oil) หมายถึง น้ำมันที่มีโซ่กิ่ง ไม่มีพันธะคู่ สีขาวความหนืดต่ำ

2. น้ำมันเอสเทอร์ (Ester) เป็นเอสเทอร์ของกรดอินทรีย์หรือกรดฟอสฟอริก ใช้ในการผสมกับยางชนิดที่ทนน้ำมัน เช่น ยางไนไตรล์ น้ำมันชนิดนี้ทำให้ความแข็งของยางลดลงมากกว่าน้ำมันปิโตรเลียม ตัวอย่างน้ำมันเอสเทอร์ ได้แก่ สารประกอบ Phthalate ได้แก่ Dioctyl phthalate (DOP) และ Di-2-isooctyl phthalate (DIOP) เป็นต้น

### 2.5.7 สารหน่วง

สารหน่วง (Retarders) คือ สารที่เติมลงในยางเพื่อป้องกันการสกอรัชในสภาวะต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เช่น การผสมยางที่อุณหภูมิสูงยางจะสกอรัชทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้ตามความต้องการซึ่งสารหน่วงช่วยป้องกันการสกอรัชขณะผสมยาง ในขณะที่ยวกันทำให้อัตราเร็วการเชื่อม โยงลดลง

สารหน่วง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. สารหน่วงชนิดกรด (Acidic retarders) สารหน่วงจำพวกกรดช่วยหน่วงปฏิกิริยาเชื่อมโยง เช่น กรดซาลิไซลิก (Salicylic) กรดเบนโซอิก (Benzoic acid) กรดมาลลิก (Malic acid) โดยทั่วไป สารหน่วงชนิดกรดใช้ได้ดีกับสารเร่งประเภทไทเอโซล (Thiazole) ขณะที่ประสิทธิภาพในการหน่วงลดลง เมื่อใช้สารเร่งประเภทซัลฟิनाไมด์ (Sulfenamide)

2. ไซโคลเฮกซิลไทโอพทาไลไมด์ (Cyclohexylthio phthalimide, CTP) เป็นสารหน่วงที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงใช้ได้ดีกับยางหลายชนิดและมีความปลอดภัยในการใช้งานทำให้อัตราเร็วเชื่อมโยงสมดุล ปกติใช้ในปริมาณน้อยประมาณ 0.1-0.3 phr

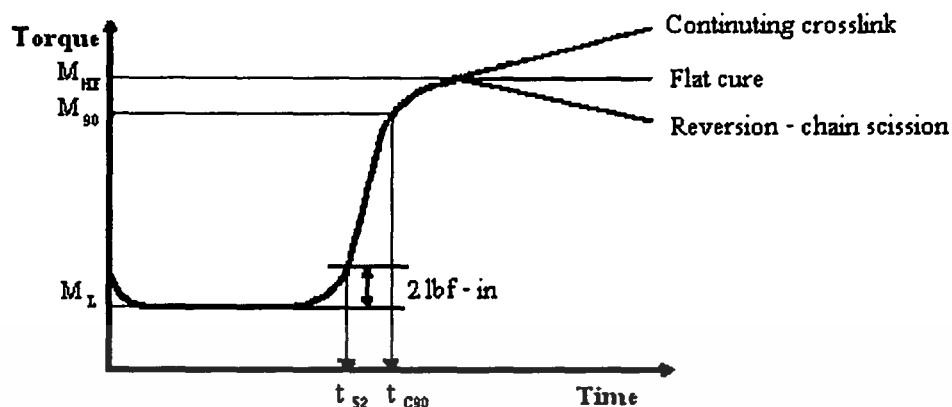
## 2.6 การทดสอบยาง [4, 13-17]

### 2.6.1 เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง

เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง (Curemeter) เป็นเครื่องมือที่ใช้หาสถานะของการเชื่อมโยง เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปและควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ยาง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบจานแกว่ง (Oscillating Disc Rheometer, ODR) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเชื่อมโยงได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการทดสอบยาง เพื่อใช้หาสถานะและเวลาที่เหมาะสมในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 กราฟการเชื่อมโยง แสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบจานแกว่ง คือ ตรวจวัดความแข็งของยาง โดยวัดการเปลี่ยนแรงบิดหรือทอร์คของจานรูปโคนครึ่งวงกลมหมุนแกว่งอยู่ในตัวอย่างยางที่มีการควบคุมอุณหภูมิ

2. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร่จานหมุน (Moving Die Rheometer, MDR) เป็นเครื่องมือวัดการเชื่อมโยงที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิรวดเร็วเนื่องจากขึ้นทดสอบยางที่ใช้เล็กและบางกว่า ข้อมูลที่ได้ถูกต้องแม่นยำกว่า เพราะความผิดพลาดซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานของจานหมุนต่ำกว่าเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบจานแกว่งและให้ข้อมูลมากกว่า เช่น โมดูลัสการสูญเสีย (Loss modulus,  $E''$ ) อัตราการเชื่อมโยงและมุมเฟส (Phase angle)



รูปที่ 2.7 กราฟการเชื่อม โยง [4]

#### คำนิยามต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM

$M_L$  คือ ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)

$M_{HF}$  คือ ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)

$M_{90}$  คือ ค่าแรงบิดที่ 90 % ของการเชื่อม โยง สามารถคำนวณได้จาก

$$M_{90} = M_L + 0.9 (M_{HF} - M_L) \quad (2.1)$$

$t_{s2}$  คือ เวลาเริ่มเกิดเชื่อม โยงหรือสกอร์ช เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อม โยงจนแรงบิดเพิ่ม 2 ปอนด์-นิ้ว (lbf-in) เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด

$t_{90}$  คือ เวลาที่ใช้ในการเชื่อม โยงจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อม โยง 90 % (Optimum cure time)

กราฟเชื่อม โยง แบ่งออกเป็น 3 ช่วงดังนี้ ซึ่งสามารถพิจารณาดังรูปที่ 2.7

#### ช่วงที่ 1 (Delay phase)

ขณะที่ให้แรงบิดในช่วงแรกยางจะนิ่มตัว เนื่องจากความร้อนของเครื่องวัดการเชื่อม โยงยาง ส่งผลให้ค่าแรงบิดลดลงเล็กน้อยและคงที่ ซึ่งช่วงเวลานี้สามารถแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางได้

#### ช่วงที่ 2 (Curing phase)

ช่วงเวลานี้ทำให้สารเชื่อม โยงซึ่งประกอบด้วย กำมะถัน สารเร่งและสารกระตุ้นเกิดปฏิกิริยาเชื่อม โยงกับโมเลกุลยาง โดยเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลยางจากสายโซ่ตรงเป็นร่างแหสามมิติทำให้แรงบิดมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งขึ้นสูงสุดและคงที่ ช่วงเวลานี้ให้ข้อมูลอัตราเร็วของการเชื่อม โยง

ช่วงที่ 3 (Overcure phase) ข้อมูลการเสื่อมสลายของยาง แบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

- เส้นกราฟคงที่ เมื่อเวลาผ่านไปยางมีองศาการเชื่อมโยงคงที่ ไม่เกิดการเสื่อมสลาย
- เส้นกราฟสูงขึ้น ค่ามอดุลัสของยางเพิ่มขึ้น (Marching modulus) แสดงว่าองศาการเชื่อมโยงยางเพิ่มขึ้น ซึ่งยางที่เกิดลักษณะเช่นนี้ ได้แก่ ยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ เป็นต้น
- เส้นกราฟลดลง เนื่องจากโมเลกุลหรือโครงร่างแหที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลสลายตัวเรียกปฏิกิริยานี้ว่าเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ (Reversion) ยางที่เกิดลักษณะเช่นนี้ ได้แก่ ยางธรรมชาติ ยางไอโซพรีน ยางบิวทิล เป็นต้น

### 2.6.2 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่

เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) เป็นเครื่องมือทดสอบสมบัติการไหลของยาง (Rheology properties) ตามมาตรฐาน ASTM D 1646 สามารถใช้ประโยชน์จากการทดสอบหลายลักษณะ คือ ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity, MV) ของยางดิบและยางผสมสูตร เพื่อทดสอบมาตรฐานของยางหรือควบคุมคุณภาพ ตัวอย่างเครื่องวัดความหนืดมูนนี่แสดงดังรูปที่ 2.8

หลักการของเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ คือ ยางอยู่ภายในห้องทดสอบที่ควบคุมอุณหภูมิและความดันตามกำหนด งานหมุนโลหะ (Rotor) จะหมุนความถี่คงที่เท่ากับ  $2 \pm 0.02$  รอบต่อนาที ให้อัตราเอนต้า อุณหภูมิที่ใช้ภายในห้องทดสอบควบคุมเท่ากับ  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $120^{\circ}\text{C}$  หรือ  $125^{\circ}\text{C}$  โดยขึ้นอยู่กับชนิดของยาง



รูปที่ 2.8 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่

งานหมุน (Rotor) มีลักษณะผิวเป็นร่อง เพิ่มผิวสัมผัสและแรงเสียดทานเพื่อป้องกันการเลื่อนไถลระหว่างงาน โลหะกับยาง โดยทั่วไปการหาค่าความหนืดมูนนี่ใช้งานหมุนโลหะ 2 ขนาด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. งานหมุนขนาดใหญ่ (Large rotor, L) ใช้สำหรับทดสอบยางทั่วไป
2. งานหมุนขนาดเล็ก (Small rotor, S) ใช้สำหรับทดสอบยางที่มีความหนืดสูงมาก

ยางที่ทำการทดสอบหาความหนืดมูนนี้ สามารถเตรียมขึ้นทดสอบได้จากการอัดรีดด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งให้เป็นแผ่นหนาประมาณ 1 เซนติเมตร ตั้งยางไว้อย่างน้อย 30 นาที จากนั้นตัดขึ้นทดสอบเป็น 2 แผ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.5-5.0 เซนติเมตร นำขึ้นทดสอบที่เตรียมได้ประกบด้านบนและด้านล่างของจานโลหะ โดยใช้แผ่นเซลโลเฟนหรือพลาสติกบางประมาณ 0.25 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการติดผนังด้านในของห้องทดสอบ เมื่ออุณหภูมิเครื่องวัดความหนืดมูนนี้เท่ากับอุณหภูมิที่ทดสอบหลังจากนั้นปิดห้องทดสอบซึ่งยางที่อยู่ภายในจะได้รับความร้อน นิยมใช้เวลาเท่ากับ 1 นาที ก่อนเริ่มทำการเดินเครื่อง ส่วนค่าความหนืดมูนนี้สามารถอ่านได้ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 4 นาทีหรือ 8 นาทีขึ้นอยู่กับชนิดของยาง

### 2.6.3 การทดสอบความแข็งกด

ความแข็งกดของยางที่นิยมทดสอบในอุตสาหกรรมยางมี 2 วิธีการ ดังนี้

#### 1. ความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ (Durometer Hardness)

การทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 เป็นการทดสอบที่ง่ายและสะดวก ใช้แรงสปริงในการกดขึ้นทดสอบ โดยทั่วไปสเกลสำหรับเครื่องวัดความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์มีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 ซึ่งค่าความแข็งกด 0 หมายถึง ความแข็งของของเหลว หรือค่าความแข็งกด 100 หมายถึง ความแข็งของวัสดุแข็งมากจะไม่ยุบตัว สำหรับคูโรมิเตอร์ชนิด A หรือชอร์ A (Shore A) วัดพอลิเมอร์ที่มีลักษณะอ่อนนิ่ม เช่น ยาง วัดความแข็งที่ไม่เกิน 90 ส่วนวัสดุที่มีความแข็งเกิน 90 ใช้คูโรมิเตอร์ชนิด D หรือชอร์ D (Shore D)

ลักษณะและรูปร่างของหัวกดแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.9 ค่าความแข็งกดอ่านได้หลังจากกดเป็นระยะเวลา 5 ถึง 30 วินาที โดยยางที่ใช้ทดสอบต้องมีความหนาอย่างน้อย 0.25 นิ้ว สามารถซ้อนขึ้นทดสอบเพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการ



รูปที่ 2.9 ลักษณะและรูปร่างของหัวกด ตามมาตรฐานชนิดต่างๆ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ความแข็งกดสากล (International Hardness)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1415 ทดสอบโดยการกดหัวกดลงบนผิวของชิ้นทดสอบ ด้วยแรงเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย ส่วนแรงที่ใช้กดเป็นน้ำหนักโดยตรงไม่ใช่แรงสปริง โดยทั่วไปนิยมใช้เวลาในการกด 30 วินาที ปกติแล้วระยะที่จมลงในชิ้นทดสอบจะถูกเปลี่ยนเป็นระดับความแข็งของยางแบบสากล (International Rubber Hardness Degrees, IRHD) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 ซึ่งความหมายคล้ายกับความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์

### 2.6.4 การทดสอบความต้านทานต่อโอโซน

ความต้านทานต่อโอโซน หมายถึง ความต้านทานของผลิตภัณฑ์ยางต่อบรรยากาศที่มีโอโซนเมื่อนำยางมายืด โดยทั่วไปโมเลกุลยางจะทำปฏิกิริยากับโอโซนเกิดรอยแตกตั้งฉากกับทิศทางการยืด ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1431/1 ความต้านทานของยางต่อโอโซนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยดังนี้

- ชนิดของยาง ปกติยางที่มีพันธะคู่ในโครงสร้างมาก เช่น ยางธรรมชาติเกิดปฏิกิริยากับโอโซนได้อย่างรวดเร็ว ส่วนยางที่มีพันธะคู่ในโครงสร้างน้อย เช่น ยางเอทิลีน โพรพิลีนจะมีความทนทานต่อโอโซนได้ดี
- ขนาดการยืด เมื่อขนาดการยืดของชิ้นทดสอบสูงจะเกิดรอยแตกได้ง่าย
- ชนิดและปริมาณของสารแอนตี้โอโซนเนนท์ ซึ่งสารแอนตี้โอโซนเนนท์ที่ต่างชนิดกัน ความต้านทานโอโซนที่ไม่เหมือนกัน เช่นเดียวกับยางที่เดิมในปริมาณมากทนทานต่อโอโซนได้ดีกว่า

วิธีทดสอบทำได้โดยการนำยางคงรูปมาดึงไว้ที่ความเครียดค่าหนึ่ง ในบรรยากาศที่มีความเข้มข้นโอโซน ความชื้นและอุณหภูมิที่กำหนด สังเกตและตรวจสอบรอยแตกที่ผิวยางตามระยะเวลาเป็นช่วงๆ ซึ่งตัวอย่างรายงานผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2.1

วิธีการทดสอบสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธีดังนี้

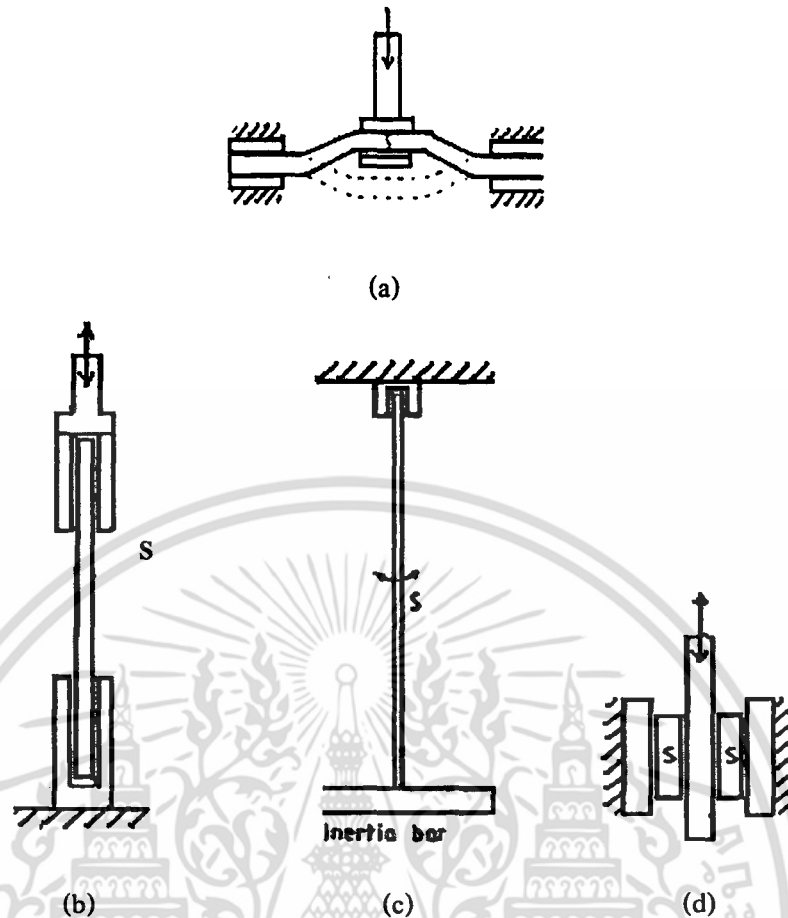
1. ยืดชิ้นทดสอบ 20 % ในตู้อบโอโซนเป็นเวลา 72 ชั่วโมงแล้วนำมาตรวจหารอยแตก
2. ยืดชิ้นทดสอบตามความยืดหนึ่งค่าหรือมากกว่า แต่ถ้ายืดด้วยความยืดเดียวให้ยืด 20 % แล้วตรวจรอยแตกเป็นช่วงเวลา 2, 4, 8, 16, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง ทำการบันทึกเวลาที่เกิดรอยแตกครั้งแรก
3. เลือกความยืดของชิ้นทดสอบ 4 ค่า จากค่าดังนี้  $5 \pm 1$ ,  $10 \pm 1$ ,  $15 \pm 2$ ,  $20 \pm 2$ ,  $30 \pm 2$ ,  $40 \pm 2$ ,  $50 \pm 2$ ,  $60 \pm 2$  และ  $80 \pm 2$  ทำการบันทึกเวลาที่เกิดรอยแตกครั้งแรก

ตารางที่ 2.1 การรายงานผลลักษณะรอยแตกเนื่องจากไอโซน [16]

จำนวนรอยแตก	ขนาดและความลึกของรอยแตก
A. รอยแตกจำนวนน้อย	1. ไม่สามารถเห็นรอยแตกด้วยตาเปล่า แต่สามารถเห็นรอยแตกด้วยแว่นขยายที่มีกำลังขยาย 10 เท่า
B. รอยแตกจำนวนมาก	2. ความยาวและความลึกของรอยแตกต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร
C. รอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน	3. ความยาวและความลึกของรอยแตก 1 - 3 มิลลิเมตร
	4. ความยาวและความลึกของรอยแตก มากกว่า 3 มิลลิเมตร

### 2.6.5 การวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงกลพลวัต

การวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงกลพลวัต เป็นเทคนิคการทำให้ขึ้นทดสอบเสียรูปร่างภายใต้แรงค้ำหรือแรงบิดเป็นจังหวะกลับไปมาเป็นวัฏจักร ซึ่งแรงชนิดต่างๆ ที่ให้กับขึ้นทดสอบดังรูปที่ 2.10 โดยแสดงความสัมพันธ์ในรูปกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ข้อมูลจากกราฟสามารถบอกพฤติกรรมการผ่อนคลาย (Relaxation) ของขึ้นทดสอบ โดยขึ้นทดสอบถูกควบคุมอุณหภูมิและถูกกระทำซ้ำๆ ที่อุณหภูมิต่างกันมีรูปแบบการสั่นอยู่ในรูปเส้นคลื่นขึ้น-ลงแบบไซน์ (Sinusoidal) ซึ่งความแตกต่างของระยะยืดหรือความเครียดเนื่องจากความเค้นเรียกว่า “มุมเฟส” (Phase angle,  $\delta$ ) โดยค่ามุมเฟสที่ได้สามารถใช้คำนวณหาลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุ



รูปที่ 2.10 ชนิดของแรงที่ให้กับชิ้นทดสอบ (a) แรงบิดขึ้นลงระหว่างสองคานยึด (b) แรงบิดในแนวตั้ง (c) แรงบิด และ (d) แรงเฉือน [15]

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ พบว่าสามารถแสดงมอดุลัสของวัสดุอยู่ในรูปมอดุลัสเชิงซ้อน (Complex modulus,  $E^*$ ) เมื่อวัสดุได้รับแรงแบบพลวัต (Dynamic) ซึ่งมอดุลัสแบบพลวัตของวัสดุประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ

1. มอดุลัสสะสม (Storage modulus,  $E'$ ) คือ พลังงานที่เก็บไว้เมื่อได้รับแรงจากภายนอกและปล่อยพลังงานออกมาโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานไปอยู่ในรูปอื่นเมื่อแรงกระทำหมดไป
2. มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $E''$ ) คือ เมื่อวัสดุได้รับพลังงานแล้วเกิดการกระจายหรือสูญเสียอยู่ในรูปอื่น เช่น พลังงานความร้อน พลังงานเสียง

สามารถคำนวณปัจจัยสูญเสีย (Loss factor,  $\tan \delta$ ) ดังสมการที่ 2.2

$$\tan \delta = E''/E' \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $E'$  คือ มอดุลัสสะสม (Storage modulus)

$E''$  คือ มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus)

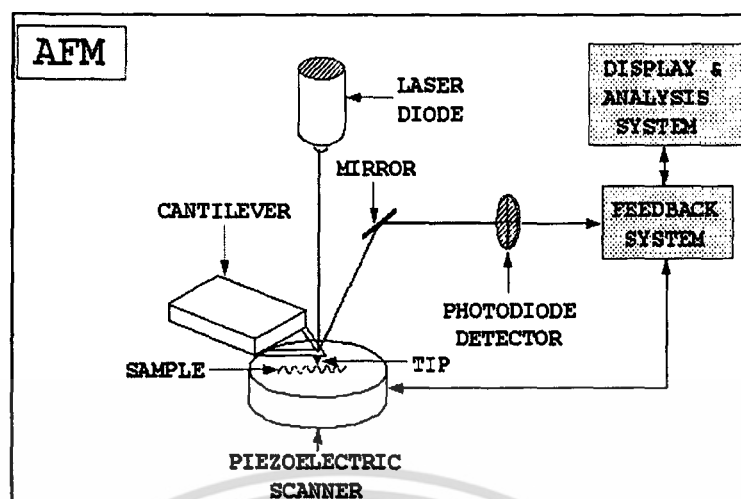
$\delta$  คือ มุมเฟส (Phase angle)

### 2.6.6 การศึกษาพื้นฐานวิทยาด้วย Atomic Force Microscope

Atomic Force Microscopy (AFM) หรือ Scanning Force Microscopy (SFM) เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาพื้นผิววัสดุของต่างๆ ทั้งตัวอย่างที่นำไฟฟ้าและไม่นำไฟฟ้า ได้แก่ โลหะ พอลิเมอร์ วัสดุกึ่งตัวนำ เซลล์สิ่งมีชีวิต เป็นต้น เนื่องจากเตรียมชิ้นงานง่าย ราคาถูก ไม่ทำลายชิ้นงานและวิเคราะห์ข้อมูลได้ง่ายทำให้นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องด้วยเหตุที่สามารถสร้างภาพสองมิติและสามมิติที่มีกำลังขยายสูงมากถึงระดับอะตอม นอกจากนี้ยังวัดแรงและสมบัติอื่นๆ ของพื้นผิว เช่น แรงยึดติดเฉพาะบริเวณหรือสมบัติความยืดหยุ่นของพื้นผิว ซึ่งมีผลต่อสมบัติโดยรวมของวัสดุ

หลักการทำงานของเครื่อง AFM

เครื่อง AFM วัดแรงโดยใช้แคนติลิวเวอร์ (Cantilever) เป็นแผ่นวัสดุแข็งที่มีปลายแหลมหรือทิว (Tip) ติดอยู่ที่ปลายแคนติลิวเวอร์ทำจากวัสดุที่มีความแข็งสูง เช่น ซิลิกอน (Si) ซิลิกอนไนไตรด์ ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) ความยาวของทิวระหว่าง 100 ถึง 500  $\mu\text{m}$  และความหนา 0.5 ถึง 5  $\mu\text{m}$  สำหรับการสร้างภาพดิจิทัลของเครื่อง AFM โดยทิวสัมผัสกับชิ้นงานด้วยแรงน้อยมาก (ประมาณ  $10^{-9}$  นิวตัน) และเคลื่อนที่สแกนไปมาบนพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งวางอยู่บนวัสดุพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric scanners) และควบคุมการเคลื่อนที่ในสามทิศทาง (แกน x, y, z) ทิวจะเคลื่อนที่ขึ้นลงตามความสูงต่ำของพื้นผิวชิ้นงาน ตำแหน่งของทิวสามารถวัดได้จากการใช้แสงเลเซอร์ส่องที่แคนติลิวเวอร์ แล้วสะท้อนกลับไปบนส่วนรับสัญญาณแบบโฟโตไดโอด (Photodiode detector) ทำให้ทราบข้อมูลในการเคลื่อนที่ขึ้นลงของแคนติลิวเวอร์หรือความสูงต่ำของพื้นผิว ซึ่งข้อมูลความสูงต่ำเปรียบเทียบกับตำแหน่งของทิวทำให้เครื่อง AFM สร้างภาพจากพื้นผิวงานได้ทั้งสองมิติและสามมิติ โดยหลักการการทำงานของเครื่อง AFM แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่อง AFM [17]

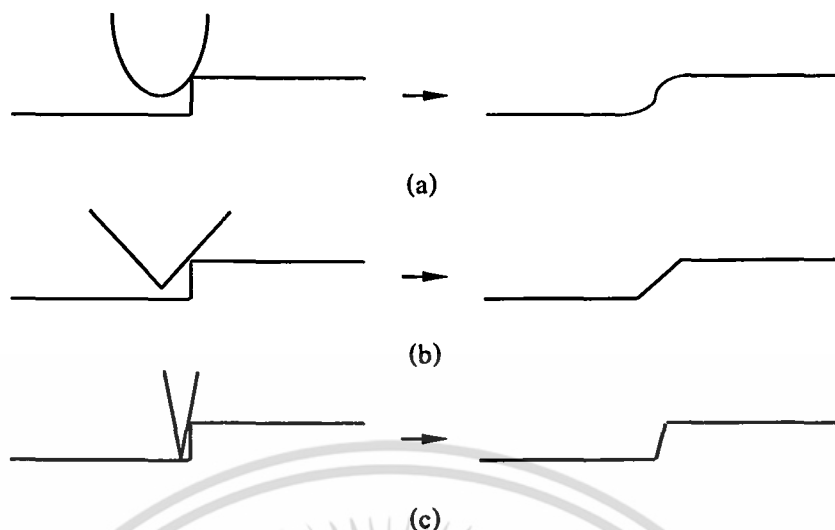
#### ข้อดีของเครื่อง AFM

- วิเคราะห์และตรวจสอบพื้นผิวด้วยกำลังขยายที่สูงมาก
- ใช้ได้กับชิ้นงานทุกประเภททั้งนำไฟฟ้าและไม่นำไฟฟ้า
- ไม่ทำลายพื้นผิวของชิ้นงาน
- ตรวจวิเคราะห์พื้นผิวชิ้นงานในหลายสถานะ เช่น ของเหลว ก๊าซ
- ข้อมูลในรูปดิจิทัล สามารถวิเคราะห์ข้อมูลง่าย
- วัดแรงได้หลายประเภท เช่น แรงดึงดูดระยะไกล แรงผลักระยะใกล้

#### ข้อด้อยของเครื่อง AFM

- ลักษณะพื้นผิวที่ได้ขึ้นอยู่กับความแหลมของทิป บางครั้งอาจจะเกิดลักษณะภาพที่ไม่จริงหรือภาพเพี้ยน ดังรูปที่ 2.12 แสดงการเปรียบเทียบภาพที่ได้จากการสแกนด้วยทิป ภาพที่ได้จะมีลักษณะแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ผลของลักษณะและความแหลมของทิป (รูปด้านซ้าย) ที่มีต่อภาพจากเครื่อง AFM (รูปด้านขวา) ของทิปแบบต่างๆ (a) ทุ้ม (b) แหลมน้อย และ (c) แหลมมาก [17]

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Bandyopadhyay และคณะ [18] ศึกษาผลของการเติมเขม่าดำที่มีต่อความเข้ากันได้ของยางคลอโรพรีนผสมยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์ (CR/ENR) ด้วยการวิเคราะห์ความร้อนเชิงกลพลวัต บดผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องบราเบลนเดอร์ พลาสติคคอร์ดอร์ (Brabender Plasticorder) ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  แปรยางผสม CR/ENR อัตราส่วน 30/70, 50/50 และ 70/30 ทำการเปรียบเทียบผลการเติมเขม่าดำลงในยางผสมที่มีต่อค่าปัจจัยสูญเสีย (Loss factor,  $\tan \delta$ ) เมื่อยางผสม CR/ENR อัตราส่วน 30/70 ที่เติมและไม่เติมเขม่าดำ พบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าเดียว ส่วนยางผสม CR/ENR อัตราส่วน 50/50 ที่ไม่เติมเขม่าดำ พบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพียงค่าเดียว เมื่อเติมเขม่าดำลงไปมีผลทำให้มีการแยกของวัฏภาคของยางผสม เนื่องจากกราฟปัจจัยสูญเสียปรากฏอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว 2 ค่า ในขณะที่ยางผสม CR/ENR อัตราส่วน 30/70 ที่เติมและไม่เติมเขม่าดำ พบว่ากราฟปัจจัยสูญเสียจะปรากฏอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว 2 ค่า

H. Ismail และ B. T. Poh [19] ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงและความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) ของยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์ผสมกับยางธรรมชาติ (ENR-25/NR) และ (ENR-50/NR) บดผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งอุณหภูมิ  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ ENR ทำให้เวลาสกอร์ชและเวลาเชื่อมโยงลดลง เนื่องจากทอร์คสูงสุด (Maximum torque) และความแตกต่างระหว่างทอร์คสูงสุดและต่ำสุด (Torque difference) เพิ่มขึ้น จากการเปรียบเทียบเวลาสกอร์ชและเวลาเชื่อมโยงที่มีหมู่อีพอกซี (Epoxy group) ในโครงสร้างที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า ENR-50 มีเวลาสกรอร์ชและเวลาเชื่อมโยงเร็วกว่า ENR-25 เนื่องจากหมู่ไอพอกซีที่อยู่ใกล้พันธะคู่ในโครงสร้างของยาง ENR ช่วยกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเร็วขึ้น สำหรับค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยาง ENR จนถึงอัตราส่วน 50/50 หลังจากนั้นเริ่มลดลง

P. Boochathum และ W. Prajudtake [20] ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงและกระจายการเชื่อมโยง (Crosslink distribution) ของยางธรรมชาติ (NR) ผสมกับยางสังเคราะห์ ทรานซ์-1,4-พอลิไอโซพรีน (trans-1,4-Polyisoprene, TPI) เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติระหว่างระบบเชื่อมโยงปกติ (Conventional vulcanization, CV) และระบบเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization, EV) บดผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C พบว่าอัตราการเชื่อมโยงของยางธรรมชาติเร็วกว่ายาง TPI เนื่องจากในโครงสร้างของยางธรรมชาติมีอัลลิลิกไฮโดรเจน (Allylic hydrogens) สูงกว่ายาง TPI ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า สำหรับระบบเชื่อมโยงปกติ ใช้อัตราส่วนของตัวเร่งน้อยกว่ากัมมะถันเกิดพันธะแบบพอลิซัลไฟดิก (Polysulfidic linkage) ส่วนระบบเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพจะใช้อัตราส่วนตัวเร่งสูงกว่ากัมมะถันเกิดพันธะแบบโมโนซัลไฟดิก (Monosulfidic linkage) เมื่อเปรียบเทียบกับทั้งสองชนิดกับระบบเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน พบว่ายาง TPI ที่เชื่อมโยงด้วยพันธะแบบพอลิซัลไฟดิกจะทนทานต่อการเสื่อมสภาพดีกว่าพันธะแบบโมโนซัลไฟดิกต่างไปจากยางธรรมชาติที่เชื่อมโยงด้วยพันธะแบบโมโนซัลไฟดิกสามารถทนทานต่อการเสื่อมสภาพดีกว่า โดยสมบัติที่มีความแตกต่างเกิดเนื่องมาจากคอนฟิกูเรชัน (Configuration) ที่ต่างกันของยางทั้งสองชนิด

R. L. Fan และคณะ [21] ศึกษาผลของการเชื่อมโยงอุณหภูมิสูงที่มีต่อโครงสร้างการเชื่อมโยง (Crosslink structure) สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลพลวัตของยางธรรมชาติที่เต็มและไม่เต็มเขม่าดำเมื่อเชื่อมโยงด้วยระบบปกติ (CV) กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และมีประสิทธิภาพ (EV) บดผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 80 °C อุณหภูมิขึ้นรูประหว่าง 150 ถึง 180 °C พบว่าการเชื่อมโยงด้วยระบบปกติมีค่าออกดูลัส ความแข็งแรงดึงและความแข็งกดสูงกว่าการเชื่อมโยงระบบอื่น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เวลาเชื่อมโยงนานเกิน (Overcure) ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางธรรมชาติขาดได้ง่ายนอกจากนี้ทำให้สมบัติทางกายภาพลดลงมาก สำหรับระบบการเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพจะเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพเนื่องจากความร้อนต่ำ เมื่อใช้เวลาเชื่อมโยงนานเกินไป

