

การปรับปรุงยางธรรมชาติเพื่อใช้ในงานอเนกประสงค์

MODIFICATION OF NATURAL RUBBER FOR GENERAL PURPOSE  
APPLICATIONS

เสวตพงษ์ นวลศิลป์  
SAWAITTAPHONG NUALSILP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงยางธรรมชาติเพื่อใช้ในงานอเนกประสงค์

MODIFICATION OF NATURAL RUBBER FOR GENERAL PURPOSE  
APPLICATIONS



เสวตพงษ์ นวลศิลป์

SAWAITTAPHONG NUALSILP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

**MODIFICATION OF NATURAL RUBBER FOR GENERAL PURPOSE  
APPLICATIONS**

**SAWAITTAPHONG NUALSILP**

**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**

**2007**

**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงยางธรรมชาติเพื่อใช้ในงานอเนกประสงค์
นักศึกษา	นายเสวตพงษ์ นवलศิลป์
รหัสประจำตัว	46064316
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติเพื่อสามารถนำไปใช้ได้ในงานอเนกประสงค์ ด้วยการลดข้อบกพร่องของยางในด้านต่างๆ โดยศึกษาปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติ เช่น ปริมาณสารตัวเติมเขม่าดำ ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ปริมาณไดอะทอไมต์ และปริมาณเซลลูล์ซ ทำได้โดยการนำยางแท่งชนิด STR XL มาบดและผสมสารเคมีด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขึ้นรูปยางด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยเริ่มศึกษาอุณหภูมิ เวลาการเชื่อมโยง และปริมาณเขม่าดำ เพื่อเสริมความแข็งแรงของยาง

จากผลการทดลองพบว่า ยางธรรมชาติที่ปริมาณเขม่าดำ 40 phr อุณหภูมิขึ้นรูป 160 °C มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด นำผลที่ได้ทดสอบต่อโดยแปรปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ สมบัติที่ทำการศึกษาได้แก่ สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง โดยนำชิ้นงานอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง พบว่าที่ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 1 phr มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด จากนั้นดำเนินการทดสอบต่อโดยแปรปริมาณดินเบาหรือไดอะทอไมต์ ศึกษาสมบัติทางความร้อนของยางผสมสูตรด้วยเทคนิคเทอร์มัลกราฟิเมตริก พบว่าเมื่อปริมาณของไดอะทอไมต์เพิ่มขึ้นเสถียรภาพทางความร้อนของยางเพิ่มขึ้น จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตร พบว่าไดอะทอไมต์สามารถรวมตัวและแทรกเข้าไปในโมเลกุลยางได้ดี ปริมาณไดอะทอไมต์ที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมคือ 7 phr หลังจากนั้นทดสอบต่อโดยแปรปริมาณเซลลูล์ซ เพื่อให้ยางมีสมบัติทนต่อน้ำมัน โดยหาค่าร้อยละการบวมตัวของน้ำมัน พบว่าเมื่อปริมาณเซลลูล์ซเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการบวมตัวในน้ำมันมีค่าลดลง เนื่องจากเซลลูล์ซมีโครงสร้างของพอลิเอสเทอร์เป็นองค์ประกอบซึ่งมีสมบัติทนน้ำมัน เมื่อเติมลงไปยางจึงทำให้การบวมพองในน้ำมันลดลง จากการทดสอบสมบัติเชิงกลและความทนต่อน้ำมันของเซลลูล์ซ พบว่าปริมาณเซลลูล์ซที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคือ 3 phr

<b>Thesis</b>	Modification of Natural Rubber for General Purpose Applications
<b>Student</b>	Mr. Sawaittaphong Nualsilp
<b>Student ID</b>	46064316
<b>Degree</b>	Master of science
<b>Program</b>	Polymer Technology
<b>Year</b>	2007
<b>Thesis advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Somsak Woramongconchai

### **ABSTRACT**

This research aims to modification of natural rubber's properties for general purposes uses and for reduction of rubber's defects. The modification of natural rubber is made from rubber STR XL grades. It was ground by two-roll mill and then forming with compression molding technique.

The effect of temperatures, cure time and carbon black loading was investigated on enhancement of strength. It was found that the natural rubber vulcanizates with 40 phr, carbon black loading exhibited overall optimum mechanical properties. The varied amounts of antioxidant mixture were studied before ageing and after ageing, the samples were heated at 70 °C in a hot air oven for 96 hours. The antioxidant of 1 phr loading was exhibited overall optimum mechanical properties. The loading diatomite was studied to the heat stability by using thermogravimetric technique. It was found that when diatomite loading was increased, the heat stability of rubber was also increased. From morphological studies with SEM it was revealed that rubber indicated good dispersion with diatomite loading was 7 phr which passed Thai Standard Industrial products. The shellac loading was testing for oil resistance by observing the percent of oil swelling. It was found that the increasing shellac loading, the greater percent of oil swelling. Because shellac's structure belongs to polyester component which is resistance to oil. Therefore shellac was added to rubber, the oil swelling was decreased. From mechanical properties and oil resistance of shellac loading was 3 phr which passed the standard of industrial products.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ที่คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะ สั่งสอนและช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์ ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร และ รศ.ดร.เก็จวดี พลุกษาทร เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยและกรุณามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์มนตรี ทองคำ เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยยาง และภาควิชาเคมี สจล. ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณอุไรรัตน์ บุญทอง ที่ให้คำแนะนำและความอนุเคราะห์สารเร่ง TBBS

ขอขอบคุณ คุณชาติ ศรีวิสัย ที่ให้ความเอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดาและมารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

เสวตพงษ์ นวลศิลป์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....</b>	<b>3</b>
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber).....	3
2.1.1 ยางธรรมชาติแปรรูป (Modified Natural Rubber).....	4
2.1.2 สมบัติของยางธรรมชาติ.....	6
2.1.3 สมบัติของยางเชื่อมโยง.....	7
2.2 การผสมยาง.....	9
2.2.1 เครื่องผสมยางแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill).....	11
2.3 การเชื่อมโยงบยาง (Rubber vulcanization).....	12
2.3.1 ระบบการเชื่อมโยงบยางของยางธรรมชาติ (Vulcanization system).....	13
2.3.2 การเชื่อมโยงบยางด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization).....	14
2.3.3 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators).....	15
2.3.4 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activators).....	17
2.4 สารเติมแต่งของยางและการเสริมแรง (Rubber additives and Reinforcement)...	18
2.4.1 สารตัวเติม (Fillers).....	18
2.4.2 สารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง (Antidegradants).....	21
2.4.3 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers).....	22
2.4.4 ไดอะทอมไมต์ (Diatomaceous earth or Diatomite).....	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.5 เซลแล็ก (Shellac).....	26
2.5 การทดสอบสมบัติยาง.....	28
2.5.1 เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง (Curemeter).....	28
2.5.2 เครื่องวัดความหนืดมูนี่ (Mooney viscometer).....	30
2.5.3 การอัดขึ้นรูป (Compression molding).....	31
2.5.4 การทดสอบความแข็งกด (Hardness test).....	32
2.5.5 การวิเคราะห์ทางความร้อนโดยเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก (Thermal Gravimetric).....	33
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>37</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.3 วิธีการทดลอง.....	38
3.3.1 การเตรียมโคอะทอไมด์และเซลแล็ก.....	38
3.3.2 ขั้นตอนการผสมยางและเตรียมขึ้นทดสอบ.....	38
3.3.3 การบดผสมยางและสารเคมี.....	39
3.4 การทดสอบยางผสมสูตร.....	41
3.4.1 การทดสอบความหนืดมูนี่.....	42
3.4.2 เวลาเชื่อมโยงของยางผสมสูตร (Cure time).....	42
3.4.3 การเชื่อมโยงยาง (Vulcanization).....	42
3.4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	42
3.4.5 การทดสอบความต้านทานการบ่มเร่ง (Air oven ageing).....	43
3.3.6 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance).....	44
3.3.7 การทดสอบความแข็งกด (Hardness).....	45
3.4.8 การทดสอบความหนาแน่น.....	45
3.4.9 การทดสอบความทนทานต่อน้ำมัน (Oil resistance).....	45
3.4.10 สมบัติทางความร้อน โดยเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก.....	46
3.4.11 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology).....	46

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....</b>	<b>47</b>
4.1 การศึกษาอุณหภูมิ เวลาการเชื่อมโยง และปริมาณเขม่าดำ.....	47
4.2 การศึกษาปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ.....	55
4.2.1 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งที่ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ต่างกัน.....	55
4.3 การศึกษาปริมาณดินเบาหรือโคอะทอไมต์.....	60
4.3.1 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งที่ปริมาณโคอะทอไมต์ต่างกัน.....	61
4.3.2 สันฐานวิทยาของยางผสมสูตรที่ปริมาณโคอะทอไมต์ต่างกัน.....	67
4.3.3 สมบัติทางความร้อนของยางผสมสูตรที่ปริมาณโคอะทอไมต์ต่างกัน.....	69
4.4 การศึกษาปริมาณเซลลูล์ก.....	73
4.4.1 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งที่ปริมาณเซลลูล์กต่างกัน.....	74
4.4.2 ความทนทานต่อน้ำมันของยางผสมสูตรที่ปริมาณเซลลูล์กต่างกัน.....	81
4.4.3 สันฐานวิทยาของยางผสมสูตรที่ปริมาณเซลลูล์กต่างกัน.....	82
4.4.4 สมบัติทางความร้อนของยางผสมสูตร.....	83
4.5 สรุปสูตรที่เหมาะสม.....	85
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....</b>	<b>87</b>
5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางเพื่อใช้ในงานอเนกประสงค์.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	89
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>91</b>
<b>ภาคผนวก ก. สมบัติทางความร้อนของยางผสมสูตร.....</b>	<b>95</b>
<b>ภาคผนวก ข. สันฐานวิทยาของยางผสมสูตร.....</b>	<b>100</b>
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>101</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกเกรดเขม่าดำตามมาตรฐาน ASTM D 1765.....	19
2.2 แสดงองค์ประกอบของดินเบาที่พบจากแหล่งต่างๆ.....	25
3.1 สมบัติบางประการของยางแท่งที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
3.2 สูตรหลักของยางผสมสูตร.....	39
3.3 สูตรการศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำและภาวะที่เหมาะสม ของยางผสมสูตร (150 °C 160 °C และ 170 °C ).....	39
3.4 สูตรการศึกษาผลของปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (0.5 1.0 และ 1.5 phr).....	40
3.5 สูตรการศึกษาผลของปริมาณไดอะทอไมต์ที่มีต่อสมบัติของยางผสมสูตร.....	40
3.6 สูตรการศึกษาผลของปริมาณเซลลูล์สที่มีต่อสมบัติของยางผสมสูตร.....	41
4.1 อุณหภูมิการสลายตัวของยางผสมสูตร แปรปริมาณไดอะทอไมต์ 0 1 3 5 และ 7 phr ที่ได้จากเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก.....	71
4.2 สมบัติของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....	72
4.3 สมบัติของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....	80
4.4 สมบัติของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....	86

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (Cis-1, 4-polyisoprene).....	3
2.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง.....	10
2.3 SEM Micrographs แสดงโครงสร้างไดอะทอไมต์ กำลังขยาย 20000 เท่า.....	24
2.4 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ (a) polyesters และ (b) single esters ที่เป็นองค์ประกอบ ส่วนใหญ่ของเรซิน.....	27
2.5 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve).....	29
2.6 แสดงเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน TGA .....	34
3.1 ขึ้นทดสอบรูปดัมเบลล์.....	42
3.2 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด Die C.....	44
4.1 กราฟแสดงเวลา Scorch time เมื่อแปรค่าปริมาณเขม่าดำที่อุณหภูมิต่างๆ.....	49
4.2 กราฟแสดงเวลา Cure time เมื่อแปรค่าปริมาณเขม่าดำที่อุณหภูมิต่างๆ.....	49
4.3 กราฟแสดงความหนืดมูนี่ (ML 1+4 (100 °C)) เมื่อแปรค่าปริมาณเขม่าดำ.....	50
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของยางที่เพิ่มขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตร ของสารตัวเติมที่ใส่ในยางตามสมการของกรี-โกลด์.....	51
4.5 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน.....	52
4.6 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน.....	52
4.7 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 300 % ของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน.....	53
4.8 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน.....	53
4.9 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงกดของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน.....	54
4.10 ผลของปริมาณเขม่าดำต่อสมบัติของยาง.....	54
4.11 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่างกัน...	56
4.12 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่างกัน.....	57
4.13 ค่ามอดูลัสที่ 300 % ของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่างกัน....	57
4.14 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ต่างกัน.....	58
4.15 ค่าความแข็งแรงกดของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่างกัน.....	58

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกัน การเสื่อมสภาพต่างกัน.....	59
4.17 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกัน การเสื่อมสภาพต่างกัน.....	59
4.18 ค่าร้อยละมอดูลัส 300 % ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกัน การเสื่อมสภาพต่างกัน.....	60
4.19 กราฟแสดงความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 (100 °C)) เมื่อแปรค่าปริมาณไดอะทอไมด์.....	61
4.20 ค่าความแข็งแรงดึงก่อนบ่มเร่งของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณ ไดอะทอไมด์ต่างกัน.....	63
4.21 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดก่อนบ่มเร่งของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณ ไดอะทอไมด์ ต่างกัน.....	63
4.22 ค่ามอดูลัสที่ 300 % ก่อนบ่มเร่งของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณ ไดอะทอไมด์ต่างกัน.....	64
4.23 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดก่อนบ่มเร่งของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณ ไดอะทอไมด์ต่างกัน..	64
4.24 ค่าความแข็งแรงกดก่อนบ่มเร่งของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณ ไดอะทอไมด์ต่างกัน.....	65
4.25 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณ ไดอะทอไมด์ ต่างกัน.....	66
4.26 ค่าร้อยละร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณ ไดอะทอไมด์ต่างกัน.....	66
4.27 ค่าร้อยละมอดูลัส 300 % ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณ ไดอะทอไมด์ ต่างกัน.....	67
4.28 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อใช้ ปริมาณไดอะทอไมด์ต่างกัน (ภาพ ก ข ค ง และ ฉ ปริมาณไดอะทอไมด์ 0 1 3 5 7 และ 9 phr ตามลำดับ) กำลังขยาย 6000 เท่า.....	68
4.29 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของยางผสมสูตร แปรปริมาณไดอะทอไมด์ 0 1 3 5 และ 7 phr.....	70
4.30 แสดงความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 (100 °C)) เมื่อใช้ปริมาณเซลลैกต่างกัน.....	73
4.31 ค่าความแข็งแรงดึงก่อนบ่มเร่งของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลลैกต่างกัน.....	75

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ค่าร้อยละการขีด ณ จุดขาดก่อนบ่มเร่งของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลเล็กต่างกัน.....	75
4.33 ค่ามอดูลัสที่ 300% ก่อนบ่มเร่งของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลเล็กต่างกัน.....	76
4.34 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดก่อนบ่มเร่งของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลเล็กต่างกัน.....	76
4.35 ค่าความแข็งแรงกดก่อนบ่มเร่งของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลเล็กต่างกัน.....	77
4.36 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลเล็กต่างกัน..	77
4.37 ค่าร้อยละการขีด ณ จุดขาดที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลเล็ก ต่างกัน.....	78
4.38 ค่าร้อยละมอดูลัส 300 % ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลเล็กต่างกัน...	78
4.39 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสมสูตรในน้ำมันเบนซิน เมื่อใช้ปริมาณเซลเล็กต่างกัน.....	81
4.40 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสมสูตรในน้ำมันดีเซล เมื่อใช้ปริมาณเซลเล็กต่างกัน.....	81
4.41 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสมสูตรในน้ำมันไฮโดรลิก เมื่อใช้ปริมาณเซลเล็กต่างกัน..	82
4.42 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อใช้ ปริมาณเซลเล็กต่างกัน(ภาพ ก ข ค และ ง ปริมาณเซลเล็ก 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ) กำลังขยาย 6000 เท่า.....	83
4.43 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของยางผสมสูตร เปรียบเทียบกันระหว่าง ไดอะทอไมต์ 7 phr และเติมเซลเล็ก 3 phr.....	84

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติและส่งออกในรูปยางดิบมากที่สุดของโลก มีสัดส่วนการผลิตเป็นร้อยละ 34 ของปริมาณการผลิตของโลก และส่งออกร้อยละ 47 ของปริมาณการส่งออกยางทั้งหมดของโลก รายได้จากการส่งออกยางในรูปวัตถุดิบของไทยในปี 2547 มีมูลค่าถึง 136,704 ล้านบาท อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติที่ไทยผลิตในปี 2547 จำนวน 2.97 ล้านตันนั้น ร้อยละ 89 ส่งออกในรูปของวัตถุดิบ [1] ทำให้ต้องพึ่งพาดตลาดการส่งออกเป็นสำคัญ สำหรับชนิดของยางที่ส่งออกนั้น ส่วนใหญ่ยังเป็นการส่งออกยางแผ่นรมควัน และมีแนวโน้มส่งออกยางแท่งเพิ่มขึ้น

เพื่อให้ประเทศไทยคงความเป็นผู้นำยางพาราของโลก และมีศักยภาพการแข่งขันในตลาดโลกสูง จำเป็นต้องปรับโครงสร้างยางและผลิตภัณฑ์ยางให้เหมาะสมกับสถานการณ์ยางของประเทศและของโลกที่เปลี่ยนแปลง โดยเน้นการพัฒนาศักยภาพการผลิต การพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ และการพัฒนาตลาดยางไทยสู่สากล บนพื้นฐานของความร่วมมือกับประเทศผู้ผลิตยาง ในการรักษาเสถียรภาพราคายาง การส่งเสริมและการสนับสนุนการใช้ยางภายในประเทศ และการเร่งรัดการวิจัยและพัฒนาแบบครบวงจร ซึ่งการดำเนินการปรับโครงสร้างให้บรรลุเป้าหมายข้างต้น ทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับกิจการยางไม่ว่าจะเป็นภาครัฐ ภาคเอกชน และภาคเกษตรกรต้องมีความร่วมมือและดำเนินการร่วมกันอย่างเป็นระบบ

ยางธรรมชาติสามารถทำเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด เช่น พื้นรองเท้ายางรถจักรยานยนต์ ยางรถยนต์ ยางรัดของ ยางสายพาน ยางปูพื้น ถูยางอนามัย และอื่นๆ แต่โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยางคือ ยางธรรมชาติเป็นยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วน ทำให้ยางมีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม ในโครงสร้างมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทำให้ยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับออกซิเจนและโอโซน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมของยางทำให้ยางธรรมชาติไม่เหมาะกับงานหลายชนิดที่ต้องการความต้านทานการเสื่อมสภาพ การใช้งานของยางธรรมชาติค่อนข้างจำกัด ทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 70 °C เป็นระยะเวลานาน สาเหตุดังกล่าวทำให้ยางธรรมชาติมีข้อจำกัดในการใช้งาน เพื่อเป็นการแก้ปัญหาที่เกิดจากโครงสร้างของยางธรรมชาติจึงจำเป็นต้องใส่สารเคมีต่างๆ เข้าไป เพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพและทางเคมีตามที่ต้องการสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปใช้งาน เพื่อสามารถแปรรูปและขึ้นรูปได้ง่าย และเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ยางมีความทนทานใช้งานได้นานขึ้น และสิ่งที่สำคัญคือจะต้องมีราคาที่แข่งขันได้ สารเคมีต่างๆ ที่ใส่เข้าไปจึงมีอยู่หลายชนิด และสารเคมีแต่ละชนิดจะทำหน้าที่แตกต่างกัน

กันไป ให้สมบัติต่างๆ กัน และมีผลต่อการแปรรูปต่างกัน ในการที่จะทำได้ตามจุดประสงค์ต่างๆ เหล่านี้ อาจมีข้อจำกัดในการทำงานอย่างมากเพราะบางครั้งการที่จะทำได้ตามจุดประสงค์หนึ่ง อาจทำให้อีกจุดประสงค์หนึ่งคือยกลงไปได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติ ด้วยการลดข้อบกพร่องของยางในด้านต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น เพื่อให้ยางมีสมบัติดีและใช้งานได้มากขึ้น โดยศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติ เมื่อใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม เพื่อเสริมความแข็งแรงของยาง ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำดินเบาหรือไดอะทอมไมต์ซึ่งเป็นแร่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ จากนั้นทำการศึกษาปริมาณของครั้งหรือเซลลูล์กซึ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์ธรรมชาติ ที่ได้จากการสกัดเรซินที่เป็นสารคัดหลั่งจากแมลง เพื่อทำใหยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อน้ำมันได้ดีขึ้น จึงเป็นการดีอย่างยิ่งหากมีการใช้ประโยชน์จากไดอะทอมไมต์และเซลลูล์ก ซึ่งถือว่าเป็นทรัพยากรธรรมชาติทำให้สามารถนำยางผสมสูตรไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมของประเทศได้มากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงยางธรรมชาติเพื่อนำไปใช้ในงานอเนกประสงค์ ด้วยการลดข้อบกพร่องของยางในด้านต่างๆ เช่น ทนต่อความร้อน และทนต่อน้ำมัน
2. เพื่อศึกษาปริมาณของสารปรับแต่งที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตยางที่เหมาะสมกับงานอเนกประสงค์
3. เพื่อศึกษาถึงบทบาทของสารปรับแต่งที่เหมาะสมในการผลิตยางธรรมชาติอเนกประสงค์
4. เพื่อศึกษาหาสูตรที่ใช้ในการผลิตยางที่มีสมบัติเหมาะสมกับงานอเนกประสงค์

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาปริมาณและภาวะที่เหมาะสมของเขม่าดำในปริมาณ 10 20 30 40 50 และ 60 phr
2. ศึกษาปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ในปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 phr
3. ศึกษาปริมาณและบทบาทของไดอะทอมไมต์ในปริมาณ 1 3 5 7 และ 9 phr
4. ศึกษาปริมาณและบทบาทของเซลลูล์กในปริมาณ 1 2 3 และ 4 phr
5. ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อนของยางผสมสูตร

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

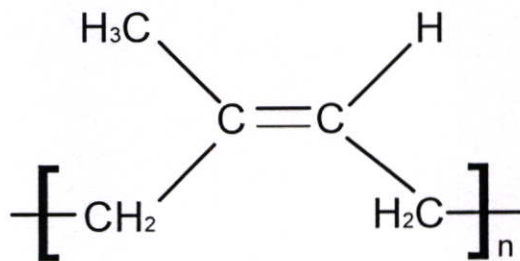
1. ส่งเสริมปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศให้มากขึ้น
2. สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ และนำไปสู่การผลิตหรือประยุกต์ใช้ยางผสมในเชิงพาณิชย์
3. ได้สูตรที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายและกว้างขวางมากขึ้น

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) [2,3]

ยางธรรมชาติ ได้จากต้นยางพาราที่มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ “ฮีเวีย-บราซิลเลียนซิส” (*Hevea brasiliensis*) เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติดี ประกอบกับมีราคาต่ำ ทำให้ยางธรรมชาติถูกจัดให้เป็นยางที่อยู่ในลำดับแรกของการเลือกใช้งานในบรรดายางทั้งหมด ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล (Mn) สูง เฉลี่ยประมาณสองแสนถึงห้าแสน และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง ยางธรรมชาติมีสูตร โมเลกุลเป็น Cis-1,4-polyisoprene โดยมีค่าตั้งแต่ 5,000 จนถึงประมาณ 15,000



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (Cis-1, 4-polyisoprene) [3]

โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยางคือ

1. ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันพืช แต่จะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
2. พันธะคู่ที่ว่องไวในปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และทำให้ยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมของยาง ทำให้การออกสูตรยางธรรมชาติจำเป็นต้องมีสารกันเสื่อม (Antioxidant) และสารต้าน โอโซน (Antiozonant) ร่วมด้วย
3. สายโซ่ที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี อาจจะสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ยางธรรมชาติมีค่า  $T_g = -73^\circ\text{C}$  ซึ่งต่ำกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ ยกเว้นเฉพาะยางบิวทาไดอีนและยางซิลิโคนเท่านั้น
4. ความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อยืด ทำให้ความต้านทานแรงดึงสูงมาก และทำให้มีค่า “green strength” สูง และ “tack” ดี
5. น้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องนำยางไปบดเพื่อให้ได้โมเลกุลเล็กลงก่อนนำไปใช้งาน

### 2.1.1 ยางธรรมชาติแปรรูป (Modified Natural Rubber)

ในการใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติต้องทำการแปรรูปน้ำยางดิบให้อยู่ในรูปอื่น เพื่อความสะดวกในการใช้งาน การขนย้าย และการเก็บรักษา ซึ่งมี 2 รูปแบบคือ ยางแห้ง (Dry rubber) และน้ำยางข้น (Concentrated latex)

#### 2.1.1.1 ยางแห้ง (Dry rubber)

ยางแห้งเป็นรูปแบบของยางธรรมชาติที่นิยมใช้ที่สุด เนื่องจากใช้งานง่าย ขนส่ง และเก็บรักษา น้ำยางสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปยางแห้งได้หลายแบบ ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheets, RSS) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air dried sheets, ADS) ยางแท่ง (Block rubbers) ยางเครฟ (Crepe rubbers) เป็นต้น

##### (1) ยางแผ่น

การทำยางแผ่น เป็นวิธีแปรรูปยางที่นิยมที่สุดโดยเฉพาะสวนยางขนาดเล็ก เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และไม่ต้องใช้เครื่องจักรราคาแพง การทำให้แผ่นแห้งนิยมนำมาในสองรูปแบบ คือ

##### 1.1 ยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheets, RSS)

เป็นยางที่ทำมาจากน้ำยางสดนำมากรองแล้วใส่กรด ริดให้เป็นแผ่น แล้วนำไปรมควัน ให้แห้ง เพื่อป้องกันเชื้อรา ช่วยยืดอายุการเก็บรักษา เนื่องจากควันไฟมีสารจำพวกฟีนอล (Phenol) ซึ่งเป็นสารต่อต้านการเกิดเชื้อราตามธรรมชาติ เนื้อยางจะมีสีน้ำตาลอ่อน ไปจนถึงน้ำตาลเข้มตามปริมาณของควันไฟที่รม ยางแผ่นรมควันที่แห้งสนิทจะนำมาพิจารณาจัดแยกเกรดชั้น เป็นชั้น 1 ถึงชั้น 5 ตามลักษณะความสม่ำเสมอของสี ความแห้ง ความสะอาด ปริมาณฟองอากาศและสิ่งสกปรกเจือปน เมื่อแยกชั้นแล้ว ยางแผ่นจะถูกอัดเป็นก้อน (Bale) ก้อนละ 100 กิโลกรัม หรือ 113 กิโลกรัม (250 ปอนด์) โดยมีการเคลือบก้อนยางด้วยแป้งหรือทัลคัม เพื่อป้องกันการติดกันของก้อนยาง

##### 1.2 ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air dried sheets, ADS)

ยางแผ่นผึ่งแห้ง เป็นยางแผ่นที่ทำมาจากน้ำยาง ได้เป็นแผ่นแล้วมาตากให้แห้ง ด้วยอากาศร้อนหรือให้ลมร้อนที่ปราศจากควันไฟ บางครั้งอาจมีการชุบสารเคมีป้องกันเชื้อรา เช่น พาราไนโตรฟีนอล เป็นต้น การไม่รมควัน ทำให้ยางไม่เป็นสีคล้ำ ยางแผ่นไม่รมควัน นิยมใช้การทำยางรัดของหรือพื้นรองเท้า

##### (2) ยางเครฟ (Crepe rubbers)

ยางเครฟ เป็นยางแผ่นชนิดหนึ่ง ที่ทำโดยการเอาก้อนยางมารีดในเครื่องเครฟ ซึ่งเป็นลูกกลิ้งสองลูกหมุนเข้าหากัน ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ผิวของลูกกลิ้งจะกลิ้งเป็นดอกข้าวหลามตัด ขณะที่มีการรีดแผ่นมีการเปิดน้ำเพื่อชะล้างสิ่งสกปรกที่อยู่บนผิวยางออกไป

ยางเครฟที่ดีที่สุด คือ ยางเครฟขาว (Pale crepe) ทำมาจากน้ำยางที่แยกสี หรือฟอกสีให้หมดไป ทำให้ได้ยางที่มีสีจาง ส่วนยางเครฟอื่นๆ อาจทำมาจากยางก้อน เช่น ยางก้นถ้วย หรือยางติดเปลือกไม้ เป็นต้น เป็นยางเกรดที่สู้อยางแผ่นรมควันไม่ได้

### (3) ยางแท่ง (Block rubbers)

ยางแท่ง เป็นยางที่จัดทำให้มีรูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาดประมาณ 675 x 330 มิลลิเมตร หนาประมาณ 175 มิลลิเมตร น้ำหนักแต่ละแท่งเท่ากับ 33.33 กิโลกรัม

ยางแท่งเตรียมโดยการนำยางมารีดให้เป็นแผ่น ด้วยเครื่องรีดเครฟ ขณะรีดมีการชะล้างด้วยน้ำให้สิ่งสกปรกออกไปด้วย ในที่สุดทำการตัดย่อยแผ่นยางให้เป็นเม็ดเล็กขนาดประมาณ 2-4 มิลลิเมตร ใส่งไปในอ่างน้ำเพื่อชะล้างสิ่งสกปรกอีกครั้งหนึ่ง แล้วนำยางดังกล่าวไปใส่ในกระบะนำไปอบให้แห้งในเตาอบอากาศร้อน แล้วนำมาอัดให้เป็นแท่ง การย่อยยางให้เป็นชิ้นเล็กๆเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมาก ยางจะได้แห้งเร็ว

ยางแท่งที่ทำมาจากน้ำยาง มีคุณภาพดี มักจะมีสีสวย และมีความสกปรกน้อย ส่วนยางแท่งที่มีคุณภาพรองลงมา ทำมาจากยางแห้ง เช่น ยางแผ่น หรือ เศษยางติดกันด้วย เป็นต้น

ยางกำหนดสมบัติหรือยางทีเอสอาร์ (Technically Specified Rubber, TSR) คือยางที่มีการกำหนดมาตรฐาน ให้มีสมบัติเฉพาะคงที่และมีมาตรฐาน ซึ่งมีการจำแนกเป็นหลายประเภทตามประเทศผู้ผลิตยางธรรมชาติ เช่น

- ยางเอสเอ็มอาร์ (Standard Malaysian Rubber, SMR) กำหนดโดยประเทศมาเลเซียเป็นประเทศแรกในปี ค.ศ.1965

- ยางเอสทีอาร์ (Standard Thai Rubber, STR) กำหนดโดยประเทศไทย

- ยางเอสไออาร์ (Standard Indonesian Rubber, SIR) กำหนดโดยประเทศอินโดนีเซีย

การกำหนดสมบัติและมาตรฐานของยางธรรมชาติเป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากสะดวกต่อผู้ใช้ยาง สามารถควบคุมสมบัติของยางธรรมชาติบางประการได้ ทำให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติคงที่ได้

#### 2.1.1.2 น้ำยางข้น (Concentrated latex)

น้ำยางข้น มีลักษณะเป็นของเหลว มีเนื้อยางอยู่ประมาณ 60% นิยมเตรียมโดยการนำน้ำยางสดมาเซนตริฟิวจ์ (Centrifuging) แยกเอาน้ำออกไป

น้ำยางข้นแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ ตามปริมาณแอมโมเนีย คือ

- น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง มีปริมาณแอมโมเนียร้อยละ 0.7

- น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ มีปริมาณแอมโมเนียร้อยละ 0.2 ร่วมกับสารเก็บรักษาอื่นๆ

น้ำยางข้นต้องมีการระเหยเอาน้ำออกไป เมื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำยางเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาไม่เกิน 2 มิลลิเมตร เว้นแต่ผลิตภัณฑ์มีรูพรุน ซึ่งสามารถระเหยเอาน้ำออกง่าย ตัวอย่าง ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางได้แก่ ถุงมือยาง ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย เป็นต้น

## 2.1.2 สมบัติของยางธรรมชาติ

### 1. การบดและการผสมสารเคมี

ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง และความหนืดของยางธรรมชาติจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเก็บเพิ่มขึ้น ถึงแม้จะเป็นชนิดเกรดความหนืดคงที่ก็ตาม (CV grade) ดังนั้นยางธรรมชาติจำเป็นต้องมีการบดยางเสียก่อนที่จะผสมสารเคมีอื่นๆเข้าไปซึ่งสิ่งนี้เป็นข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับยางสังเคราะห์ที่สามารถผสมสารเคมีลงไปได้โดยไม่ต้องบดยางเสียก่อน

การบดยางธรรมชาติแต่ละครั้งจะทำให้ยางมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง ทำให้ยางนิ่มลงไปเรื่อยๆ ดังนั้น ในกระบวนการผลิตใดๆ ที่มีการบดหรือรีดยางซ้ำหลายๆครั้ง จะทำให้ยางที่ได้มีนิ่มเกินกว่าความต้องการ จะก่อให้เกิดปัญหาในการแปรรูปตามมา ดังเช่น

ก) สารเคมีที่จะผสมเข้าไปในยางที่นิ่มเกินไป จะกระจายตัวไม่ดี โดยเฉพาะสารเคมีที่ผสมยาก ได้แก่ เขม่าดำ ซิลิกา หรือ ซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น

ข) อากาศจะขังไว้ในยางมาก ก่อให้เกิดรูพรุนของฟองอากาศขณะบดผสม ไม่อาจจะรีดออกไปขณะการรีดแผ่น

ค) ในกระบวนการอัดรีด จะทำให้ยางห้อยย้อยเสียรูปได้ง่ายขึ้น

ง) การอัดเข้าจะเกิดอากาศขังไว้ในยางมากเกินไป

การเลือกยางชนิดความหนืดคงที่ จะช่วยป้องกันปัญหานี้บางส่วน ส่วนในกรณีที่ต้องการให้ยางนิ่มมากๆ เช่น การนำยางไปทำเป็นสารละลาย การทำยางฟองน้ำ จะต้องบดยางให้นานเป็นพิเศษ

ยางธรรมชาติ สามารถพันลูกกลิ้งได้ง่ายและเร็ว เกะติดลูกกลิ้งแน่น ไม่มีปัญหาในการผสมสารเคมีเข้าไปในยางขณะอยู่บนลูกกลิ้ง

### 2. การประกอบชิ้นส่วนยาง

ยางธรรมชาติขณะที่ยังไม่เชื่อมโยง มีสมบัติที่ดีก็คือ มีความแข็งแรงขณะไม่เชื่อมโยงสูง (Green strength) และมีความเหนียวติดกันสูง (building tack) ทำให้เหมาะแก่การทำผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น ยางท่อ สายพาน และยางรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ต้องมีการยึดยางขณะประกอบและต้องปะชิ้นส่วนต่างๆไว้ด้วยกันขณะประกอบ ชิ้นส่วนจากยางธรรมชาติจะยึดเข้ารูปได้ดี และจะนำมาปะติดกันได้เองโดยไม่ต้องใช้สารเพิ่มการติดหรือตัวทำละลายเช็ดช่วยเลย

### 3. การเชื่อมโยง

ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาดที่อุณหภูมิสูงดี ทำให้การแกะยางออกจากเบ้าทำได้ง่าย โดยผลิตภัณฑ์จะไม่เสียหายมาก ถ้าหากจำเป็นที่จะต้องยึดขณะถอดแบบ ยางธรรมชาติสามารถเชื่อมโยงได้รวดเร็วที่อุณหภูมิปานกลาง เช่นที่ 150 °C เป็นต้น ทำให้สามารถใช้สารตัวเร่งปกติ และใช้ปริมาณน้อยได้ ยางธรรมชาติเชื่อมได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น ไม่ควรที่จะใช้อุณหภูมิ

สูงเกินไปในการเชื่อมโยง เช่น ที่อุณหภูมิสูงเกิน 180 °C เป็นต้น การเชื่อมโยงให้สูงเกินไป จะทำให้สมบัติของยางตกลง เช่น ค่าความต้านทานต่อแรงดึง มอดุลัส และความแข็งลดลง

### 2.1.3 สมบัติของยางเชื่อมโยง

#### 1. ความแข็ง

ยางธรรมชาติสามารถเชื่อมโยงให้มีความแข็งต่างๆกันได้มาก ตั้งแต่ยางที่นิ่มมากไปจนถึงยางที่มีความแข็งมาก การปรับความแข็งของยางทำได้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติมหรือโดยการเปลี่ยนปริมาณกำมะถัน ในช่วงของการใช้กำมะถันปริมาณ 10-20 phr จะให้ยางที่มีความแข็งคล้ายหนัง สำหรับงานกระเบื้องยางปูพื้นและยางลูกกลิ้ง จะมีความแข็งแรงต่ำและเสื่อมสภาพได้ง่าย

#### 2. ความทนทานต่อแรงดึง

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ ทำให้สามารถตกผลึกได้เมื่อดึง ดังนั้นจึงทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงสูง และความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง แม้ไม่มีสารตัวเติมยังมีความแข็งแรงสูงถึงประมาณ 30 เมกะปาสกาล (MPa) สมบัตินี้ทำให้ยางธรรมชาติ มีความเหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ที่มีความบาง นิ่ม และแข็งแรงได้ เช่น ถุงมือผ่าตัด ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย สายยางยืด และยางรัด เป็นต้น