H. Ismail และ H. C. Leong [22] ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ ผสมกับยางคลอโรพรีน (NR/CR) และยางธรรมชาติไอพอกซีโคพอลิเมอร์กับยางคลอโรพรีน (ENR/CR) บดผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 70 °C โดยขึ้นรูปที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

150 °C พบว่ามูนีแบบสกอร์ชและดัชนีการเชื่อมโยง (Cure index) ของยางผสมลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์ลงในยางคลอโรพรีน จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่ายางผสม NR/CR และ ENR/CR อัตราส่วน 25/75 ให้ค่ามอดูลัสและความแข็งแรงกดมีค่าสูงสุด สำหรับยางผสม NR/CR และ ENR/CR อัตราส่วน 75/25 ให้ความแข็งแรงดึงสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนเดียวกัน พบว่ายางผสม ENR/CR มีสมบัติเชิงกลดีกว่า NR/CR เนื่องจากโครงสร้าง ยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์มีหมู่อีพอกซี ซึ่งเกิดอันตรกิริยากับหมู่คลอรีนของยางคลอโรพรีนทำให้สมบัติเชิงกลสูงกว่ายางผสม NR/CR

H. Ismail และคณะ [23] ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของยางคลอโรพรีนโดยใช้เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียม (Cetyltrimethylammonium, CTMAM) เป็นสารเชื่อมโยง ทำการเปรียบเทียบกับระบบเชื่อมโยงปกติ (ZnO, MgO และ ETU) บดขยี้และผสมสารเคมีด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 °C พบว่าเมื่อใช้สารเชื่อมโยง CTMAM ที่มีปริมาณ 3 phr ทำให้เวลาสกอร์ชและเวลาเชื่อมโยงใกล้เคียงกับการเชื่อมโยงระบบปกติ จากผลการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าที่ปริมาณสารเชื่อมโยง CTMAM 3 phr มีค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงกดใกล้เคียงกับระบบเชื่อมโยงปกติ ส่วนการกระดองตัว (Resilience) ของยางจะต่ำกว่า

H. Ismail และคณะ [24] ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อน้ำมันของยางสไตรีนบิวทีไดอีนผสมกับยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์ (SBR/ENR) บดขยี้และผสมสารเคมีด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่มีอุณหภูมิ 60 °C ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยาง ENR ในยางผสม SBR/ENR ทำให้เวลาสกอร์ชและเวลาเชื่อมโยงลดลง ส่วนค่าความแข็งแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาดและมอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากมีความสามารถในการเกิดผลึกได้เมื่อดึง จากผลการทดลองเมื่อแช่ยางผสมในน้ำมันทำให้สมบัติเชิงกลของยางผสม SBR/ENR เปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณยาง ENR

K. N. Pandey และคณะ [25] ศึกษาลักษณะรอยแตกของยางบิวทีลผสมกับยางคลอโรพรีน (IIR/CR) โดยเปรียบเทียบกับเขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica) และไมกา (Mica) เป็นสารตัวเติม บดและผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งอุณหภูมิ 30 °C อุณหภูมิขึ้นรูป 160 °C จากการทดสอบความแข็งแรงดึง ความต้านทานการฉีกและต้านทานการสึกหรอ พบว่ายางผสม IIR/CR ผสมด้วยเขม่าดำให้ค่าความแข็งแรงดึงและต้านทานการฉีกขาดดีกว่าซิลิกาและไมกา ส่วนยางผสม IIR/CR ที่ผสมด้วยซิลิกาจะมีความต้านทานการสึกหรอดีกว่ายางผสมเขม่าดำและไมกา ในขณะที่ไมกาให้สมบัติเชิงกลต่ำ จากการศึกษาสถาบันวิทยาโดยนำขึ้นทดสอบที่ทดสอบสมบัติเชิงกลแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าเขม่าดำกระจายตัวอย่างดีและเกิดอันตรกิริยาระหว่างข้างทั้งสองชนิด ซึ่งลักษณะทางกายภาพของชิลิกาในยางผสมจะเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน ส่วนไมกามีลักษณะเป็นแผ่นทำให้การกระจายตัวในยางผสมไม่ดี

C. Nah และคณะ [26] ศึกษาผลของสมบัติทางกายภาพและสถานะทางวิทยาศาสตร์ของยางธรรมชาติผสมยางไนไตรล์ (NR/NBR) โดยใช้ยางทรานส์-พอลิโอคทีน (trans-Polyoctene Rubber, TOR) เป็นสารช่วยผสม (Compatibilizer) ทำการบดผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 100 °C อุณหภูมิขึ้นรูป 145 °C พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ TOR ลงในยางผสมทำให้ค่าความแข็งกดมอดุลัสและการกระดอนตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งจากการศึกษาสถานะทางวิทยาศาสตร์ของยางผสม NR/NBR/TOR อัตราส่วน 40/40/20 พบว่า TOR ที่เติมลงไปทำให้แทรกตัวอยู่ระหว่างภูมิภาคของยางธรรมชาติและยางไนไตรล์ เป็นผลให้สมบัติทางกายภาพของยางผสมดีขึ้น

A. P. Kuriakose และ M. Varghese [27] ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง ความสามารถในการแปรรูป และสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติผสมกับยางคลอโรพรีน (CR/NR) โดยใช้น้ำมันรำข้าว (Rice bran oil, RBO) และน้ำมันรำข้าวอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized rice bran oil, ERBO) เปรียบเทียบสมบัติกับน้ำมันอะโรมาติก บดผสมยางด้วยเครื่องบราเวนเดอร์ พลาสติกอร์เดอร์ที่อุณหภูมิ 27 °C ความเร็วโรเตอร์ 40 รอบต่อนาที แล้วนำไปผสมสารเคมีด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง อุณหภูมิ 50 °C นำไปขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C พบว่าเวลาเชื่อมโยงของยางผสม CR/NR ที่ใช้น้ำมันรำข้าวและน้ำมันรำข้าวอีพอกซิไดซ์สั้นกว่าใช้น้ำมันอะโรมาติก เนื่องจากในน้ำมันรำข้าวและน้ำมันรำข้าวอีพอกซิไดซ์มีกรดไขมันอิสระซึ่งช่วยในการเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงคล้ายคลึงกับกรดสเตียริก จากการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพ พบว่ายางผสม CR/NR ที่ใช้น้ำมันรำข้าวและน้ำมันรำข้าวอีพอกซิไดซ์มีสมบัติเชิงกลและทางกายภาพก่อนบ่มแรงดีกว่าน้ำมันอะโรมาติก ยกเว้น ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกด ส่วนสมบัติเชิงกลและทางกายภาพหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR พบว่ายางผสมที่ใช้น้ำมันรำข้าวอีพอกซิไดซ์ทนทานการบ่มแรงดีที่สุด

C. Sirisinha และคณะ [28] ศึกษาความทนทานต่อความร้อนและน้ำมันของยางธรรมชาติผสมกับคลอริเนตพอลิเอทิลีน (NR/CPE) โดยเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer) และสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stabilizer) บดผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิ 145 °C ความเร็วโรเตอร์ 45 รอบต่อนาที ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 155 °C จากการศึกษาระดับวิทยาศาสตร์ของยางผสม NR/CPE พบว่าเกิดการแยกภูมิภาคของผสมเนื่องจากความแตกต่างของแรงตึงผิวระหว่างภูมิภาค (Interfacial tension) ในขณะที่การเติมสารช่วยผสม EPDM-g-MA ลงในยางผสม NR/CPE ช่วยให้ขนาดภูมิภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางผสมเล็กกลดลอกจนวิฎภาคยางธรรมชาติกระจายตัวได้ดีในโมเลกุลของ CPE ทำให้ยางผสมทนทานต่อความร้อนและน้ำมันดีขึ้น เมื่อพิจารณาพื้นฐานวิชาของยางผสม NR/CPE พบว่าการเติมสารแอนติออกซิแดนท์ทำให้ขนาดวิฎภาคยางธรรมชาติเล็กลงและกระจายตัวดีทำให้ทนทานต่อ น้ำมันและความร้อนดีขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ยางและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ชนิดยางแผ่นรมควันชั้น 2 (RSS-2) สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการ กรมวิชาการเกษตร สมบัติบางประการของยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 3.1
2. ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber, CR) ชื่อการค้า Skyprene<sup>®</sup> B-30 บริษัท Tosoh สมบัติบางประการของยางคลอโรพรีน แสดงดังตารางที่ 3.2
3. กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า
4. น้ำมันแนฟทานิก (Naphthanic oil) เกรดการค้า
5. เขม่าดำ (Carbon black) ชนิด N 330
6. ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทเอซิลซัลเฟนไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide, CBS) เกรดการค้า
7. เอทิลีนไทโอยูเรีย (Ethylene thiourea, ETU) เกรดการค้า
8. แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) เกรดการค้า
9. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ชนิด White seal
10. กำมะถัน (Sulfur, S<sub>8</sub>) เกรดการค้า
11. ฟีนิลไดเมทิลบิวทิลฟีนิลดีนไดเอมีน (N-phenyl-N'-1,3-dimethylbutyl-p-phenylene diamine, 6 PPD) เกรดการค้า
12. น้ำมันชนิด ASTM No.1 แสดงสมบัติบางประการของน้ำมันที่ใช้ทดสอบดังตารางที่ 3.3
13. น้ำมันชนิด ASTM No.3 แสดงสมบัติบางประการของน้ำมันที่ใช้ทดสอบดังตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยางแผ่นรมควันชั้น 2 ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ปริมาณ
สิ่งสกปรก (Dirt) (%wt)	0.015
เถ้า (%wt)	0.15
ไนโตรเจน (%wt)	0.34
สารระเหยได้ (Volatile matter) (%wt)	0.42
ค่าพลาสติกซิตี (Initial Plasticity, P <sub>0</sub> )	38.67
ดัชนีความอ่อนตัว (Plasticity Retention Index, RPI)	92.22

หมายเหตุ ผลจากการทดสอบตามวิธีทดสอบมาตรฐานยางแท่งเอสทีอาร์ (Standard Thai Rubber)

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของยางคลอโรพรีนที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
ชนิด (Type)	Mercaptan modified
อัตราการเกิดผลึก (Crystallization rate)	Medium
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	1.23
ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4(100°C))	45 - 53

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของน้ำมันที่ใช้ทดสอบ

สมบัติ	ASTM No.1	ASTM No.3
ชนิดน้ำมัน	พาราฟิน	อะโรมาติก
Aniline Point (°C)	123.8	69.5
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	0.886	0.921
ความหนืด (mm <sup>2</sup> /s)	20.8	32.7
จุดวาบไฟ (°C)	290	170

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท AT Technology Consultant Co.,Ltd

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two - roll mill) บริษัท Lab Tech Engineer
2. เครื่องผสมระบบปิด (Dispersion kneader machine) บริษัท Swang fu
3. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่น Visc tech บริษัท Tech Pro Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เครื่องวัดการเชื่อมโยงยางแบบจานแกว่ง (Oscillating disc rheometer) รุ่น Rheotech บริษัท Tech Pro
5. เครื่องอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ (Compression molding machine) บริษัท Lab Tech Engineer
6. เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น LR 5K บริษัท Lloyd Instrument
7. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบชอร์เอ (Hardness tester, Shore A) รุ่น DXT-3 บริษัท Yasuda Seiki
8. เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical thermal analyzer, DMTA) รุ่น Eplexor QC 25 บริษัท Gabo
9. ตู้อบโอโซน รุ่น 703 บริษัท Hampden
10. ตู้อบแบบอากาศร้อน รุ่น UM 400 บริษัท MEMERT
11. เครื่องชั่ง รุ่น TR - 6101 บริษัท Denver Instrument
12. เครื่องไมโครโทม รุ่น Leitz 1400 บริษัท Ernst Leitz Wetzlar
13. เครื่อง Atomic force microscope รุ่น Nanoscope<sup>®</sup> III บริษัท Divecco Digital Instrument

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 ขั้นตอนการผสมยางและเตรียมขึ้นทดสอบ

ขั้นตอนที่ 1 บดย่อยยางธรรมชาติก่อน ต่อมานำยางคลอโรพรีนผสมกัน ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง หลังจากนั้นเติมสารเติมแต่งต่างๆ ตามสูตรที่กำหนด ด้วยเครื่องผสมระบบปิดอุณหภูมิ 70 °C เตรียมยางผสมสูตร 3 ครั้งต่อ 1 สูตร

ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบสมบัติเชื่อมโยงและหาเวลาการเชื่อมโยง

ขั้นตอนที่ 3 ขึ้นรูปยางผสมสูตร

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

#### การศึกษาสมบัติเชิงกล

- ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาดและมอดุลัส (ก่อนและหลังบ่มเร่ง)
- ความแข็งกด ชนิดชอร์เอ
- การยุบตัวเนื่องจากแรงกด
- การยืดตัวเนื่องจากแรงดึง

#### การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

- ความต้านทานต่อโอโซน
- ความทนทานต่อน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

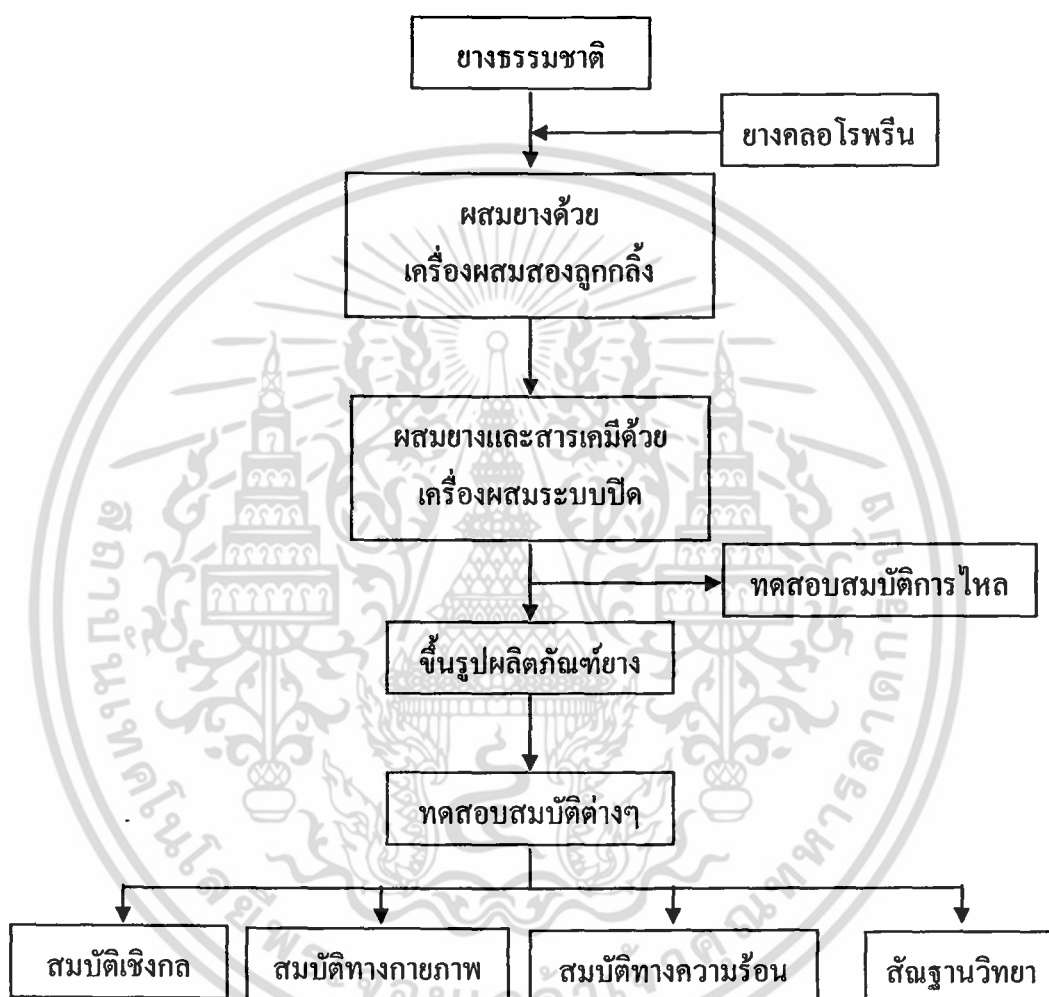
### การศึกษาชั้นฐานวิทยา

- วิทยาของยางผสม

### การศึกษาสมบัติทางความร้อน

- ความร้อนเชิงกลพลวัต

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบสามารถสรุปเป็นแผนผัง แสดงดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการผสมและเตรียมชิ้นทดสอบ

### 3.3.2 การบดผสมยางและสารเคมี

1. ชั่งยางและสารเคมีตามสูตร ดังตารางที่ 3.4
2. บดย่อยยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ยางธรรมชาติมีความหนืดใกล้เคียงกับยางคลอโรพรีน จากนั้นนำยางคลอโรพรีนผสมกันที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำยางมาผสมกับสารเคมีด้วยเครื่องผสมระบบปิด เดิมกรดสเตียริก ZnO MgO และ 6 PPD (ใช้เวลาประมาณ 4 นาที)

4. เติมขี้ผึ้งดำประมาณ 2 ใน 3 ของทั้งหมด บดผสมให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันแล้วเติมขี้ผึ้งดำที่เหลือพร้อมกับน้ำมันแนฟทานิก (ใช้เวลาประมาณ 8 นาที)

5. เติม ETU และสารเร่ง CBS (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที) จากนั้นเติมกำมะถัน (ใช้เวลาประมาณ 3 นาที) แล้วนำมารีดเป็นแผ่นหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ทิ้งขยงให้เย็นแล้วนำมาเตรียมขึ้นทดสอบ

ตารางที่ 3.4 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr)						
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2		สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5	
CR	100	100	75, 50, 25	-	75	75	75, 60, 50
NR	-	-	25, 50, 75	100	25	25	25, 40, 50
ZnO	5	5	5	5	5	5	5
MgO	1	1	1	-	1-4	1,2	1
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2
Carbon black	40 - 70	60	60	60	60	60	60
Napthanic oil	5	5	5	5	5	5	5
6 PPD	1	1	1	1	1	1	1
ETU	1	1	1	-	1	1	1
CBS	-	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulfur	-	-	2.5	2.5	2.5	1 - 2.5	1 - 2.5

หมายเหตุ สูตรที่ 1 ใช้ศึกษาผลของปริมาณขี้ผึ้งดำที่มีต่อยางคลอโรพรีน

สูตรที่ 2 ใช้ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างยางคลอโรพรีนต่อยางธรรมชาติ

สูตรที่ 3 ใช้ศึกษาผลของปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีต่อยางผสม

สูตรที่ 4 ใช้ศึกษาผลของปริมาณกำมะถันที่มีต่อยางผสม

สูตรที่ 5 ใช้ศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมที่มีกำมะถันต่างกัน

### 3.4 การทดสอบยางผสมสูตร

สมบัติของยางผสมสูตร ทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ดังนี้

#### 3.4.1 ความหนืดมูนนี่

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1646 [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าความเหนียวนี้ โดยใช้แกนหมุนขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  (ML1+4( $100^{\circ}\text{C}$ )) ตัดขึ้น ยางที่ได้จากเครื่องผสมสองลูกกลิ้งเป็นแผ่นหนาประมาณ 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4-5 เซนติเมตร มาทดสอบหาความเหนียวนี้

### 3.4.2 เวลาเชื่อมโยงของยางผสมสูตร

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2084 [30]

ตัดยางเป็นแผ่นหนาประมาณ 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 เซนติเมตร ทดสอบ ด้วยเครื่อง ODR ที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  แกว่งที่มุม  $\pm 3$  องศา หาเวลาสกอรัซ ( $t_{s2}$ ) และเวลาเชื่อมโยง ( $t_{90}$ ) ของยางผสมสูตรแต่ละสูตร

### 3.4.3 การเชื่อมโยงยาง

นำยางผสมสูตรมาอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) อัดขึ้นรูปทดสอบที่เวลาเชื่อมโยงดังนี้

- เวลาเชื่อมโยง  $t_{90}$  สำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อโอโซนของยางผสมสูตรแต่ละสูตร
- เวลาเชื่อมโยง 2 เท่าของ  $t_{90}$  สำหรับทดสอบการขุดตัวเนื่องจากแรงกดของยางผสมสูตรแต่ละสูตร

### 3.4.4 ความแข็งกด

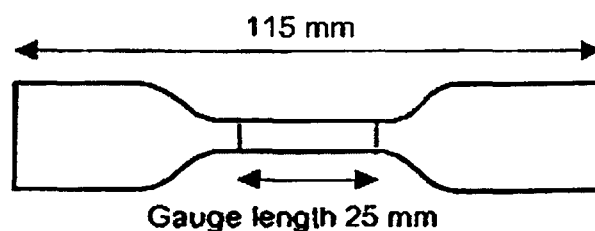
มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2240 [31]

นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดแบบน้ำหนักคงที่ (Dead load hardness tester) ชนิด Shore A ที่อุณหภูมิห้อง สามารถอ่านค่าความแข็งกดได้โดยตรงจากเครื่องทดสอบหลังจากกดเป็นระยะเวลา 30 วินาที ความหนาของชิ้นทดสอบอย่างน้อย 0.25 นิ้ว รายงานผลค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ 10 ครั้งต่อ 1 สูตร

### 3.4.5 สมบัติแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 412 [32]

การเตรียมชิ้นทดสอบสมบัติแรงดึง โดยนำยางคงรูปมาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell shape) ชนิด Die C ที่มีความยาวเกจ (Gauge length) 25 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2 แล้วทำการทดสอบ



รูปที่ 3.2 ชิ้นทดสอบรูปคัมเบลล์ [32]

- ทดสอบสมบัติแรงดึงก่อนบ่มเร่ง

ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงโดยใช้โหลดเซลล์ (Load cell) ขนาด 5 กิโลนิวตัน (kN) ที่มีอัตราเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที หาค่าความแข็งแรงดึง ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดและมอดูลัสที่ 100 % ทำการทดสอบ 5 ชิ้นต่อ 1 สูตร

- ทดสอบสมบัติแรงดึงหลังบ่มเร่ง

นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้ไปบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นระยะเวลา 96 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงโดยใช้สภาวะเดียวกับการทดสอบสมบัติแรงดึงก่อนบ่มเร่งทำการทดสอบ 5 ชิ้นต่อ 1 สูตรนำค่าที่ได้ไปคำนวณผลดังสมการที่ 3.1 - 3.4

คำจำกัดความและการคำนวณ

1) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) หมายถึง ความเค้นดึงสูงสุดของชิ้นทดสอบที่สามารถรับได้ในการทดสอบแรงดึง หน่วยเป็นเมกะปาสกาล (MPa)

$$TS = F/A \quad (3.1)$$

เมื่อ TS คือ ความแข็งแรงดึง (MPa)

F คือ แรงที่ใช้ในการดึงสูงสุดเกิดที่จุดขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (m<sup>2</sup>)

2) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) หมายถึง ความยาวของชิ้นทดสอบที่เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการทดสอบแรงดึงจนกระทั่งขาด หน่วยเป็นร้อยละ (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\% Eb = [(l - l_0)/l_0] \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ % Eb คือ ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)

l คือ ความยาวสุดท้าย ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ (mm)

l<sub>0</sub> คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (mm)

3) ร้อยละสมบัติแรงดึงที่คงอยู่ หมายถึง สมบัติแรงดึงหลังจากบ่มเร่งหารด้วยสมบัติแรงดึงก่อนบ่มเร่ง หน่วยเป็นร้อยละ (%)

$$P = [A/O] \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ P คือ ร้อยละสมบัติแรงดึงที่คงอยู่ (%)

O คือ ค่าที่วัดได้ก่อนบ่มเร่ง

A คือ ค่าที่วัดได้หลังบ่มเร่ง

4) มอดูลัสที่ 100 % (Modulus at 100 %) หมายถึง ความเค้นที่การยืด 100 % ของชิ้นทดสอบ หน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa)

5) ร้อยละของมอดูลัสที่เปลี่ยนแปลง หมายถึง ค่ามอดูลัสที่ 100 % หลังบ่มเร่งที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่ามอดูลัสที่ 100 % ก่อนบ่มเร่ง หน่วยเป็นร้อยละ (%)

$$\text{Modulus change (\%)} = [(M_A - M_O)/M_O] \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ M<sub>O</sub> คือ มอดูลัสที่ 100 % ก่อนบ่มเร่ง (MPa)

M<sub>A</sub> คือ มอดูลัสที่ 100 % หลังบ่มเร่ง (MPa)

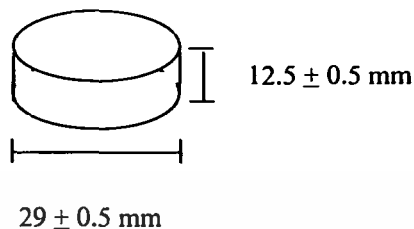
#### 3.4.6 การยวบตัวเนื่องจากแรงกด

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 395 [33]

เตรียมชิ้นทดสอบยางคงรูปมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ความหนา 12.5 ± 0.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.0 ± 0.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.3 วัดความหนาของชิ้นทดสอบ ต่อมานำไปวางระหว่างแผ่นเหล็กทั้งสองของอุปกรณ์สำหรับทดสอบการอัดที่มีแท่งเหล็กกัน (Spacer bars) เพื่อกำหนดระยะในการอัดยาง อัดชิ้นทดสอบให้มีความหนาเท่ากับแท่งเหล็กกัน ซึ่งความหนาจะลดลงจากเดิมประมาณ 25 % ต่อมานำอุปกรณ์สำหรับทดสอบการอัดที่มีชิ้นทดสอบ เข้าไปในตู้อบที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 100°C นาน 24 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดนำชิ้นทดสอบออกจากอุปกรณ์ทดสอบมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 30 นาที วัดความหนาของชิ้นทดสอบ โดยทดสอบ 3 ชิ้นต่อ 1 สูตร คำนวณผลดังสมการที่ 3.5



รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด [33]

การคำนวณ

$$\% C_B = [(t_0 - t_1)/(t_0 - t_n)] \times 100 \quad (3.5)$$

- เมื่อ  $C_B$  คือ การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (%)  
 $t_0$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบเริ่มต้น (mm)  
 $t_1$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังอบ (mm)  
 $t_n$  คือ ความหนาของแท่งเหล็กกัน (mm)

### 3.4.7 การยืดตัวเนื่องจากแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 412 [32]

นำชิ้นทดสอบอย่างคงรูปที่มีลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติแรงดึง มาทำสัญลักษณ์ตรงเกจ ต่อมาวัดระยะความยาวเกจก่อนทำการทดสอบ โดยยืดชิ้นทดสอบให้ยาวขึ้น 25 % แล้วนำอุปกรณ์ทดสอบการดึงที่มีชิ้นทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดแล้วนำมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที วัดระยะความยาวเกจหลังทดสอบ โดยทดสอบ 3 ชิ้นต่อ 1 สูตร คำนวณผลดังสมการที่ 3.6

การคำนวณ

$$T_A = [(L_1 - L_0)/L_0] \times 100 \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $T_A$  คือ การยืดตัวเนื่องจากแรงดึง (%)

$L_0$  คือ ความยาวเกจก่อนยืด (mm)

$L_1$  คือ ความยาวเกจหลังจากยืด (mm)

### 3.4.8 ความต้านทานต่อโอโซน

มาตรฐานการทดสอบ ISO 1431/1 [34]

นำชิ้นทดสอบยางคงรูปที่มีขนาด 80 x 25 x 2 มิลลิเมตร มายืดปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบให้ความยาวเพิ่มขึ้น 20 % หลังจากนั้นนำไปไว้ในห้องมืดเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำเข้าสู่อบโอโซนที่มีความเข้มข้นของโอโซน 50 (Part per hundred million, pphm) อุณหภูมิ 40 °C นาน 72 ชั่วโมง จากนั้นตรวจหารอยแตกที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบด้วยแว่นขยายที่มีกำลังขยาย 10 เท่า โดยทดสอบ 3 ชิ้นต่อ 1 สูตร ตัวอย่างการรายงานผลลักษณะของรอยแตก แสดงดังตารางที่ 2.1

### 3.4.9 ความทนทานต่อน้ำมัน

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 471 [35]

นำชิ้นทดสอบยางคงรูปที่มีขนาด 40 x 20 x 2 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนักของยางในน้ำและในอากาศ ทำการบันทึกน้ำหนักก่อนแช่น้ำมันไว้ ต่อมาแช่ชิ้นทดสอบในน้ำมัน ASTM No.1 และ No.3 ที่มีอุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 70 ชั่วโมง นำชิ้นทดสอบยางออกจากน้ำมันมาชั่งด้วยกระดาษทิชชูแล้วชั่งน้ำหนักของยางในน้ำและอากาศบันทึกน้ำหนักหลังแช่น้ำมัน โดยทดสอบ 3 ชิ้นต่อ 1 สูตร เพื่อหาร้อยละการบวมตัวของยาง คำนวณผลดังสมการที่ 3.7

การคำนวณ

$$\text{Oil swell (\%)} = [(m_3 - m_4) - (m_1 - m_2)] / (m_1 - m_2) \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ Oil swell คือ ร้อยละการบวมตัวของยางในน้ำมัน (%)

$m_1$  คือ น้ำหนักยางก่อนแช่น้ำมันซึ่งในอากาศ (g)

$m_2$  คือ น้ำหนักยางก่อนแช่น้ำมันซึ่งในน้ำ (g)

$m_3$  คือ น้ำหนักยางหลังแช่น้ำมันซึ่งในอากาศ (g)

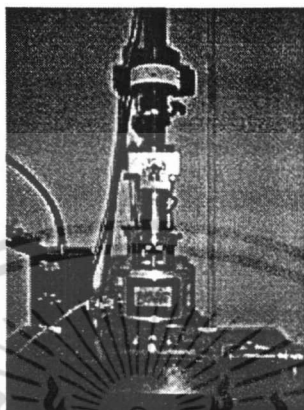
$m_4$  คือ น้ำหนักยางหลังแช่น้ำมันซึ่งในน้ำ (g)

### 3.4.10 สัณฐานวิทยา

เตรียมชิ้นทดสอบโดยการนำกระจกคมของเครื่องไมโครโทม (Microtome) ตัดชิ้นทดสอบที่ผิวของยางขณะแช่ด้วยไนโตรเจนเหลวตลอดเวลา ตัดผิวหน้าของยางให้เรียบเพื่อลดความผิดพลาดซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดจากความขรุขระของผิว หลังจากนั้นนำขางที่เตรียมได้ไปทดสอบด้วยเครื่อง AFM ดังรูปที่ 3.4 โดยใช้รูปแบบการทดลองชนิด Tapping mode ที่ผลิตจากซิลิกอนที่มีความยาว 125 ไมโครเมตร อัตราเร็วสแกน 0.5 Hz ความถี่เรโซแนนซ์ 300 kHz ขนาดพื้นที่สแกน 20 ไมโครเมตร บันทึกภาพแบบ Phase image



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบ Atomic Force Microscope

#### 3.4.11 สมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัต

เตรียมชิ้นทดสอบขางทรงรูปเป็นแผ่นที่มีขนาด 6 x 25 x 2 มิลลิเมตร นำไปทดสอบด้วยเครื่อง DMTA รูปแบบการทดลอง Tension mode ความถี่ทดสอบ 10 Hz ช่วงอุณหภูมิ -80 ถึง 40 °C ที่มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 °C/min เพื่อหาค่า  $\tan \delta$  และ  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

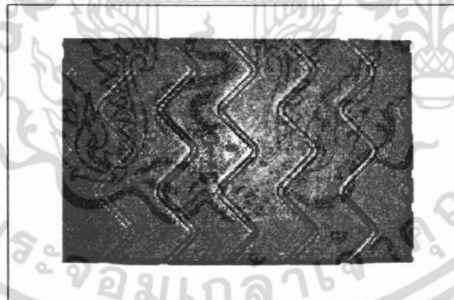
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นยางรองรางรถไฟซึ่งผลิตจากยางคลอโรพรีน (CR) ผสมยางธรรมชาติ (NR) ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป หลังจากนั้นทดสอบสมบัติต่างๆ ที่มีต่อยางผสม เช่น สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง ซึ่งมีปัจจัยที่ศึกษา ดังนี้

- ปริมาณเขม่าดำ (Carbon black loading)
- อัตราส่วนระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ (CR/NR ratios)
- ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO loading)
- ปริมาณกำมะถัน (Sulfur loading)
- การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

ผู้วิจัยเลือกใช้ยางคลอโรพรีนผสมสารเคมีให้ได้สมบัติและสูตรที่เหมาะสมเพื่อใช้ผลิตเป็นแผ่นยางรองรางรถไฟ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานการรถไฟแห่งประเทศไทย (ร.ฟ.ท.) แสดงค่าดังตารางที่ 1.1 หลังจากนั้นหาอัตราส่วนยางผสมที่มีอัตราส่วนยางธรรมชาติในผลิตภัณฑ์ให้ได้มากที่สุดเพื่อลดต้นทุนการผลิตและศึกษาสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับยางผสม ตามมาตรฐานของการรถไฟแห่งประเทศไทยและทดสอบเพิ่มเติมในเรื่องสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา



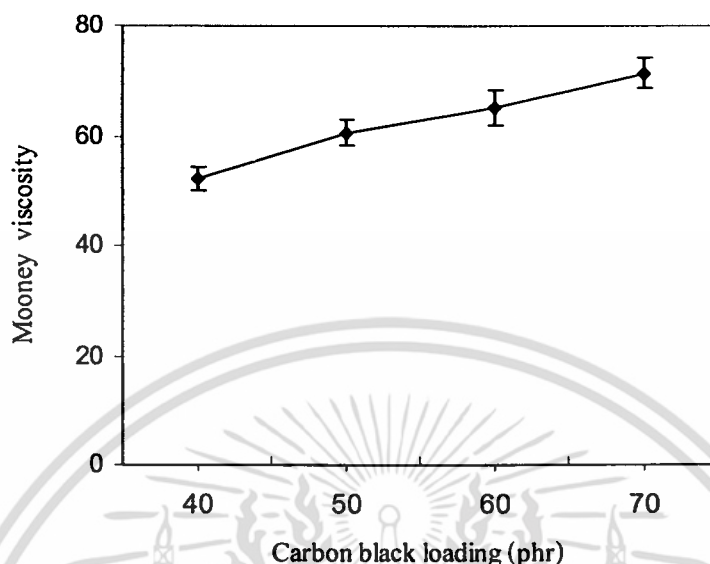
รูปที่ 4.1 ยางรองรางรถไฟที่ใช้ในปัจจุบัน

#### 4.1 การศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อสมบัติของยางคลอโรพรีน

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากสามารถเติมลงในยางได้ปริมาณมากเพื่อลดต้นทุนและทำให้สมบัติเชิงกลของยางดีขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำชนิดเฟอร์เนส เกรด N 330 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 28 - 36 นาโนเมตร [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำ (40 - 70 phr) ที่มีต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยางคลอโรพรีน ผสมเขม่าดำที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยง (Unvulcanized rubber black mix) แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความหนืดมูนนี่ (ML 1 + 4 (100 °C)) ของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าความหนืดมูนนี่ของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ (40 - 70 phr) พบว่าความหนืดมูนนี่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางและเขม่าดำ ซึ่งโมเลกุลยางจะแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างในโครงสร้างเขม่าดำเกิดเป็นยางบาวด์ (Bound rubber) เมื่อผสมเขม่าดำในปริมาณมากทำให้การเคลื่อนไหวสายโซ่โมเลกุลยางลดลง สอดคล้องกับสมการของกัทซ์-โกลด์ (Guth-Gold equation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมที่ใส่ลงในยาง ดังสมการที่ 4.1 อย่างไรก็ตาม สมการของกัทซ์-โกลด์ จะประมาณค่าความหนืดได้แม่นยำเมื่อใช้กับยางที่ผสมสารตัวเติมก่อนกลมมีโครงสร้าง (Structure) ต่ำและผสมสารตัวเติมในปริมาณที่ไม่สูงมาก (ไม่เกิน 30 phr) [36]

$$\eta_r = \eta_u (1 + 2.5 \phi + 14.1 \phi^2) \quad (4.1)$$

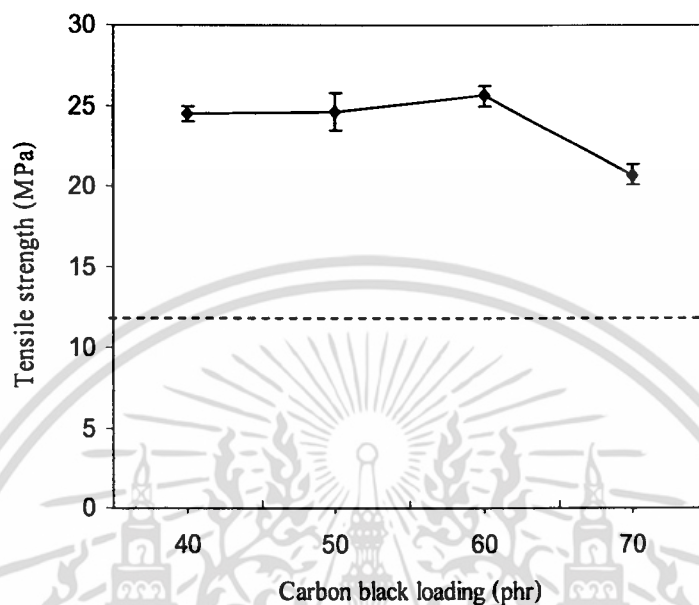
เมื่อ  $\eta_r$  คือ ความหนืดของยางผสมสารตัวเติม (Filled compound)

$\eta_u$  คือ ความหนืดของยางไม่ผสมสารตัวเติม (Unfilled compound)

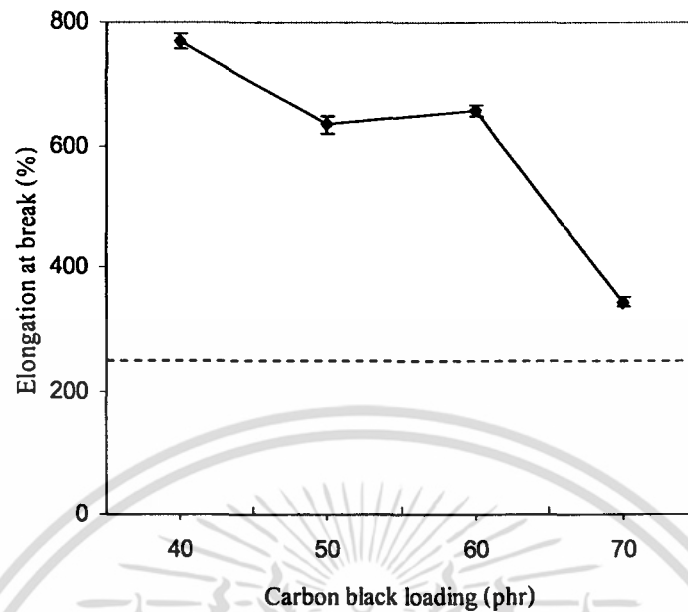
$\phi$  คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมในยาง (Volume fraction of filler)

#### 4.1.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงของยางคลอโรพรีนที่มีปริมาณเขม่าดำต่างกัน

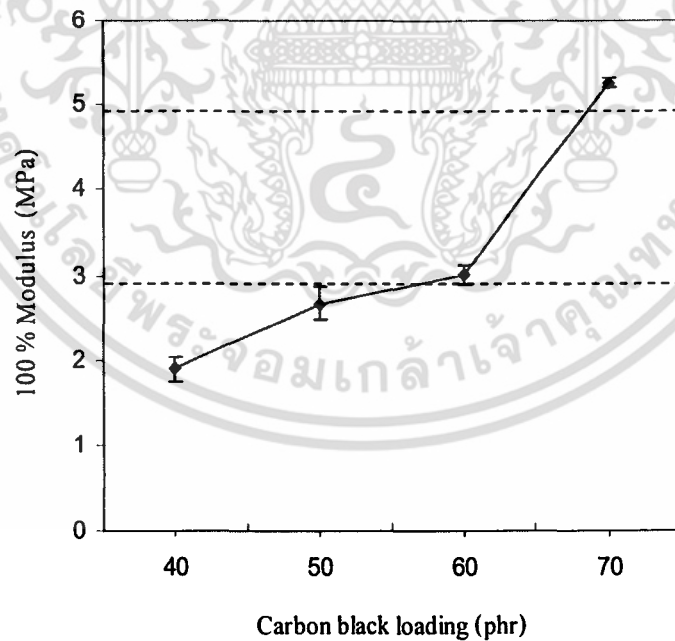
จากการทดสอบผลของปริมาณเขม่าดำ (40 - 70 phr) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงของยางคลอโรพรีนเพื่อหาสูตรเหมาะสมในการผลิตเป็นแผ่นยางรองรางรถไฟ แสดงผลดังรูปที่ 4.3 - 4.6



รูปที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงดึงของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

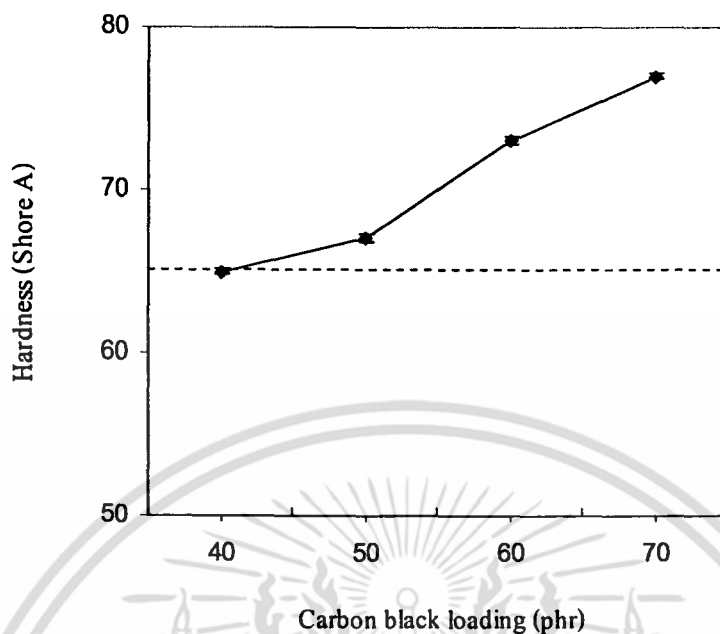


รูปที่ 4.4 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.



รูปที่ 4.5 ค่ามอดุลัสที่ 100 % ของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดและสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



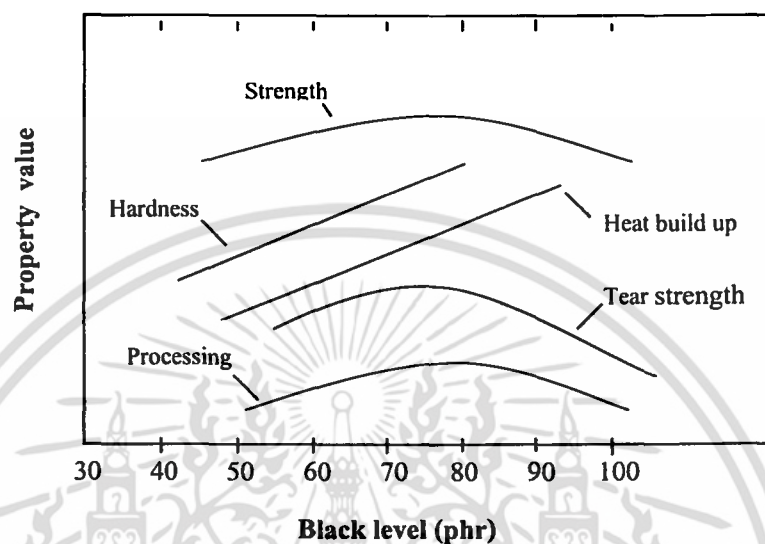
รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งกดของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาด แปรปริมาณเขม่าดำ (40 - 70 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำในช่วง 40 - 60 phr ความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเขม่าดำมากกว่า 60 phr ความแข็งแรงดึงของยางลดลง ส่วนร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเขม่าดำเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ยางก็จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำและยางมากขึ้น โดยโมเลกุลยางแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างในโครงสร้างเขม่าดำหรือยึดเกาะระหว่างพื้นผิวทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นแต่ที่ปริมาณเขม่าดำมากเกินไปทำให้การกระจายตัวในยางได้ไม่ดี เกิดรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Agglomerates) มีช่องว่าง (Voids) อยู่ภายใน เมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นทดสอบทำให้ความแข็งแรงดึงลดลงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง [4,36]

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงค่ามอดูลัสที่ 100 % และความแข็งกด แปรปริมาณเขม่าดำ (40 - 70 phr) พบว่ามอดูลัสที่ 100 % และความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเขม่าดำทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและเขม่าดำสูงขึ้น ส่วนของยางจะถูกดูดซึม (Adsorption) เข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างในโครงสร้างเขม่าดำมาก ซึ่งเขม่าดำเป็นวัสดุที่มีความแข็งและมอดูลัสสูงมากจึงไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ (Non-deformable) ขณะที่รับแรง ยางเป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนขนาดหรือเปลี่ยนรูปได้มาก ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเขม่าดำในยางทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

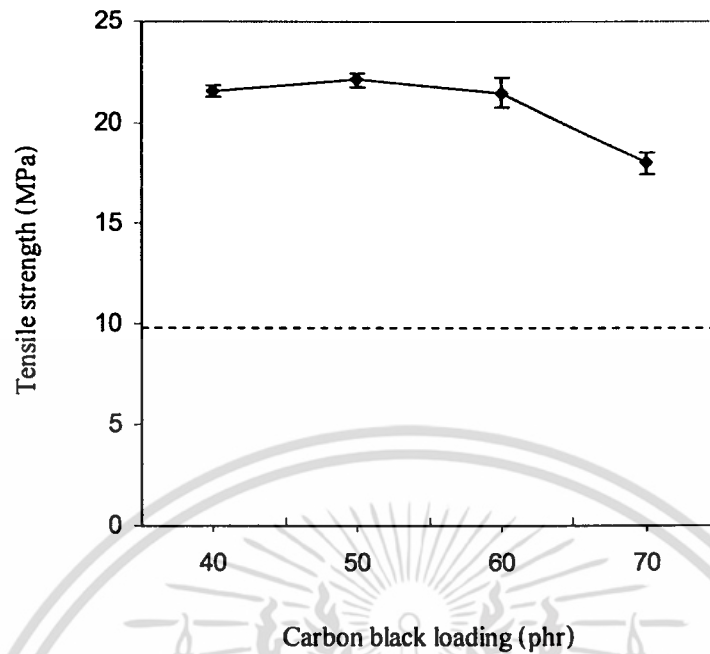
ชิ้นงานมีความแข็งขึ้นและเปลี่ยนรูปลดลง [36] ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับรูปที่ 4.7 แสดงผลของปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติบางประการของยาง อย่างไรก็ตามก็ดีจากการเปรียบเทียบตารางที่ 1.1 พบว่าปริมาณเขม่าดำ 60 phr ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งกดและมอดูลัสที่ 100 % อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด



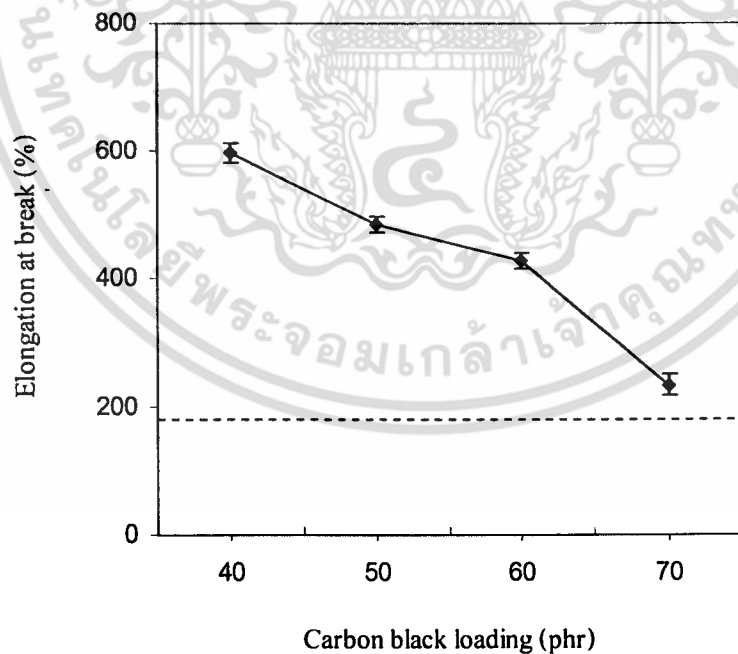
รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติของยาง [36]

#### 4.1.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงของยางคลอโรพรีนที่มีปริมาณเขม่าดำต่างกัน

จากการทดสอบผลของปริมาณเขม่าดำ (40 - 70 phr) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงของยางคลอโรพรีน อุณหภูมิทดสอบ 100 °C นาน 96 ชั่วโมง แสดงผลดังรูปที่ 4.8 - 4.13

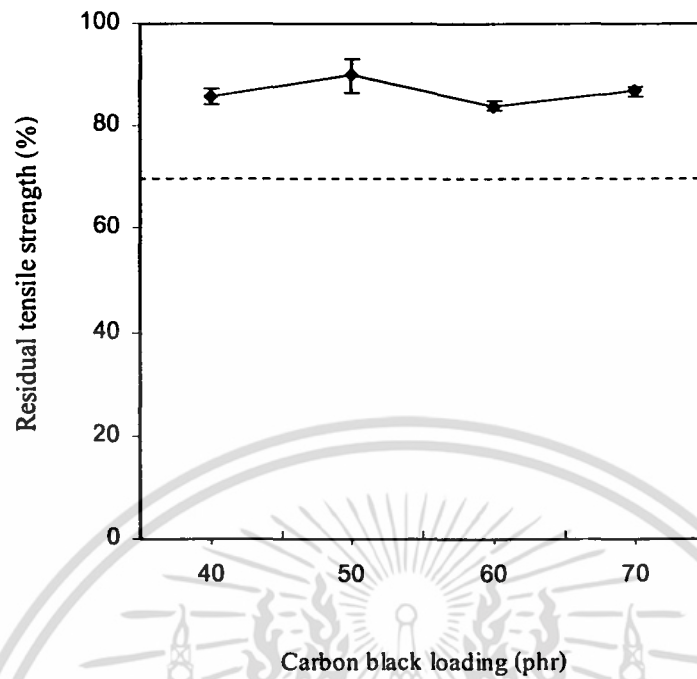


รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มแรงของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

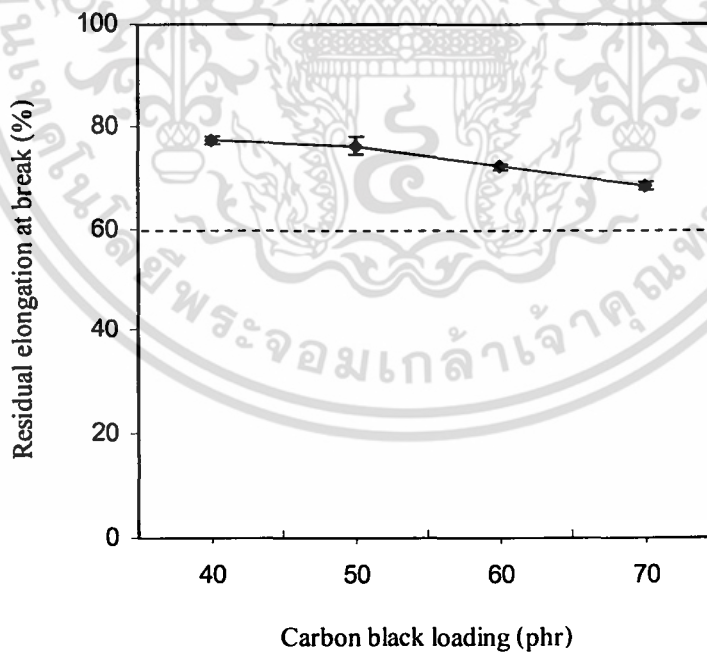


รูปที่ 4.9 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มแรงของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

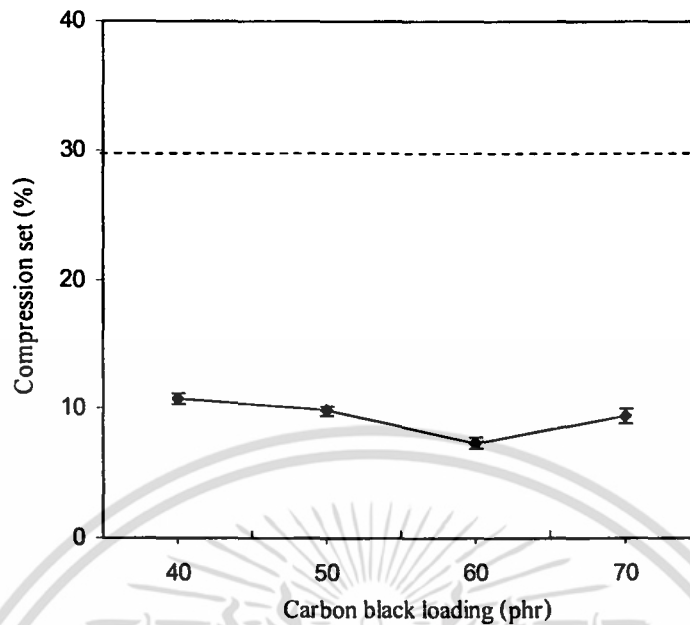


รูปที่ 4.10 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

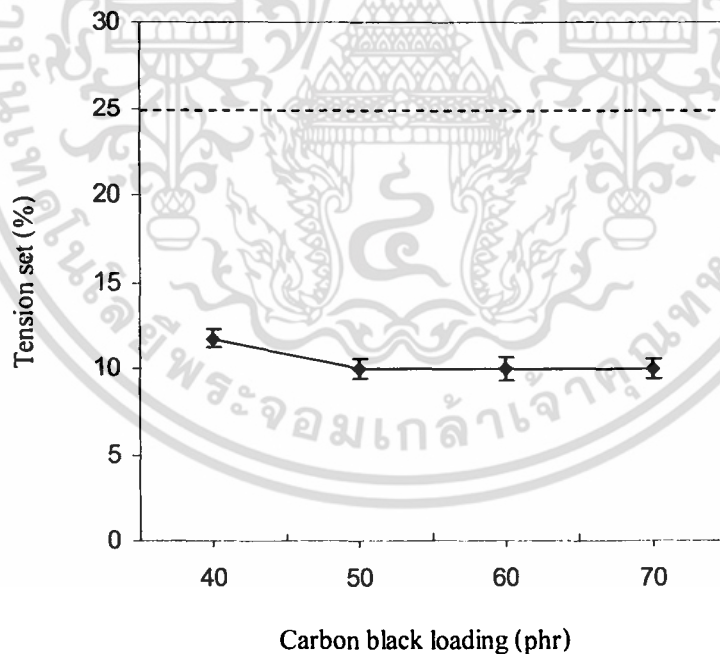


รูปที่ 4.11 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ เส้นประ (----) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

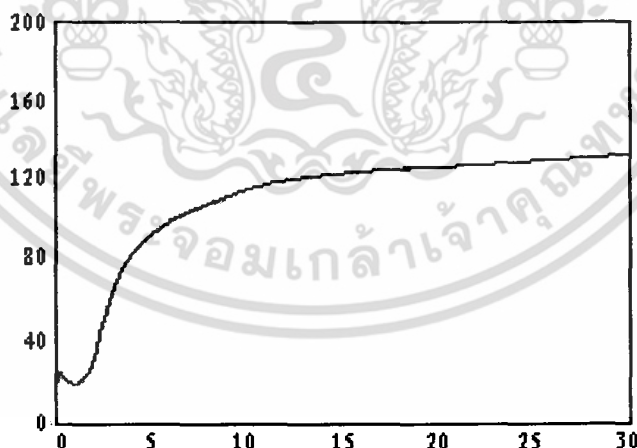


รูปที่ 4.13 ค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางคลอโรพรีน แปรปริมาณเขม่าดำ เส้นประ (----) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่ง แปร ปริมาณเขม่าดำ (40 - 70 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเขม่าดำทำให้ความเครียดของยางสูง เมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นทดสอบตามทฤษฎีการขยายความเครียด (Strain amplification effect) ดังนั้นการให้ความร้อนแก่ยางซึ่งมีปริมาณเขม่าดำมากกว่า ทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดได้ง่ายเป็นผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดลดลง ซึ่งความสามารถในการรักษาสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่ง แสดงผลด้วยค่าร้อยละความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าค่าความแข็งแรงดึงที่คงอยู่หลังบ่มเร่งมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ มีแนวโน้มลดลง

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดและการยืดตัวเนื่องจากแรงดึง แปร ปริมาณเขม่าดำ (40 - 70 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ การยุบตัวเนื่องจากแรงกดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยอย่างไรก็ดีที่ปริมาณเขม่าดำ 60 phr แล้วเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [36] ที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ทำให้การยุบตัวเนื่องจากแรงกดและการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น เวลาเชื่อม โยง ( $t_{90}$ ) ของยางยังเชื่อม โยง ได้ไม่สมบูรณ์เพราะยางคลอโรพรีนมีองศาการเชื่อม โยงเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเชื่อม โยงผ่านไป แสดงดังรูปที่ 4.14 โดยบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงทำให้การเชื่อม โยงของยางเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มเขม่าดำ ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดและการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงจึงไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิมมากนัก



รูปที่ 4.14 กราฟการเชื่อม โยงของยางคลอโรพรีน

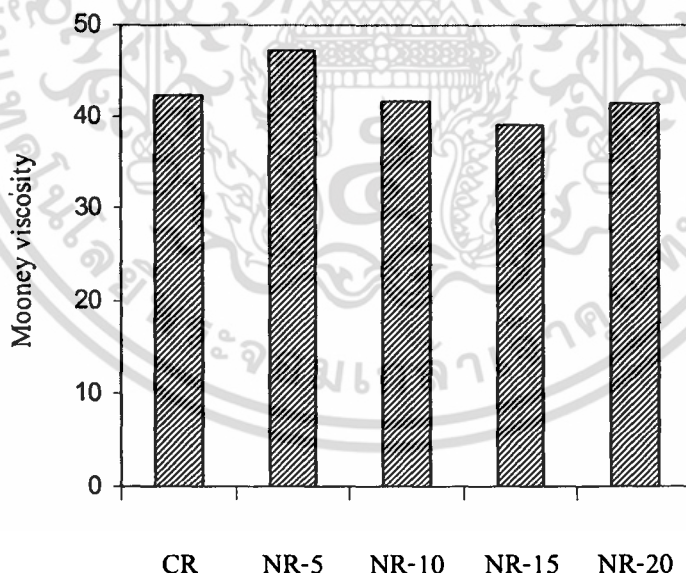
เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางคลอโรพรีนกับตารางที่ 1.1 พบว่าการใช้ยางคลอโรพรีนผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr มีสมบัติอยู่ในเกณฑ์ที่การรถไฟแห่งประเทศไทย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดเพื่อใช้ผลิตเป็นแผ่นยางรองรางรถไฟ สำหรับปัจจัยที่สำคัญในการตัดสินใจ คือ ค่ามอดูลัสที่ 100 % เนื่องจากปริมาณเคมีค่า 40 และ 50 phr ให้ค่ามอดูลัสที่ 100 % ต่ำกว่าเกณฑ์กำหนด ส่วนปริมาณเคมีค่า 70 phr ทำให้ค่ามอดูลัสที่ 100 % สูงเกินไป ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณเคมีค่า 60 phr ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

#### 4.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ

อุตสาหกรรมยางในปัจจุบันนี้นิยมใช้ยางผสมอย่างแพร่หลาย เพื่อวัตถุประสงค์หลายประการ เช่น เพิ่มสมบัติการใช้งาน ช่วยกระบวนการแปรรูปให้ง่ายขึ้นและลดต้นทุนการผลิต ซึ่งการใช้ยางเพียงชนิดเดียวไม่สามารถที่จะให้สมบัติต่างๆ ตามต้องการได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดในการใช้งานของยางแต่ละประเภทที่แตกต่างกัน [36]

การผสมระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติเพื่อให้เข้ากันดี ควรบดย่อยยางธรรมชาติให้ ความหนืดมูนนี่ (ML(1+4) 100 °C) ใกล้เคียงกับยางคลอโรพรีนเพื่อให้การผสมระหว่างยางทั้งสอง ชนิดเข้ากันดียิ่งขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดสูงกว่ายางคลอโรพรีน ดังนั้นควรบดย่อยยางธรรมชาติเพื่อตัดสายโซ่ยาวให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง [6,7] จากการหาความหนืดมูนนี่ของยางทั้งสองชนิด โดยการบดย่อยยางธรรมชาติเป็นเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที พบว่า เวลาประมาณ 10 นาที ทำให้ความหนืดมีค่าใกล้เคียงกับยางคลอโรพรีนมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.15

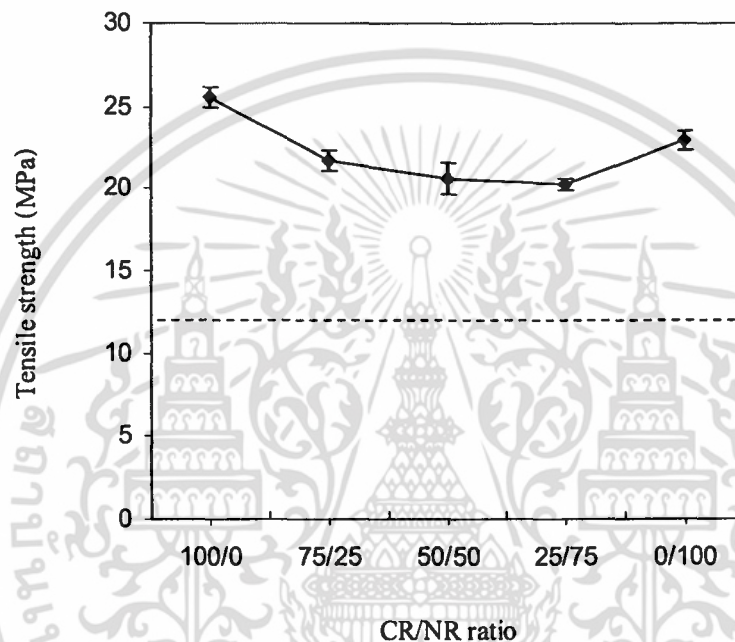


รูปที่ 4.15 ความหนืดมูนนี่ (ML(1+4) 100 °C) ของยาง CR และยาง NR - 5, NR - 10, NR - 15 และ NR - 20 ที่ใช้เวลาบดย่อย 5, 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ

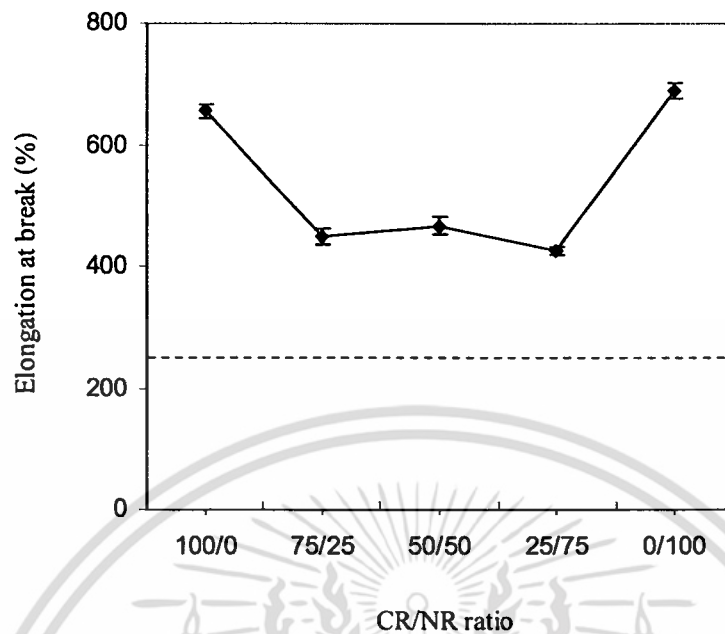
สำหรับขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ (CR/NR ratios) ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนเชิงกลและสัณฐานวิทยา โดยใช้ยางผสม CR/NR อัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 100/0

#### 4.2.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR ต่างกัน

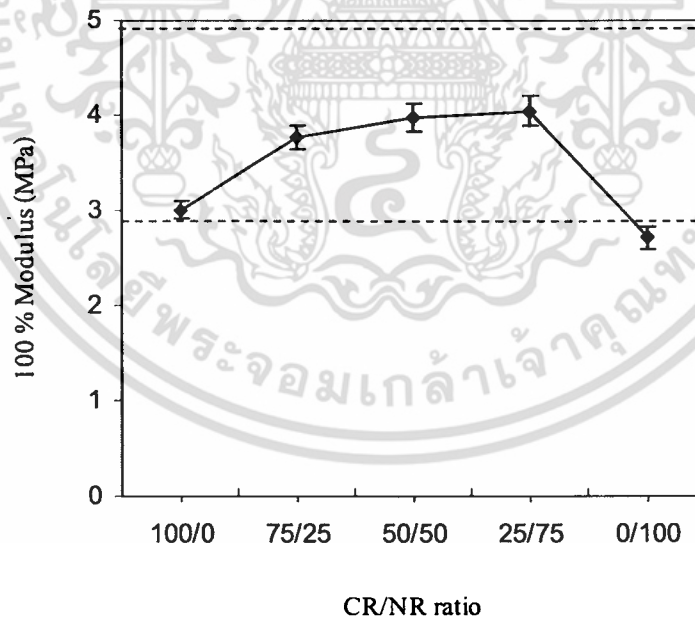
จากการทดสอบผลของอัตราส่วนยางผสม CR/NR 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr ต่อสมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรง แสดงผลดังรูปที่ 4.16 - 4.19



รูปที่ 4.16 ค่าความแข็งแรงดึง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

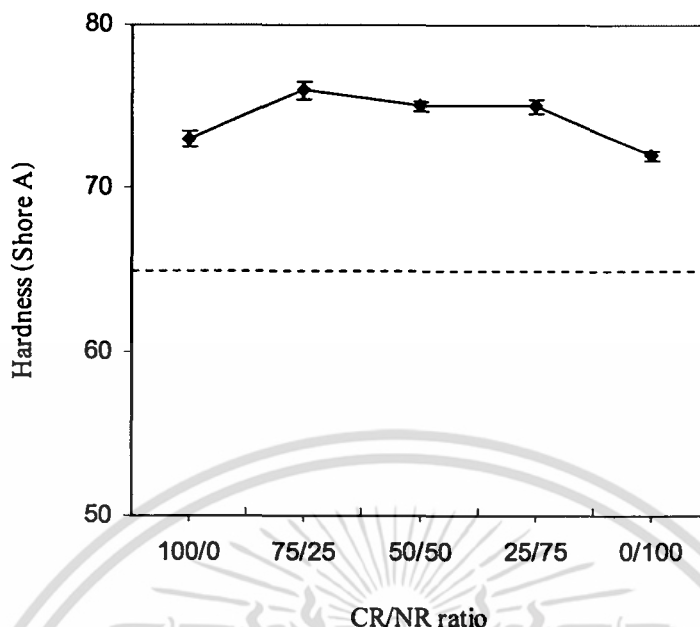


รูปที่ 4.17 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.