เนื่องจากยางธรรมชาติมีความแข็งแรงในตัวเองสูง ทำให้สามารถใช้สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรงได้ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตและดินขาว ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความแข็งแรงเป็นสมบัติหลัก เช่น ยางรองพื้นรถ ยางปูพื้น และยางรองขาเก้าอี้ เป็นต้น ทำให้ยางธรรมชาติได้เปรียบในด้านต้นทุนการผลิต สำหรับการใส่สารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพที่มีราคาแพง เช่น เขม่าดำและซิลิกา จะใช้เมื่อต้องการความแข็งแรงสูงเท่านั้น เช่น ดอกยางรถยนต์ พื้นและเส้นรองทำคุณภาพสูง ยางหุ้มสายพานลำเลียงที่ใช้ลำเลียงสารที่ทำให้ยางมีความสึกหรอสูง เช่น แร่โลหะหรือกรวด เป็นต้น

#### 3. ความสามารถในการยืด

ยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม จะสามารถยืดได้ถึงประมาณ 1000 % หรือมากกว่านั้น ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติจะลดลงตามปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น และตามปริมาณของพันธะที่เชื่อมโยง สมบัติในการยืดได้สูงนี้ ทำให้ยางธรรมชาติสามารถใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดสูง เช่น เส้นยางยืด ยางรัดของ และลูกโป่ง เป็นต้น

#### 4. ความต้านทานต่อการฉีกขาด

ยางธรรมชาติมีความสามารถในการตกผลึกได้ดี ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ ยกเว้นยางพอลิยูรีเทน ที่เชื่อมโยงพันธะด้วยไอโซไซยานเนต ความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อใส่สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพพร้อมด้วย

## 5. ความสามารถในการกระเด็นตัวและฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

ยางธรรมชาติมีการกระเด็นตัวสูงกว่ายางอื่นๆ ยกเว้น ยางบิวตะไดอิน เมื่อไม่มีสารตัวเติม จะมีการกระเด็นตัวสูงกว่ายางธรรมชาติ เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น การกระเด็นตัวจะลดลง การกระเด็นตัวสูงของยางธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่า ยางธรรมชาติเมื่อได้รับแรงกระทำจะไม่สะสมพลังงานไว้ในยาง ทำให้ความร้อนสะสมในยางธรรมชาติน้อยกว่ายางอื่นๆ จึงเหมาะสมในการใช้ทำดอกยางรถบรรทุก ซึ่งมีความหนาและมีการถ่ายเทความร้อนยาก จึงต้องเลือกใช้ยางที่สะสมความร้อนต่ำแบบยางธรรมชาติเท่านั้น

การกระเด็นตัวสูงและ ฮิสเทอรีซิสต่ำ (Hysteresis loss) ของยางธรรมชาติ สามารถทำให้ลดลงได้โดยการเติมสารตัวเติม ส่งผลทำให้สามารถเตรียมผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ ที่มีสมบัติการกระเด็นตัวต่างๆ กันได้

## 6. การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

ยางธรรมชาติมีความสามารถในการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากยางธรรมชาติมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ประมาณ  $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นจึงมีความเป็นยางที่อุณหภูมิต่ำดีกว่ายางทั่วไป ยกเว้น ยางบิวตะไดอิน และยางซิลิโคน เท่านั้น การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ จะใช้ได้ในช่วงสั้นๆ แต่ถ้าเป็นเวลานาน เช่น มากกว่า 1-2 วัน จะเกิดการตกผลึกได้ การเติมน้ำมันลงในยางธรรมชาติจะทำให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิมได้

## 7. ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ

พันธะคู่ที่ว่องไวในปฏิกิริยาซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้อย่างรวดเร็ว เมื่อใช้กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยง แต่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) และโอโซน ( $\text{O}_3$ ) ได้เช่นเดียวกัน โดยทั่วไปยางธรรมชาติไม่เหมาะสมกับงานหลายชนิดที่ต้องการ ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงและมีโอโซนด้วย เพื่อที่จะให้ยางมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพดีขึ้น จำเป็นที่จะต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่อออกซิเจน (Antioxidant) และสารป้องกันการเสื่อมต่อโอโซน (Antiozonant) ทำให้ยางคงรูปในระยะเวลาสั้นที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไป อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติที่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพแล้ว ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพก็ยังไม่ดีเท่ากับยางสังเคราะห์

## 8. ความต้านทานต่อความร้อน

การใช้งานของยางธรรมชาติค่อนข้างจำกัด ในภาวะที่มีผลต่ออายุการเสื่อมของยาง ทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลานาน โดยเฉพาะยางที่มีความหนาน้อย ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับบรรยากาศเป็นบริเวณกว้าง และไม่ใช้ในกรณีที่ต้องยึดยางในบรรยากาศที่มีโอโซนอยู่ การทำให้ยางธรรมชาติทนทานต่อความร้อนดีขึ้น อาจต้องทำทั้ง 3 วิธี พร้อมๆ กัน คือ ก) ระบบและวิธีเชื่อมโยง ข) ระบบสารตัวเติม และ ค) ระบบสารป้องกันการเสื่อมสภาพ

## 2.2 การผสมยาง [3]

ขั้นตอนแรกในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ก่อนเริ่มกระบวนการผลิต จำเป็นต้องมีการออกสูตรยาง (Rubber formulation) คือ การกำหนดชนิด ปริมาณยาง และสารเติมแต่งต่างๆ ที่จะผสมเป็นยางผสมสูตร ซึ่งมีผลโดยตรงกับสมบัติต่างๆ ของยาง

- การกำหนดสัดส่วนปริมาณของสารต่างๆ ในสูตรยางจะกำหนดเป็น “phr” (Parts per hundred of rubber) หรือส่วนในร้อยส่วนของยาง น้ำหนักขององค์ประกอบ phr นี้จะเป็นน้ำหนักหน่วยใดก็ได้ เช่น กรัม กิโลกรัม หรือปอนด์ เป็นต้น เช่น การใช้กรดสเตียริก 1 phr จะหมายถึงถ้ามียาง 100 กิโลกรัม จะใช้กรดสเตียริก 1 กิโลกรัม

- ปกตินิยมเขียนสูตรยาง เรียงตามลำดับการผสมยาง เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน

- ก่อนจะชั่งสารเคมีและยางต้องคำนวณน้ำหนักรวมของยางผสมสูตรที่เหมาะสมกับเครื่องจักรที่ใช้งาน สามารถใช้ในการคำนวณราคาต้นทุนการผลิต ต่อน้ำหนักของยางเพื่อให้ได้สูตรที่ต้องการ การผสมยางหรือการคอมปาวด์ (Rubber compounding) เป็นขั้นตอนการผสมยางดิบที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยงกับสารเติมแต่งต่างๆ ของยาง องค์ประกอบสำคัญของยางผสมสูตรหรือยางคอมปาวด์ ได้แก่

- 1) ยาง (Elastomer) เป็นองค์ประกอบหลักสามารถเลือกใช้ได้ในหลายรูป เช่น ยางดิบ ยางมาสเตอร์แบตช์ (Masterbatches) หรือยางผสมสูตรสำเร็จ ยางผสมน้ำมันสน ยางผสมเขม่าดำ ยางรีเคลม (Reclaimed rubber) หรือ ยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer) เป็นต้น

- 2) สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) เช่น กำมะถัน เปอร้ออกไซด์ ออกไซด์ของโลหะ ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางสายโซ่ตรงให้เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง

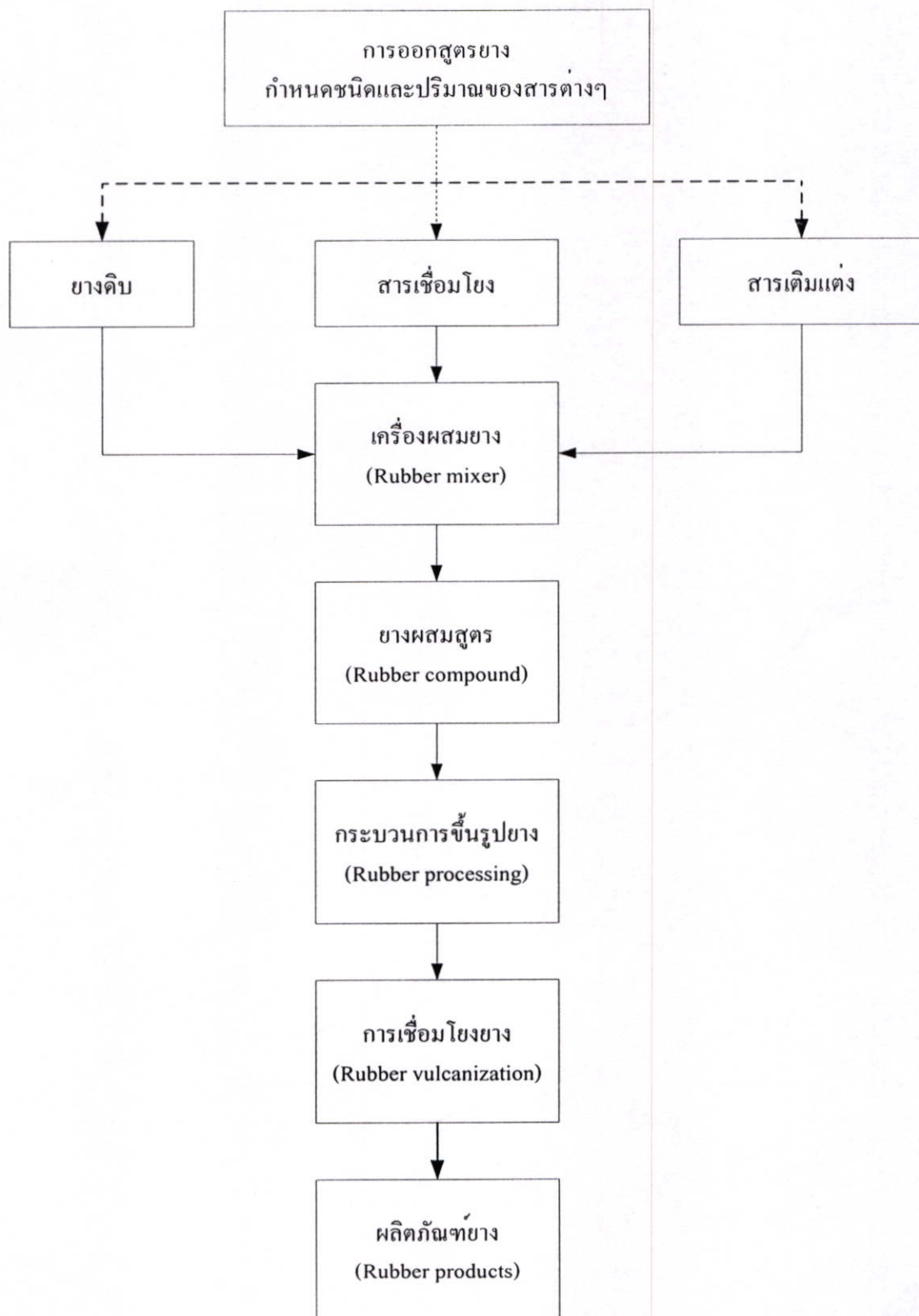
- 3) สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) ทำหน้าที่ช่วยสารเชื่อมโยง ทำให้มีอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเร็วขึ้น ลดเวลาเชื่อมโยง ทำให้เกิดการเชื่อมโยงอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้สารเชื่อมโยงน้อยลง นอกจากนี้ยังทำให้สมบัติของยางที่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยงดีขึ้น

- 4) สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง ให้เกิดเป็นสารเชิงซ้อน กับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง ทำให้สารเร่งมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น อัตราเร็วของการเชื่อมโยงสูง เวลาเชื่อมโยงลดลง และช่วยให้สมบัติของยางที่ผ่านการเชื่อมโยงดีขึ้น

- 5) สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) ทำหน้าที่เพิ่มเนื้อ หรือลดต้นทุนให้กับผลิตภัณฑ์ยาง สารตัวเติมบางชนิด นอกจากช่วยลดต้นทุนแล้วยังเพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง เช่น เขม่าดำ ซิลิกา

- 6) สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) ทำหน้าที่เพื่อช่วยปรับปรุงความสามารถในการผสม หรือขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ง่ายขึ้น

- 7) สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) ได้แก่ แอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) แอนติโอโซนแนนท์ (Antiozonant) รวมทั้งสารอื่นๆ ที่ช่วยลดการเสื่อมสภาพของยางจากภาวะ



รูปที่ 2.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง [3]

แวดล้อม เช่น แสงแดด ความร้อน รังสียูวี

- 8) พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) คือ สารที่เติมเพื่อเพิ่มความนิ่มหรือความยืดหยุ่นของยาง
- 9) สารหล่อลื่น (Lubricants) เป็นสารช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ หรือหล่อลื่นระหว่างเครื่องผสมกับวัสดุ ช่วยกระบวนการผลิตให้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อย่างได้ง่ายขึ้น
- 10) สารเติมแต่งอื่นๆ (Miscellaneous ingredients) เติมเพื่อเพิ่มสมบัติบางประการ เช่น
  - สารหน่วง (Retarders) ใส่เพื่อป้องกันการเชื่อมโยงก่อนกำหนดในขณะเก็บ หรือระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้เกิดการเชื่อมโยงช้าลง และมีเวลาเพียงพอในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์
  - สารให้สี (Colorants) ทำหน้าที่เปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ให้มีสีสันสวยงาม
  - สารให้ฟอง (Blowing agent) ใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุน มีโครงสร้างแบบเซลลูลาร์ เช่น ยางฟองน้ำ โฟม
  - สารให้กลิ่น (Odorants) เป็นสารที่เติมลงไปในยาง เพื่อให้มีกลิ่นหอม หรือระงับกลิ่นของยาง
  - สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) ช่วยเพิ่มสมบัติการยึดติดที่ผิวหน้ายาง ให้เหนียวและยึดติดกับวัสดุอื่น หรือยางด้วยกันเองได้ดีขึ้น

การผสมยาง มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตยาง และมีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางหากผสมยางไม่ดี หรือไม่มีประสิทธิภาพอาจทำให้สารเติมแต่งไม่กระจายตัว เกิดการเชื่อมโยงก่อนเวลา ทำให้ไม่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการ เครื่องผสมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางมีหลายชนิด ได้แก่ เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เครื่องผสมภายใน (Internal mixer) เครื่องผสมแต่ละชนิดมีหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดเล็กใช้ในห้องปฏิบัติการ หรือมีขนาดใหญ่มากสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้งมีข้อดีคือราคาถูก ใช้งานง่าย นิยมใช้แพร่หลาย แต่ใช้เวลาผสมนานกว่า และต้องใช้แรงงานผู้ผสมมากกว่า เทียบกับเครื่องผสมแบบปิดซึ่งมีราคาแพง แต่ให้แรงเนียนมากกว่า เกิดการกระจายตัวในการผสมดีกว่า และใช้เวลาในการผสมน้อยกว่าและใช้เวลาในการผสมน้อยกว่า นอกจากนี้ยังผสมยางแต่ละครั้งได้ในปริมาณมากกว่า

### 2.2.1 เครื่องผสมยางแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

เครื่องผสมยางแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง เป็นเครื่องมือทำให้ยางมีความแข็งแรงลดลงหรือนิ่มลง ในกระบวนการดังกล่าว โมเลกุลยางเกิดการฉีกขาดออกจากกัน ทำให้ขนาดโมเลกุลของยางลดลง การที่ยางนิ่มลงทำให้สามารถแปรรูปได้ รวมทั้งสามารถนำสารเคมีมาผสมในยางให้มีสมบัติตามต้องการได้ การผสมสารเคมีเข้ากับยางที่ใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง กระบวนการที่ทำให้ยางนิ่มมีชื่อเรียกว่า mastication

การที่เครื่องผสมยางสองลูกกลิ้งทำให้ยางนิ่มลงได้ เกิดจากปัจจัยหลายประการ

1. ความเร็วของผิวลูกกลิ้งทั้งสองไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการฉีกขาดได้
2. ออกซิเจนในบรรยากาศ ทำให้โมเลกุลของยางที่ขาดออกจากกันนั้น ไม่อาจกลับมารวมตัวกันใหม่ได้
3. อุณหภูมิของลูกกลิ้ง มีผลทำให้ยางนิ่มช้าหรือเร็วได้ ถ้าให้อุณหภูมิของลูกกลิ้งต่ำยางจะแข็งตัวทำให้ยางไหลผ่านลูกกลิ้งได้ยาก แต่ในกรณีที่ใช้ลูกกลิ้งที่มีอุณหภูมิสูง ยางจะถูกออกซิไดซ์ได้รวดเร็วขึ้น ทำให้ยางนิ่มลงได้รวดเร็วเช่นเดียวกับประสิทธิภาพในการบดยางจะต่ำสุดที่อุณหภูมิประมาณ  $105^{\circ}\text{C}$

อัตราส่วนความเร็วของผิวของลูกกลิ้งทั้งสองเรียกว่า Friction Ratio โดยทั่วไปลูกกลิ้งหน้าจะมีความเร็วช้ากว่าลูกกลิ้งหลัง Friction Ratio ของยางมักอยู่ในช่วง 1:1 ถึง 1.4:1 ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของยาง เช่น ยางธรรมชาติอาจใช้อัตราส่วนความเร็วของผิวของลูกกลิ้งเท่ากับ 1.25:1 เป็นต้น

ลูกกลิ้งบดยางเป็นลูกกลิ้งที่มีความทนทานสูง มีผิวแข็ง ภายในลูกกลิ้งจะมีรู เพื่อให้น้ำเย็นหรือผ่านไอน้ำให้ผิวของลูกกลิ้งมีอุณหภูมิต่ำตามต้องการ เครื่องผสมยางชนิดสองลูกกลิ้งทำงานโดยการนำยางใส่ลงในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง (Nip) ลูกกลิ้งจะบีบและฉีกยาง ในการปฏิบัติงาน ฟังต้องระมัดระวังอันตรายอันเนื่องมาจากลูกกลิ้งอาจหนีบนิ้วมือได้

### 2.3 การเชื่อมโยงยาง (Rubber vulcanization) [3, 4-5]

การเชื่อมโยงยาง สามารถทำได้โดยการเติมสารเคมี คือ สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agents) ได้แก่ กำมะถัน เปอร์ออกไซด์ หรือสารประกอบออกไซด์ของโลหะบางชนิด นิยมใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators) ผสมเข้ากับยางแล้วให้ความร้อน ภายหลังจากกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิสูงทำให้สารเชื่อมโยงต่างๆ เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง โครงสร้างโมเลกุลยาง จะเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่ตรง เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ทำให้มีเสถียรภาพของรูปร่าง และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น การเชื่อมโยงทำให้สมบัติของยางเปลี่ยนไป ดังนี้

- ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น
- โมดูลัสเพิ่มขึ้น
- ความยืดหยุ่นดีขึ้น
- ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ลดลง
- การเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent set) เมื่อได้รับแรง หรือมีเสถียรภาพของรูปร่างลดลง
- การเหนียวติดน้อยลง
- เปลี่ยนโครงสร้างเป็นเทอร์โมเซต (Thermoset) ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ทนต่อความร้อน แสง และการใช้งานนานขึ้น