รูปที่ 4.18 ค่ามอดุลัสที่ 100 % แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดและสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งกด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดก่อนบ่มเร่ง แปรยางผสม CR/NR ที่มีอัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติ ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสม CR/NR มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสม CR/NR มีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจากการเปรียบเทียบระหว่างยางทั้งสองชนิดและยางผสม CR/NR พบว่ายางผสมขาดง่ายกว่ายางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติเพียงชนิดเดียว เนื่องจากยางผสม CR/NR เป็นยางผสมชนิดไม่รวมเป็นเนื้อเดียว (Immiscible blends) เพราะความเป็นขั้ว (Polarity) และตัวแปรการละลาย (Solubility parameter) ของยางแต่ละชนิดต่างกันซึ่งยางคลอโรพรีนมีอะตอมคลอรีน (Cl) ในโครงสร้างทำให้ยางแสดงขั้ว (Polar) ขณะที่ยางธรรมชาติมีเฉพาะอะตอมคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) อยู่ในโครงสร้างของยางจึงไม่สามารถแสดงความเป็นขั้ว (Non-polar) [36] ดังนั้นความแตกต่างระหว่างวัฏภาคนี้ทำให้เกิดจุดด้อยของยางผสม โดยเฉพาะรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ที่ไม่แข็งแรง เมื่อให้แรงดึงกับชิ้นทดสอบจึงขาดได้ง่ายกว่ายางเพียงชนิดเดียว

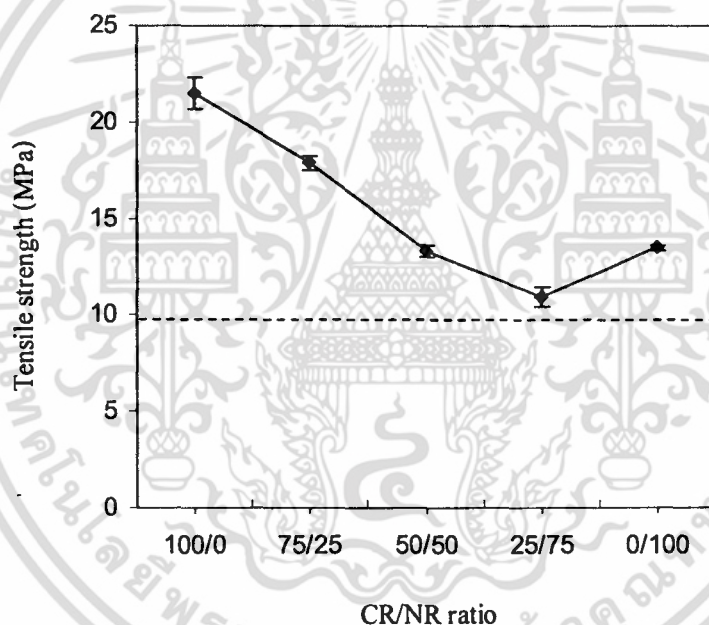
จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 แสดงค่ามอดูลัสที่ 100 % และความแข็งกด แปรยางผสม CR/NR ที่มีอัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติ ค่ามอดูลัสที่ 100 % และความแข็งกดของยางผสมมีค่าสูงกว่ายางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ เนื่องจากยาง

คลอโรพรีนสามารถเชื่อมโยงได้ด้วยกำมะถัน ดังนั้นกำมะถันในสูตรยางผสม CR/NR จะเพิ่มความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางผสม ส่งผลให้การเคลื่อนไหวในสายโซ่โมเลกุลยากกว่ายางที่ใช้ระบบเชื่อมโยงเพียงชนิดเดียว [6,36]

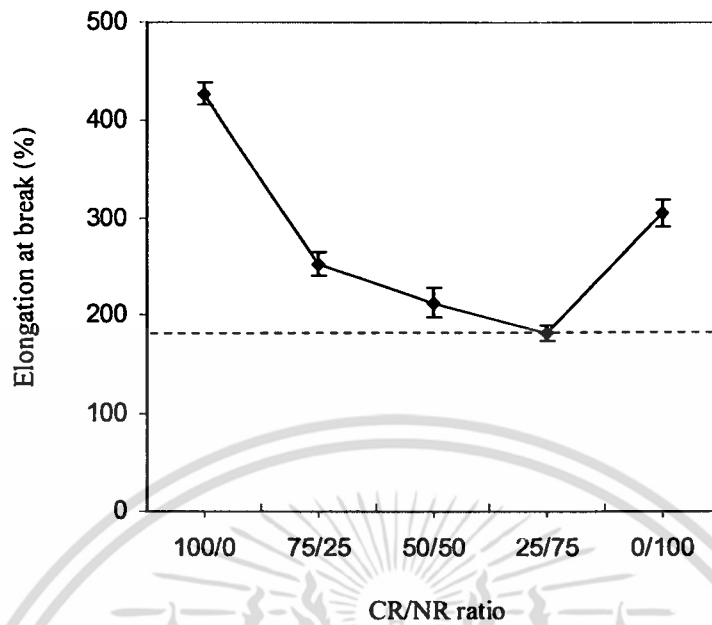
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและมาตรฐานของ ร.ฟ.ท. ดังตารางที่ 1.1 ยางผสมส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ยกเว้น ยางธรรมชาติ 100 % มีค่ามอดูลัสที่ 100 % ต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย

#### 4.2.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR ต่างกัน

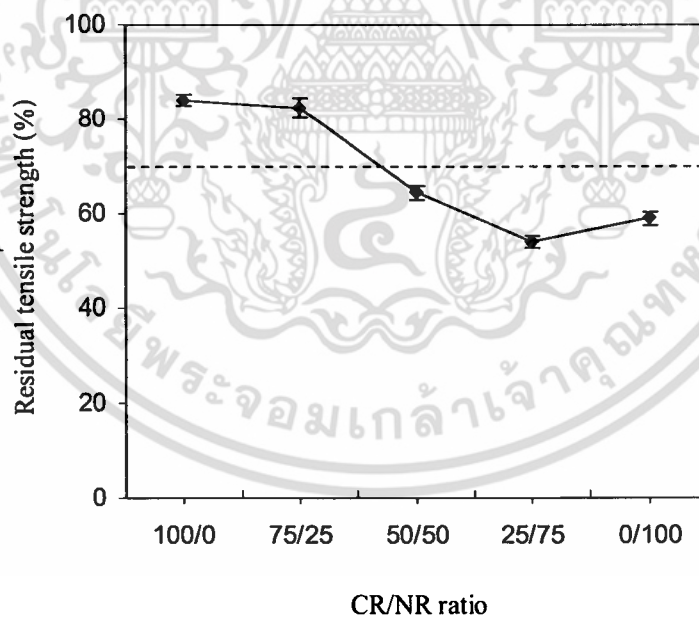
จากการทดสอบผลของอัตราส่วนยางผสม CR/NR 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr ต่อสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรง อุณหภูมิทดสอบ 100 °C นาน 96 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.20 - 4.26



รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มแรง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

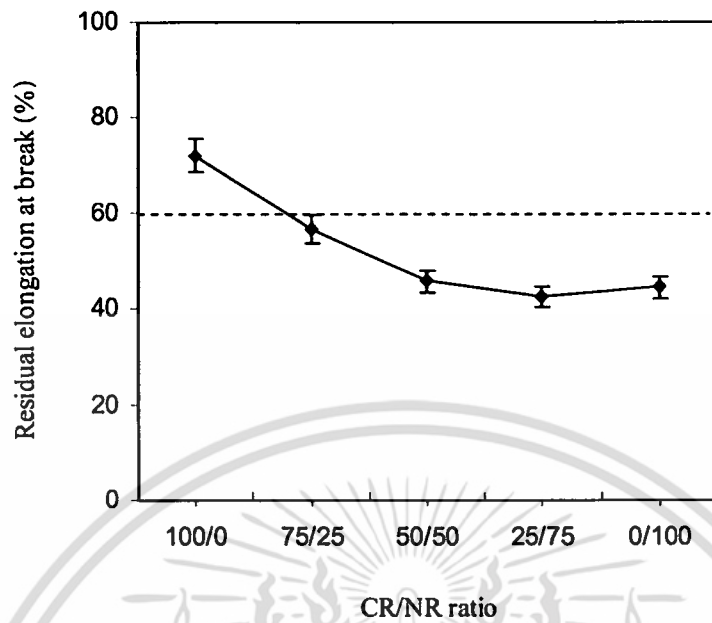


รูปที่ 4.21 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มแรง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

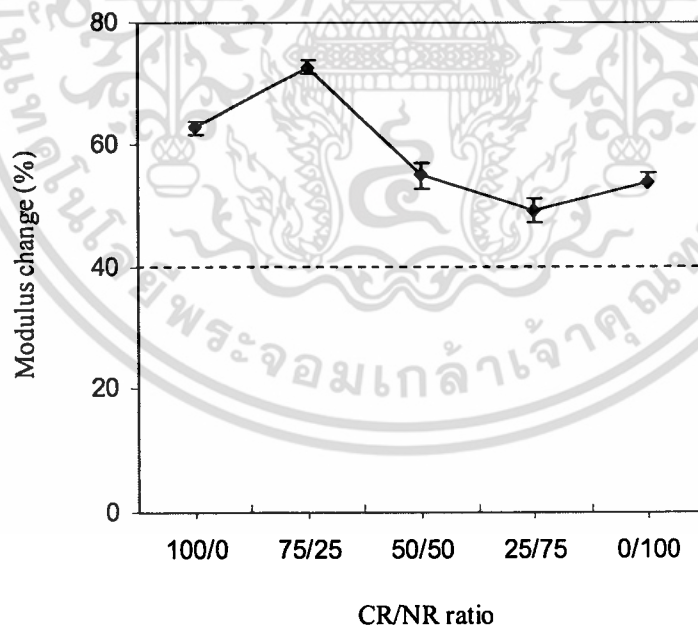


รูปที่ 4.22 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

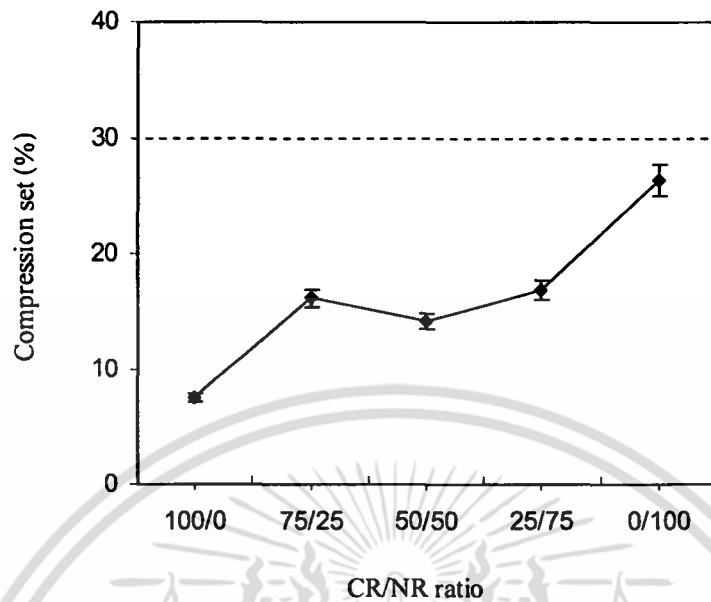


รูปที่ 4.23 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

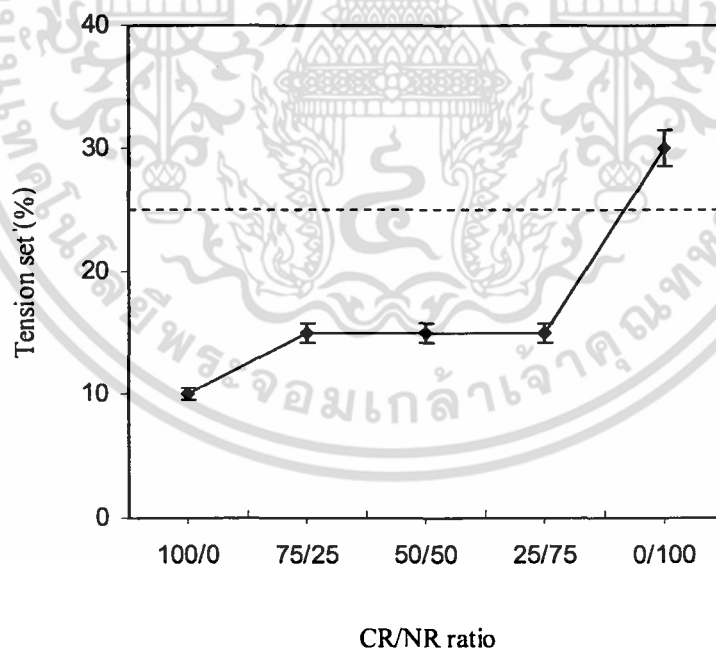


รูปที่ 4.24 ค่าร้อยละมอดูลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (----) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (----) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.พ.ท.

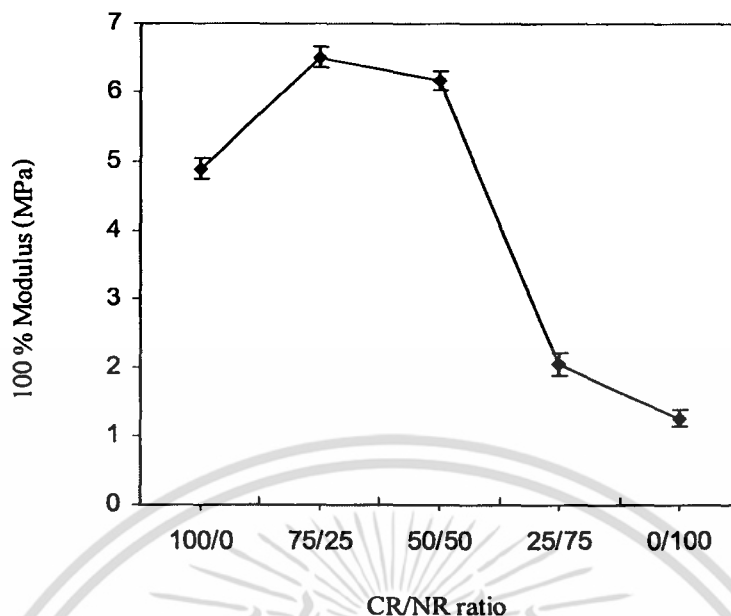


รูปที่ 4.26 ค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (----) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.พ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาด เมื่อแปรขงผสม CR/NR ที่มีอัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 100/0 มีค่าสูงที่สุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติ เนื่องจากยางคลอโรพรีนมีอะตอมคลอรีนในโครงสร้างช่วยป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยา (Shielding effect) ของออกซิเจนที่ตำแหน่งพันธะคู่และลดความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาทำให้ยางคลอโรพรีนทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดี ในขณะที่โครงสร้างของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเสื่อมสลายได้ง่ายด้วยความร้อน [36] ดังนั้นยางผสม CR/NR ที่มีอัตราส่วนยางธรรมชาติสูงทำให้สมบัติแรงดึงของยางผสมหลังจากบ่มแรงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่มีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.22 และ 4.23 ส่วนค่าร้อยละมอดูลัสที่เปลี่ยนแปลงหลังบ่มแรงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 4.24 เนื่องจากยางคลอโรพรีนเมื่อบ่มแรงที่อุณหภูมิสูงจะมีองศาการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นทำให้มอดูลัสหลังบ่มแรงมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ยางธรรมชาติมีองศาการเชื่อมโยงที่ลดลง ดังรูปที่ 4.27

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 แสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดและยืดตัวเนื่องจากแรงดึง เมื่อแปรขงผสม CR/NR ที่มีอัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติ การยุบตัวเนื่องจากแรงกดและการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางคลอโรพรีน 100 % มีค่าต่ำสุด ส่วนยางธรรมชาติ 100 % มีค่าสูงสุด เนื่องจากยางคลอโรพรีนทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ความสามารถในการคืนตัวหลังกดหรือยืดเป็นระยะเวลานานที่อุณหภูมิสูงได้ดี เมื่อนำยางทั้งสองชนิดมาผสมกัน ส่งผลให้การยุบตัวเนื่องจากแรงกดและการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบยางผสม CR/NR ทั้ง 3 อัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน

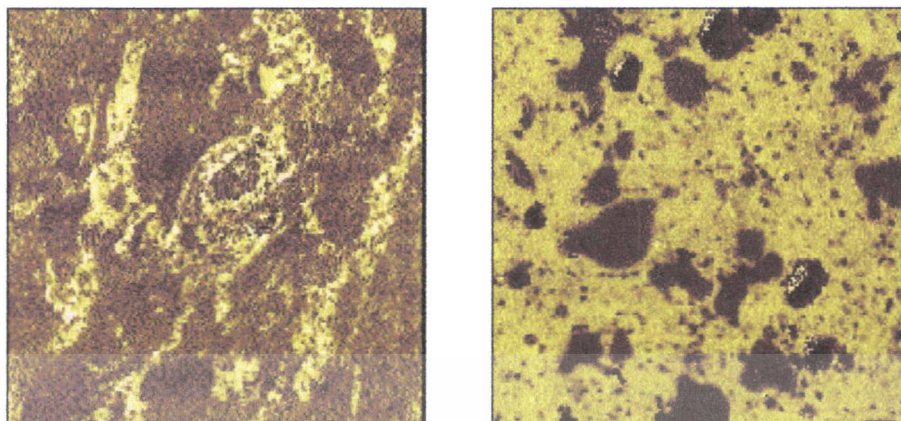


รูปที่ 4.27 ค่ามอดูลัสที่ 100 % หลังบ่มแรง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบและมาตรฐานของ ร.ฟ.ท. ดังตารางที่ 1.1 พบว่าสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มแรงของยาง CR 100 % อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนยางผสม CR/NR ที่มีอัตราส่วน 75/25 สมบัติส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ยกเว้น ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ และค่าร้อยละมอดูลัสที่เปลี่ยนแปลง

#### 4.2.3 สันฐานวิทยาของยางผสม

การผสมระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ เป็นยางผสมชนิดที่ไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวในระดับ โมเลกุลเนื่องจากความแตกต่างระหว่างขั้วและค่าตัวแปรการละลายของยางแต่ละชนิด ซึ่งค่าตัวแปรการละลายของยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติเท่ากับ 9.26 และ 8.25  $(\text{cal}/\text{cm}^3)^{1/2}$  ตามลำดับ [37] ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างวัฏภาคที่มีผลต่อสมบัติของยางผสมจึงศึกษาเพิ่มเติมในส่วนสันฐานวิทยาของยางผสม โดยเปรียบเทียบระหว่างการเติมและไม่เติมเขม่าดำในยางผสม CR/NR ด้วยเครื่อง AFM โดยใช้รูปแบบการทดลองชนิด Tapping mode ภาพที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะของเฟสคอนทราสต์ (Phase contrast) แสดงดังรูปที่ 4.28 และ 4.29

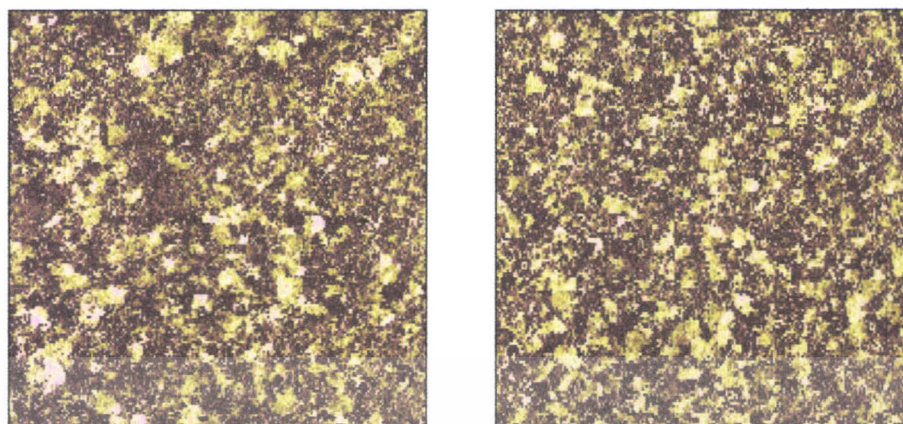


(a) 75/25

(b) 25/75

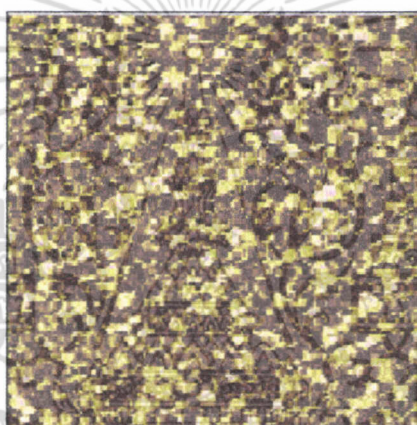
รูปที่ 4.28 AFM Micrographs ของยางผสม CR/NR ที่ไม่เติมเขม่าดำ พื้นที่สแกน  $20\ \mu\text{m}$  อัตราเร็วสแกน  $0.3\ \text{Hz}$  รูปประเภท Phase image (a) 75/25 และ (b) 25/75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) 75/25

(b) 50/50



(c) 25/75

**รูปที่ 4.29** AFM Micrographs ของยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr พื้นที่สแกน 20  $\mu\text{m}$  อัตราเร็วสแกน 0.3 Hz รูปประเภท Phase image (a) 75/25 (b) 50/50 และ (c) 25/75

จากรูปที่ 4.28 แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 25/75 ที่ไม่เติมเขม่าดำ พบว่ารูปที่ 4.28 (a) ยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 สังเกตเห็นบริเวณที่มีความทึบมากกว่าบริเวณที่มีความสว่าง โดยบริเวณที่มีความทึบเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) บริเวณที่มีความสว่างเป็นวัฏภาคกระจาย (Disperse phase) ส่วนรูปที่ 4.28 (b) ยางผสม CR/NR อัตราส่วน 25/75 สังเกตเห็นบริเวณที่มีความสว่างมากกว่าบริเวณที่มีความทึบ โดยบริเวณที่มีความสว่างเป็นวัฏภาคต่อเนื่องและบริเวณที่มีความทึบเป็นวัฏภาคกระจาย จากการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนยางผสม CR/NR และสัณฐานวิทยากับรูปที่ 4.28 สามารถสรุปได้ว่าบริเวณที่มีความทึบคือยางคลอโรพรีน ส่วนบริเวณที่มีความสว่างคือยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.29 แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75 ที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr พบว่ารูปที่ 4.29 (a) ยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 สังเกตเห็นบริเวณที่มีความทึบมากกว่าบริเวณที่มีความสว่างเล็กน้อย รูปที่ 4.29 (b) ยางผสม CR/NR อัตราส่วน 50/50 สังเกตเห็นบริเวณที่มีความทึบใกล้เคียงกับบริเวณที่มีความสว่าง ส่วนรูปที่ 4.29 (c) ยางผสม CR/NR อัตราส่วน 25/75 สังเกตเห็นบริเวณที่มีความสว่างมากกว่าบริเวณที่มีความทึบเล็กน้อย ซึ่งไม่สามารถจำแนกได้อย่างชัดเจนว่าเป็นวัฏภาคของยางชนิดใด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.28 และ 4.29 พบว่าการเติมเขม่าดำในยางผสมทำให้การกระจายของวัฏภาคดีขึ้น อย่างไรก็ตามจากสาเหตุที่เกิดการแยกวัฏภาคของยางผสมส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ฉุด จุกขาด

#### 4.2.4 ความต้านทานต่อโอโซนของยางผสม

จากการทดสอบความต้านทานต่อโอโซนที่มีความเข้มข้น 50 ppm อุณหภูมิ 40 °C ยืดขึ้นทดสอบ 20 % นาน 72 ชั่วโมง แปรยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr [รูปที่ 4.30] รายงานผลดังตารางที่ 4.1



(a) CR/NR 75/25

(b) CR/NR 50/50

(c) CR/NR 25/75

**รูปที่ 4.30** รอยแตกของยางผสม CR/NR เนื่องจากโอโซน ความเข้มข้น โอโซน 50 ppm ยืด 20 % อุณหภูมิ 40 °C เวลา 72 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน (a) 75/25 (b) 50/50 และ (c) 25/75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.1** ผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซนที่มีความเข้มข้น โอโซน 50 pphm ชีด 20 %  
อุณหภูมิ 40 °C เวลา 72 ชั่วโมง

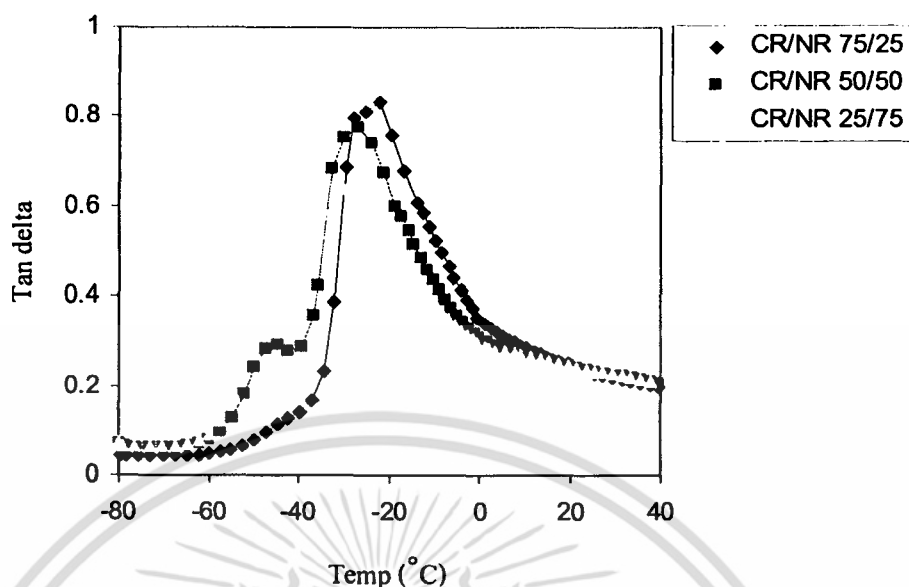
อัตราส่วนยางผสม CR/NR	ผลการทดลอง
75/25	ไม่เกิดรอยแตกใดๆ บนชิ้นงาน
50/50	ไม่เกิดรอยแตกใดๆ บนชิ้นงาน
25/75	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวของรอยแตกมากกว่า 3 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.30 และตารางที่ 4.1 พบว่ายางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 ไม่เกิดรอยแตกที่ผิวของผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากยางคลอโรพรีนมีความต้านทานต่อโอโซนดีเพราะอะตอมของคลอรีนในโครงสร้างที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity, EN) สูง ช่วยป้องกันและลดความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของโอโซนตรงพันธะคู่ในสายโซ่หลัก ดังนั้นยางผสมที่มีอัตราส่วนยางคลอโรพรีนในปริมาณมาก แสดงดังรูปที่ 4.30 ยางผสม CR/NR ที่มีอัตราส่วน (a) 75/25 และ (b) 50/50 สามารถทนทานต่อโอโซนที่มีความเข้มข้น 50 pphm [36] อย่างไรก็ตามยางผสม CR/NR อัตราส่วน 25/75 ไม่สามารถทนทานต่อสภาวะที่มีโอโซนได้ เนื่องจากยางผสมที่มีอัตราส่วนยางธรรมชาติมาก โดยโอโซนจะเข้าไปทำปฏิกิริยาตรงพันธะคู่ของวงแหวนของธรรมชาติได้ง่ายกว่าเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางและโอโซนเป็นโอโซนไนด์ (Ozonide) ทำให้ผิวของยางแข็งและแตกเมื่อยางถูกดึง รอยแตกจะเกิดขึ้นมากกับทิศทางการดึงที่ผิวของผลิตภัณฑ์ [37]

#### 4.2.5 สมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตของยางผสม

การวิเคราะห์พอลิเมอร์สองชนิดด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) เป็นการวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงกล โดยหาปัจจัยการสูญเสีย (Loss factor,  $\tan \delta$ ) และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ซึ่งบอกถึงค่าความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์หรือสัดส่วนการกระจายแรงต่อรับแรงของวัสดุ

ผลการทดลองที่ได้จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA เปรียบเทียบค่า  $\tan \delta$  และ  $T_g$  ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75 ที่มีรูปแบบการทดลอง Tension mode ความถี่ที่ทำการทดสอบ 10 Hz โดยมีช่วงอุณหภูมิระหว่าง -80 ถึง 40 °C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 °C/min แสดงดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ค่าปัจจัยการสูญเสีย (Loss factor,  $\tan \delta$ ) ของยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr แปรอัตราส่วนยางผสม 75/25, 50/50 และ 25/75

จากรูปที่ 4.31 แสดงค่าปัจจัยการสูญเสียของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75 ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง  $-80$  ถึง  $40$  °C พบว่ายางผสม CR/NR ที่มีอัตราส่วน 75/25 แสดงค่าปัจจัยการสูญเสีย คือ 0.83 และ 0.11 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ  $-22.1$  °C และ  $-44.6$  °C ตามลำดับ สำหรับยางผสม CR/NR อัตราส่วน 50/50 แสดงปัจจัยการสูญเสีย 2 ค่า คือ 0.78 และ 0.29 ซึ่งมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ  $-26.8$  และ  $-44.5$  °C ตามลำดับ ส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วน 25/75 แสดงปัจจัยการสูญเสีย 2 ค่า คือ 0.65 และ 0.53 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ  $-26.8$  °C และ  $-44.1$  °C ตามลำดับ