ปกติการเชื่อมโยงของยางต้องการให้สายโซ่ในโมเลกุล มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ยาง ปริมาณการเชื่อมโยงในยางสามารถระบุได้โดยใช้ ปริมาณการเชื่อมโยง (Degree of crosslink) หรือ ความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) สัมพันธ์กับจำนวนพันธะเชื่อมโยงในหนึ่งหน่วยปริมาตรของยาง ยางที่เกิดพันธะเชื่อมโยงมากจะมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ปริมาณการเชื่อมโยงจะสูงและมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมโยงน้อย

### 2.3.1 ระบบการเชื่อมโยงของยางธรรมชาติ (Vulcanization system)

ยางธรรมชาติสามารถเชื่อมโยงได้หลายระบบด้วยกัน คือ

- ก) ระบบกำมะถันปกติ
- ข) ระบบอีวี
- ค) ระบบเซมิอีวี
- ง) ระบบเปอร์ออกไซด์
- จ) ระบบยูรีเทน

#### 1. ระบบกำมะถันปกติ (Conventional system)

ระบบกำมะถันปกติ เป็นระบบที่มีราคาถูกที่สุดในระบบทั้งหมด แต่ละพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่หลายอะตอม (Polysulphidic crosslink) จึงให้ยางที่มีสมบัติทางเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดี ความต้านทานการฉีกขาดและความต้านการล้าดี มีสมบัติความต้านทานการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก แต่ไม่ต้านการย้อนกลับ (reversion) เช่น สมบัติตกลงเมื่อใช้เวลาเชื่อมโยงมากเกินไป หรือ เสื่อมเนื่องจากถูกออกซิไดซ์

ส่วนสมบัติการต้านทานต่อความร้อน การต้านความเสื่อม และสมบัติการจัดตัวเมื่อได้รับแรงอัด (Compression set) ของยาง จะดีกว่าระบบอื่นๆ

ตัวอย่าง การใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในระบบนี้ในหน่วย phr

กำมะถัน 2-3.5 phr + ซัลเฟนาไมด์ 0.5-1 phr

#### 2. ระบบอีวี (Efficient vulcanizing system)

ระบบนี้ใช้กำมะถันน้อยและสารตัวเร่งมาก หรือใช้ระบบสารให้กำมะถัน ซึ่งทำให้การใช้กำมะถันเชื่อมโยงแต่ละพันธะ มีประสิทธิภาพมาก แต่ละพันธะเชื่อมโยง จะมีกำมะถันอยู่เพียง หนึ่งหรือสองอะตอมเท่านั้น ทำให้งามีสมบัติเชิงกลดีกว่ากำมะถันแบบธรรมดา แต่จะให้งามีความต้านทานการย้อนกลับ(reversion) ดี สมบัติด้านการทนต่อความร้อนดี และมีสมบัติด้านการเสื่อมเมื่อถูกออกซิไดซ์และมีสมบัติการ จัดตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่ดี

ตัวอย่างของระบบการเชื่อมโยงแบบอีวี

ระบบใช้กำมะถันน้อย

กำมะถัน 0.5 phr + CBS (N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide) 6 phr

ระบบใช้สารให้กำมะถัน

TMTD (Tetramethylthiuramdisulfide) 3 phr

### 3. ระบบเซมิอีวี (Semi efficient vulcanizing system)

ระบบนี้ใช้กำมะถันและสารตัวเร่งกึ่งกลางระหว่าง การใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในระบบปกติกับการใช้ในระบบอีวี ทำให้สมบัติเชิงกลและความต้านทานความเสื่อมอยู่ระหว่างทั้งสองระบบ

ตัวอย่างของระบบการเชื่อมโยงแบบเซมิอีวี

กำมะถัน 2.0 phr + ซัลเฟนาไมด์ 1.0 phr

### 4. ระบบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide system)

ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ที่มีแอนติออกซิแดนท์ที่เหมาะสม ให้ยางมีความต้านทานต่ออุณหภูมิสูงที่สุดที่สูงสุดในระบบทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ระบบเปอร์ออกไซด์เวลาในการเชื่อมโยงช้า และสกอร์ชช้า ระยะเวลาการเชื่อมโยงใช้ประมาณ 6 เท่า ของอายุครึ่งชีวิต (Half life) ของเปอร์ออกไซด์ เพื่อไม่ให้มีเปอร์ออกไซด์เหลืออยู่ที่จะทำให้เกิดความต้านทานต่อการออกซิไดซ์ของยางเสียไป แต่ต้องระมัดระวังเกี่ยวกับการใช้แอนติออกซิแดนท์เพราะแอนติออกซิแดนท์บางชนิด ทำให้การใช้เปอร์ออกไซด์ไม่ได้ผล เช่น p-phenylenediamines เป็นต้น

เปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ Dicumyl peroxide ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีความต้านทานการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำไม่ดี และมีสมบัติเชิงกลด้อยกว่าการใช้ระบบกำมะถันปกติ และยังไม่เหมาะในการเชื่อมโยงโดยใช้ไอน้ำ หรืออากาศร้อน เพราะเปอร์ออกไซด์กระตุ้นให้เกิดการออกซิไดซ์ได้

ปริมาณการใช้เปอร์ออกไซด์ ประมาณ 2.5-3 phr ไม่ต้องมีซิงค์ออกไซด์หรือกรดสเตียริกช่วย

### 5. ระบบยูรีเทน

สารเชื่อมโยงยางธรรมชาติชนิดยูรีเทน มีชื่อเรียกทางการค้าว่า Novor ให้ยางเชื่อมโยงที่มีสมบัติมีความต้านทานการย้อนกลับ (reversion) ได้ดี ทนความร้อนสูง และมีสมบัติเชิงกลดี ระบบนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถันได้ การปรับอัตราส่วนระหว่างสองระบบนี้ ทำให้สามารถปรับสมบัติและราคาต้นทุนได้

#### 2.3.2 การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization)

การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน เป็นวิธีที่นิยมที่สุดเนื่องจากกำมะถันมีราคาถูก ละลายได้ดีในยาง ที่สำคัญที่สุดคือยางส่วนมากที่นิยมใช้เป็นยางที่ไม่อิมตัว มีพันธะคู่จำนวนมาก เช่น ยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวตะไดอิน และยางบิวตะไดอิน เป็นต้น จึงว่องไวต่อการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้น (Activators) กำมะถันที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางมี 2 ชนิด คือ

1. กำมะถันชนิดละลาย (Soluble sulfur) เป็นกำมะถันรอมบิก (Rhombic) โครงสร้างเป็นวงแหวน ประกอบด้วยกำมะถัน 8 อะตอม ( $S_8$ ) เกิดการแตกตัวของวงแหวนที่อุณหภูมิสูงประมาณ  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นชนิดที่นิยมใช้ทั่วไป เนื่องจากมีราคาถูก ใช้ในปริมาณน้อย ปกติใช้กำมะถันประมาณ 1-3 phr ถ้าใส่กำมะถันมากเกินไปจะทำให้เกิดการ “บลูม” (Bloom) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่กำมะถันเกิดการแพร่จากภายในออกมาสะสมเป็นผลึกที่ผิวของผลิตภัณฑ์เห็นเป็นรอยคราบสีเหลือง

2. กำมะถันชนิดไม่ละลาย (Insoluble sulfur) เป็นกำมะถันในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ไม่ละลายในตัวทำละลายและยาง ผสมเข้ากับยางได้ยากกว่ากำมะถันชนิดละลาย แต่เมื่อผสมเข้ากันแล้วจะเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนกับยาง ทำให้ไม่เกิดการบลูม จึงนิยมใช้กำมะถันชนิดนี้เมื่อต้องการใส่กำมะถันในปริมาณมาก เช่น ยางชนิดแข็งมาก ข้อจำกัดของกำมะถันชนิดนี้คือมีราคาแพง นอกจากนี้อาจเปลี่ยนโครงสร้างเป็นกำมะถันชนิดละลายได้ที่อุณหภูมิสูงเกิน  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  จึงต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงเกินไป

### 2.3.3 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Crosslinking rate) เร็วขึ้น ทำให้เวลาการเชื่อมโยง (Cure time) เร็วขึ้น การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กำมะถันปริมาณน้อยลง

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงสามารถแบ่งตามมาตรฐาน ASTM [28] เป็น 6 กลุ่มดังนี้

1. ซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamide)
2. ไทเอโซล (Thiazoles)
3. กัวนิดีน (Guanidines)
4. ไดไทโอคาร์บามेट (Dithiocarbamates)
5. ไทยูเรมไดซัลไฟด์ (Thiuram disulfides)
6. ไทยูเรมชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไดซัลไฟด์ (Thiuram other than disulfides)

ยังมีสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอีกสองกลุ่มที่ไม่ได้รวมอยู่ด้วย เนื่องจากมีปริมาณการใช้ที่น้อย และมีความเป็นพิษ ได้แก่ อัลดีไฮด์เอมีน (Aldehyde amines) และไทโอยูเรีย (Thioureas) ในการใช้งานสารเร่งในอุตสาหกรรมยาง อาจใช้สารเร่งมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าจะเป็นสารเร่งหลักหรือสารเร่งปฐมภูมิ (Primary Accelerators) ส่วนสารเร่งที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่าเป็นสารเร่งทุติยภูมิ (Secondary Accelerators)

#### 1. ซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamide)

ตัวเร่งกลุ่มซัลเฟนาไมด์ประกอบด้วยส่วนที่เป็นไทอาโซลและส่วนที่เป็นเอมีน ซัลเฟนาไมด์เป็นสารเร่งชนิดดีเลย์แอคชัน (Delayed-action accelerators) หรือเริ่มเกิดการเชื่อมโยง (Scorch) ช้าเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ทำให้มีเวลาเพียงพอในการเชื่อมโยง นิยมใช้กับยางที่ต้องใช้เวลาผสม

หรือขึ้นรูปนาน เนื่องจากหม้ออัลคิลในโครงสร้างเป็นหม้อใหญ่ให้โปรตอน ช่วยหนองให้จุดเริ่มการเชื่อมโยงช้า ให้ความเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) นาน ซัลเฟนาไมด์ที่นิยมได้แก่

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

TBBS ให้ความเริ่มเชื่อมโยงนานกว่า CBS ทำให้มีความปลอดภัยในการขึ้นรูปอย่างมากกว่า ไม่เกิดการเชื่อมโยงก่อนเวลา นอกจากนี้ TBBS ยังให้ยางที่มีความแข็งแรงมากกว่า CBS อีกด้วย

## 2. ไทเอโซล (Thiazole)

ทั้งไทเอโซลและซัลเฟนาไมด์ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของไทเอโซล เป็นสารตัวเร่งที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากให้ความเริ่มการเกิดการเชื่อมโยง (Scorch) และเวลาการเชื่อมโยง (Cure time) ที่หลากหลาย ไทเอโซลที่นิยมใช้ ได้แก่

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

ทั้ง MBT และ MBTS เกิดปัญหาสกอร์ชก่อนการขึ้นรูป จึงนิยมใช้ร่วมกับสารเร่งชนิดอื่นหรือเป็นสารเร่งทุติยภูมิ (Secondary accelerator) เช่น DPG (Diphenylguanidine)

## 3. กัวนิติน (Guanidines)

ปัจจุบันไม่ค่อยนิยมใช้เป็นสารตัวเร่งหลักหรือสารเร่งปฐมภูมิ (Primary accelerator) เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงช้า นิยมใช้เป็นสารเร่งทุติยภูมิ ใช้ร่วมกับสารเร่งชนิดอื่น กัวนิตินที่นิยมใช้

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

อาจใช้กัวนิตินเพียงอย่างเดียวในกรณีเชื่อมโยงผลิตภัณฑ์ยางขนาดใหญ่หรือหนาที่อุณหภูมิไม่สูงเป็นเวลานาน เพื่อให้การเชื่อมโยงอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งผลิตภัณฑ์

## 4. ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates)

สารเร่งชนิดนี้ถูกเรียกว่าเป็น อัลตราแอคซิลเรเตอร์ (Ultra-accelerator) หรือสารเร่งเร็วยิ่งยวด เนื่องจากเป็นสารเร่งที่เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ให้ความเริ่มการเกิดการเชื่อมโยง (Scorch) สั้น ชนิดที่นิยม ได้แก่

- ZMDC (Zinc dimethyldithiocarbamate)
- ZDEC (Zinc diethyldithiocarbamate)

## 5. ไทยูแรมไดซัลไฟด์ (Thiuram disulfides)

สารเร่งกลุ่มนี้จัดเป็น อัลตราแอคซิลเรเตอร์ (Ultra-accelerator) เช่นเดียวกับไทโอคาร์บาเมต ชนิดที่นิยมใช้ ได้แก่

- TMTD (Tetramethyl thiuram disulfide)
- TETD (Tetraethyl thiuram disulfide)

6. ไทยูเรมชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไดซัลไฟด์ (Thiuram other than disulfides)

สารเร่งกลุ่มนี้ได้แก่

- TMTM (Tatramethyl thiuram monosulphide)
- DPTT (Dipentamethylene thiuram tetrasulphid)

2.3.4 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้น หรือเพิ่มประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น สารกระตุ้นเมื่อเติมลงไปในยางเล็กน้อยจะทำให้มอดุลัสของยางเพิ่มขึ้น สารกระตุ้นที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับกรดสเตียริก เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงานสามารถใช้ได้กับงานทั่วไป ซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็นซิงค์สเตียเรต ซึ่งสามารถละลายในยางได้ และช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง เนื่องจากซิงค์ไอออนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง

1. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นที่เป็นสารอนินทรีย์ที่สำคัญและนิยมใช้ เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น มอดุลัสจะเพิ่มขึ้นและปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ให้มอดุลัสสูงสุดคือมากกว่า 3 phr โดยทั่วไปจะใช้ปริมาณ 3-5 phr นอกจากซิงค์ออกไซด์แล้ว โลหะออกไซด์ตัวอื่นอาจใช้เป็นตัวกระตุ้นในการเชื่อมโยงได้เช่นเดียวกัน โลหะออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพพอที่จะเป็นตัวกระตุ้นได้ในยางธรรมชาติ เรียงตามลำดับความว่องไวดังนี้



2. กรดไขมัน (Fatty acid)

กรดไขมันเป็นสารกระตุ้นอนินทรีย์ที่สำคัญ สำหรับสารเร่งการเชื่อมโยงบางตัว เช่น กรดสเตียริก กรดปาล์มิติก กรดลอริก เป็นต้น กรดไขมันที่ใช้ส่วนมากเป็นของผสมของ กรดอะลิฟาติกอิ่มตัว ที่มีคาร์บอน 12 ถึง 18 อะตอม ปริมาณการใช้กรดไขมันในยางขึ้นกับชนิดของยาง ถ้ายางชนิดใดมีกรดไขมันอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องใส่หรือใส่ปริมาณน้อย สำหรับยางธรรมชาติมีกรดไขมันอยู่ปริมาณเล็กน้อยซึ่งอยู่ในรูปกรดสเตียริก แต่กรดไขมันที่มีอยู่ในยางธรรมชาติมีปริมาณต่างกันมาก ซึ่งทำให้เวลาในการเชื่อมโยงต่างกัน ดังนั้นโดยทั่วไปปริมาณของกรดสเตียริกที่ใช้ในยางธรรมชาติ จะใช้ปริมาณ 1-4 phr เพื่อลด Cure time ที่ต่างกัน

## 2.4 สารเติมแต่งของยางและการเสริมแรง (Rubber additives and Reinforcement) [3, 4-5]

### 2.4.1 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติม หมายถึง สารที่ใส่ลงในยาง เพื่อลดต้นทุนหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น หน้าที่ของสารตัวเติมมีดังนี้

- 1) เพื่อลดต้นทุน
- 2) เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของยาง
- 3) ช่วยในกระบวนการผลิต
- 4) ลดการพองตัวในน้ำมัน
- 5) เพิ่มการนำไฟฟ้า
- 6) เพิ่มอายุการใช้งานของยาง

สารตัวเติมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

- สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิต และช่วยเสริมแรงทำให้ความแข็งแรงของยางสูงขึ้น สารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่สำคัญ เช่น เขม่าดำ ซิลิกา

- สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว แต่ไม่ช่วยเสริมแรงให้กับยาง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว

#### 2.4.1.1 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่สำคัญ และมีปริมาณการใช้มากที่สุด ในด้านอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากเขม่าดำมีราคาถูก เพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง และช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปของยางให้ง่ายขึ้น เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล ลดการหดตัวและการบิดเบี้ยวของผลิตภัณฑ์ แต่มีข้อเสียคือ ผลิตภัณฑ์ยางที่ใส่เขม่าดำจะมีสีดำ

ก) ชนิดของเขม่าดำ สามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ

- เขม่าดำชนิดเฟอร์เนส (Furnace black) เขม่าดำชนิดนี้นิยมใช้ และมีปริมาณการใช้มากที่สุด จะมีลักษณะเป็นก้อนกลม ติดกันอยู่เป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ มีโครงสร้างสูง ขนาดเล็ก (10-100 nm)

- เขม่าดำชนิดเทอร์มอล (Thermal black) จะมีขนาดใหญ่ประมาณ (100-500 nm) ลักษณะเป็นก้อนกลม โครงสร้างน้อยและมีพื้นที่ผิวน้อย

- เขม่าดำชนิดชันแนล (Channel black) เขม่าดำชนิดนี้มีขนาดเล็ก (1-3 nm) มีความเป็นกรด ซึ่งจะหน่วงปฏิกิริยาการเชื่อมโยง

### ข) การแบ่งเกรดและการเรียกชื่อเขม่าดำ

ในอดีตได้มีการแบ่งเกรดและเรียกชื่อเขม่าดำต่างๆ มากมาย โดยมากจะเรียกตามชนิดและความสามารถในการปรับปรุงสมบัติของยาง เช่น

- SAF (Super abrasion furnace)
- HAF (High abrasion furnace)
- FEF (Fast extrusion furnace)

ปัจจุบันมาตรฐาน ASTM D 1765 ได้แบ่งเกรดเขม่าดำตามอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size) และระดับการออกซิเดชันบนพื้นผิว (Degree of surface oxidation) ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อความเร็วในการเชื่อมโยงยาง โดยใช้อักษร “N” หรือ “S” แล้วตามด้วยเลขสามหลัก เช่น N110 N660 S330 เป็นต้น หลักการเรียกชื่อมีดังนี้

- อักษรนำ “N” มาจาก “Normal-curing” ใช้เรียกเขม่าดำชนิดเฟอร์เนส (Furnace black) และเขม่าดำชนิดเทอร์มอล (Thermal black)

- อักษรนำ “S” มาจาก “Slow-curing” ใช้เรียกเขม่าดำชนิดชันแนล (Channel black) และเขม่าดำชนิดเฟอร์เนสที่ถูกออกซิไดซ์ (Oxidized furnace black)