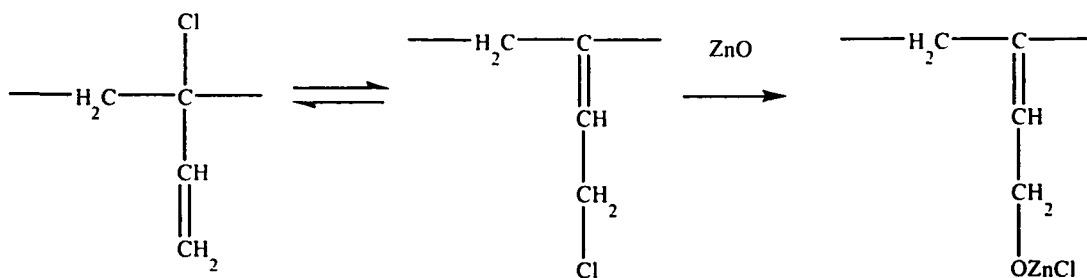
เมื่อเปรียบเทียบค่าปัจจัยการสูญเสียและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางผสม พบว่ายางผสม CR/NR จัดเป็นยางผสมที่ไม่สามารถเข้ากันในระดับโมเลกุล เนื่องจากแสดงค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางผสม 2 ค่า เพราะยางแต่ละชนิดจะมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเป็นลักษณะเฉพาะตัวโดยปกติยางคลอโรพรีนมีอุณหภูมิ  $T_g$  ประมาณ  $-50$  °C และยางธรรมชาติมีอุณหภูมิ  $T_g$  ประมาณ  $-73$  °C [9] จากการทดลองพบว่ายางคลอโรพรีนอุณหภูมิ  $T_g$  ประมาณ  $-26$  ถึง  $-22$  °C และยางธรรมชาติมีอุณหภูมิ  $T_g$  ประมาณ  $-45$  ถึง  $-41$  °C ทั้งนี้เนื่องจากหลายปัจจัย เช่น สารตัวเติม สารเชื่อมโยงที่ส่งผลให้อุณหภูมิ  $T_g$  ของยางผสมเพิ่มขึ้น สำหรับยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 แสดงอุณหภูมิ  $T_g$  ของยางธรรมชาติไม่เด่นชัดเพราะอัตราส่วนยางธรรมชาติในยางผสมมีปริมาณน้อยทำให้ปัจจัยการสูญเสียมีค่าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

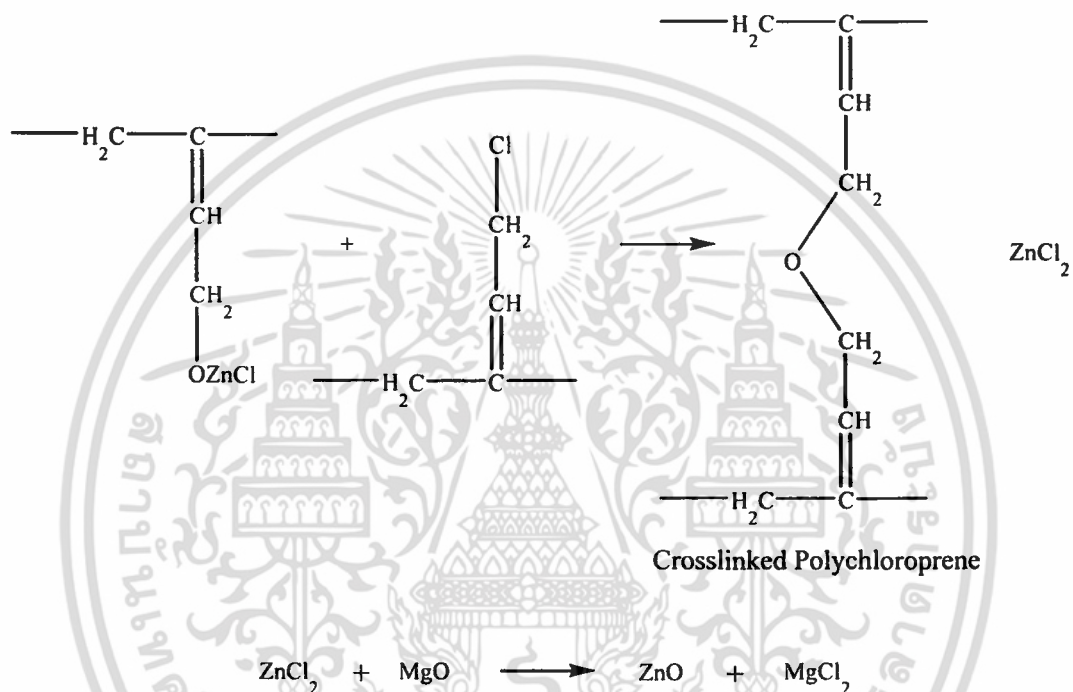
เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง ความต้านทานต่อโอโซน พบว่ายางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 มีความเป็นไปได้ที่นำมาผลิตแผ่นยางรองรางรถไฟมากที่สุด เนื่องจากสมบัติต่างๆ สูงกว่ามาตรฐาน ยกเว้น ร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่และร้อยละมอดูลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ในขั้นตอนต่อไปเป็นการปรับปรุงสมบัติของยางผสมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อให้ยางทนทานต่อการเสื่อมสภาพซึ่งยางทั้งสองชนิดมีระบบเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเลือกศึกษาสารเชื่อมโยงที่มีผลต่อการเชื่อมโยง โมเลกุลของยางผสม CR/NR คือ ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์และกำมะถัน

#### 4.3 การศึกษาผลของปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีต่อยางผสม

กลไกการเชื่อมโยงยางคลอโรพรีนด้วยออกไซด์ของโลหะเกิดผ่าน “อัลลิลิก คลอรินอะตอม” (Allylic chlorine atom) เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันตรงตำแหน่ง 1,2 (1,2 - Addition) เมื่อพิจารณารูปที่ 4.32 เห็นได้ว่าซิงก์ออกไซด์ที่เติมลงไป เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่ตำแหน่ง 1,2 ของยางคลอโรพรีนแล้วปลดปล่อยซิงก์คลอไรด์ออกมาจากปฏิกิริยา ในขณะที่แมกนีเซียมออกไซด์ที่เติมในยางคลอโรพรีนทำหน้าที่เปลี่ยนซิงก์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) เป็นซิงก์ออกไซด์ ( $ZnO$ ) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้ใหม่ [36]



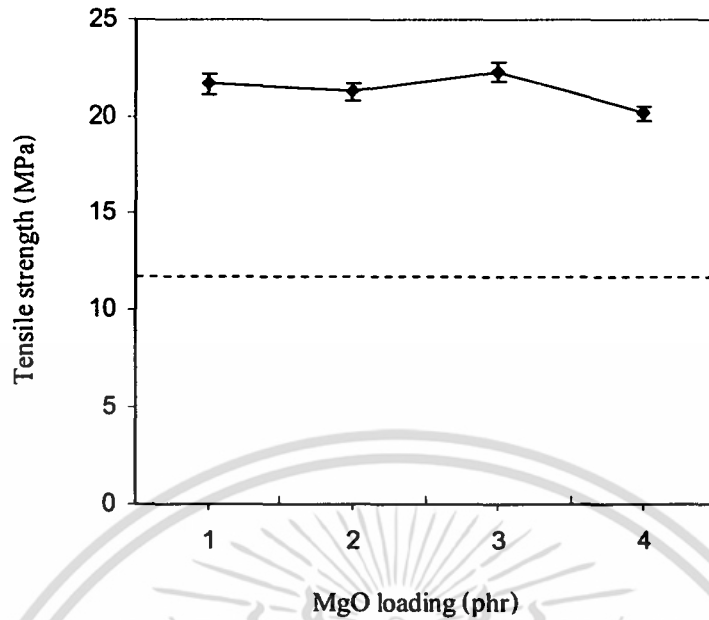
Vinyl 1,2 Polychloroprene



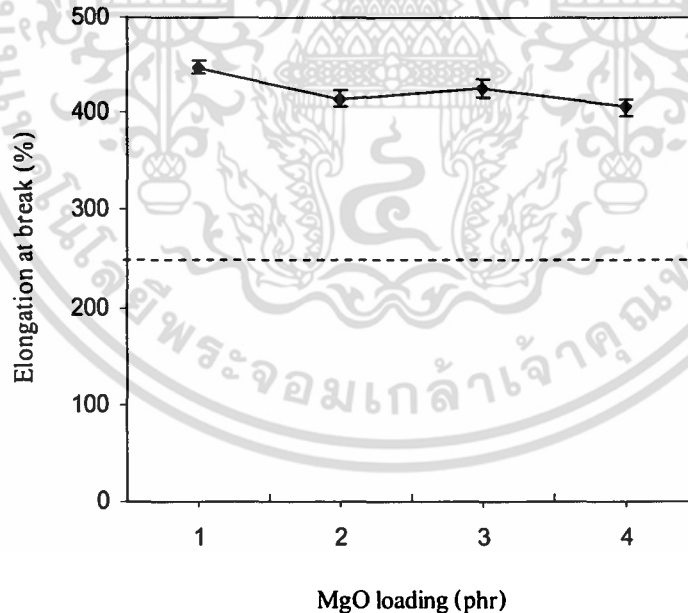
รูปที่ 4.32 กลไกการเชื่อมโยงยางคลอโรพรีนด้วยซิงก์ออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ [36]

#### 4.3.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงของยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ต่างกัน

จากการทดสอบผลของปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (1 - 4 phr) ต่อสมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr และกำมะถัน 2.5 phr แสดงผลดังรูปที่ 4.33 - 4.36

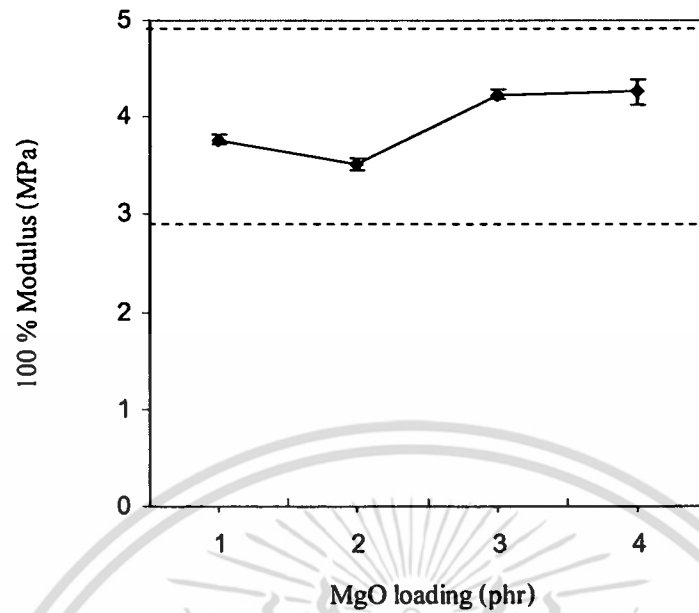


รูปที่ 4.33 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์  
เส้นประ(----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

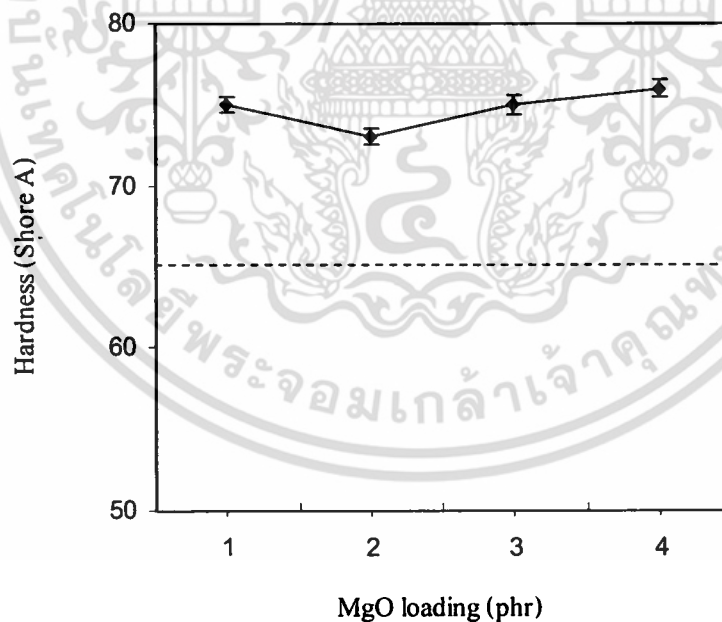


รูปที่ 4.34 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยาง CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์  
เส้นประ(----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 ค่ามอดูลัสที่ 100 % ของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดและสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

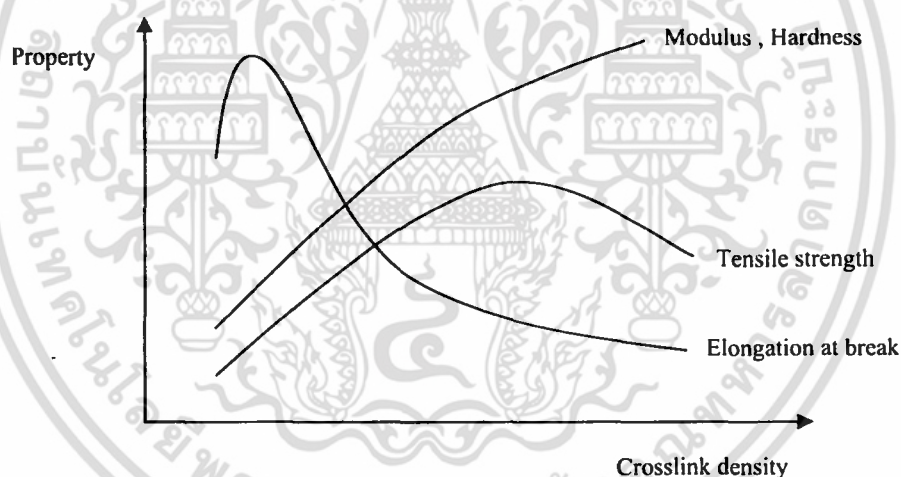


รูปที่ 4.36 ค่าความแข็งกดของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.33 และ 4.34 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาด แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (1 - 4 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มแมกนีเซียมออกไซด์ ความแข็งแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มแมกนีเซียมออกไซด์ในยางผสมทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงสูง เกิดจุดเชื่อมโยงกลายเป็นสายโซ่กิ่งมากขึ้นซึ่งสายโซ่หลุดออกจากกันยากเมื่อได้รับแรงทำให้การยืดตัวของยางผสมลดลง อย่างไรก็ตามค่าสมบัติแรงดึงของยางผสมก่อนบ่มแรงถือว่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

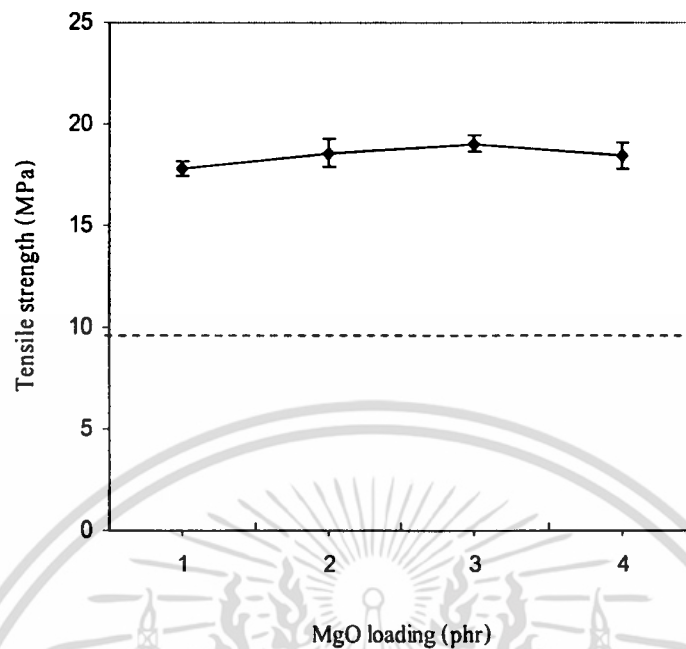
จากรูปที่ 4.35 และ 4.36 แสดงค่ามอดูลัสที่ 100 % และความแข็งกด แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (1 - 4 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ ค่ามอดูลัสและความแข็งกดยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางผสมถูกยึดด้วยพันธะเชื่อมโยงที่แน่นขึ้นทำให้เกิดการเคลื่อนไหวได้อย่างจำกัดเพราะเกิดโครงสร้างร่างแหที่แน่น (Tight network) เป็นผลให้ค่ามอดูลัสและความแข็งกดยังคงเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.37 อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและมาตรฐานของ ร.ฟ.ท. แสดงดังตารางที่ 1.1 พบว่าสมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 1 - 4 phr ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน



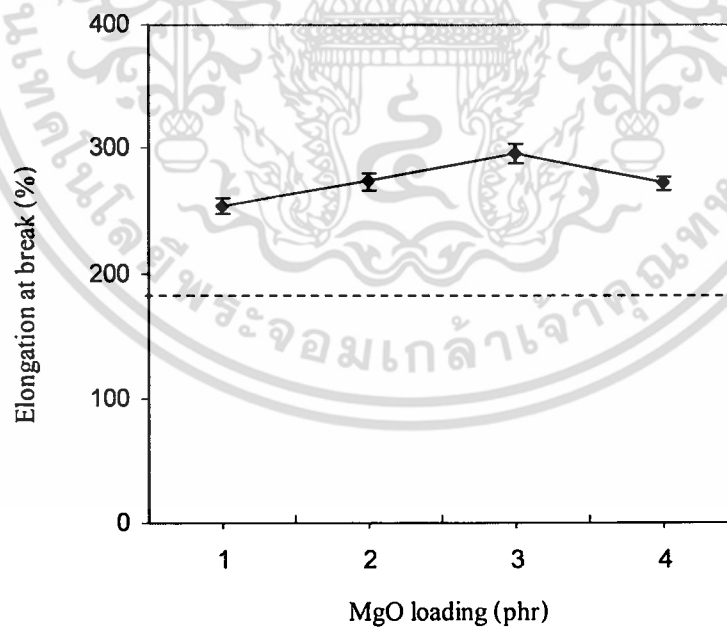
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยงกับสมบัติบางประการของยาง [13]

#### 4.3.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ต่างกัน

จากการทดสอบผลของปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (1 - 4 phr) ต่อสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr กำมะถัน 2.5 phr อุณหภูมิทดสอบ 100 °C นาน 96 ชั่วโมง แสดงผลดังรูปที่ 4.38 - 4.44

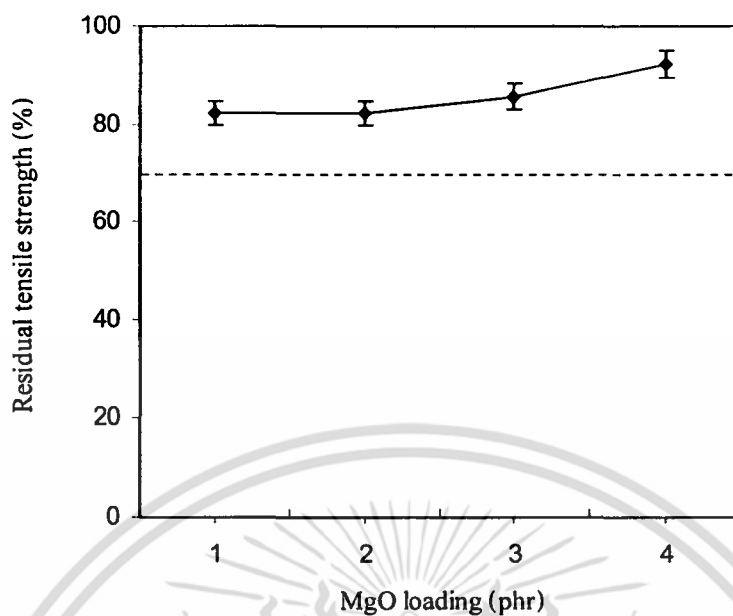


รูปที่ 4.38 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

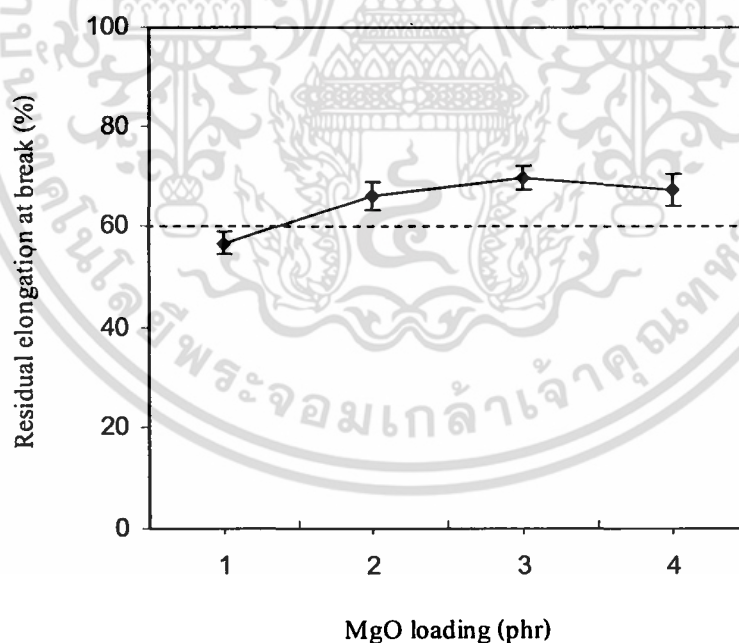


รูปที่ 4.39 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

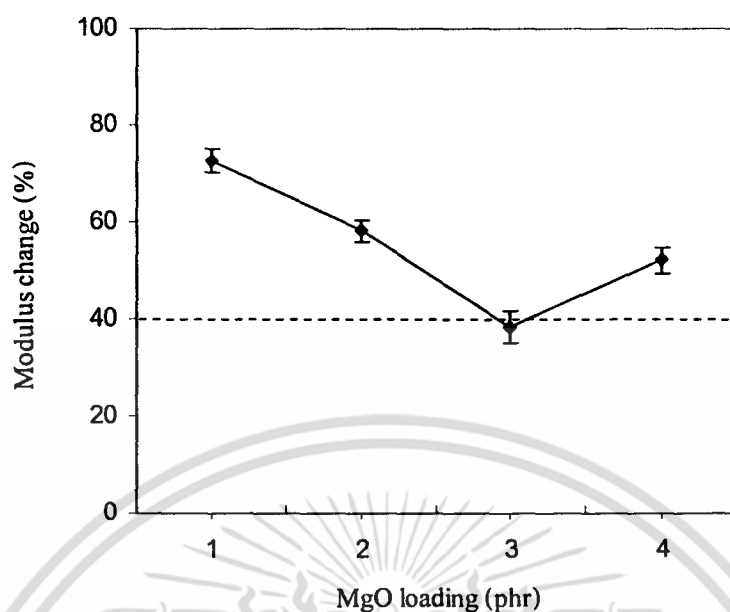


รูปที่ 4.40 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

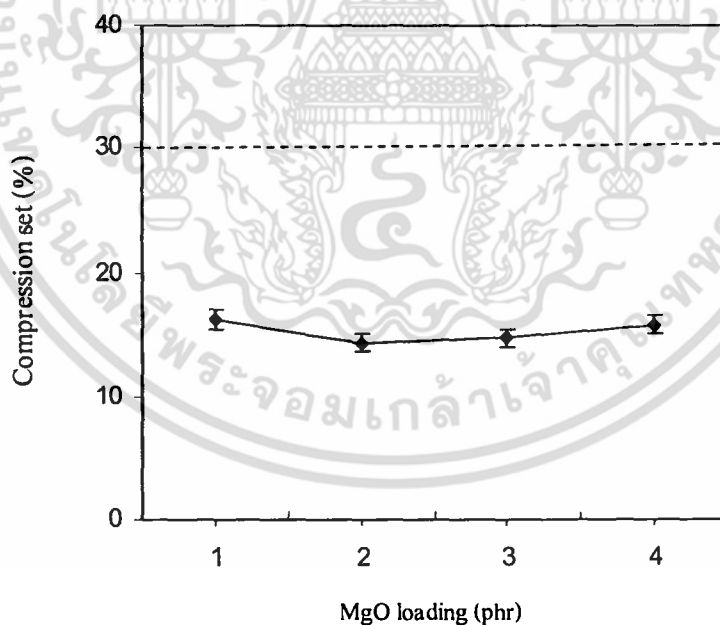


รูปที่ 4.41 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

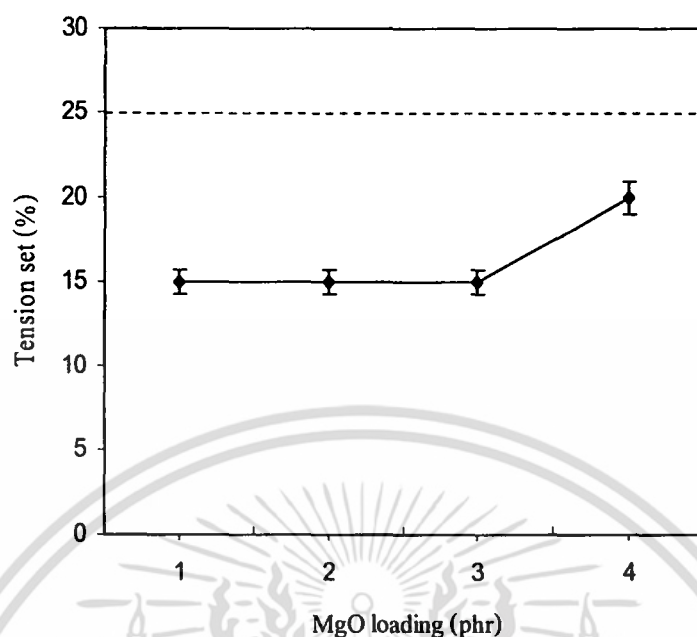


รูปที่ 4.42 ค่าร้อยละมอดุลัส 100% ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ เส้นประ (----) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.



รูปที่ 4.43 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ เส้นประ (----) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 ค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางผสม CR/NR 75/25 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ เส้นประ (---) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.พ.ท.

จากรูปที่ 4.38 และ 4.39 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่ง แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (1 - 4 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ ความแข็งแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ในยางผสม CR/NR ทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางผสมสูงขึ้นและมีหน้าที่ในการจับกรดไฮโดรคลอริกที่เกิดจากปฏิกิริยาเชื่อมโยงซึ่งช่วยในการป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง ทำให้ทนทานต่อความร้อนและมีความสามารถในการรักษาสมบัติแรงดึงหลังจากบ่มเร่งที่ดี สอดคล้องกับค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่และร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.40 และ 4.41 ส่วนค่าร้อยละมอดูลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.42 เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์ทำหน้าที่เปลี่ยนซิงค์คลอไรด์เป็นซิงค์ออกไซด์เพื่อที่จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับยางคลอโรพรีนได้ใหม่ [36] ทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากความร้อนได้ดีส่งผลให้ค่ามอดูลัสที่ 100 % มีแนวโน้มลดลง

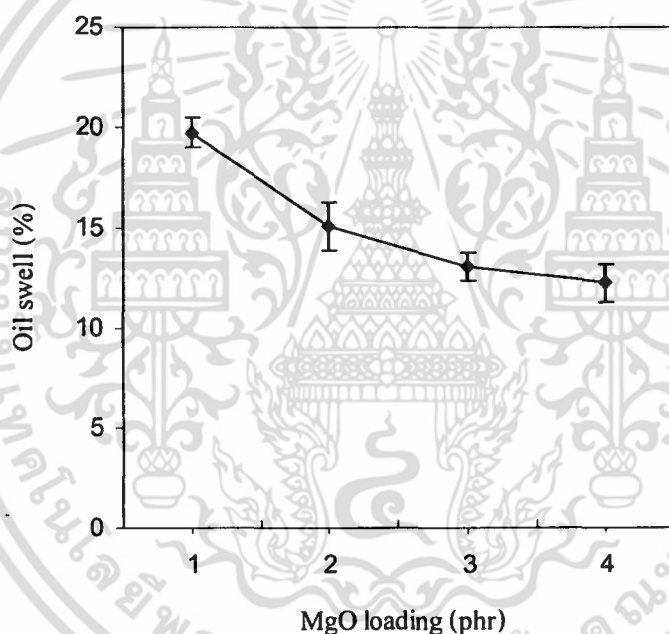
จากรูปที่ 4.43 และ 4.44 แสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดและการยืดตัวเนื่องจากแรงดึง แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (1 - 4 phr) พบว่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่า

การขีดตัวเนื่องจากแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อมีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 1 - 3 phr อย่างไรก็ตาม การขีดตัวเนื่องจากแรงดึงมีค่าสูงสุดที่แมกนีเซียมออกไซด์ 4 phr

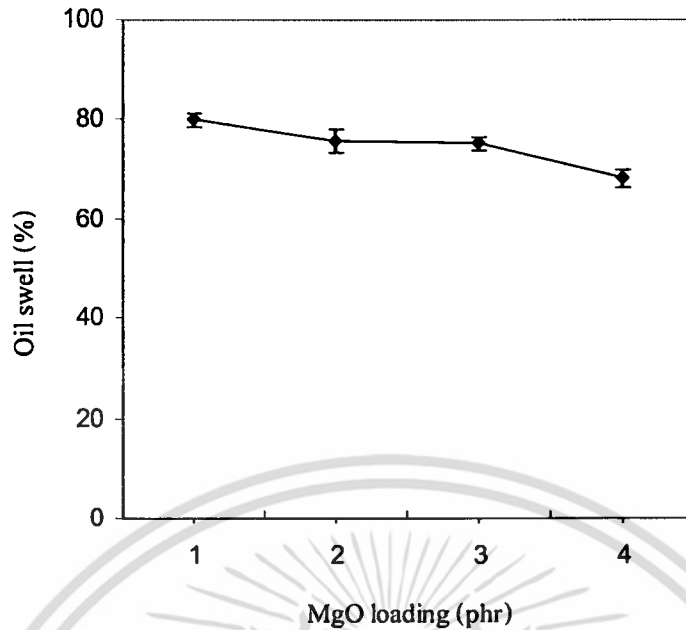
#### 4.3.3 ความทนทานต่อน้ำมันของยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ต่างกัน

การใช้งานสำหรับยางรองรางรถไฟในบางครั้งจะต้องสัมผัสกับน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องจักรซึ่งระหว่างที่สัมผัสน้ำมันยางจะดูดซึมของเหลวเกิดการบวมตัวในน้ำมัน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทดสอบความทนทานน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM D 2000 โดยแช่ชิ้นทดสอบในน้ำมันที่มีอุณหภูมิและเวลาตามมาตรฐานที่ใช้สำหรับยางคลอโรพรีน [38]

จากการทดสอบผลของปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (1 - 4 phr) ที่มีความทนทานต่อน้ำมันชนิด ASTM No.1 และ ASTM No.3 ทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 70 ชั่วโมงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr และกำมะถัน 2.5 phr แสดงดังรูปที่ 4.45 - 4.46



รูปที่ 4.45 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR 75/25 ในน้ำมัน ASTM No. 1 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์



รูปที่ 4.46 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR 75/25 ในน้ำมัน ASTM No. 3 แปรปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์

จากรูปที่ 4.45 และ 4.46 แสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR ในน้ำมันชนิด ASTM No.1 และ ASTM No.3 เมื่อปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้น พบว่าค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR ในน้ำมันชนิด ASTM No.1 และ ASTM No.3 มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ ทำให้องศาการเชื่อมโยงหรือความหนาแน่นเชื่อมโยงในวัฏภาคยางผสมสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อแช่ชิ้นทดสอบในน้ำมันทั้งสองชนิดทำให้ค่าร้อยละการบวมตัวในน้ำมันมีแนวโน้มลดลงซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการหาความหนาแน่นเชื่อมโยง ( $\rho_c$ ) จากสมการของฟลอรี-ไรเนอร์ (Flory- Rehner equation) แสดงได้ดังสมการที่ 4.2 [36]

$$\rho_c = \frac{1}{2V_s} \left[ \frac{(\ln(1-V_r) + V_r + \chi_1 V_r^2)}{V_r^{1/3} - V_r/2} \right] \quad (4.2)$$

เมื่อ  $\rho_c$  คือ ความหนาแน่นเชื่อมโยงยาง ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )

$V_s$  คือ ปริมาณโมลาร์ของตัวทำละลาย ( $\text{cm}^3/\text{mol}$ )

$V_r$  คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของยางในเจลที่บวมตัว (Swollen gel)

$\chi_1$  คือ ตัวแปรอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลาย

สำหรับขั้นตอนนี้ได้ศึกษาปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีต่อสมบัติของยางผสม เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งแล้ว ปรากฏว่ายางผสม CR/NR ที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 2-4 phr มีสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งใกล้เคียงกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พยายามลดต้นทุนการผลิตเนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีราคาแพงและทำให้เวลาการเชื่อมโยงสูงขึ้น จากการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 2 phr พบว่ามีสมบัติต่างๆ โดยรวมอยู่ในเกณฑ์ดี นอกจากแมกนีเซียมออกไซด์แล้วกำมะถันก็มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพทำให้การเชื่อมโยงวัลภาคของยางผสม ดังนั้นผู้วิจัยได้ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถันเป็นขั้นตอนต่อไป