- ตัวเลขหลักแรกแสดงถึงขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size) ตัวเลขน้อยใช้แทนอนุภาคนขนาดเล็ก ตัวเลขมากใช้แทนอนุภาคนขนาดใหญ่แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.1

- ตัวแรกหลักที่ 2 และ 3 แสดงถึงโครงสร้าง (Structure) ตัวเลขน้อยใช้แทนเขม่าดำที่มีโครงสร้างน้อย ตัวเลขมากใช้แทนเขม่าดำที่มีโครงสร้างมาก

ตารางที่ 2.1 การจำแนกเกรดเขม่าดำตามมาตรฐาน ASTM D 1765 [3]

ASTM number	Average particle diameter(nm)	Old classification
900-999	201-500	MT
800-899	101-200	FT
700-799	61-100	SRF
600-699	49-60	GPF HMF
500-599	40-48	FEF
400-499	31-39	FF
300-399	26-30	HAF EPC
200-299	20-25	ISAF
100-199	11-19	SAF
000-099	1-10	-

### ก) ปัจจัยของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติการเสริมแรง

- ขนาดของอนุภาค (Size) เขม่าดำยังมีขนาดเล็ก ประสิทธิภาพการเสริมแรงยิ่งสูงขึ้น ทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้น ความทนทานต่อการสึกหรอสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเขม่าดำขนาดเล็ก การผสมเขม่าดำเข้ากับยางยิ่งทำได้ยากขึ้น

- โครงสร้าง (Structure) ผลของโครงสร้างของเขม่าดำที่มีต่อยาง ส่วนใหญ่จะมีผลทางด้าน การแปรรูป เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง ผสมกระจายในยางได้ดี ทำให้ยางที่ผ่านการอัดรีดมีผิวเรียบ แต่ผสมในยางได้ปริมาณน้อยกว่าเขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำ

- เคมีของพื้นผิว (Surface chemistry) เขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 90-99 ที่เหลือเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน นอกจากนี้ยังมีกำมะถันปริมาณน้อยปนอยู่ด้วย สารเหล่านี้จะให้ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเขม่าดำต่างกัน ซึ่งมีผลต่ออัตราการเชื่อมโยง เขม่าดำที่มีความเป็นด่าง จะเกิดการเชื่อมโยงเร็วกว่าเขม่าดำที่มีความเป็นกรด

- ความเป็นรูพรุน (Porous) ความเป็นรูพรุนของเขม่าดำจะมีผลต่ออัตราการเชื่อมโยง เพราะรูพรุนนี้จะดูดสารเร่งเข้าไปทำให้การเชื่อมโยงช้าลง

#### 2.4.1.2. ซิลิกา (Silica)

ซิลิกา เป็นสารตัวเติมที่เสริมแรงดีที่สุด เมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำอื่นๆ ส่วนข้อดีของ ซิลิกา คือ ช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่น เพิ่มความต้านทานการฉีกขาด ลดความร้อนสะสม เพิ่มความต้านทานการขัดถู เป็นต้น การใช้งานของซิลิกานิยมใช้ ร่วมกับสารคู่ควบ (Coupling agent) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัฏภาค ทำให้สมบัติของยางดี

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ได้จากทั้งธรรมชาติและการสังเคราะห์ สมบัติของซิลิกาขึ้นกับหลายปัจจัยได้แก่

- ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิว
- ปริมาณน้ำในโครงสร้าง (Extent of hydration)
- สมบัติทางกายภาพ เช่น pH องค์ประกอบทางเคมี การดูดซับน้ำมัน เป็นต้น

เนื่องจากซิลิกาประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจน จึงมีหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol group,  $-Si-OH$ ) ชนิดต่างๆ บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำที่สามารถเกาะติดบนพื้นผิว และยังมีผลต่อความเป็นกรดบนพื้นผิวของซิลิกาอีกด้วย

ซิลิกาสามารถแบ่งได้หลายชนิดดังนี้

#### 1. ซิลิกาจากธรรมชาติหรือซิลิกาชนิดบด (Ground silica)

เป็นซิลิกาที่ได้จากธรรมชาติ โดยการขุดจากเหมืองแล้วทำการบดให้มีขนาดเล็ก เป็นผลึกโดยธรรมชาติ ซิลิกาชนิดบดนิยมนำมาใช้เพื่อลดต้นทุน เนื่องจากมีราคาถูกและช่วยเพิ่มสมบัติการทนความร้อน (Heat resistance) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

- ซิลิกาผลึก (Crystalline silica) คือซิลิกอนไดออกไซด์ในรูปผลึกควอตไซต์ (Quartzite) ซึ่งเป็นสินแร่ที่พบมากเป็นอันดับสอง ได้จากการขุดจากเหมืองแล้วทำการล้าง บด และแยกขนาด (ด้วยตะแกรงร่อนหรือลมเป่า) ซิลิกาชนิดนี้มีสิ่งเจือปนสูง มีพื้นผิวที่เกิดจากการแตกหัก ขรุขระ และมีขอบอนุภาคแหลมคม ทำให้มีสมบัติความเสียดทานสูง

- ซิลิกาผลึกเล็ก (Microcrystalline silica) บางครั้งอาจเรียกว่าซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) สามารถผลิตได้ด้วยวิธีการบดเช่นเดียวกับซิลิกาชนิดผลึก แต่จะได้อนุภาคที่มีพื้นผิวเรียบ มีขอบอนุภาคกลมมน ซิลิกาชนิดนี้บดง่าย สามารถใช้ผลิตซิลิกาขนาดเล็กลงมาก (Ultrafine silica)

- ซิลิกาไดอะตอมเมเชียส (Diatomaceous silica) ผลิตจากไดอะตอมไมต์ (Diatomite) ซึ่งเป็นหินอ่อนคล้ายขอสลัคที่เกิดจากซากกระดูกฟอสซิลเรียกว่าไดอะตอม (Diatoms) สามารถผลิตได้จากการบดหินและแยกขนาดด้วยลมหมุน (Cyclone)

## 2. ซิลิกาชนิดสังเคราะห์ (Synthetic silica)

ซิลิกาชนิดสังเคราะห์มีลักษณะเป็นผงสีขาวขนาดเล็ก สามารถแบ่งย่อยได้เป็นสามชนิด คือ ซิลิกาชนิดไอ (Fumed silica) ซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica) และซิลิกาชนิดเจล (Gel silica)

- ซิลิกาชนิดไอ (Fumed silica) เตรียมได้จากปฏิกิริยาทางเคมีในภาวะเป็นไอที่อุณหภูมิสูง เกิดจากซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (Silicontetrachloride,  $\text{SiCl}_4$ ) เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ในตะกิ้งของไฮโดรเจนและออกซิเจน คิวหรือไอของผลิตภัณฑ์จะควบแน่นกลายเป็นก้อนซิลิกาขนาดเล็กลงมาก (ประมาณ 20 nm) ติดที่ผิวลูกกลิ้งหมุน

- ซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica) สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาในภาวะของเหลว ซึ่งมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าในภาวะไอ ซิลิกาชนิดนี้ได้จากการตกตะกอนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) หรือของผสมของกรดเกลือแร่กับคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ )

- ซิลิกาชนิดเจล (Gel silica) การตกตะกอนซิลิกาในภาวะกรดเป็นเวลานาน จะได้สารไฮโดรเจล (Hydrogel) หรือเจลซิลิกาที่เป็นโครงสร้างของอนุภาคคอลลอยด์ของซิลิกาต่อกันเป็นร่างแหสามมิติ จากนั้นจะทำการชะล้าง ทำให้แห้ง และบดให้มีขนาดเล็ก

### 2.4.2 สารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง (Antidegradants)

การเสื่อมของยาง ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและระบบการเชื่อมโยงยาง การเสื่อมของยางแบ่งได้เป็น 6 ประเภท ดังนี้

- เสื่อมสภาพเนื่องจากตั้งทิ้งไว้นาน
- เสื่อมสภาพเนื่องจากมีโลหะหนักปะปนในยาง
- เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

- เสื่อมสภาพเนื่องจากแสง
- เสื่อมสภาพเนื่องจากการหักงอไปมา
- เสื่อมสภาพเนื่องจากบรรยากาศ

ออกซิเจนและโอโซนเป็นตัวการสำคัญในการเสื่อมสภาพของยาง โดยโลหะหนัก ความร้อน แสง และความเครียดในยางเป็นตัวเร่งให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น สารป้องกันการเสื่อมสภาพสามารถแบ่งได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆ คือ

### 1. สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant)

เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากออกซิเจน ( $O_2$ ) เข้าทำปฏิกิริยากับยาง แบ่งได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ

- สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดเปื้อนสี (Staining antioxidant) เป็นสารประกอบเอมีน (Amine) หรืออนุพันธ์ของเอมีนมีประสิทธิภาพในการป้องกันออกซิเจนดี อย่างไรก็ตามแอนติออกซิแดนท์ชนิดนี้สีจะเปื้อนลงบนผลิตภัณฑ์ยางทำให้ไม่สวยงาม ซึ่งนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีดำ

- สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดไม่เปื้อนสี (Non- Staining antioxidant) เป็นสารประกอบฟีนอล (Phenol) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ยางทั่วไปที่ไม่ใช่สีดำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสีสวยและไม่เปลี่ยนสีผลิตภัณฑ์ยาง

### 2. แอนติโอโซนแนนท์ (Antiozonant)

เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากับโอโซน ( $O_3$ ) หรือปฏิกิริยาโอโซนชัน ปกติปริมาณโอโซนมีปริมาณน้อยประมาณ 3-4 ppm แต่มีผลต่อยางโดยทำให้ยางเกิดรอยแตก

### 3. ขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin wax)

เมื่อเติมขี้ผึ้งลงในยางผสมสูตร ขี้ผึ้งจะซึมออกมาที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนทำปฏิกิริยากับยาง

### 2.4.3 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

ทำหน้าที่เพิ่มความนิ่มให้แก่ยาง และช่วยลดความหนืดในกระบวนการผลิต ซึ่งแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง เป็นการเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free volume) ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ง่ายและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง

หน้าที่ของพลาสติไซเซอร์ คือ

1. ช่วยให้กระบวนการแปรรูปยางง่ายขึ้น
2. เปลี่ยนแปลงสมบัติความนิ่มหรือความแข็งของยาง
3. ลดต้นทุน
4. ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี
5. ลดพลังงานในกระบวนการขึ้นรูปยาง

ชนิดของพลาสติกไซเซออร์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่

1. **ยางสน** ผลิตภัณฑ์ในรูปของยางสนในรูปของน้ำมัน ได้จากการกลั่นไม้สนได้น้ำมันที่มีความหนืดต่างกัน ใช้เป็นสารผสมเข้าไปในยางทำให้ยางมีความเหนียวติดกันเพิ่มขึ้น (Tack) ความเหนียวนี้จะคงอยู่ในยางแม้จะตั้งทิ้งไว้ก็ตาม เหมาะในการทำผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องนำชิ้นส่วนต่างๆ มาประกอบเข้าด้วยกัน เช่น การทำยางรถยนต์ เป็นต้น นอกจากนั้นยางสนยังช่วยให้การกระจายของเขม่าดำในยางดีขึ้น และสารฟีนอลิกในยางสนจะทำหน้าที่เป็นแอนติออกซิแดนท์ในยางได้ แต่เนื่องจากมีสีน้ำตาลทำให้ไม่เหมาะกับการใช้ยางที่ต้องการสีสด

2. **ผลิตภัณฑ์จากถ่านหิน (Coal tar)** เคยใช้เป็นสารทำให้นิ่ม(Softener) สำหรับยางในระยะแรก แต่ระยะหลังไม่นิยมใช้อาจเนื่องมาจากสมัยก่อนผลิตออกมามีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ และมีฤทธิ์เป็นกรดทำให้ยางเชื่อมโยงช้า

### 3. เรซินและกรดอินทรีย์

- ไฮโดรคาร์บอนเรซิน เป็นสารช่วยในการแปรรูปยางอย่างหนึ่ง มี  $T_g$  สูงทำให้ความหนืดลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงในขณะผสมยางหรือขณะเชื่อมโยง ดังนั้นเรซินชนิดนี้ใช้ช่วยในการแปรรูปยางและช่วยให้ยางไหลเต็มแม่พิมพ์ได้ดีในขณะการขึ้นรูป การใช้เรซินไม่ทำให้ความแข็งแรงของยางลดลง เพราะขณะร้อนจะเป็นของเหลวและเมื่อเย็นถึงอุณหภูมิห้องกลายเป็นของแข็งอีกครั้งหนึ่ง การใช้งานของเรซินขึ้นอยู่กับส่วนประกอบและโครงสร้างทางเคมีของเรซิน ตัวอย่างเช่น เรซินโดยทั่วไปจะช่วยให้ยางมีความเหนียวติดกันดีขึ้น และถ้าเรซินมีโครงสร้างเป็นอะโรมาติกมากจะมีผลต่อการเสริมประสิทธิภาพของยาง แต่ถ้ามีโครงสร้างเป็นอะลิฟาติกมากจะช่วยให้มีความเหนียวดีขึ้น ทำให้สามารถเลือกใช้ในกรณีผสมยางในส่วนองผ้าใบในยางรถยนต์ รวมทั้งสารประเภทกาวด้วย และถ้ามีโครงสร้างกิ่งๆ อะโรมาติกและอะลิฟาติกจะมีสมบัติทั้งความเหนียวและประสิทธิภาพด้วย

- **ปิโตรเลียมเรซิน** ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียม เรซินที่ได้มีทั้งส่วนที่เป็นอะโรมาติกน้อยจนถึงมากหรือเป็นอะลิฟาติก อะลิฟาติกส่วนใหญ่ใช้เป็นสารเพิ่มการยึดติด (Tackifier) ทั้งนี้เพราะมีบางส่วนในอะลิฟาติกที่ไม่ละลายเข้ากันกับยางทำให้มีผลทางความเหนียวติดของยาง ส่วนอะโรมาติกเรซินจะเป็นตัวช่วยในการแปรรูป

- **ฟีนอลิกเรซิน** เรซินจากฟีนอลเป็นเรซินชนิดหนึ่งที่ใช้มากในอุตสาหกรรมยาง สมบัติจะแตกต่างกันไปตามโครงสร้าง ตัวอย่างของเรซินจากฟีนอล ได้แก่ อัลคิลฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Alkyl phenol formaldehyde resin) ซึ่งแบ่งเป็นสองชนิดคือ ชนิดไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Non-reactive) และชนิดว่องไวต่อปฏิกิริยา (Active)

4. **น้ำมันปิโตรเลียม** เป็นน้ำมันที่เข้ากันได้ดีกับยาง ลดความหนืดลง ไม่ระเหยและสีไม่ตก น้ำมันประเภทนี้ทำให้สมบัติของยางมีผลตรงกันข้ามกับการใช้สารตัวเติม คือ ทำให้ความแข็งแรงและมอดูลัสลดลง น้ำมันที่ใช้กับยางประกอบด้วย คาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตาม

มีกำมะถัน ออกซิเจนและไนโตรเจนปนอยู่เล็กน้อย ด้วยเหตุนี้น้ำมันมีโครงสร้างของคาร์บอนและไฮโดรเจนแตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

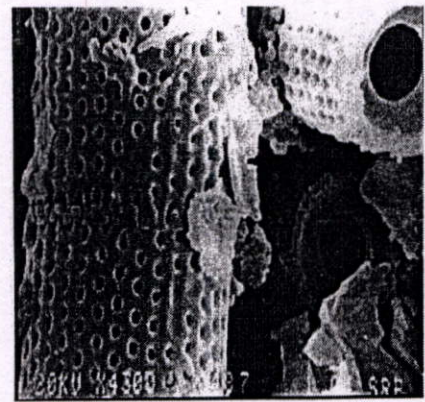
- น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) หมายถึง น้ำมันที่มีพันธะคู่ สีกดำ ความหนืดสูงมาก
- น้ำมันแนฟทาติก (Naphthanic oil) หมายถึง น้ำมันที่ไม่มีพันธะคู่ ความหนืดปานกลาง
- น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic oil) หมายถึง น้ำมันที่มีโซ่กิ่ง ไม่มีพันธะคู่ สีขาว ความหนืดต่ำ

5. น้ำมันเอสเทอร์ เป็นเอสเทอร์ของกรดอินทรีย์หรือกรดพอสฟอริก ใช้ในการผสมกับยางชนิดที่ทนน้ำมัน เช่น ยางไนไตรล์ น้ำมันชนิดนี้ทำให้ความแข็งแรงของยางลดลงมากกว่าน้ำมันปิโตรเลียม ตัวอย่างน้ำมันเอสเทอร์ ได้แก่ สารประกอบ Phthalate

#### 2.4.4 ไคอะทอไมต์ (Diatomaceous earth or Diatomite) [6,7]

ไคอะทอไมต์หรือที่เรียกทั่วไปว่าดินเบา (Diatomite) เป็นแร่ธาตุสาหร่ายที่เกิดจากการทับถมของซากไดอะตอม ซึ่งเป็นพืชเซลล์เดียวขนาดเล็กมากตั้งแต่ 2-2000 ไมครอน มีผนังเป็นซิลิกาประกบกัน พบได้ในแหล่งน้ำทั่วโลก ทั้งน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม มีอยู่ประมาณ 12000-16000 ชนิด บางชนิดว่ายน้ำได้ แต่บางชนิดต้องอาศัยกระแสน้ำพัดพาไป เมื่อตายลงเปลือกที่เป็นซิลิกาจะตกตะกอนทับถมกันเป็นจำนวนมากจนเกิดเป็นแหล่งไคอะตอม

ดินเบา มีโครงสร้างประกอบด้วยโพรงเล็กๆ อยู่ทั่วไป มีเนื้อหยาบพรุนคล้ายชอล์กและมีปริมาณซิลิกาสูงถึงประมาณร้อยละ 85 ขึ้นไป ในประเทศไทยพบมากแถบจังหวัดลำปาง



รูปที่ 2.3 SEM Micrographs แสดงโครงสร้างไคอะทอไมต์ กำลังขยาย 20000 เท่า [6]

ในการผลิตดินเบาจากแหล่งไคอะตอมจะถูกนำมาบดและเผาให้เป็นเถ้า โดยจะมีความละเอียด (Fineness) และความบริสุทธิ์แตกต่างกันไป ดินเบาที่บริสุทธิ์จะมีสีขาว แต่ถ้ามีสิ่งเจือปนมากจะมีสีเทา สีออกน้ำตาลหรือเขียว มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 92-272 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

Diatom frustules มีสมบัติดังนี้

- เป็น opaline silica ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) ไร้รูปผลึก มีรูปร่างแตกต่างกันมากมาย

- มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก มีพื้นที่ผิวมาก
- เมื่อทับถมกันมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ มีความพรุนสูง
- ความหนาแน่นต่ำ
- เชื้อต่อปฏิกิริยาเคมี