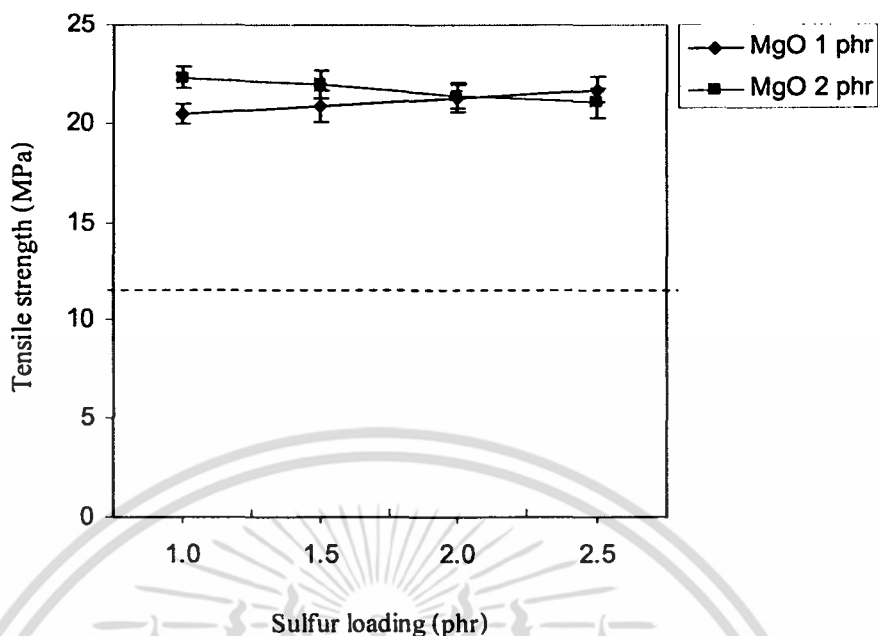
#### 4.4 การศึกษาผลของปริมาณกำมะถันที่มีต่อยางผสม

โดยทั่วไปยางธรรมชาตินิยมใช้การเชื่อมโยงด้วยระบบปกติ (Conventional vulcanization, CV) พันธะส่วนใหญ่จะเกิดการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic linkage) ซึ่งเสื่อมสภาพได้ง่ายด้วยความร้อนทำให้ผลิตภัณฑ์ยางไม่สามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลาสั้น การปรับปรุงสมบัติของยางให้มีเสถียรต่อความร้อนและทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดีขึ้น โดยการเปลี่ยนระบบเชื่อมโยงยางแบบมีประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization, EV) ซึ่งพันธะส่วนใหญ่เกิดแบบโมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic linkage) ทำให้สมบัติของยางธรรมชาติที่เชื่อมโยงด้วยพันธะชนิดนี้ดีขึ้น เช่น เปลี่ยนรูปร่างถาวรต่ำและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิก สำหรับในระบบเชื่อมโยงแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficient vulcanization, Semi-EV) มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงที่ใกล้เคียงกันระหว่างโมโนซัลฟิดิกและพอลิซัลฟิดิกเป็นการรวมสมบัติที่ดีระหว่างพันธะเชื่อมโยงทั้งสองชนิด [4,36]

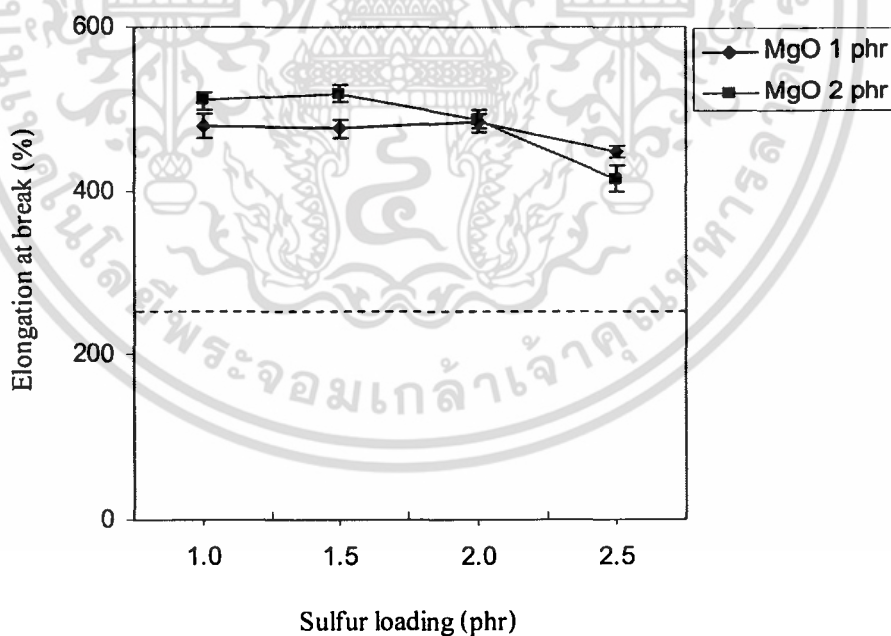
การศึกษาผลของปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) ยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติยางผสม คือ การเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมโยงในวัลภาคของยางธรรมชาติเพราะยางธรรมชาติเสื่อมสลายได้ง่ายด้วยความร้อน ในขั้นตอนนี้ได้ลดปริมาณกำมะถันเพื่อให้การเชื่อมโยงวัลภาคของยางผสมเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

##### 4.4.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งของยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณกำมะถันต่างกัน

จากการทดสอบผลของปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) ต่อสมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แสดงผลดังรูปที่ 4.47 - 4.50

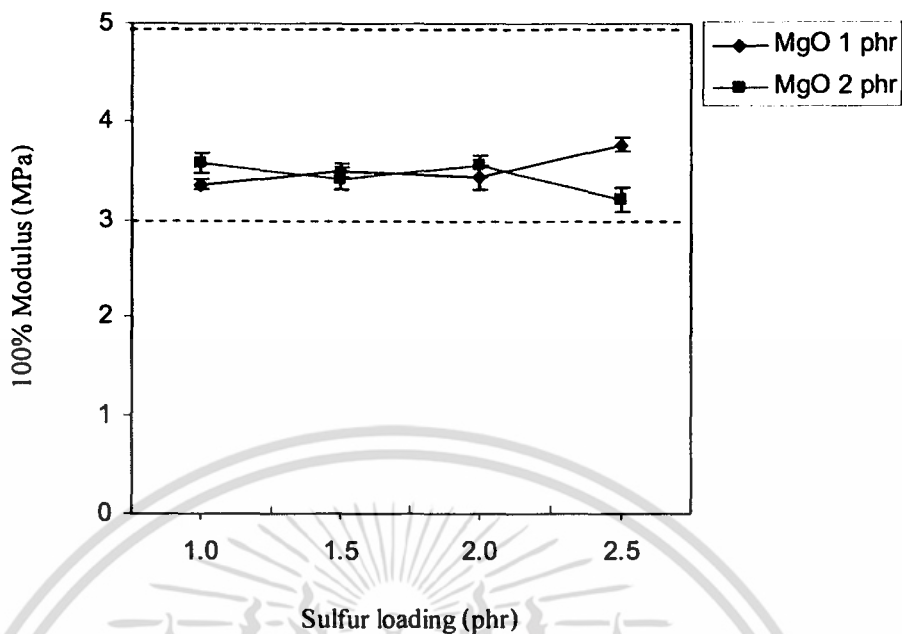


รูปที่ 4.47 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

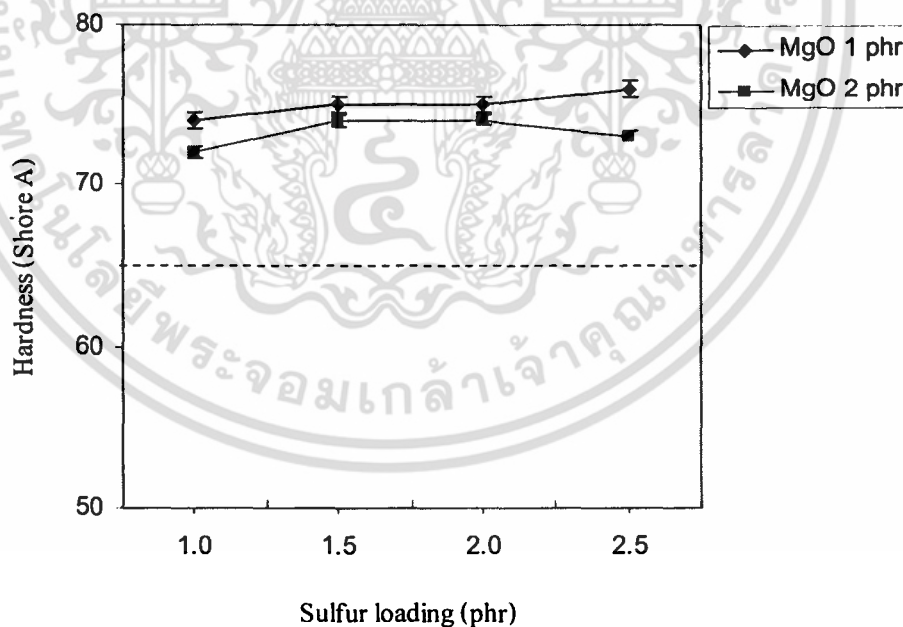


รูปที่ 4.48 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 ค่ามอดูลัสที่ 100 % ของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปร ปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.



รูปที่ 4.50 ค่าความแข็งกดของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปร ปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

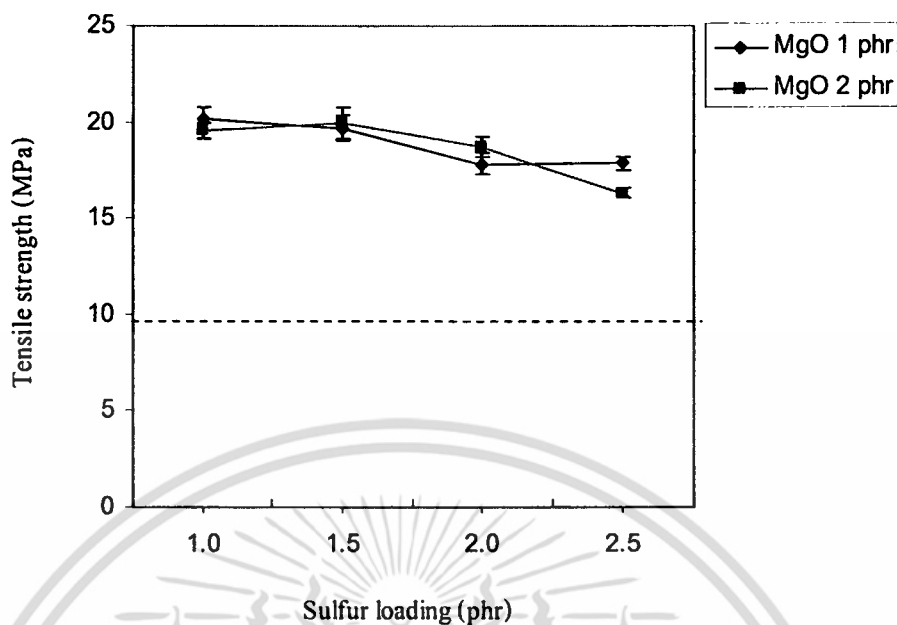
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.47 และ 4.48 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) พบว่ายางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน สำหรับยางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 2 phr ค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน เนื่องจากกำมะถันในยางผสมทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโองสูงเกิดจุดเชื่อมโองกลายเป็นสายโซ่กิ่งมากขึ้นซึ่งสายโซ่หลุดออกจากกันยากเมื่อได้รับแรง ส่งผลให้การยืดตัวของยางลดลงโดยยางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 2 phr ยืดตัวน้อยกว่ายางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr เพราะยางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 2 phr เกิดพันธะเชื่อมโองมากหรือองศาการเชื่อมโองหรือที่สูงกว่า ทำให้การยืดตัวของยางลดลง

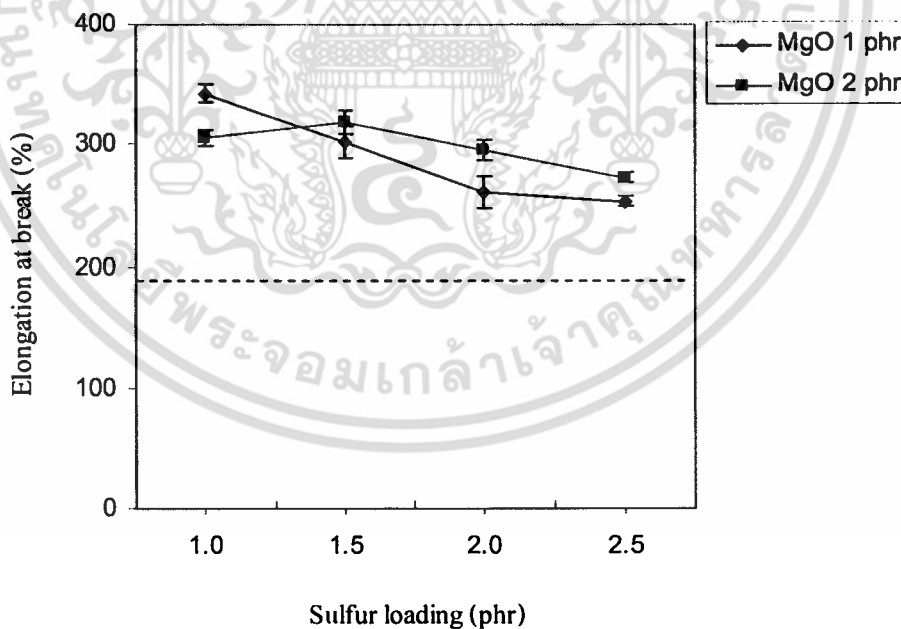
จากรูปที่ 4.49 และ 4.50 แสดงค่ามอดูลัสที่ 100 % และความแข็งกดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน ยางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr ค่ามอดูลัสที่ 100 % และความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับยางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 2 phr ค่ามอดูลัสที่ 100 % และความแข็งกดมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากกำมะถันที่เติมในยางผสมมีปริมาณจุดเชื่อมโองมากขึ้นทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวย่างจำกัด ส่งผลให้ค่ามอดูลัสและความแข็งกดของยางผสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความแข็งกดของยางผสมที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr พบว่ายางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 2 phr ต่ำกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตามถือว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและมาตรฐานของ ร.พ.ท. ดังตารางที่ 1.1 พบว่ายางผสม CR/NR ที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr ทุกปริมาณกำมะถันผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

#### 4.4.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณกำมะถันต่างกัน

จากการทดสอบผลของปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) ต่อสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr อุณหภูมิทดสอบ 100 °C นาน 96 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.51 - 4.57

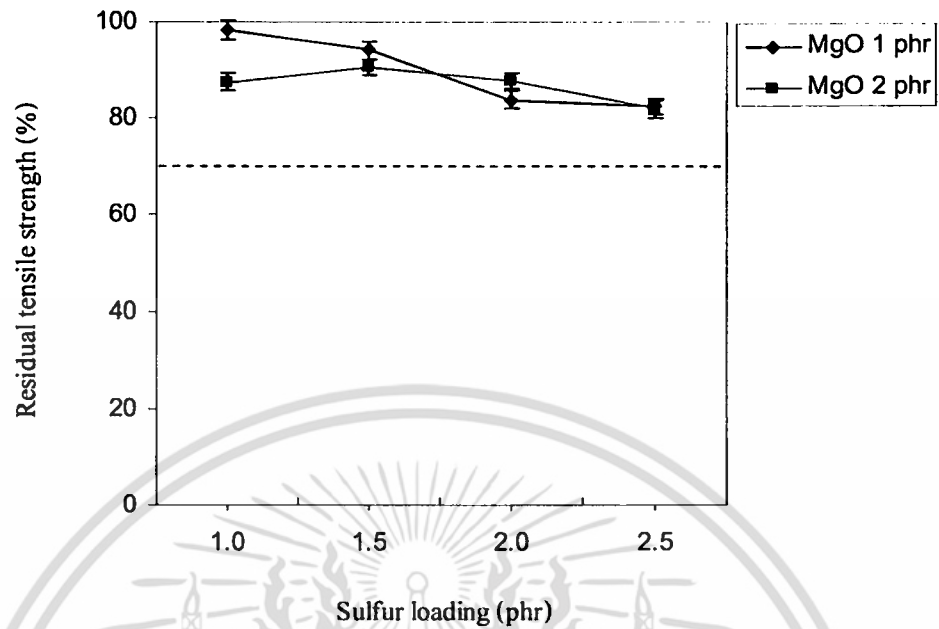


รูปที่ 4.51 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

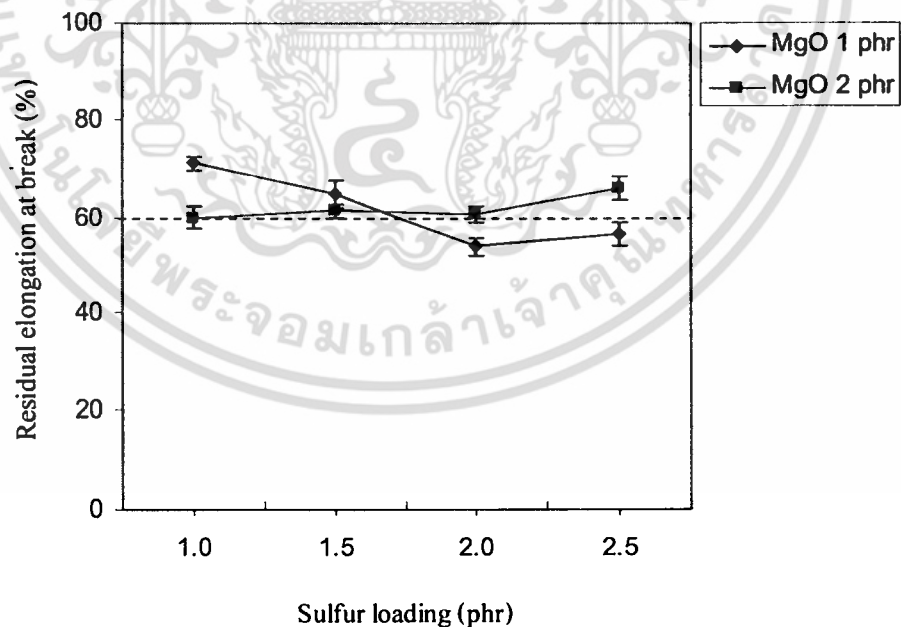


รูปที่ 4.52 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

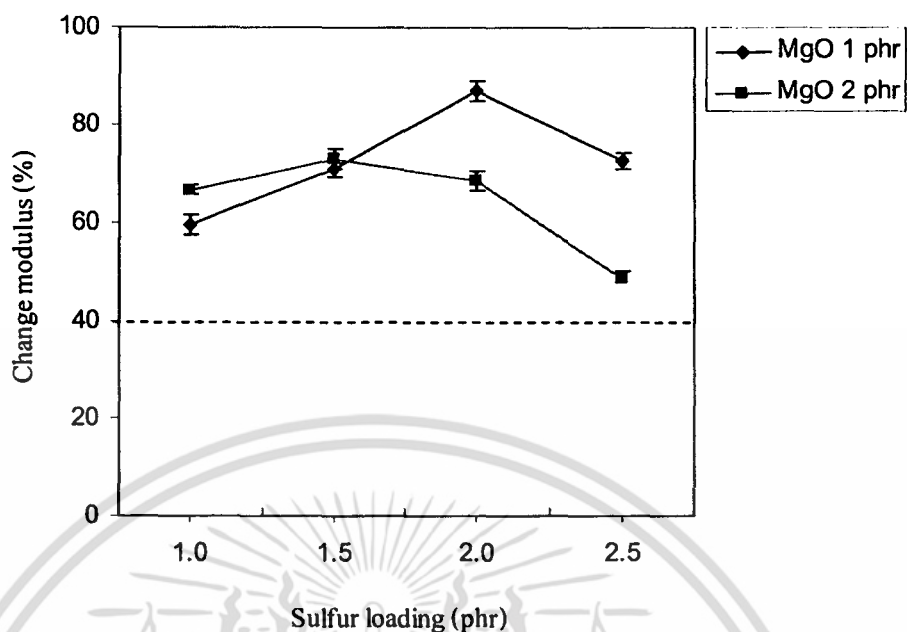


รูปที่ 4.53 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

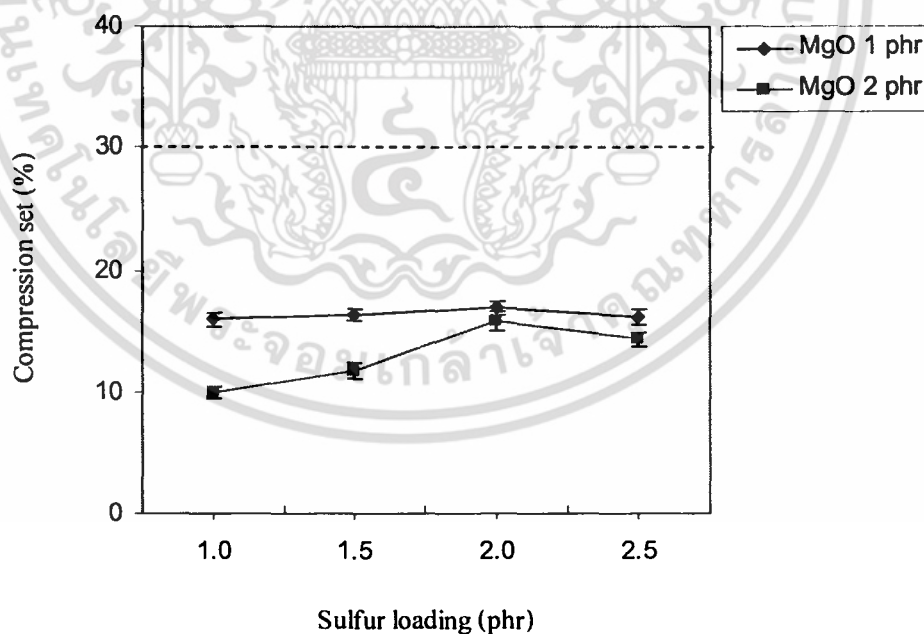


รูปที่ 4.54 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

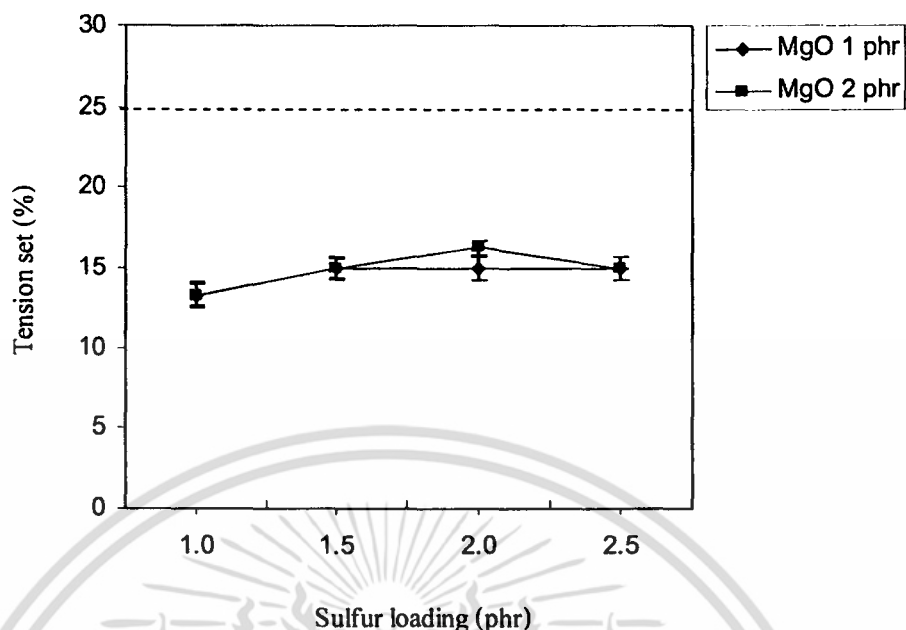


รูปที่ 4.55 ค่าร้อยละมอดุลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.



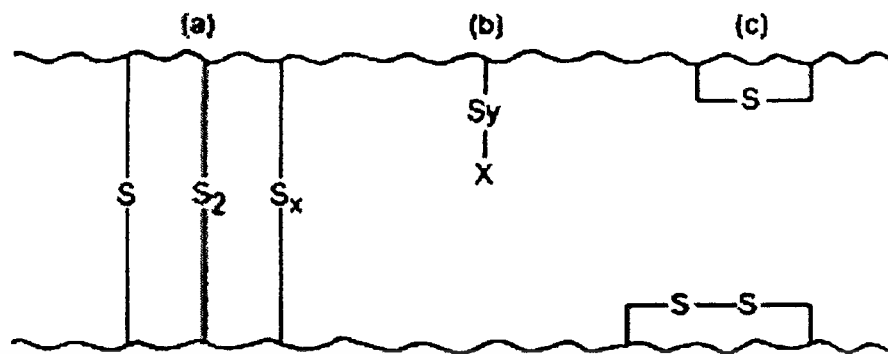
รูปที่ 4.56 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.57 ค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (----) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.พ.ท.

จากรูปที่ 4.51 และ 4.52 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน ค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสม CR/NR ที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยางผสมที่มีปริมาณกำมะถันน้อยเกิดการเชื่อมโยงพันธะส่วนใหญ่แบบโมโนซัลไฟด์หรือกำมะถันอะตอมเดี่ยว โดยเชื่อมโยงด้วยพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับกำมะถัน ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงสูง ( $C-S = 66 \text{ kcal/mol}$ ) จึงต้องใช้พลังงานสลายพันธะสูงกว่ายางผสมที่มีปริมาณกำมะถันสูงเกิดพันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิซัลไฟด์ โดยพันธะเชื่อมโยงระหว่างอะตอมกำมะถัน ( $S-S = 49 \text{ kcal/mol}$ ) เป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง กำมะถันที่เหลือบางส่วนเกิดการเชื่อมโยงที่ไร้ประสิทธิภาพ เช่น โครงสร้างแบบห้อย โครงสร้างแบบวง แสดงดังรูปที่ 4.58 (b) และ (c) ตามลำดับ [4,37] ดังนั้นยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณกำมะถันน้อยจะทนทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีกว่าจากการเปรียบเทียบระหว่างยางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr พบว่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.58 โครงสร้างของยางเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยก้ำมะถัน (a) พันระแบบโมโนซัลฟิดิก ไคซัลฟิดิกและพอลิซัลฟิดิก (b) โครงสร้างแบบห้อย (c) โครงสร้างแบบวง [37]

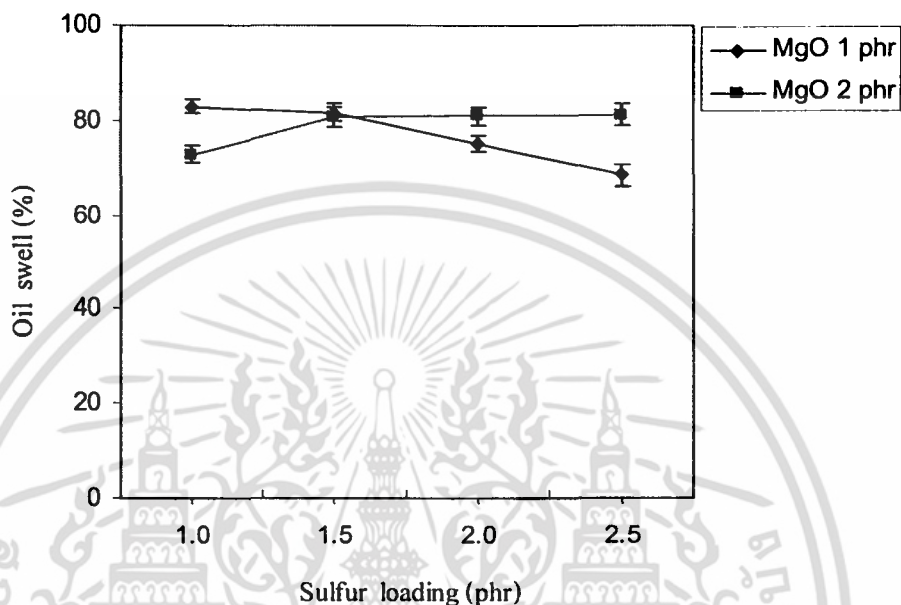
จากรูปที่ 4.53 - 4.54 แสดงค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ ร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ และมอดูลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณก้ำมะถัน (1 - 2.5 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณก้ำมะถัน ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR แมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr มีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าร้อยละมอดูลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงปริมาณก้ำมะถัน 2 phr หลังจากนั้นค่าก็ลดลง

สำหรับยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 2 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณก้ำมะถัน ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ร้อยละมอดูลัส 100 % เปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย จากการเปรียบเทียบระหว่างยางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr พบว่ายางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr ก้ำมะถัน 1 phr มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงน้อยสุด

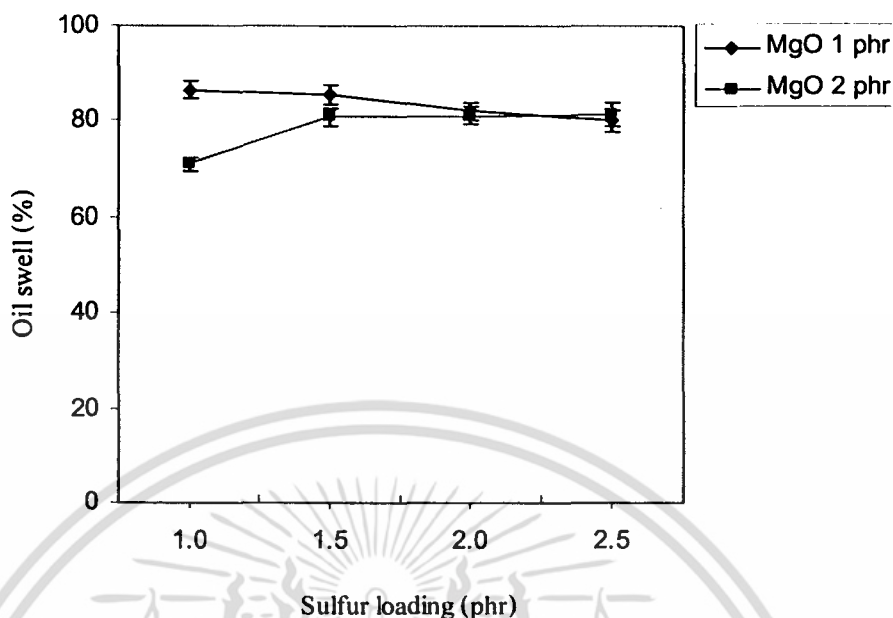
รูปที่ 4.55 และ 4.56 แสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดและยืดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แปรปริมาณก้ำมะถัน (1 - 2.5 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณก้ำมะถันในยางผสม CR/NR แมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr การยุบตัวเนื่องจากแรงกดและการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับยางผสม CR/NR แมกนีเซียมออกไซด์ 2 phr ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดและการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบพบว่า การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 2 phr ต่ำกว่ายางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr เล็กน้อย เนื่องจากยางผสมที่มีปริมาณแมกนีเซียมสูงจึงทนทานต่อการเปลี่ยนรูปเนื่องจากความร้อนได้ดีกว่า

#### 4.4.3 ความทนทานต่อน้ำมันของยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณกำมะถันต่างกัน

จากการทดสอบผลของปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) ที่มีความทนทานต่อน้ำมัน ASTM No.1 และ ASTM No.3 ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C นาน 70 ชั่วโมงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr และแมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr แสดงผลดังรูปที่ 4.59 และ 4.60



รูปที่ 4.59 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr ในน้ำมัน ASTM No.1 แปรปริมาณกำมะถัน



รูปที่ 4.60 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr ใน น้ำมัน ASTM No.3 แปรปริมาณกำมะถัน

จากรูปที่ 4.59 และ 4.60 แสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ใน น้ำมันชนิด ASTM No.1 และ ASTM No.3 แปรปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน ยางผสม CR/NR แมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสมในน้ำมันชนิด ASTM No.1 และ ASTM No.3 มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการเพิ่มปริมาณกำมะถันทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงปริมาณมากและความหนาแน่นเชื่อมโยงของวัสดุยางผสมสูงขึ้น เมื่อแช่ขึ้นทดสอบในน้ำมันทั้งสองชนิดทำให้ร้อยละการบวมตัวในน้ำมันมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการหาความหนาแน่นเชื่อมโยง ( $\rho_c$ ) จากสมการของฟลอรี-โรเนอร์ [36] สำหรับยางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 2 phr ร้อยละการบวมตัวมีค่าใกล้เคียงกัน อาจเกิดจากยางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 2 phr เป็นปริมาณที่มีความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางผสมใกล้เคียงจุดอิ่มตัว ดังนั้นการเพิ่มปริมาณกำมะถันจึงมีผลต่อการบวมตัวของยางเล็กน้อย จากการเปรียบเทียบระหว่างยางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 1 และ 2 phr พบว่ายางผสมที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 2 phr บวมตัวในน้ำมันต่ำกว่า เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีปริมาณมากกว่าทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงในวัสดุยางผสมปริมาณมากกว่า ดังนั้นร้อยละการบวมตัวจึงมีค่าต่ำกว่า