การนำไปใช้ประโยชน์

- ใช้เป็นสารขัดถู (Abrasive) สำหรับขัดภาชนะโลหะได้ดี เพราะมีซิลิกาขนาดเล็กมากอยู่ในเนื้อ

- ใช้ในการกรอง (Filtering) เช่นกรองน้ำตาลและสารกรองอื่นๆ แท่งไดอะทอมไมต์ (Diatomite block) มีความพรุนสูงถึงร้อยละ 90 ของปริมาตรแท่งจึงมีสมบัติในการกรองสูงมาก

- ใช้เป็นตัวเติม (Filler) ในการผลิตสีและการขึ้นรูปพลาสติก

- ใช้เป็นส่วนผสมในการทำกระดาษเพื่อให้เนื้อกระดาษเนียน เช่น ในการทำกระดาษสา

- ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนโดยนำมาอัดเป็นก้อน (block) หรือเป็นแผ่น (board) สามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง  $371^{\circ}\text{C}$  และบางชนิดเมื่อนำมาสร้างพันธะกับใยหิน (asbestos) จะทนอุณหภูมิได้ถึง  $1038^{\circ}\text{C}$

- ทำวัสดุน้ำหนักเบา

- ใช้เป็นวัสดุดูดซับของเสีย

- เป็นสารพองตัวเร่ง (Catalyst support)

คุณภาพของดินเบาที่แหล่งต่างกัน

ดินเบาประกอบด้วย Silica = 89.70% Alumina = 3.72% Red iron oxide = 1.09% และ

Ignition loss = 3.70%

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบของดินเบาที่พบจากแหล่งต่างๆ [6]

แหล่งที่พบ	องค์ประกอบ		
	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
สหรัฐอเมริกา	89.7	3.7	1.1
สเปน	88.6	0.6	0.2
เดนมาร์ก	67.8	10.3	0.9
ลำปาง ประเทศไทย	67-78	11-18	2.12

ประเทศที่ผลิตไดอะทอมไมต์ได้มากที่สุด ได้แก่ สหรัฐอเมริกา โรมาเนีย ฝรั่งเศส เดนมาร์ก และประเทศอื่นๆ ส่วนประเทศไทยพบไดอะทอมไมต์หลายแห่งและพบมากที่สุดที่จังหวัดลำปางแต่การ

นำมาใช้น้อย เพราะมีปริมาณ  $Al_2O_3$  และ  $Fe_2O_3$  สูงจึงควรทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับไคอะทอไมด์ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะด้านมากขึ้น

#### 2.4.5 เชลแล็ก (Shellac) [8,9]

เชลแล็ก (Shellac) ประกอบด้วยพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้จากการสกัดเรซินที่เป็นสารคัดหลั่งจากแมลง *Laccifer lacca* หรือที่รู้จักกันในชื่อว่า ครั่ง ที่พบได้ในหลายประเทศในเขตเอเชีย เช่น อินเดีย ปากีสถาน พม่า จีน รวมถึง ไทยซึ่งเป็นที่มีการส่งออกเรซินที่ได้ในระดับต้นๆของโลก โดยส่วนมากจะส่งออกในรูปแบบที่ไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปให้บริสุทธิ์มาก เชลแล็กประกอบด้วยส่วนผสมของ พอลิเอสเทอร์ (Polyesters) หลายชนิด ที่มีสมบัติกันน้ำได้ดี ไม่ละลายในกรดแต่สามารถละลายได้ดีในด่าง มีความเป็นมันวาว นำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร สำหรับการเคลือบผลไม้ อุตสาหกรรมยาสำหรับการเคลือบห้วงผลในแง่ป้องกันการซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น

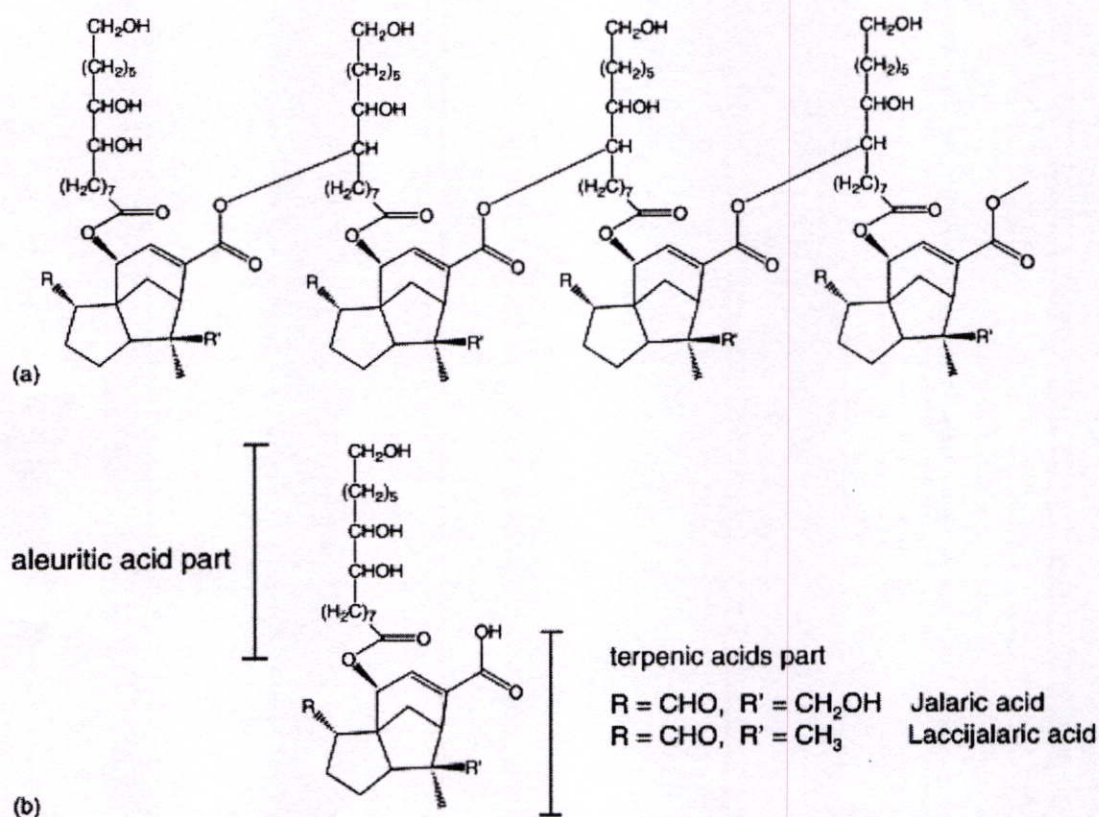
##### 1. ขั้นตอนการผลิตเชลแล็ก

จากการสำรวจพบว่าประเทศไทยมีการผลิตเชลแล็กในภาคเหนือ และภาคอีสาน ซึ่งพบมากที่จังหวัด แพร่ ลำปาง เชียงใหม่ เชียงราย ขอนแก่น โดยขั้นตอนการผลิตจะเริ่มจากการนำครั่งไปปล่อยที่ต้นไม้ในราวเดือนธันวาคม โดยต้นไม้ที่นิยมได้แก่ ต้นก้ามปู ต้นกระถินยักษ์ ตัวอ่อนของครั่งจะเจริญเติบโตและปล่อยสารคัดหลั่งออกมา ตอนแรกจะเห็นเป็นรอยของสารคัดหลั่งสีแดงบนกิ่งและจะเติบโตหนาขึ้นรอบกิ่งไม้ที่เกาะอยู่จนพร้อมจะตัดออกใช้เวลาประมาณ 8 เดือน ในขั้นตอนนี้สารที่ได้จะมีลักษณะเป็นก้อนสีแดงเข้มหรือค่อนข้างดำของสารคัดหลั่งหุ้มอยู่รอบกิ่งไม้ที่เรียกว่า สตีกแล็ก (Sticklac) ซึ่งชาวบ้านจะนำไปขายและผ่านกระบวนการทำความสะอาดที่โรงงาน โดยประกอบด้วยขั้นตอนการย่อยขนาด การคัดแยกเศษไม้ การล้างด้วยน้ำและโซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate) จนกระทั่งได้สารที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมๆสีแดงเข้มที่เรียกว่า ซีดแล็ก (seedlac) โดยทั่วไปในประเทศจะทำขั้นตอนนี้แล้วทำการส่งออกเพื่อไปแปรรูปต่อที่ต่างประเทศ แต่อย่างไรก็ตามมีโรงงานบางแห่งที่สามารถทำในขั้นตอนนี้ไปคือนำ ซีดแล็ก ไปผ่านขบวนการสกัดด้วยความร้อนหลอม ทำการกรองสิ่งเจือปนออกไป และทำให้แห้ง จะได้สารที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ที่เรียกว่า เชลแล็ก นอกจากนี้แล้วการทำให้บริสุทธิ์อาจใช้วิธีการละลายในเอทานอลและทำการกรองสิ่งสกปรกออกไป แต่โรงงานในประเทศไทยไม่ใช้วิธีนี้เนื่องจากมีราคาแพงและการควบคุมการใช้เอทานอลตามกฎหมาย

##### 2. องค์ประกอบและประเภทของเชลแล็ก

สตีกแล็กประกอบด้วยส่วนผสมของเรซิน (70-80%) แวกซ์ (6-7%) สี (4-8%) รวมทั้งสารเจือปน (15-25%) เมื่อผ่านกระบวนการจนกระทั่งได้เชลแล็ก องค์ประกอบที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นส่วนของเรซินที่มีแวกซ์และความชื้นปะปนอยู่โดยมีสารเจือปนอยู่น้อยมาก ในส่วนของเรซินประกอบ

ด้วยส่วนผสมของเรซินแข็ง (Hard resin) ที่ประกอบด้วยพอลิเอสเทอร์ ซึ่งจะเป็พอลิเมอร์ที่มีความยาวไม่มากและเรซินอ่อน (Soft resin) ที่ประกอบด้วยเอสเทอร์ (Single esters) หลายชนิด เมื่อทำการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ส่วนของเรซินจะพบส่วนผสมของ Hydroxy fatty acid ได้แก่ aleuritic acid และ terpenic acid ซึ่งประกอบด้วยสารหลายชนิดโดยสารที่มีอยู่มากได้แก่ jalaric acid, laccijalaric acid ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ (a) polyesters และ (b) single esters ที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเรซิน [8]

### 3. สมบัติของเซลลูล์

เซลลูล์มีสมบัติที่น่าสนใจในหลายเรื่องได้แก่

- การซึมผ่านของไอน้ำที่ต่ำ
- การละลายขึ้นอยู่กับ pH
- ความสวยงามของฟิล์ม
- การนำความร้อนและไฟฟ้าที่ต่ำ
- ความสามารถในการยึดเกาะผิวที่เคลือบและความทนทานต่อการถูกขีดข่วน

#### 4. การประยุกต์ใช้เซลเล็ก

เซลเล็กที่ดีจะต้องละลายหมดในตัวทำละลาย เช่น แอลกอฮอล์ จึงจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ดี เซลเล็กแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เซลเล็กธรรมดา เซลเล็กฟอกขาว และเซลเล็กปรุงแต่ง การนำเอาเซลเล็กมาใช้ประโยชน์ได้เริ่มมานานแล้ว ปัจจุบันมีการนำเอาเซลเล็กมาใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่

- อุตสาหกรรมยา มีการนำเซลเล็กมาเคลือบยาเม็ดเพื่อป้องกันความชื้น และป้องกันตัวยาทำปฏิกิริยากับกรดในกระเพาะอาหาร

- อุตสาหกรรมกระดาษ มีการนำเซลเล็กมาใช้เคลือบกระดาษเพื่อช่วยให้แข็งแรงสวยงาม ป้องกันการเปื้อนสกปรก และใช้เป็นตัวประสานในการผลิตกระดาษสำหรับทำภาชนะบรรจุอาหาร

- อุตสาหกรรมหมึกพิมพ์ มีการนำเอาเซลเล็กมาใช้ในการทำหมึกเขียนชนิดกันน้ำได้ มีสมบัติแห้งเร็ว และกันน้ำได้มีส่วนผสมของเซลเล็กถึง 6 ส่วน

- อุตสาหกรรมเกี่ยวกับวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เนื่องจากเซลเล็กไม่เป็นสื่อไฟฟ้าจึงมีการนำเอามาใช้ในการประสานเชื่อมติดกับวัสดุเซลลูโลส เพื่อทำผลิตภัณฑ์บางประเภท เช่น กระดาษแข็ง นอกจากนี้ยังใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น หลอดไฟ และใช้ในการผลิตแผ่นไม้ก้ำ

นอกจากประโยชน์ดังกล่าวแล้ว ยังมีการนำเอาเซลเล็กมาใช้ใช้อื่นอีก เช่น เคลือบผิวผลไม้ ทำให้เหี่ยวช้าลงกว่าปกติ ใช้ในการผลิตน้ำยาล้างฟิล์มถ่ายรูป เคลือบลูกกวาด อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น

### 2.5 การทดสอบสมบัติยาง [3,10-12]

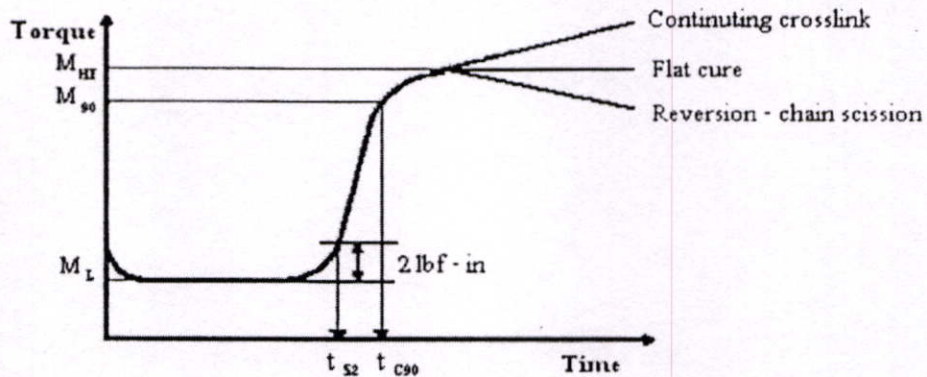
#### 2.5.1 เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง (Curemeter)

เครื่องวัดการเชื่อมโยงยางเป็นเครื่องมือที่ใช้หาภาวะของการเชื่อมโยง เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป และควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ยาง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบจานสั่น (Oscillating Disc Rheometer, ODR) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเชื่อมโยงได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการ ทดสอบยาง เพื่อใช้หาภาวะและเวลาที่เหมาะสมในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ยาง หลักการทำงานของเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบจานสั่นคือ ตรวจวัดความแข็งของยาง โดยวัดการเปลี่ยนแปลงบิดหรือทอร์ก (Torque) ของจานรูปโคนครึ่งวงกลมหมุนสั่นอยู่ภายในตัวอย่างยางที่มีการควบคุมอุณหภูมิ

2. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้อานหมุน (Moving Die Rheometer, MDR) เป็นเครื่องมือวัดการเชื่อมโยงที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิรวดเร็วเนื่องจากขึ้นทดสอบยางที่ใช้เล็กและบางกว่า ข้อมูลที่ได้ถูกต้องแม่นยำกว่า เพราะความผิดพลาดซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานของจานหมุนต่ำกว่าเครื่องวัดการ

เชื่อม โยงแบบงานสั้นและให้ข้อมูลมากกว่า เช่น มอดุลัสการสูญเสีย (Loss modulus,  $E''$ ) อัตราการเชื่อม โยงมุมเฟส (Phase angle)



รูปที่ 2.5 กราฟเชื่อม โยง (Cure curve) [3]

คำนิยามต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM

- $M_L$  คือ ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)
- $M_{HF}$  คือ ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)
- $M_{HR}$  คือ ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟที่สูงสุดแล้วลดลง (Reversion)
- $M_H$  คือ ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟในเวลาที่ทดสอบ เมื่อกราฟเพิ่มขึ้น (Marching)
- $M_{90}$  คือ ค่าแรงบิดที่ 90% ของการเชื่อม โยง สามารถคำนวณได้จาก

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

- $t_{s2}$  คือ เวลาเริ่มเกิดการเชื่อม โยงหรือสกอรัซ เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อม โยงจนแรงบิดเพิ่ม 2 ปอนด์- นิ้ว (lb<sub>f</sub>-in) เทียบกับแรงบิดต่ำสุด
- $t_{90}$  คือ เวลาที่ใช้ในการเชื่อม โยงจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อม โยง 90% (Optimum cure time)
- CRI คือ ดัชนีอัตราเร็วเชื่อม โยง (Cure rate index) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Cure rate index (CRI)} = 100 / (t_{90} - t_{s2}) \quad (2.2)$$

กราฟเชื่อมโยง แบ่งออกเป็น 3 ช่วงดังนี้ สามารถพิจารณาดังรูปที่ 2.5

ช่วงที่ 1 (Delay phase)

ขณะที่ให้แรงบิดในช่วงแรกยางจะนิ่มตัว เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลเกิดการเรียงตัวตามแนวแรง ซึ่งเกิดจากแรงเฉือนเป็นผลให้ค่าแรงบิดลดลงเล็กน้อย และ คงที่ซึ่งช่วงเวลานี้สามารถแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางได้

ช่วงที่ 2 (Curing phase)

ช่วงเวลานี้ทำให้สารเชื่อมโยง ซึ่งประกอบด้วย กำมะถัน สารเร่งและสารกระตุ้นปฏิกิริยา เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับโมเลกุลยาง โดยเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลยางจากสายโซ่ตรงเป็นร่างแหสามมิติทำให้แรงบิดมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งขึ้นสูงสุดและคงที่ ช่วงเวลานี้ให้ข้อมูลอัตราเร็วของการเชื่อมโยง

ช่วงที่ 3 (Overcure phase) ข้อมูลการเสื่อมสลายของยาง แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

- เส้นกราฟคงที่ เมื่อเวลาผ่านไปยางมีปริมาณการเชื่อมโยงคงที่ ไม่เกิดการเสื่อมสลาย
- เส้นกราฟสูงขึ้น ค่ามอดุลัสของยางเพิ่มขึ้น (Marching modulus) แสดงว่ามีปริมาณการเชื่อมโยงยางเพิ่มขึ้น ซึ่งยางที่เกิดลักษณะเช่นนี้ ได้แก่ ยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ เป็นต้น
- เส้นกราฟลดลง เนื่องจากโมเลกุลหรือโครงสร้างร่างแหที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลสลายตัว เรียกปฏิกิริยานี้ว่าเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ (Reversion) ยางที่เกิดลักษณะเช่นนี้ ได้แก่ ยางธรรมชาติ ยางไอโซพรีน ยางบิวทิล เป็นต้น

### 2.5.2 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer)

เครื่องวัดความหนืดมูนนี่เป็นเครื่องมือทดสอบสมบัติการไหล (Rheology properties) ตามมาตรฐาน ASTM D 1646 [22] สามารถใช้ประโยชน์จากการทดสอบหลายลักษณะ คือ ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity, MV) ของยางดิบและยางผสมสูตร เพื่อทดสอบมาตรฐานของยางหรือควบคุมคุณภาพ