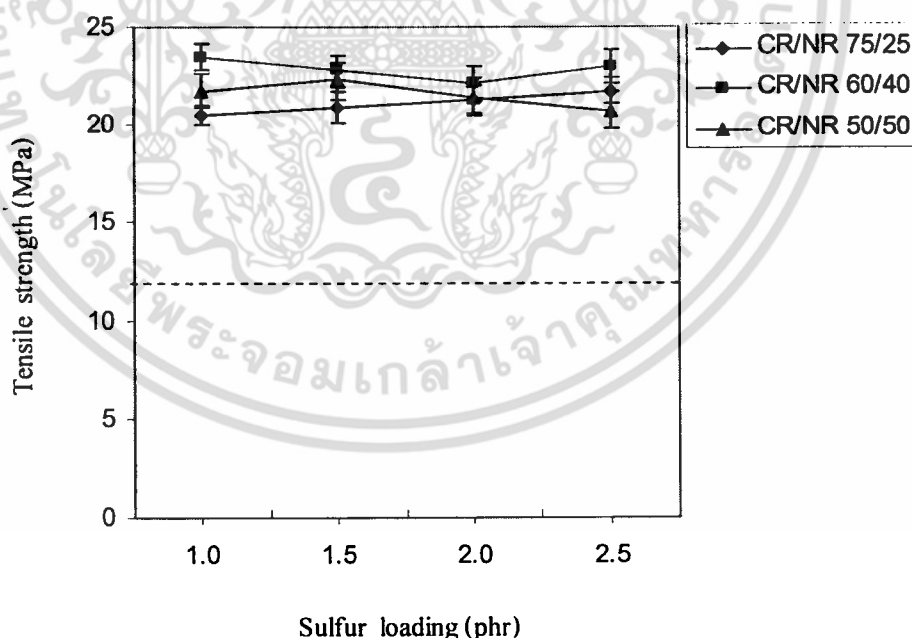
สำหรับขั้นตอนนี้ได้ศึกษาปริมาณกำมะถันที่มีต่อยางผสม CR/NR จากการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มแรง พบว่าสมบัติเชิงกลของยางผสมที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr กำมะถัน 1 phr และผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามตารางที่ 1.1 ยกเว้น ค่าร้อยละมอดูลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลง

#### 4.5 ศึกษาการเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติในยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณกำมะถันต่างกัน

สำหรับขั้นตอนนี้ได้ศึกษาการเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติมากที่สุดในยางผสม CR/NR เพื่อลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติซึ่งจากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของยางผสม พบว่าสามารถเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบยางผสม CR/NR ที่มีอัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr)

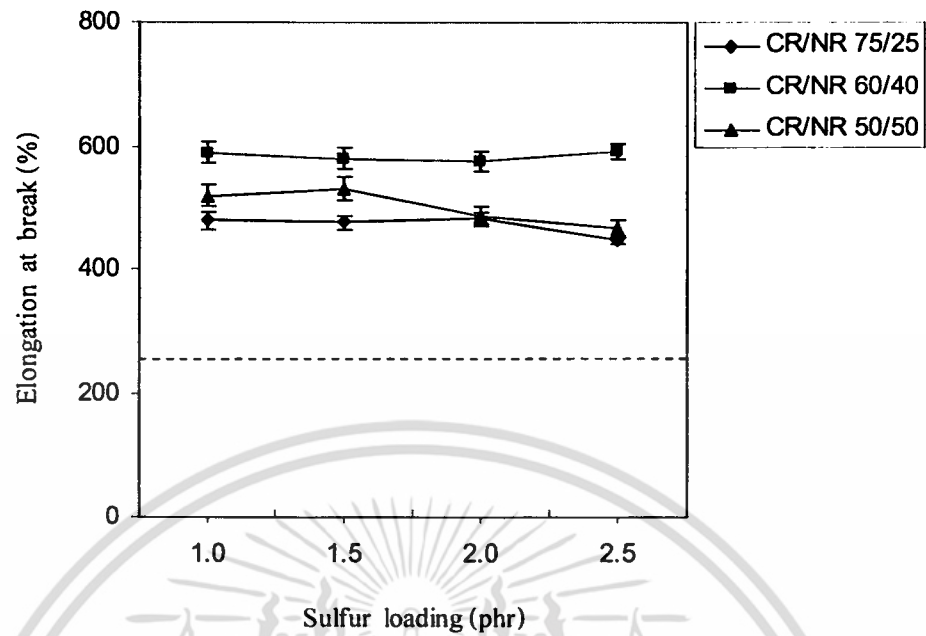
##### 4.5.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงยางผสม CR/NR 75/25, 60/40 และ 50/50 ที่มีปริมาณกำมะถันต่างกัน

จากการทดสอบผลของปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) ต่อสมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr และแมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr แสดงผลดังรูปที่ 4.61 - 4.64

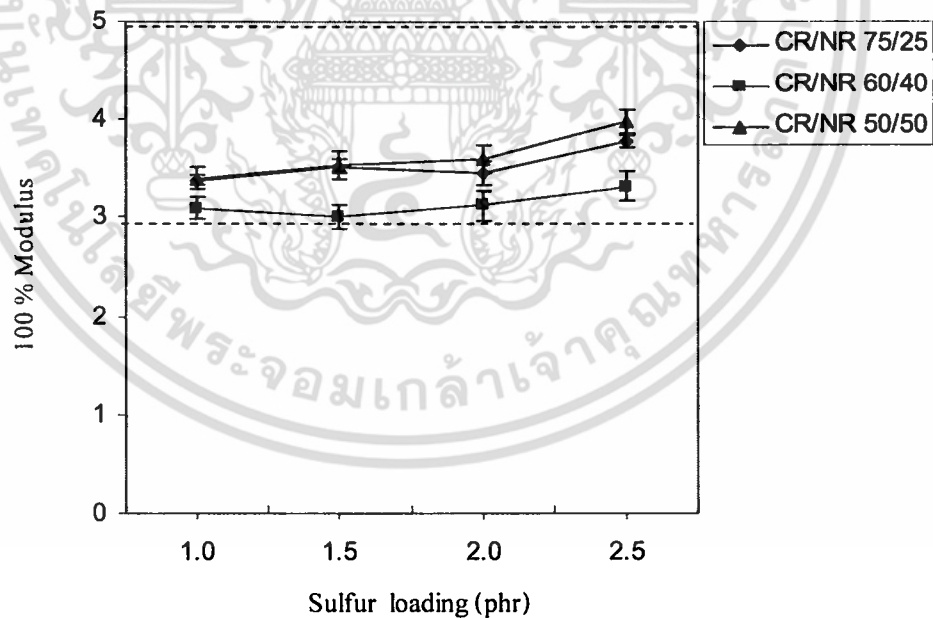


รูปที่ 4.61 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (----) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.พ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

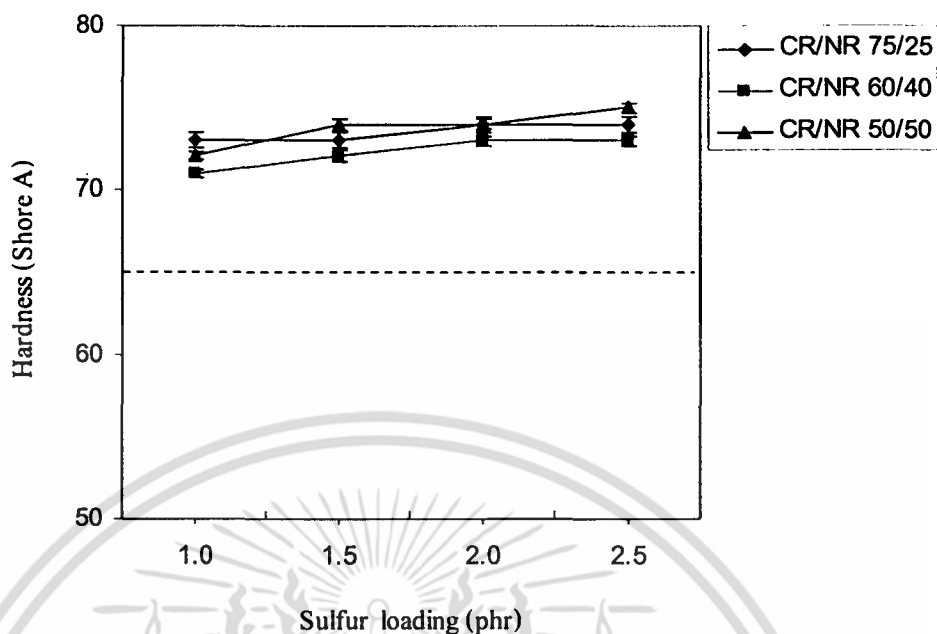


รูปที่ 4.62 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.



รูปที่ 4.63 ค่ามอดุลัสที่ 100 % ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดและสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



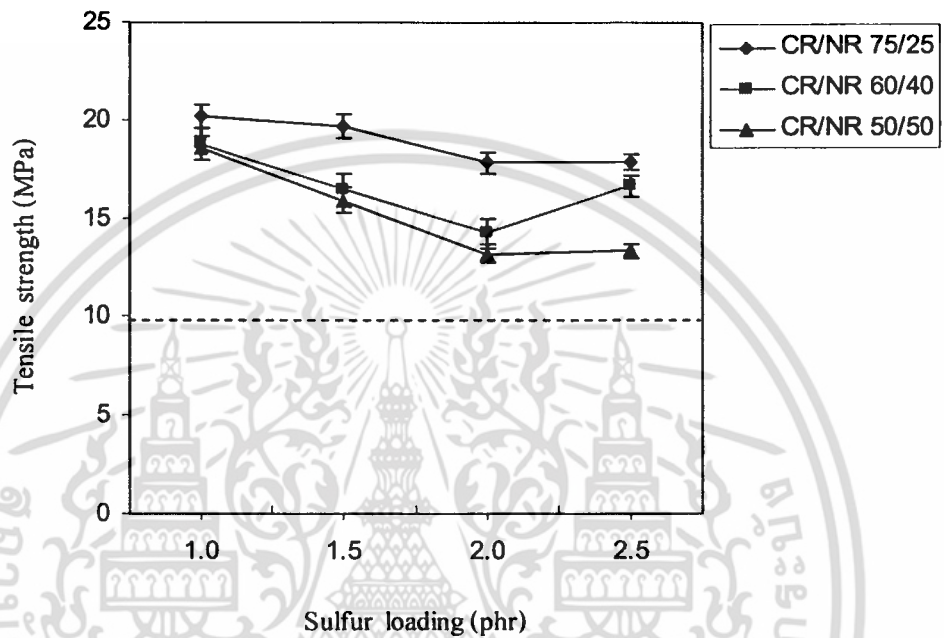
รูปที่ 4.64 ค่าความแข็งกดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

จากรูปที่ 4.61 และ 4.62 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมทั้ง 3 อัตราส่วนมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่วนร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสมที่อัตราส่วน 75/25 และ 60/40 มีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ยางผสมอัตราส่วน 50/50 มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มกำมะถันทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงในวัฏภาคยางผสมสูงขึ้น อาจถือได้ว่าสมบัติแรงดึงของยางผสมก่อนบ่มเร่งไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน

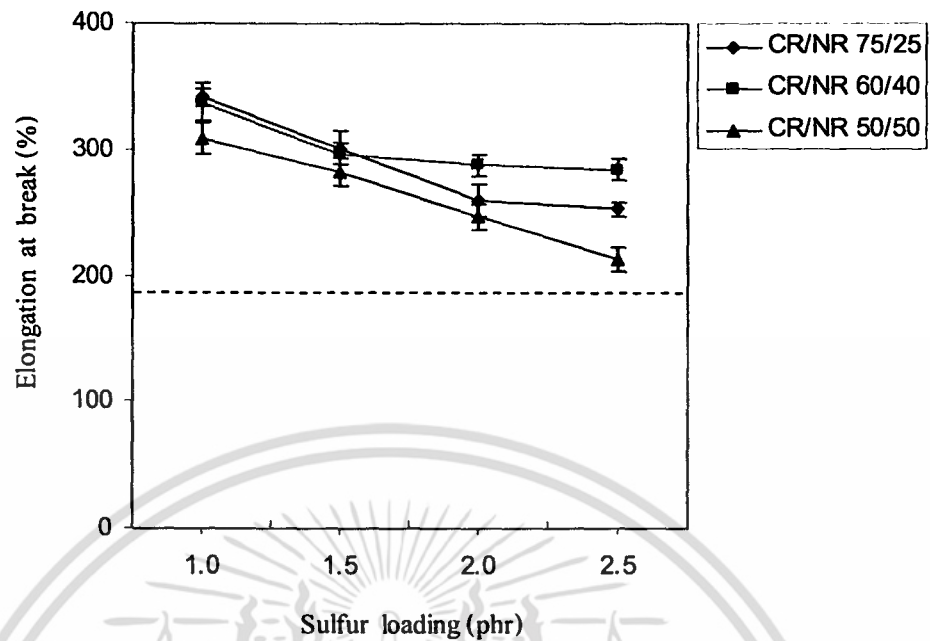
จากรูปที่ 4.63 และ 4.64 แสดงค่ามอดูลัสที่ 100 % และความแข็งกดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันค่ามอดูลัสที่ 100 % และความแข็งกดของยางผสม CR/NR ของยางผสมทั้ง 3 อัตราส่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มกำมะถันทำให้องศาการเชื่อมโยงของวัฏภาคยางผสมสูงส่งผลให้การเคลื่อนไหวยของสายโซ่โมเลกุลยางลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและมาตรฐาน ร.ฟ.ท. ดังตารางที่ 1.1 พบว่าสมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งของยางผสมทั้ง 3 อัตราส่วนผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกปริมาณกำมะถัน

#### 4.5.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งอย่างผสม CR/NR 75/25, 60/40 และ 50/50 ที่มีปริมาณกำมะถันต่างกัน

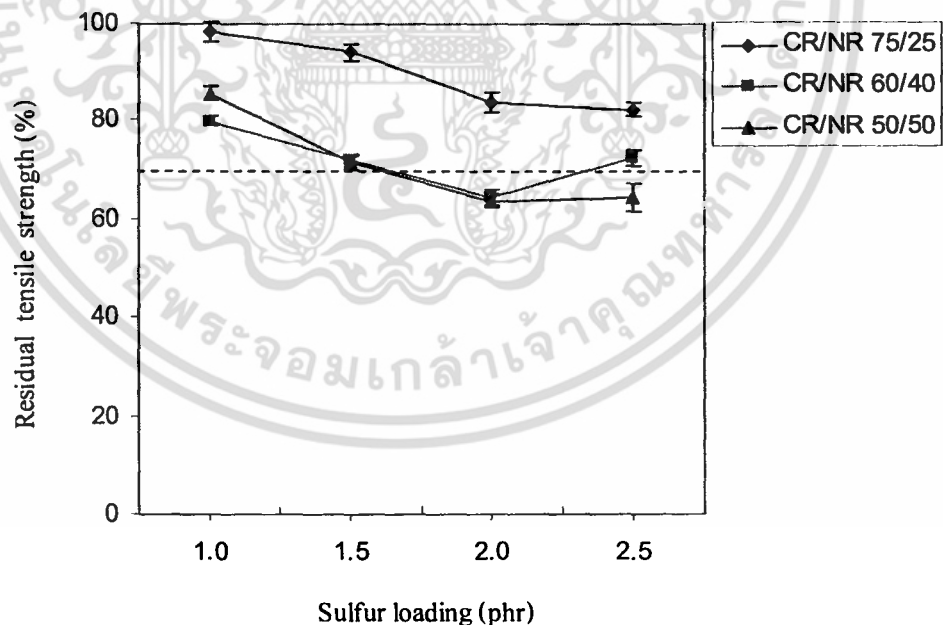
จากการทดสอบผลของปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) ต่อสมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr และแมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr แสดงผลดังรูปที่ 4.65 - 4.71



รูปที่ 4.65 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

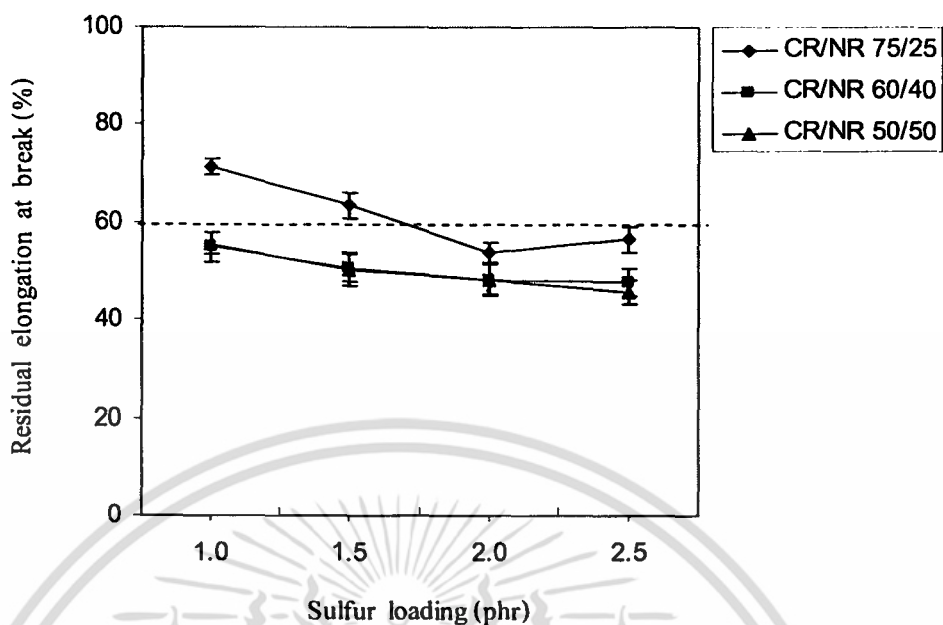


รูปที่ 4.66 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

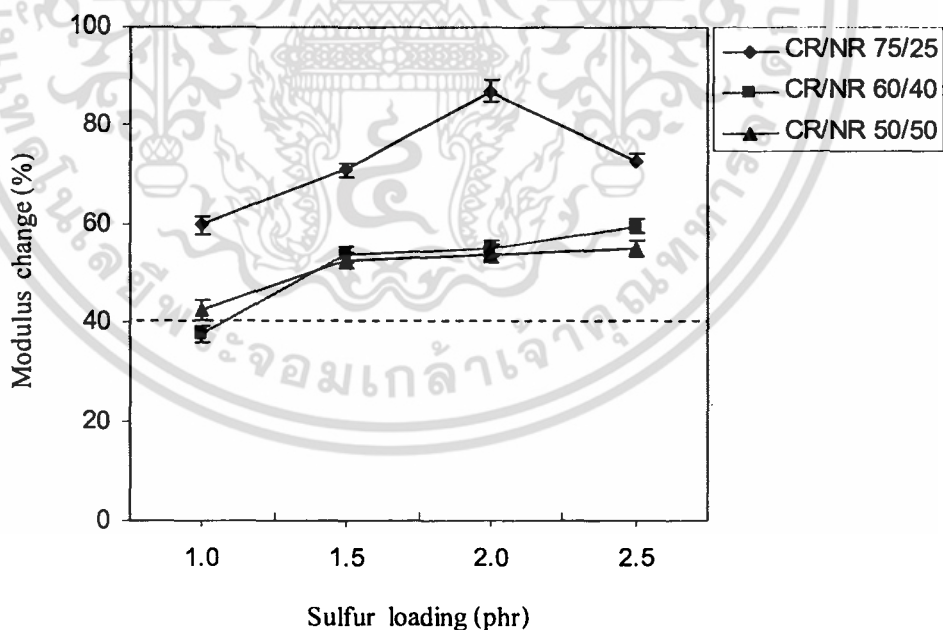


รูปที่ 4.67 ค่าร้อยละความแข็งแรงคงที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

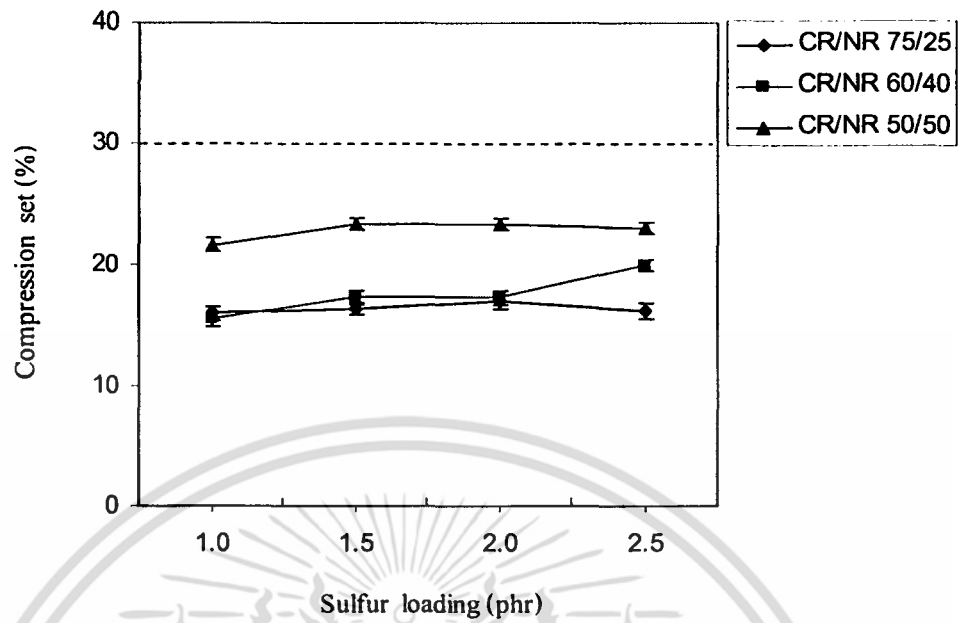


รูปที่ 4.68 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

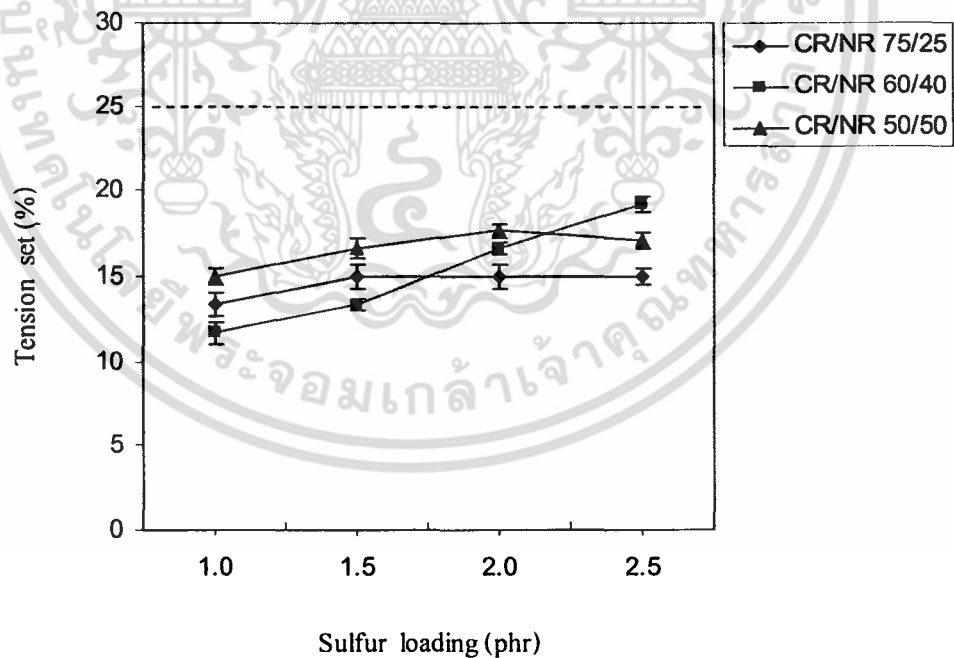


รูปที่ 4.69 ค่ามอดูลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.70 ค่าการขยุตัวเนื่องจากแรงกดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.



รูปที่ 4.71 ค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน เส้นประ (---) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ ร.ฟ.ท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.65 และ 4.66 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน ค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งของยางผสมทั้ง 3 อัตราส่วนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยางผสมที่มีปริมาณกำมะถันน้อยเกิดพันธะแบบโมโนซัลฟิดิกเชื่อมโยงด้วยพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนกับกำมะถัน (C-S bonds) ซึ่งมีความแข็งแรงต้องใช้พลังงานสลายพันธะสูงกว่ายางผสมที่มีปริมาณกำมะถันมาก เกิดพันธะแบบพอลิซัลฟิดิกเชื่อมโยงด้วยพันธะระหว่างกำมะถันกับกำมะถัน (S-S bonds) [4] เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 พบว่ายางผสมที่มีอัตราส่วน 75/25 มีค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มเร่งสูงสุด ในขณะที่ร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 อัตราส่วน

จากรูปที่ 4.67 - 4.69 แสดงค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ ร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ และร้อยละมอดูลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน ค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่มีแนวโน้มลดลง ขณะที่ค่าร้อยละมอดูลัส 100 % เปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกจะเสื่อมสลายได้ง่ายด้วยความร้อน ส่งผลให้ค่าสมบัติแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงหลังบ่มเร่งมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 พบว่าค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่และร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ของยางผสมที่มีอัตราส่วน 75/25 มีค่าสูงสุดเนื่องจากยางคลอโรพรีนเป็นยางชนิดที่ทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ทำให้ยางผสมที่มีอัตราส่วนยางคลอโรพรีนปริมาณมากสามารถรักษาสมบัติแรงดึงเนื่องจากความร้อนได้ดี ส่วนค่าร้อยละมอดูลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลงมีค่าสูงกว่า เกิดเนื่องจากยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 แสดงผลคล้ายกับยางคลอโรพรีนเพราะยางชนิดนี้มีองศาการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น (Marching modulus) เมื่อบ่มเร่ง ส่วนค่ามอดูลัสของยางธรรมชาติลดลงเมื่อบ่มเร่ง เนื่องจากเกิดการเสื่อมสลายแบบเกิดการขาดของสายโซ่หรือปฏิกิริยาย้อนกลับ (Reversion) ดังนั้นยางผสม CR/NR ที่มีอัตราส่วนยางธรรมชาติปริมาณมากทำให้ค่ามอดูลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มลดลง

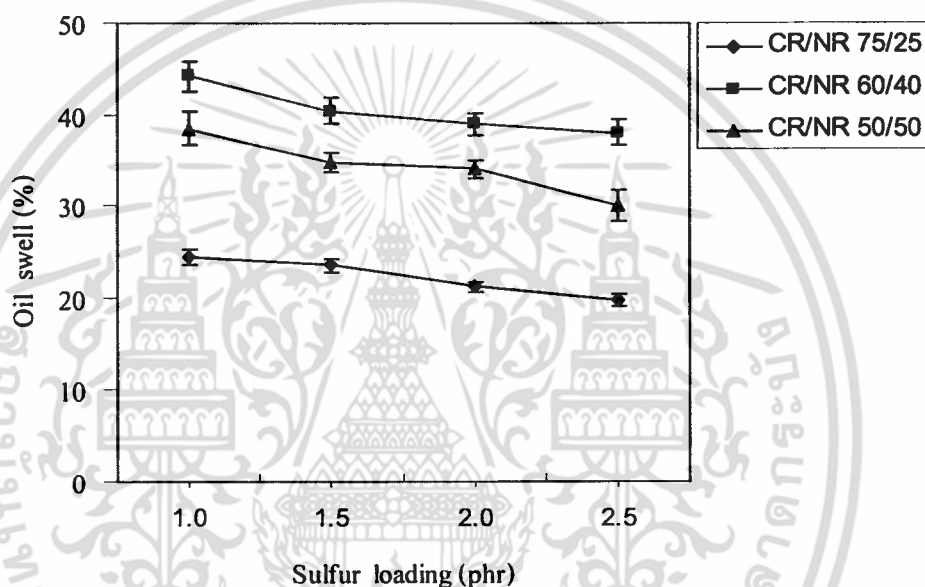
จากรูปที่ 4.70 และ 4.71 แสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดและการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางผสมทั้ง 3 อัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณกำมะถันสูงจึงเสื่อมสลายได้ง่ายด้วยความร้อนทำให้การเปลี่ยนรูปของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเพราะขึ้นทดสอบมีความหนา เมื่อเปรียบเทียบยางผสมทั้ง 3 อัตราส่วน พบว่ายางผสม CR/NR อัตราส่วน 50/50 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดและการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงสูงสุด เนื่องจากยางธรรมชาติเสื่อมสลายได้ง่ายด้วยความร้อนทำให้ยางผสมที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

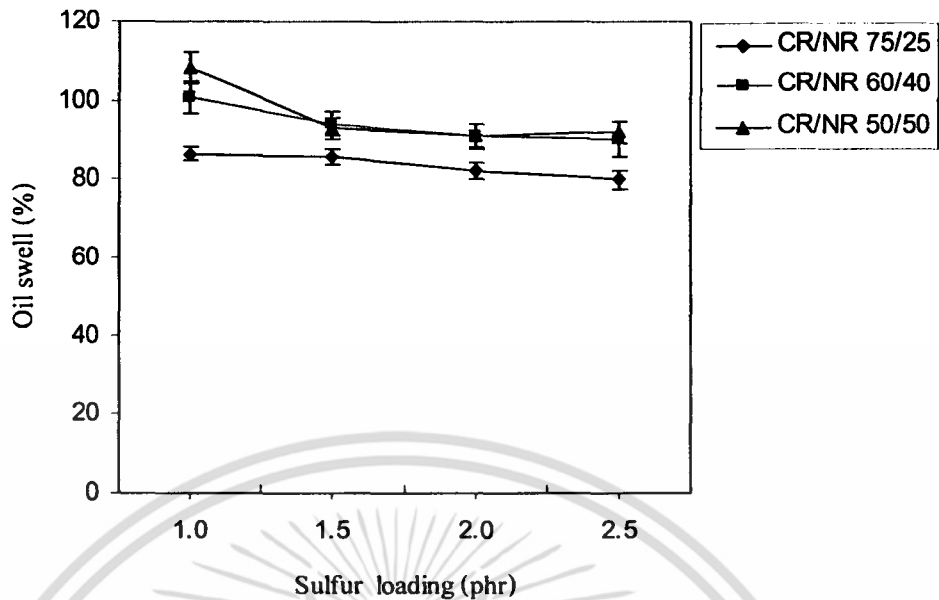
อัตราส่วนยางธรรมชาติมากกว่าเสื่อมสลายด้วยความร้อนได้ง่ายกว่า ทำให้ความสามารถในการคืนตัวของยางผสมลดลง

#### 4.5.3 ความทนทานต่อน้ำมันของยางผสม CR/NR 75/25, 60/40 และ 50/50 ที่มีปริมาณกำมะถันต่างกัน

จากการทดสอบผลของปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) ที่มีความทนทานต่อน้ำมัน ASTM No.1 และ ASTM No.3 อุณหภูมิ 100 °C นาน 70 ชั่วโมงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr และแมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr แสดงผลดังรูปที่ 4.72 และ 4.73



รูปที่ 4.72 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 ในน้ำมัน ASTM No.1 แปรปริมาณกำมะถัน



**รูปที่ 4.73** ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 ในน้ำมัน ASTM No.3 แปรปริมาณกำมะถัน

จากรูปที่ 4.72 และ 4.73 แสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณกำมะถัน (1 - 2.5 phr) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสมในน้ำมันชนิด ASTM No.1 และ No.3 ของยางผสมทั้ง 3 อัตราส่วนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณกำมะถันทำให้องศาการเชื่อมโยงหรือความหนาแน่นเชื่อมโยงของวัสดุยางผสมสูงขึ้นเมื่อแช่ขึ้นทดสอบในน้ำมันทั้งสองชนิดทำให้ค่าร้อยละการบวมตัวในน้ำมันมีแนวโน้มลดลง [36] จากการเปรียบเทียบระหว่างยางผสมทั้ง 3 อัตราส่วน พบว่ายางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 มีค่าร้อยละการบวมตัวต่ำสุด เนื่องจากยางคลอโรพรีนเป็นยางทนทานต่อการบวมตัวในน้ำมันได้ดี ส่วนยางธรรมชาติทนทานต่อการบวมตัวในน้ำมันต่ำ ดังนั้นยางผสมที่มีอัตราส่วนยางคลอโรพรีนในปริมาณมากทำให้ทนทานต่อการบวมตัวในน้ำมันดีกว่ายางผสมที่มีอัตราส่วนยางคลอโรพรีนในปริมาณน้อย

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและมาตรฐานของ ร.ฟ.ท. ดังตารางที่ 1.1 พบว่าสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 แมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr กำมะถัน 1 phr มีสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานมาก ยกเว้น ร้อยละมอดูลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลงต่ำกว่าเกณฑ์เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้ตัดสินใจเลือกยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 1phr กำมะถัน 1 phr เพราะสมบัติก่อนและหลังบ่มเร่งโดยรวมดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 สรุปสูตรที่เหมาะสมและสมบัติของยางรองรางรถไฟ

จากการทดลอง พบว่าองค์ประกอบของยางและสารเคมีที่เหมาะสม เพื่อผลิตยางรองรางรถไฟมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมในการใช้งาน ประกอบด้วย

- ปริมาณเขม่าดำ 60 phr (ส่วน โดยน้ำหนักของยาง)
- อัตราส่วนยางผสมระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ CR/NR อัตราส่วน 75/25
- ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr
- ปริมาณกำมะถัน 1 phr

ทำการบดผสมยางด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งหลังจากนั้นผสมสารเคมีด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิผสม 70 °C ความเร็วรอบ 44 รอบต่อนาที โดยมีอุณหภูมิขึ้นรูป 150 °C ซึ่งสมบัติของยางรองรางรถไฟที่ผลิตได้ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติของยางรองรางรถไฟที่ผลิตได้

สมบัติของยางรองรางรถไฟ	ค่าที่ได้
- สมบัติก่อนบ่มเร่ง	
ความแข็งแรงดึง (MPa)	22.33
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	479.4
มอดุลัสที่ 100 % (MPa)	3.37
ความแข็งกด (Shore A)	74
ความต้านทานต่อไอโซนที่ 50 pphm , 20 % อุณหภูมิ 40 °C 72 ชั่วโมง	ไม่เกิดรอยแตก
- สมบัติหลังบ่มเร่ง อุณหภูมิ 100 °C นาน 96 ชั่วโมง	
ความแข็งแรงดึง (MPa)	20.16
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	341.3
มอดุลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลง (%)	57.64
ร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ (%)	98.44
ร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ (%)	71.19
การยุบตัวเนื่องจากแรงกด อุณหภูมิ 100 °C นาน 24 ชั่วโมง (%)	15.97
การยืดตัวเนื่องจากแรงดึง อุณหภูมิ 100 °C นาน 24 ชั่วโมง (%)	13.33
ร้อยละการบวมตัวในน้ำมัน	
- ASTM Oil No.1 อุณหภูมิ 100 °C นาน 70 ชั่วโมง	12.79
- ASTM Oil No.3 อุณหภูมิ 100 °C นาน 70 ชั่วโมง	71.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ

การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบโดยเลือกใช้ยางผสมที่มีสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง สมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบของสูตรยางรองรางรถไฟที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ทำการเปรียบเทียบระหว่างสูตรของยางคลอโรพรีน (CR) 100 % และสูตรของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าต้นทุนวัตถุดิบ 93.84 บาท/กก. และ 83.97 บาท/กก. ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบสำหรับผลิตแผ่นยางรองรางรถไฟ ด้วยยางคลอโรพรีน และยางผสม CR/NR

ยางและสารเคมี	phr	ราคาวัตถุดิบ (บาท/กก.)	ราคาสูตร CR 100 % (บาท)	ราคาสูตร CR/NR 75/25 (บาท)
ยางคลอโรพรีน	100/75	140	80.22	59.47
ยางธรรมชาติ	0/25	70	-	9.91
เขม่าดำ (N 330)	60	25	8.6	8.5
น้ำมันเนฟทานิก	5	13.9	0.4	0.4
ซิงก์ออกไซด์	5	54	1.55	1.53
แมกนีเซียมออกไซด์	1	91	0.52	0.52
กรดสเตียริก	2	24	0.28	0.27
6 PPD	1	230	1.31	1.31
เอทิลีน ไทโอยูเรีย	0.5	330	0.96	0.92
CBS	1	180	-	1.03
กำมะถัน	0/1	19	-	0.11
<b>รวมราคา</b>			<b>93.84</b>	<b>83.97</b>

หมายเหตุ ราคาโดยประมาณเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2548

จากตารางที่ 4.4 และ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบของยางผสมสูตร 1 กิโลกรัม ประหยัดเงินกว่าเดิมประมาณ 10 บาท ซึ่งนอกจากลดต้นทุนการผลิตเนื่องจากยางคลอโรพรีนมีราคาสูงกว่ายางธรรมชาติมากและช่วยเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศ อาจกล่าวได้ว่าการผลิตยางรองรางรถไฟโดยใช้ยางคลอโรพรีนผสมยางธรรมชาติ (CR/NR) ในงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นยางรองวางรถไฟซึ่งผลิตจากยางคลอโรพรีน (CR) ผสมยางธรรมชาติ (NR) ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางผสมระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ

##### 1. การศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อยางคลอโรพรีน

- เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำในยางคลอโรพรีนพบว่ามอดูลัสที่ 100 % และความแข็งกคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ขณะที่ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงปริมาณเขม่าดำ 60 phr หลังจากนั้นค่าก็ลดลง ส่วนสมบัติแรงดึงหลังบ่มแรงและร้อยละสมบัติแรงดึงที่คงอยู่มีแนวโน้มลดลง การเปลี่ยนรูปถาวรมีค่าใกล้เคียงกัน

##### 2. การศึกษาผลของอัตราส่วนยางผสมระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ

- ความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติมีค่าสูงกว่ายางผสม CR/NR ขณะที่ค่ามอดูลัสที่ 100 % และความแข็งกคของยางผสมสูงกว่ายางธรรมชาติหรือยางคลอโรพรีนชนิดเดียว เมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติในยางผสม CR/NR พบว่าสมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงของยางผสมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนสมบัติแรงดึงหลังบ่มแรงและร้อยละสมบัติแรงดึงที่คงอยู่มีแนวโน้มลดลง การเปลี่ยนรูปถาวรมีค่าใกล้เคียงกัน

- ยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 ทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนดี

- จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค AFM ชนิด Tapping mode พบว่ามีการแยกวัฏภาคระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติอย่างชัดเจน ซึ่งการเติมเขม่าดำทำให้การกระจายตัวของวัฏภาคของยางผสมดีขึ้น

- จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMTA ชนิด Tension mode พบว่ายางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75 แสดงค่า  $Tan \delta$  ที่อุณหภูมิ  $T_g$  2 ค่าที่ตำแหน่งเดิมยืนยันความเป็นยางผสมชนิดไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends)

##### 3. การศึกษาผลของปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีต่อยางผสม

- เมื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ในยางผสม CR/NR พบว่าสมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่วนสมบัติแรงดึงหลังบ่มแรงและร้อยละสมบัติแรงดึงที่คงอยู่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่การเปลี่ยนรูปถาวรมีค่าใกล้เคียงกัน ร้อยละการบวมตัวในน้ำมันมีแนวโน้มลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. การศึกษาผลของปริมาณกำมะถันที่มีต่ออย่างผสม

- สำหรับอย่างผสม CR/NR ที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr เมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันพบว่าสมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่วนสมบัติแรงดึงหลังบ่มเร่ง ร้อยละสมบัติแรงดึงที่คงอยู่และร้อยละการบวมตัวในน้ำมันมีแนวโน้มลดลง การเปลี่ยนรูปถาวรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

- สำหรับอย่างผสม CR/NR ที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 2 phr เมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันพบว่าสมบัติแรงดึงก่อนบ่มเร่งมีแนวโน้มลดลง มอดูลัสที่ 100 % และความแข็งกดมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนสมบัติแรงดึงหลังบ่มเร่งมีแนวโน้มลดลง ร้อยละสมบัติแรงดึงที่คงอยู่และร้อยละการบวมตัวในน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกัน การเปลี่ยนรูปถาวรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

#### 5. ศึกษาการเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติในยางผสม CR/NR ที่มีปริมาณกำมะถันต่างกัน

- เมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันในยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25, 60/40 และ 50/50 พบว่าอย่างผสมทั้ง 3 อัตราส่วน สมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่วนสมบัติแรงดึงหลังบ่มเร่ง ร้อยละสมบัติแรงดึงที่คงอยู่และร้อยละการบวมตัวในน้ำมันมีแนวโน้มลดลง การเปลี่ยนรูปถาวรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

#### 6. สูตรสูตรที่เหมาะสมสำหรับผลิตแผ่นยางรองรางรถไฟ

จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางผสม CR/NR เพื่อผลิตเป็นแผ่นยางรองรางรถไฟ พบว่าสูตรยางที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับการใช้งานจริง ซึ่งประกอบด้วยอย่างผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ผสมเขม่าดำ 60 phr แมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr และกำมะถัน 1 phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C โดยต้นทุนวัตถุดิบในยางผสมสูตร 1 กิโลกรัมราคาประมาณ 84 บาท ซึ่งประหยัดกว่าเดิมสูตรยางที่ใช้คลอโรพรีนเพียงอย่างเดียวประมาณ 10 บาทและมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยในการผลิตยางรองรางรถไฟด้วยยางคลอโรพรีนผสมยางธรรมชาติ สามารถสรุปข้อเสนอแนะต่างๆ ที่น่าสนใจซึ่งอาจเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป ดังนี้

1. ศึกษาชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม (Compatibilizer) ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนเชิงกลและสัณฐานวิทยาของยางผสมระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ
2. ศึกษาผลของสารเชื่อมโยงชนิดอื่น เช่น แคลเซียมสเตียเรต
3. เพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ โดยที่สมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานของการรถไฟ

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบระหว่างสมบัติของยางรองรางรถไฟที่ผลิตได้และมาตรฐานของการรถไฟแห่งประเทศไทย

สมบัติของยางรองรางรถไฟ	มาตรฐาน	ค่าที่ได้
<b>- สมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่ง</b>		
ความแข็งแรงดึง <sup>1</sup> (MPa)	11.77	22.33
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด <sup>1</sup> (%)	250	479.4
มอดุลัสที่ 100 % (MPa)	2.94 - 4.90	3.37
ความแข็งกด (Shore A)	65 - 80	74
<b>- สมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่ง อุณหภูมิ 100 °C นาน 96 ชั่วโมง</b>		
ความแข็งแรงดึง <sup>1</sup> (MPa)	9.81	20.16
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด <sup>1</sup> (%)	180	341.3
มอดุลัส 100 % ที่เปลี่ยนแปลง <sup>2</sup> (%)	40	57.64
ร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ <sup>1</sup> (%)	70	98.44
ร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ <sup>1</sup> (%)	60	71.19
การยุบตัวเนื่องจากแรงกด อุณหภูมิ 100 °C นาน 24 ชั่วโมง <sup>2</sup> (%)	30	15.97
การยืดตัวเนื่องจากแรงดึง อุณหภูมิ 100 °C นาน 24 ชั่วโมง <sup>2</sup> (%)	25	13.33

หมายเหตุ<sup>1</sup> ผลการทดลองที่ได้ต้องสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

<sup>2</sup> ผลการทดลองที่ได้ต้องต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

<sup>3</sup> การบ่มเร่ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 96 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] การรถไฟแห่งประเทศไทย. 2002. ประวัติรถไฟไทย. [online]. Available :  
http:// www.railway.co.th
- [2] S. Miura, H. Takai, M. Uchida and Y. Fukada. "The Mechanism of Railway Tracks" **Japan Railway & Transport Review**. March 1998. pp. 38-44.
- [3] The State Railway of Thailand. 1982. **Specification for the Supply of Rubber Solepads**.
- [4] อธิพิณ แจ่มชัด. เอกสารประกอบการสอนเทคโนโลยียาง. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [5] International Rubber Study Group. "Thailand NR Production." **IRSG Rubber Statistical Bulletin**. Vol.59, No.6, March 2005. pp. 10-13.
- [6] A. J. Tinker and K. P. Jones. **Blends of Natural Rubber**. London : Chapman & Hall Ltd. 1998.
- [7] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. เทคโนโลยียาง. กรุงเทพฯ : ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2541.
- [8] พรพรรณ นิธิอุทัย. ยาง : เทคนิคการออกสูตร. ปัตตานี : ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2528.
- [9] J. A. Brydson **Rubber Material and Their Compounds**. London : Elsevier Science Publishers Ltd. 1989.
- [10] International Rubber Quality and Packing Conferences. **International Standards of Quality and Packing for Natural Rubber Grades (The Green Book)**. New York : The Rubber Manufacturers Association, Inc. 1996.
- [11] พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. ปัตตานี : ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2528.
- [12] บุญธรรม นิธิอุทัย, พรพรรณ นิธิอุทัยและปรีชา ป้องภัย. สารเคมีสำหรับยางและเทคนิคการออกสูตรยาง. ปัตตานี : ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2530.
- [13] C. M. Blow. **Rubber Technology and Manufacture**. 3<sup>rd</sup>. Ed. London : Butterworth & Co. Publication Ltd. 1978
- [14] M. Morton. **Rubber Technology**. 3<sup>rd</sup>. Ed. New York : Van Nostrand Reinhold Ltd. 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] คณะอาจารย์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. การทดสอบยางและผลิตภัณฑ์. ปีตธานี : ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2534.
- [16] ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2545.
- [17] อธิพิล แจ้งชัด. “แนะนำเทคนิคใหม่ : AFM & STM” วิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. ปีที่ 9, ฉบับที่ 2, สิงหาคม 2542. หน้า 5-11.
- [18] S. Bandyopadhyay, P. P. De, D. K. Tripathy and S. K. De. “Dynamic Mechanical Spectroscopic Studies on the Miscibility of CR/ENR Blends in Presence of Carbon Black Filler” *Polymer.*, vol. 36, 1995. pp. 1979-1984.
- [19] H. Ismail and B. T. Poh. “Cure and Tear Properties of ENR25/SMR L and ENR 50/SMR L Blends” *European Polymer Journal.* vol. 36, 2000. pp. 2403-2408.
- [20] P. Boochathum and W. Prajudtake. 2001. “Vulcanization of *Cis*- and *Trans*- Polyisoprene and their Blends : Cure Characteristics and Crosslink Distribution” *European Polymer Journal.* vol. 37, 2001. pp. 417-427.
- [21] R. L. Fan, Y. Zhang, F. Li, Y. X. Zhang, K. Sun and Y. Z. Fan. “Effect of High Temperature Curing on the Crosslink Structures and Dynamic Mechanical Properties of Gum and N 330 Filled NR Vulcanizates” *Polymer Testing.* vol. 20, 2001. pp. 925-936.
- [22] H. Ismail and H. C. Leong. “Curing Characteristics and Mechanical Properties of NR/CR and ENR/CR Blends” *Polymer Testing.* vol. 20, 2001. pp. 509-516.
- [23] H. Ismail, Z. Ahmad and Z. A. Ishak. “Effects of Cetyltrimethylammonium Maleate on Curing Characteristics and Mechanical Properties of CR” *Polymer Testing.* vol. 22, 2002. pp. 179-183.
- [24] H. Ismail, S. Suzaimah and H. M. Hairunezam. “Curing Characteristics, Mechanical Properties and Oil Resistance of SBR/ENR Blends” *Journal of Elastomer and Plastics.* vol. 34, 2002. pp. 119-130.
- [25] K. N. Pandey, D. K. Setua and G. N. Mathur. “Material Behavior Fracture Topography of Rubber Surfaces” *Polymer Testing.* vol. 22, 2002. pp. 353-359.
- [26] C. Nah, C. Han, B. Jo, W. D. Kim and Y. Chang. “Influences of *Trans*-Polyoctylene Rubber on the Physical Properties and Phase Morphology of NR/NBR Blends” *Journal of Applied Polymer Science.* vol. 86, 2002. pp. 125-134.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] A. P. Kuriakose and M. Varghese. "Use of Rice Bran Oil and Epoxidized Rice Bran Oil in Carbon Black Filled NR/CR Blends" **Journal of Applied Polymer Science**. vol. 90, 2003. pp. 4084-4092.
- [28] C. Sirisinha, P. Sacoui and J. Guaysomboon. "Oil and Thermal Aging Resistance in Compatibilized and Thermally Stabilized CPE/NR Blends" **Polymer**. vol. 45, 2004. pp. 4909-4916.
- [29] ASTM D 1646 Committee on Standard "Standard Test Methods for Rubber Viscosity, Stress Relaxation and Pre-Vulcanization Characteristics (Mooney Viscometer).", Philadelphia : American Society for Testing and Materials., 1992.
- [30] ASTM D 2084 Committee on Standard "Standard Test Method for Rubber Property - Vulcanization Using Oscillating Disk Cure Meter.", Philadelphia : American Society for Testing and Materials., 1992.
- [31] ASTM D 2240 Committee on Standard "Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness.", Philadelphia : American Society for Testing and Materials., 1991.
- [32] ASTM D 412 Committee on Standard "Standard Test Method for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer-Tension.", Philadelphia : American Society for Testing and Materials., 1992.
- [33] ASTM D 395 Committee on Standard "Standard Test Method for Rubber Property - Compression Set.", Philadelphia : American Society for Testing and Materials., 1989.
- [34] ISO 1431/1 Committee on Standard "Rubber, vulcanized - Resistance to Ozone Cracking - Part 1 : Static strain test.", Switzerland : International Organization for Standardization., 1984.
- [35] ASTM D 471 Committee on Standard "Standard Test Method for Rubber Property - Effect of Liquids.", Philadelphia : American Society for Testing and Materials., 1991.
- [36] J. E. Mark, B. Erman and F. R. Eirich. **Science and Technology of Rubber**. 2<sup>nd</sup>. Ed. New York : Academic Press, Inc. 1994.
- [37] A. D. Robert. **Natural Rubber Science and Technology**. Oxford : Oxford Science Publication 1990.
- [38] ASTM D 2000 Committee on Standard "Standard Classification System for Rubber Products in Automotive Applications.", Philadelphia : American Society for Testing and Materials., 1992.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

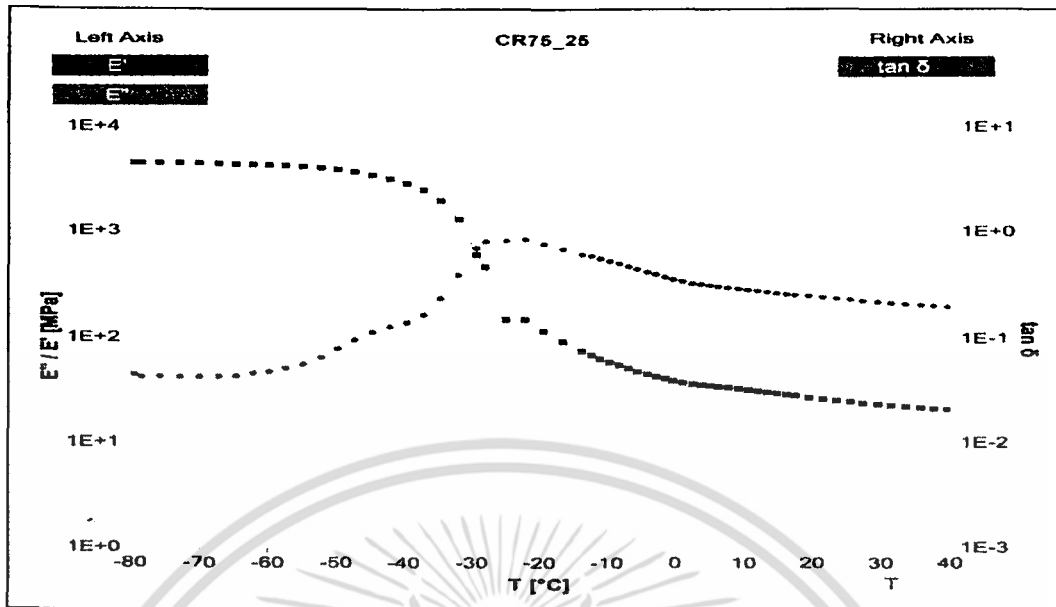


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

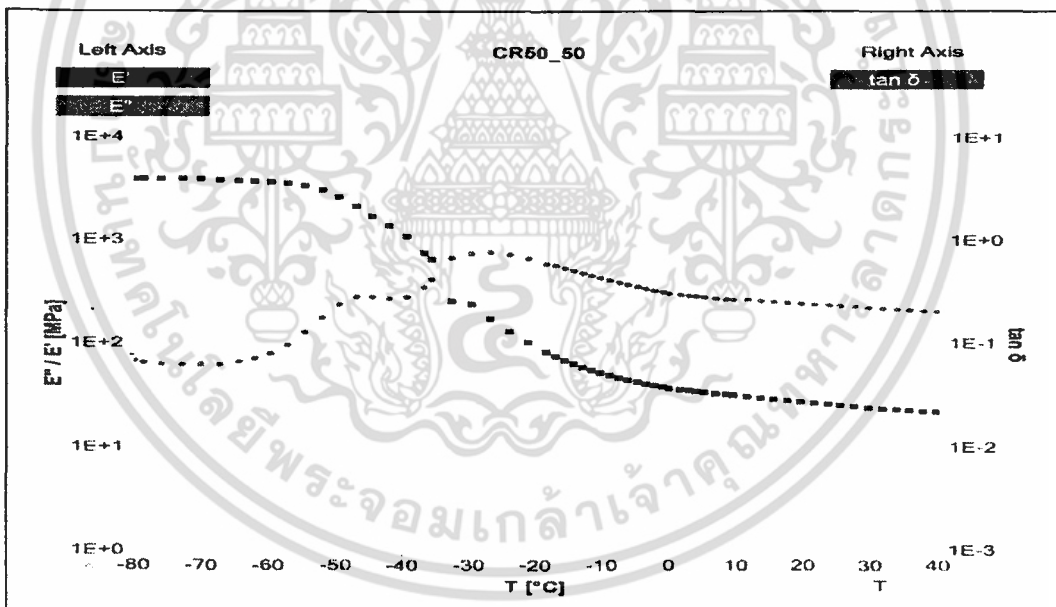


**ภาคผนวก ก**  
**สมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตของยางผสม CR/NR**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

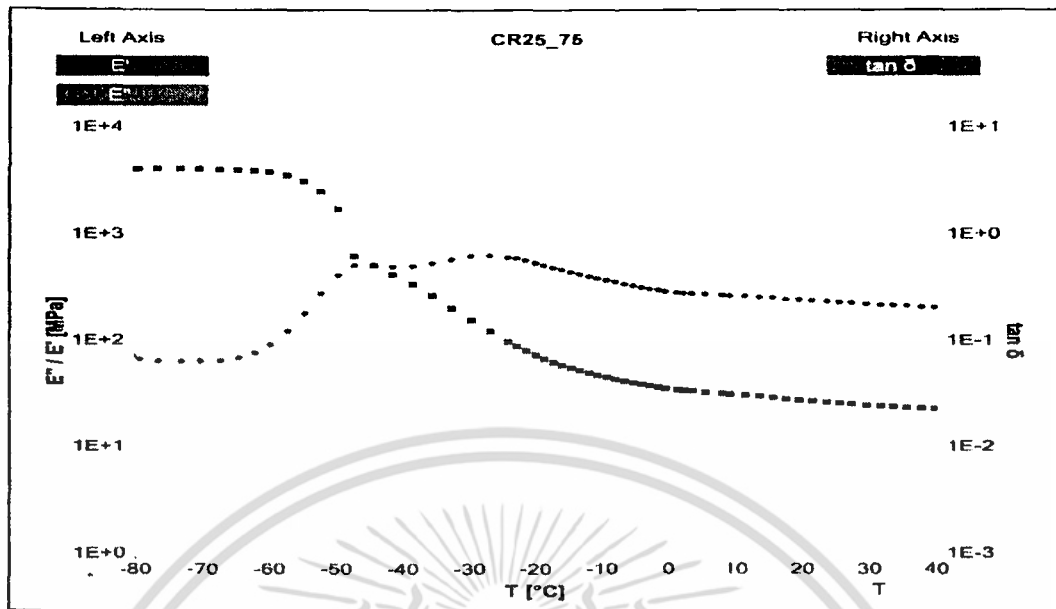


รูปที่ ก.1 DMTA Thermograms ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25



รูปที่ ก.2 DMTA Thermograms ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 50/50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

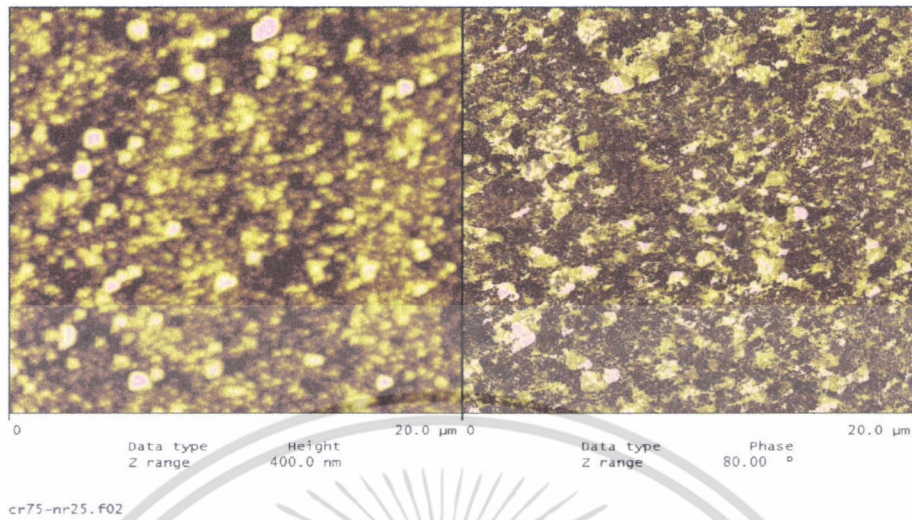


รูปที่ ก.3 DMTA Thermograms ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 25/75

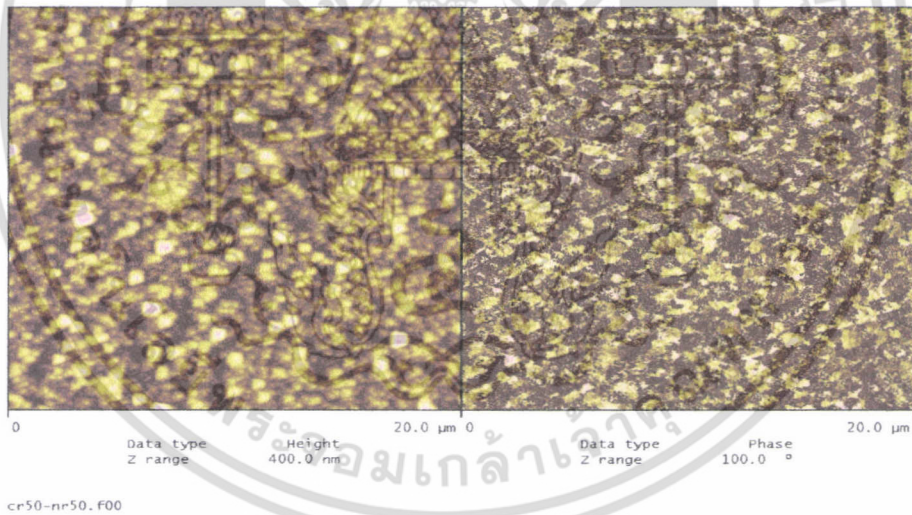
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

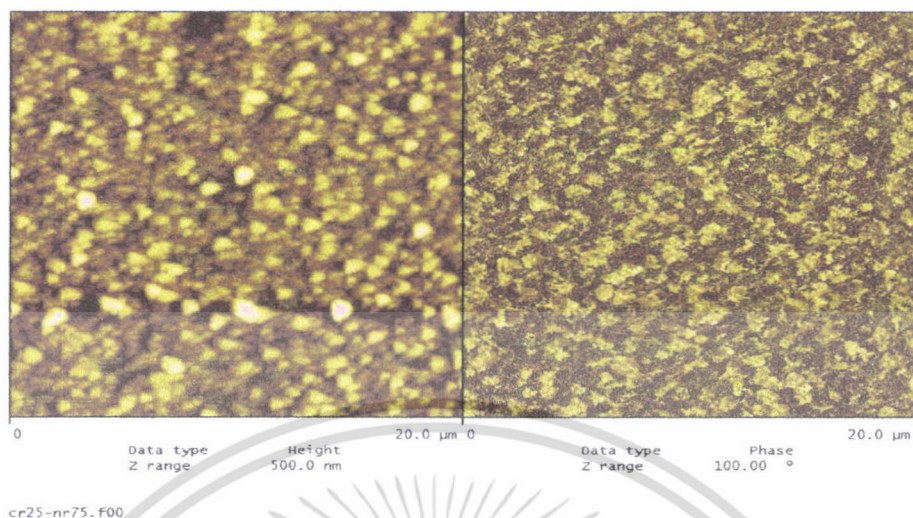


**รูปที่ ข.1** AFM Micrographs ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr ประเภทของรูป (ซ้าย) Height (ขวา) Phase image

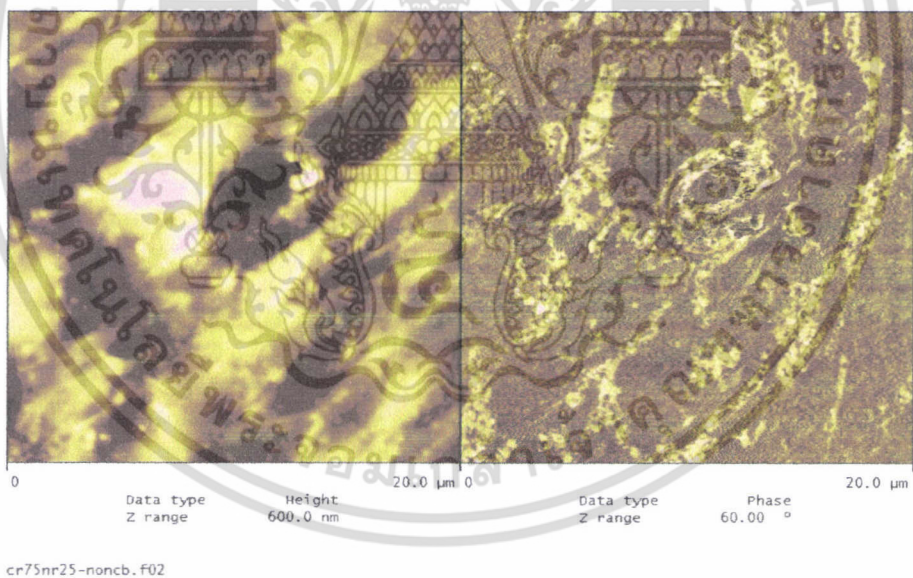


**รูปที่ ข.2** AFM Micrographs ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 50/50 ที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr ประเภทของรูป (ซ้าย) Height (ขวา) Phase image

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

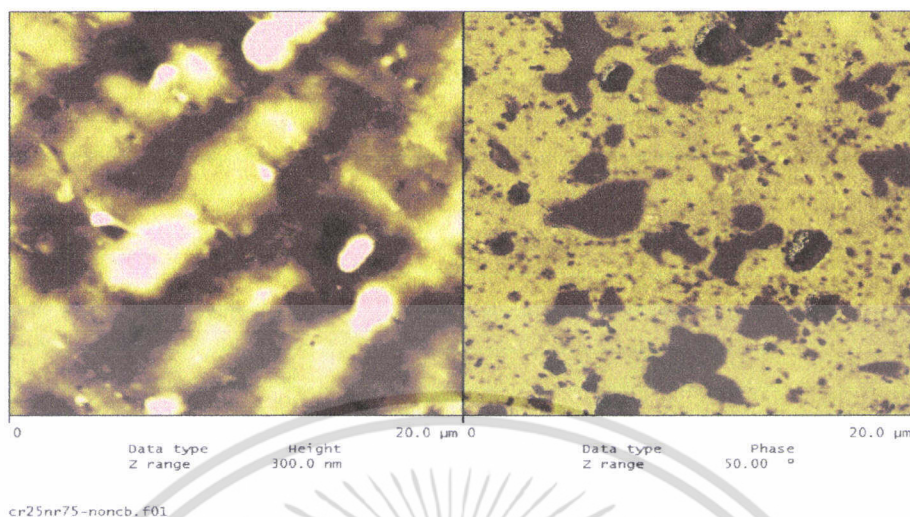


**รูปที่ ข.3** AFM Micrographs ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 25/75 ที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr ประเภทของรูป (ซ้าย) Height (ขวา) Phase image



**รูปที่ ข.4** AFM Micrographs ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 ที่ไม่เติมเขม่าดำ ประเภทของรูป (ซ้าย) Height (ขวา) Phase image

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ ข.4** AFM Micrographs ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 25/75 ที่ไม่เติมเขม่าดำ ประเภทของรูป (ซ้าย) Height (ขวา) Phase image

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย กวิน สุวรรณกุล
วัน เดือน ปีเกิด	17 มีนาคม 2523
ที่อยู่	270/26 หมู่ที่ 9 ตำบลสะเตงนอก อำเภอเมือง จังหวัดยะลา
ประวัติการศึกษา	2545 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้