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

งานหมุน (Rotor) มีลักษณะผิวเป็นร่อง เพิ่มผิวสัมผัสและแรงเสียดทานเพื่อป้องกันการเลื่อนไถลระหว่างงานโลหะกับยาง โดยทั่วไปการหาค่าความหนืดมูนนี่ใช้งานหมุนโลหะ 2 ขนาดคือ

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

ยางที่ทำการทดสอบหาความหนืดมูนนี้ สามารถเตรียมขึ้นทดสอบได้จากการอัดรีดด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งให้เป็นแผ่นหนาประมาณ 1 เซนติเมตร ตั้งยางไว้อย่างน้อย 30 นาที จากนั้นตัดขึ้นทดสอบเป็น 2 แผ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.5 - 5.0 เซนติเมตร นำขึ้นทดสอบที่ได้ประกบด้านบนและด้านล่างของจานโลหะ โดยใช้แผ่นเซลโลเฟนหรือพลาสติกบางประมาณ 0.25 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการติดผนังด้านในของห้องทดสอบ เมื่ออุณหภูมิเครื่องวัดความหนืดมูนนี้เท่ากับอุณหภูมิที่ทดสอบหลังจากนั้นปิดห้องทดสอบ ซึ่งยางที่อยู่ภายในจะได้รับความร้อน นิยมใช้เวลาเท่ากับ 1 นาที ก่อนเริ่มทำการเดินเครื่อง ส่วนค่าความหนืดมูนนี้สามารถอ่านได้ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 4 นาที หรือ 8 นาที ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง

### 2.5.3 การอัดขึ้นรูป (Compression molding)

การอัดขึ้นรูปยางเป็นกระบวนการแปรรูปยางชนิดหนึ่ง เพื่อผลิตยางให้มีรูปร่างตามแบบที่ต้องการ วิธีการขึ้นรูปยางมีอยู่ 3 วิธีใหญ่ๆ คือ

1. Compression molding
2. Transfer molding
3. Injection molding

ในกระบวนการทั้ง 3 นี้ Compression molding ใช้เครื่องจักรและแม่พิมพ์ที่มีราคาถูกที่สุดแต่ใช้เวลาผลิตต่อชิ้นงานนานที่สุด ส่วน Injection molding จะใช้เครื่องจักรและแม่พิมพ์ที่มีราคาแพงที่สุด แต่ใช้เวลาผลิตต่อชิ้นงานสั้นที่สุดด้วย กรณีของ Transfer molding ราคาเครื่องจักรและแม่พิมพ์ อีกทั้งเวลาอยู่ในช่วงระหว่าง Compression molding กับ Injection molding

การอัดขึ้นรูปยาง (Compression molding) จะใส่ยางลงในช่องว่างของแม่พิมพ์และปิดแม่พิมพ์ทำการอัดยางให้ไหลเต็มช่องว่างนั้น การอัดยางใช้ระบบไฮดรอลิกเป็นหลัก

กระบวนการทำผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้วิธีการอัดขึ้นรูป มีดังนี้

#### 1. การเตรียมยางก่อนการขึ้นรูป

นำยางที่ผสมสารเคมีแล้ว มาทำการตัดให้ได้ขนาด รูปร่าง และน้ำหนัก ตามต้องการ โดยทั่วไปจะให้ยางมีปริมาณมากกว่าปริมาณของแม่พิมพ์อยู่ประมาณ 5-15% แล้วแต่ความสามารถเตรียมรูปร่างยางได้ใกล้เคียงเพียงไร หากรู้ความหนาแน่นของยางและปริมาณของแม่พิมพ์แล้ว อาจใช้วิธีชั่งน้ำหนักของยางคอมพาวด์ (Compound) ได้

#### 2. การเตรียมแม่พิมพ์เพื่ออัดขึ้นรูปยาง

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปยางมักจะทำด้วยเหล็กหรืออะลูมิเนียม แต่อะลูมิเนียมตกแต่งได้ง่ายและเบากว่าเหล็ก ในขณะที่เดียวกันอะลูมิเนียมมีความทนทานน้อยกว่าเหล็ก อย่างไรก็ตามโลหะที่ใช้ทำแม่พิมพ์ยางนั้นห้ามใช้โลหะที่เป็นทองแดง ทองเหลือง หรือโลหะที่มีทองแดงผสม เพราะไม่

เพียงแต่ทองแดงทำให้ยางเสื่อมสภาพได้ง่ายแล้ว การแกะยางออกจากแม่พิมพ์ที่มีทองแดงผสมทำได้ยากมาก

ก่อนที่จะนำยางใส่ลงไปแม่พิมพ์ ต้องอุ่นแม่พิมพ์ให้ร้อนเท่ากับอุณหภูมิที่จะขึ้นรูปยางก่อน แล้วจึงทาหรือพ่นสารกันยางติดแม่พิมพ์ (Mould lubricant) ลงไปบนผิวของแม่พิมพ์ที่ร้อน ตัวอย่างของสารกันยางติดแม่พิมพ์ ได้แก่ ซิลิโคนอิมัลชัน (Silicone emulsion)

### 3. การอัดขึ้นรูป

นำยางใส่เข้าไปแม่พิมพ์แล้วปิดฝา นำเข้าไปอัดขึ้นรูปในเครื่องอัดไฮดรอลิก แล้วทำการอัดยางโดยเร็ว การอัดยางครั้งเดียวไม่สามารถไล่อากาศที่ขังในแม่พิมพ์ได้ จำเป็นต้องมีการไล่อากาศโดยการอัดแล้วคลายการอัดเล็กน้อยแล้วอัดใหม่ วิธีการนี้เรียกว่า Bumping อาจทำการอัด 1-2 ครั้งหรือมากกว่านั้น

การอัดขึ้นรูปยางควรใช้ความดันอัดที่ต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อป้องกันไม่ให้แม่พิมพ์ชำรุดหรือสึกหรอแต่ควรจะให้สูงพอที่ยางไหลออกมาไม่หนาจนเกินไป ควรหนาประมาณ 0.03 นิ้ว ความดันที่ใช้จริงขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ของยาง ค่าพลาสติกซิตี (Plasticity) และบางครั้งขึ้นกับการออกแบบของแม่พิมพ์ โดยทั่วไปความดันที่ใช้อัดประมาณ 3-7 MPa

### 4. การกำหนดอุณหภูมิและเวลาในการอัดขึ้นรูปยาง

นอกจากความดันในการอัดขึ้นรูปยางแล้ว เวลาและอุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องกำหนดในการอัดขึ้นรูปทุกครั้ง เวลาและอุณหภูมิมิมีความสัมพันธ์กันอย่างยิ่ง โดยทั่วไปถ้าเพิ่มอุณหภูมิขึ้น  $10^{\circ}\text{C}$  เวลาในการขึ้นรูปจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง แต่ระยะเวลาที่ใช้จริงขึ้นอยู่กับสูตรของยาง รวมทั้งขึ้นอยู่กับความหนาของยางอีกด้วย ยางที่ใช้สารตัวเร่งชนิดเร็ว (Fast accelerator) ย่อมเชื่อมโยงเร็วกว่ายางที่ใช้สารตัวเร่งชนิดเร็วปานกลางหรือช้า (Moderate accelerator or Slow accelerator)

ยางต่างสูตรกันมีความสามารถในการนำความร้อนต่างกัน ยางที่มีสารตัวเติมน้อยจะนำความร้อนไม่ดีเท่ากับยางที่มีสารตัวเติมมาก นอกจากนี้สารตัวเติมต่างชนิดกันนำความร้อนได้เร็วช้าต่างกันอีกด้วย เป็นต้น

ในการถ่ายเทความร้อนสู่ยางนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของยางด้วย ยางที่หนาต้องใช้เวลานานเพื่อให้อุณหภูมิส่วนกลางของยางขึ้นสูงตามต้องการได้ ดังนั้นยางหนาต้องใช้เวลาในการขึ้นรูปนานกว่ายางบาง และถ้ายางหนามากๆ ต้องลดอุณหภูมิในการขึ้นรูปด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้อายุภายนอกเกิดการเชื่อมโยงมากเกินไปหรือไหม้เกรียมก่อนที่จะยางภายในจะเกิดการเชื่อมโยงพอดี

เมื่อยางในแม่พิมพ์เกิดการเชื่อมโยงตามเวลาที่กำหนดแล้ว แกะยางออกจากแม่พิมพ์ และเริ่มการอัดขึ้นรูปยางใหม่ตั้งแต่ต้น ส่วนที่แกะออกมาจากแม่พิมพ์นำไปตัดขอบต่อไป

#### 2.5.4 การทดสอบความแข็งกด (Hardness Test)

ความแข็งกดของยางที่นิยมทดสอบในอุตสาหกรรมยางมี 2 วิธีการ ดังนี้

### 1. ความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ (Durometer Hardness)

การทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 [26] เป็นการทดสอบที่ง่ายและสะดวก ใช้แรงสปริงในการกดขึ้นทดสอบ โดยทั่วไปสเกลสำหรับเครื่องวัดความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์มีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 ซึ่งค่าความแข็งกด 0 หมายถึง ความแข็งของของเหลว หรือค่าความแข็งกด 100 หมายถึง ความแข็งของวัสดุแข็งมากจะไม่ยุบตัว สำหรับคูโรมิเตอร์ชนิด A หรือชอร์ A (Shore A) วัดพอลิเมอร์ที่มีลักษณะอ่อนนุ่ม เช่น ยาง วัดความแข็งที่ไม่เกิน 90 ส่วนวัสดุที่มีความแข็งเกิน 90 ใช้คูโรมิเตอร์ชนิด D หรือชอร์ D (Shore D)

ค่าความแข็งกดอ่านได้หลังจากการกดเป็นระยะเวลา 5 หรือ 30 วินาที โดยขงที่ใช้ทดสอบต้องมีความหนาอย่างน้อย  $\frac{1}{4}$  นิ้ว สามารถซ้อนขึ้นทดสอบเพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการ

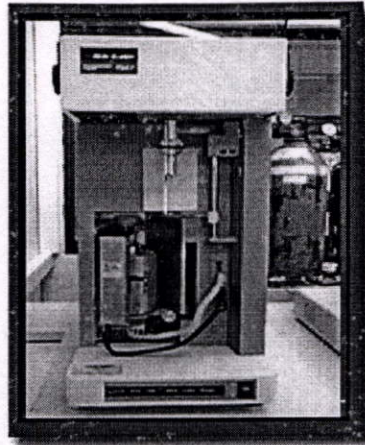
### 2. ความแข็งกดสากล (International Hardness)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1415 ทดสอบโดยการกดหัวลงบนผิวของชิ้นทดสอบ ด้วยแรงเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย ส่วนแรงที่ใช้กดเป็นน้ำหนักโดยตรงไม่ใช่สปริง โดยทั่วไปนิยมใช้เวลาในการกด 30 วินาที ซึ่งปกติแล้วระยะที่จมลงในชิ้นทดสอบจะถูกเปลี่ยนเป็นระดับความแข็งของยางแบบสากล (International Rubber Hardness Degrees, IRHD) ค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 ซึ่งมีความหมายคล้ายกับความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์

#### 2.5.5 การวิเคราะห์ทางความร้อนโดยเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก (Thermal Gravimetric, TGA) [13,14]

การวิเคราะห์ทางความร้อนโดยเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุ โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุ เมื่อได้รับความร้อนและเกิดการสลายตัว ภายใต้บรรยากาศที่กำหนด

เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนที่จีเอ มีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณของตัวอย่าง เช่น พอลิเมอร์ ยาง และ ตัวอย่างทางวัสดุศาสตร์ เช่น เซรามิกส์ เป็นต้น ใช้ศึกษาวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบของสาร เช่น ปริมาณตัวทำละลาย ความชื้น สารเติมแต่ง เมฆาค้า พลาสติกไฮเซออร์ และการศึกษาความเสถียรภาพทางความร้อนของตัวอย่างพอลิเมอร์ ยาง วิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งสถานะของแข็ง ของเหลว ผง แผ่นฟิล์ม และเส้นใย



รูปที่ 2.6 แสดงเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน TGA [14]

ระบบเครื่องซึ่งมีความละเอียดในการวิเคราะห์สูงถึง 0.1 ไมโครกรัม มีความถูกต้องของน้ำหนักมากกว่า 0.1% ความแม่นยำของอุณหภูมิ  $\pm 5$  องศาเซลเซียส แหล่งให้ความร้อนเป็นระบบเตาเผาสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 50-1500 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มลดอุณหภูมิ 0.1-200 องศาเซลเซียสต่อนาที มีระบบทำให้เตาเผาเย็นอย่างรวดเร็ว โดยใช้อากาศ ระบบการทำงานและการประมวลผลถูกควบคุมโดยระบบคอมพิวเตอร์ แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบเทอร์โมแกรมระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ หรือเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fan R. L. และคณะ [15] ศึกษาผลของการเชื่อมโยงอุณหภูมิสูงที่มีต่อโครงสร้างการเชื่อมโยง (Crosslink structure) สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลพลวัตของยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติมเจมาดำเมื่อเชื่อมโยงด้วยระบบปกติ (CV) กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-CV) และมีประสิทธิภาพ (EV) บดผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 80 °C ที่อุณหภูมิขึ้นรูประหว่าง 150-180 °C พบว่าระบบการเชื่อมโยงปกติ มีค่ามอดูลัส ความแข็งแรงดึงและความแข็งกดสูงกว่าระบบอื่น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เวลาเชื่อมโยงนานเกิน (Overcure) ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางธรรมชาติขาดได้ง่าย นอกจากนี้ทำให้สมบัติทางกายภาพลดลงมาก สำหรับระบบการเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพจะเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพต่ำ ในขณะที่ใช้เวลาเชื่อมโยงนานเกินไป

Kundu P. P. [16] ได้ทำการใส่น้ำมันพืช (Vegetable oil) ลงในยางผสมสูตรระหว่างการผสมจากการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมสูตรที่ไม่ใส่น้ำมันพืช ค่าแรงบิด ของยางผสมสูตรที่ใส่น้ำมันจะต่ำลง ซึ่งสามารถใช้ผลของสมบัติเชิงกลสนับสนุน ความต้านทานการกัดกร่อนและความแข็งแรงต่ำลง เนื่องจากน้ำมันพืชมีความสามารถเป็นพลาสติกไฮเซอร์ที่ดี และน้ำมันพืชทำให้ยางผสมสูตรมีความหนาแน่นการเชื่อมโยง (Crosslink density) ต่ำ ค่า  $\tan \delta$  ต่ำ ที่แรงบิดสูงสุด แสดงให้เห็นว่ามีค่า Loss หรือ Damping และ Heat generation ต่ำ ยางผสมสูตรที่ใส่น้ำมันพืช จะทำ

ให้หมอดูลัสต้า ค่าความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Compression set) ต่ำ ค่าการกระเดิงตัว ค่าความต้านทานการฉีกขาด และความต้านทานการโค้งงอสูง เนื่องจากน้ำมันพืชที่ใส่ในยางผสมสูตร ทำให้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงต่ำ มีสมบัติการเป็น Microplasticization กล่าวคือ น้ำมันพืชสามารถแสดงความเป็นพลาสติกไซเซอร์และแสดงความเป็นสารคู่ควบ (Coupling agent) ระหว่างพื้นผิวสัมผัสระหว่างเขม่าดำและยาง

Daniele F. C. และคณะ [17] ศึกษาผลการเติมไมก้าที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติและยางบิวตะไดอิน ที่ผ่านการเชื่อมโยงโดยเปรียบเทียบทางสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกลพลวัตของยางทั้งสองชนิด เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ ทำการบดผสมยางด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งผสมที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C และศึกษาปริมาณของไมก้าที่ 10 20 และ 30 phr ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ไมก้าทำให้กระบวนการเชื่อมโยงช้าลง สมบัติเชิงกลดีขึ้นคือ ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ค่าความต้านทานการฉีกขาด และค่าความแข็งแรงกด ต่างมีค่าสูงขึ้นที่ปริมาณ 20 phr

Varoporn T. และคณะ [18] ได้เตรียมยางอิพอกซิไดซ์โดยนำน้ำยาง 20 % ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และกรดฟอร์มิก (Formic acid) แล้วทำการแยกยางอิพอกซิไดซ์ออกโดยใช้เวลาการเกิดปฏิกิริยา (3-8 ชั่วโมง) ใช้สัญลักษณ์เป็น H3 H4 H5 H6 H7 และ H8 เปรียบเทียบผลกับยางธรรมชาติและยางอิพอกซิไดซ์ (ENR25 และ ENR50) ที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมยาง ทำการทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติความทนน้ำมันของยาง โดยบดผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิประมาณ 75 °C ขึ้นรูปยางที่อุณหภูมิ 150 °C พบว่าสมบัติเชิงกลของ H4 และ H6 มีค่าใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ ทางด้านความแข็งแรงดึงเปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด ความต้านทานการฉีกขาด และมีค่าสูงกว่ายาง ENR25 และ ENR50 หลังจากแช่ยางในน้ำมันเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ยาง H4 และ H6 มีค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด มีค่าใกล้เคียงกับยาง ENR25 และ ENR50 แต่สูงกว่ายางธรรมชาติ

Costa H.M. และคณะ [19] ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติและหาค่าคงที่อัตราสำหรับกระบวนการผลิตของเถ้าแกลบ 2 ชนิด คือเถ้าแกลบสีดำ (Black rice husk ash, BRHA) และเถ้าแกลบสีขาว (White rice husk ash, WRHA) ทำการทดลองเปรียบเทียบกับสารตัวเติม 2 ชนิด คือ เขม่าดำ (N762) และซิลิกา (Zeosil-175) นำยางผสมสูตรบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 70°C เชื่อมโยงยางโดยใช้ระบบก้ำมะถันปกติ (Conventional system) ทำการเชื่อมโยงยางที่อุณหภูมิ 150 160 170 และ 180 °C ปริมาณของสารตัวเติมที่ศึกษาคือ 10 20 30 40 และ 50 phr พบว่า เขม่าดำให้ค่าคงที่อัตราเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเขม่าดำเพิ่มขึ้นทุกอุณหภูมิที่ทดสอบ เถ้าแกลบสีดำให้ค่าคงที่อัตราเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกันกับเขม่าดำ แต่ค่าคงที่อัตราจะต่ำกว่า และค่าพลังงานกระตุ้นของเขม่าดำและเถ้าแกลบมีค่าใกล้เคียงกันและจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเขม่าดำและเถ้าแกลบสูงขึ้น สำหรับผลของการเติมซิลิกา พบว่าค่าคงที่

อัตราของซิลิกาลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นทุกอุณหภูมิที่ทดสอบ และค่าพลังงานกระตุ้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด สำหรับแก้วเคลือบขาว พบว่าค่าคงที่อัตราเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณแก้วเคลือบมากขึ้นทุกอุณหภูมิทดสอบ ค่าพลังงานกระตุ้นลดต่ำลง เมื่อปริมาณแก้วเคลือบขาวมากกว่า 20 phr

Kukreja T.R. และคณะ [20] ได้ทำการปรับปรุงผิวของเขม่าดำด้วยพลาสติกไซเซออร์ (น้ำมันพีชและน้ำมันพาราฟิน) โดยนำมาผสมเข้ากับยางผสมสูตร พบว่าแรงบิดลดลง เมื่อปริมาณน้ำมันพีชมากขึ้น น้ำมันพีชจะทำให้เกิดเป็นชั้นบางๆ (Monolayer) ระหว่างเขม่าดำกับยาง เป็นเหตุให้  $\tan \delta$  ร้อยละการยืด ๓ จุดขาด และความแข็งแรงดึงลดลง ค่าความต้านทานการกัดกร่อน ค่าความแข็งกดและมอดูลัส 300 % มากขึ้น เมื่อเติมน้ำมันปริมาณ 3 phr ขึ้นไป ค่าความต้านทานการฉีกขาด และการกระเด็นตัวเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณน้ำมันพีชมากขึ้น ในช่วง 3 phr สมบัติจะเพิ่มอย่างช้าๆ เมื่อปริมาณน้ำมันพีชมากกว่า 3 phr สมบัติจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำมันพีชปริมาณ 1 phr ทำให้ค่าความต้านทานการยึดติดเพิ่มขึ้น แต่ยางผสมสูตรที่เติมน้ำมันพาราฟินจะมีค่าความต้านทานการยึดติดน้อยลง

Gregorova A. และคณะ [21] นำลิกนินซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติเป็นส่วนประกอบหลักของเนื้อไม้ โดยนำมาผสมกับเขม่าดำกับยางผสมสูตร ศึกษาสมบัติเชิงกลและความหนาแน่นเชื่อมโยงของลิกนิน โดยการวัดการเชื่อมโยงก่อนและหลังการใช้งานแบบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 24 72 168 240 และ 408 ชั่วโมง ทดสอบที่อุณหภูมิ 80 °C โดยเปรียบเทียบกับ N-phenyl-N-isopropyl-p-phenylene diamine (IPPD) การทดสอบพบว่าลิกนินมีบทบาทในการเป็นแอนติออกซิแดนซ์สำหรับยางธรรมชาติเมื่อเติมเขม่าดำ โดยการทดสอบทางความร้อน ปริมาณที่เหมาะสมที่ใช้ประมาณ 2-5% โดยน้ำหนัก (4-8 phr) ยิ่งไปกว่านั้นลิกนินยังช่วยปรับ IPPD ให้ดีขึ้น โดยการผสมลิกนินและ IPPD ทำให้ประสิทธิภาพของแอนติออกซิแดนซ์สูงขึ้น

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ยางธรรมชาติ ชนิดแท่ง STR XL เกรดการค้า จากบริษัทแพนเอเชียไบโอเทคโนโลยี จำกัด
2. กำมะถัน (Sulfur, S) เกรดการค้า จากบริษัท เคมีมิน จำกัด
3. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เกรดการค้า จากบริษัท เคมีมิน จำกัด
4. กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า จากบริษัท เคมีมิน จำกัด
5. TBBS (N-tert-butyl-2-benzothiazolesulfenamide) เกรดการค้า จากบริษัทรับเบอร์เคมี จำกัด
6. เขม่าดำ (Carbon black) เกรดการค้า ชนิด N550 จากบริษัทไทยคาร์บอน จำกัด
7. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antioxidant)
  - Wingstay L (2,2'-Methylenebis 6-tert-butyl-4-methylphenol) เกรดการค้า จากบริษัท  
ชั้นลูป จำกัด
8. ไดอะทอมไมต์ (Diatomite) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
9. เซลแล็ก (Shellac) เกรดการค้าจากบริษัทมหาชัยเซลแล็ก
10. น้ำมันเบนซิน เกรดการค้าจากบริษัทเชลล์ประเทศไทยจำกัด (มหาชน)
11. น้ำมันดีเซล เกรดการค้าจากบริษัทเชลล์ประเทศไทยจำกัด (มหาชน)
12. น้ำมันไฮดรอลิก เกรดการค้า ชนิด SAE 90 จากบริษัทเอทีเทคโนโลยี จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยางแท่งที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ปริมาณ
สิ่งสกปรก (Dirt) (%wt)	0.02
เถ้า (%wt)	0.4
ไนโตรเจน (%wt)	0.5
สารระเหยได้ (Volatile matter) (%wt)	0.8
ค่าพลาสติกซิตี (Initial Plasticity, Po)	35
ดัชนีความอ่อนตัว (Plasticity Retention Index, PRI)	60
สัญลักษณ์สี	ฟ้า

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บริษัท Lab Technology Engineering
2. เครื่องอัดแบบขึ้นรูป (Compression molding machine) บริษัท Lab Engineering
3. เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น LR 5K บริษัท Lloyd Instrument
4. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่น Visc Tech บริษัท Tech Pro
5. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบจานหมุน (Moving die rheometer) บริษัท Tech Pro
6. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ (Instron Shore A durometer) รุ่น 716 บริษัท Shore Instrument
7. เครื่องทดสอบความหนาแน่น รุ่น EW-120SG บริษัท Mirage Trading
8. ตู้อบความร้อน (Hot air oven) รุ่น UM 400 บริษัท MEMERT
9. เครื่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM - 5800LV บริษัท JEOL
10. เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้ความดันลม รุ่น SDAP-100-N บริษัท Dumbell
11. เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน TGA (Thermogravimetric Analyzer) รุ่น Pyris I TGA HT บริษัท Parkin Elmer Instrument
12. เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve shaker) รุ่น 01409023 บริษัท Retsch พร้อมกับตะแกรงมาตรฐานขนาด 230 mesh

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมไดอะทอไมต์และเซลลูล์

1. คัดแยกเศษไม้ สิ่งสกปรกออกจากเซลลูล์
2. นำเซลลูล์ และไดอะทอไมต์มาบดด้วยครกบด
3. ทำการแยกขนาดโดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาดที่มีตะแกรงร่อนขนาด 230 mesh แล้วนำไปเก็บในเคซิเคเตอร์ก่อนนำไปผสมกับยาง

#### 3.3.2 ขั้นตอนการผสมยางและเตรียมขึ้นทดสอบ

- ขั้นตอนที่ 1 บดยางและสารเคมีด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง
- ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบสมบัติเชื่อมโยงและหาเวลาการเชื่อมโยง
- ขั้นตอนที่ 3 ขึ้นรูปยางผสมสูตร
- ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบสมบัติต่าง ๆ

- การศึกษาสมบัติเชิงกล
- การศึกษาสมบัติกายภาพ
- การศึกษาพื้นฐานวิทยา
- การศึกษาสมบัติทางความร้อน

### 3.3.3 การบดผสมยางและสารเคมี

1. ชั่งยางและสารเคมีตามสูตรตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สูตรหลักของยางผสมสูตร [25]

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr)
Natural rubber	100
ZnO	5
Stearic acid	2
Sulfur	2.25
TBBS	0.7

- ศึกษาปริมาณของเขม่าดำ (10 20 30 40 50 และ 60 phr) และภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปของยางผสมสูตร ( $150^{\circ}\text{C}$   $160^{\circ}\text{C}$  และ  $170^{\circ}\text{C}$ ) ชั่งยางและสารเคมีตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สูตรการศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำและภาวะที่เหมาะสมของยางผสมสูตร ( $150^{\circ}\text{C}$   $160^{\circ}\text{C}$  และ  $170^{\circ}\text{C}$ )

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr)					
Natural rubber	100	100	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2
Sulfur	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
TBBS	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Carbon black	10	20	30	40	50	60

- นำปริมาณของเขม่าดำและภาวะที่เหมาะสมของยางผสมสูตร ซึ่งได้จากการทดลองตามตารางที่ 3.3 มาทดลองต่อโดยศึกษาผลของปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (0.5 1.0 และ 1.5 phr) ชั่งยางและสารเคมีตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สูตรการศึกษาผลของปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (0.5 1.0 และ 1.5 phr)

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr)		
	Natural rubber	100	100
ZnO	5	5	5
Stearic acid	2	2	2
Sulfur	2.25	2.25	2.25
TBBS	0.7	0.7	0.7
Carbon black	ผลที่ดีที่สุดจากการทดลองตามตารางที่ 3.3		
Wingstay L	0.5	1	1.5

- นำปริมาณที่เหมาะสมของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ซึ่งได้จากการทดลองตามตารางที่ 3.4 มาทดลองต่อโดยศึกษาผลของปริมาณไดอะทอมไมต์ (1 3 5 7 และ 9 phr) ซึ่งยางและสารเคมีตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สูตรการศึกษาผลของปริมาณไดอะทอมไมต์ที่มีต่อสมบัติของยางผสมสูตร

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr)				
	Natural rubber	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2
Sulfur	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
TBBS	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Carbon black	ผลที่ดีที่สุด				
Wingstay L	จากการทดลองตามตารางที่ 3.4				
Diatomite	1	3	5	7	9

- นำปริมาณที่เหมาะสมของไดอะทอมไมต์ ซึ่งได้จากการทดลองตามตารางที่ 3.5 มาทดลองต่อโดยศึกษาผลของปริมาณเซลลูลอส (1 2 3 และ 4 phr) ซึ่งยางและสารเคมีตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สูตรการศึกษาผลของปริมาณเซลลิ่งที่มีต่อสมบัติของยางผสมสูตร

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr)			
	1	2	3	4
Natural rubber	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2
Sulfur	2.25	2.25	2.25	2.25
TBBS	0.7	0.7	0.7	0.7
Carbon black	ผลที่ดีที่สุดจากการทดลองตามตารางที่ 3.4			
Wingstay L				
Diatomite				
Shellac	1	2	3	4

2. ผสมส่วนประกอบต่างๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิประมาณ  $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$  จนยางมีผิวเรียบสม่ำเสมอใช้เวลาประมาณ 2 นาที
3. เติมซิงค์ออกไซด์ พร้อมกับพับ ตัด ม้วนยาง ให้เข้ากันใช้เวลาประมาณ 2 นาที
4. เติมเขม่าดำ ปรับลูกกลิ้งให้มียางเหลือขอบนลูกกลิ้งเรียกว่าแบงก์ (bank) เติมกรดสเตียริก พร้อมกับพับ ตัด ม้วนยาง ใช้เวลาประมาณ 14 นาที
5. เติม Wingstay L พร้อมกับพับ ตัด ม้วนยาง ให้เข้ากันใช้เวลาประมาณ 2 นาที
6. เติมไดอะทอมไมต์ พร้อมกับพับ ตัด ม้วนยาง ใช้เวลาประมาณ 5 นาที
7. เติมเซลลิ่ง พร้อมกับพับ ตัด ม้วนยาง ใช้เวลาประมาณ 2 นาที
8. เติม TBBS พร้อมกับตัดยาง ใช้เวลา 2 นาที
9. นำสารเคมีทั้งหมดที่หล่นอยู่บนถาดผสมอีกครั้ง แล้วจึงใส่กำมะถัน ใช้เวลาประมาณ 3 นาที
10. ทำการผสมยางให้เข้ากันแล้วปรับลูกกลิ้งใช้เวลา 2 นาที
11. ปรับลูกกลิ้ง ริดแผ่นยางให้ได้ความหนาประมาณ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาประมาณ 3 นาที
12. นำยางผสมที่ได้มาชั่งน้ำหนัก โดยยางผสมต้องมีน้ำหนักหายไปไม่เกิน 0.5 %
13. ตัดยางเพื่อทดสอบสมบัติในการเชื่อมโยงและทดสอบความหนืดมูนนี้
14. พักยางไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนการขึ้นรูป

### 3.4 การทดสอบยางผสมสูตร

สมบัติของยางผสมสูตร ทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ดังนี้

### 3.4.1 การทดสอบความเหนียว

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1646 [22]

หาค่าความเหนียว โดยใช้แกนหมุนขนาดใหญ่ ที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  (ML 1+4( $100^{\circ}\text{C}$ )) ตัดชิ้นงานเป็นแผ่นหนาประมาณ 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 – 5 เซนติเมตร มาทดสอบความเหนียว

### 3.4.2 เวลาเชื่อมโยงของยางผสมสูตร (Cure time)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2084 [23]

ตัดชิ้นงานตัวอย่างเป็นแผ่นกลม หนาประมาณ 1 เซนติเมตร ทดสอบด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer ที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$   $160^{\circ}\text{C}$  และ  $170^{\circ}\text{C}$  สำหรับตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 เมื่อได้อุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองตามตารางที่ 3.3 นำอุณหภูมิที่ได้ทดลองต่อตามตารางที่ 3.4 3.5 และ 3.6 หาเวลาเชื่อมโยง ( $t_{2}$ ) และเวลาเชื่อมโยง ( $t_{90}$ ) ของยางผสมสูตรแต่ละสูตร

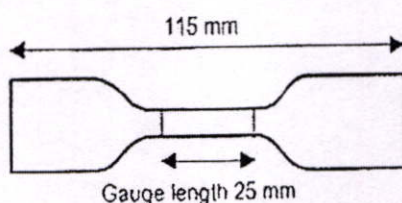
### 3.4.3 การเชื่อมโยงยาง (Vulcanization)

ตัดยางผสมสูตรมาขึ้นรูป โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) อัดขึ้นงานเป็นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$   $160^{\circ}\text{C}$  และ  $170^{\circ}\text{C}$  สำหรับตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 เมื่อได้อุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองตามตารางที่ 3.3 นำอุณหภูมิที่ได้ทดลองตามตารางที่ 3.4 3.5 และ 3.6 โดยใช้เวลาเท่ากับ 1.2 เท่าของ  $t_{90}$  ของยางผสมสูตรแต่ละสูตร

### 3.4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 412 [24]

นำยางแผ่นที่ได้จากหัวข้อ 3.4.3 มาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell shape) ด้วยหัวตัดแบบ C ดังรูปที่ 3.1 โดยใช้เครื่องตัดชิ้นงานแบบลมอัด จากนั้นนำมาวัดความกว้างและความหนาส่วนคอดของรูปดัมเบลล์ด้วยไมโครมิเตอร์



รูปที่ 3.1 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ [24]

สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

ความยาวเกจหรือความยาวเริ่มต้น (Gauge length)

25 มิลลิเมตร

ความเร็วในการดึง	500 มิลลิเมตรต่อนาที
แรงสูงสุดที่เครื่องรับได้ (Load cell)	5 กิโลนิวตัน

โดยทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นงานต่อ 1 ยางผสมสูตร เพื่อหาค่าเฉลี่ย จากผลการทดสอบ จะได้ค่า ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) มอดุลัสที่ 300% (Modulus 300%)

#### 3.4.5 การทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่ง (Air oven ageing)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 573 [29]

ทำการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.4.4 แตกต่างกันตรงที่แบ่งชิ้นทดสอบเข้าตู้อบแบบอากาศร้อน อุณหภูมิที่ทดสอบ  $70 \pm 2^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 96 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกจากตู้อบ พักชิ้นงานทดสอบไว้อย่างน้อย 16 ชั่วโมงแต่ไม่เกิน 96 ชั่วโมง นำมาทดสอบสมบัติเชิงกล

คำจำกัดความและการคำนวณ

1) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) หมายถึงความเค้นสูงสุดที่ชิ้นทดสอบสามารถรับได้ในการทดสอบแรงดึง หน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa)

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

เมื่อ TS คือ ความแข็งแรงดึง (MPa)

F คือ แรงที่ใช้ในการดึงสูงสุดเกิดที่จุดขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ( $\text{m}^2$ )

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

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

เมื่อ %EB คือ ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)

l คือ ความยาวสุดท้าย ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ (mm)

$l_0$  คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (mm)

3) ร้อยละสมบัติเชิงกลที่คงอยู่ หมายถึง สมบัติเชิงกลหลังจากบ่มเร่งที่เปลี่ยนแปลงจากสมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่ง หน่วยเป็นร้อยละ (%)

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

เมื่อ P คือ ร้อยละของสมบัติเชิงกลที่คงอยู่ (%)

O คือ ค่าที่วัดได้ก่อนบ่มเร่ง

A คือ ค่าที่วัดได้หลังจากบ่มเร่ง

4) ร้อยละของมอดุลัสที่เปลี่ยนแปลง หมายถึง ค่ามอดุลัส 300 % หลังบ่มเร่งที่เปลี่ยนแปลงไปจากมอดุลัส 300 % ก่อนบ่มเร่ง หน่วยเป็นร้อยละ (%)

$$\text{Change in modulus (\%)} = [(M_A - M_O)/M_O] \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ  $M_A$  คือ มอดุลัสที่ 300 % ก่อนบ่มเร่ง (MPa)

$M_O$  คือ มอดุลัสที่ 300 % หลังบ่มเร่ง (MPa)

#### 3.4.6 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 624 [25]

นำแผ่นยางที่ได้จากหัวข้อ 3.4.3 ตัดชิ้นงานทดสอบมีลักษณะเป็น Die C ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้เครื่องตัดชิ้นงานแบบลมอัด นำชิ้นงานทดสอบวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ใช้ Load cell ขนาด 5 กิโลนิวตัน และความเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที หาค่าความแข็งแรงฉีกขาด



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด Die C [25]

การคำนวณผล

$$T_s = F/d \quad (3.5)$$

เมื่อ  $T_s$  คือ ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)

$F$  คือ แรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานจนขาด (kN)

$d$  คือ ความหนาของชิ้นงาน (m)

### 3.4.7 การทดสอบความแข็งกด (Hardness)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2240 [26]

ทดสอบโดยนำชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งแรงดึงจำนวน 3 ชิ้น (ความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร) ทดสอบด้วยเครื่องคูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ A (Shore A durometer) วางซ้อนกันบนแท่นทดสอบ จากนั้นโยกคานให้ชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับหัวกด (Indentor) เป็นเวลา 30 วินาที อ่านค่าที่ได้จากหน้าปัด

### 3.4.8 การทดสอบความหนาแน่น

ตัดชิ้นงานทดสอบที่เชื่อมโยงแล้วน้ำหนักไม่เกิน 5 กรัม ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความหนาแน่น (Electronic densimeter) โดยชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบในอากาศและในน้ำ เครื่องจะคำนวณค่าความหนาแน่นให้อัตโนมัติโดยใช้หลักการแทนที่น้ำดังนี้

$$\text{ความหนาแน่น (Density)} = W / (W - W_1) \quad (3.6)$$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในอากาศ

$W_1$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ

ถ้ากำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการหาค่าโดยประมาณ จะได้ความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับความหนาแน่น

### 3.4.9 การทดสอบความทนทานต่อน้ำมัน (Oil resistance)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 471 [27]

นำชิ้นงานทดสอบขางคกรูปที่มีขนาด 40 x 20 x 2 มิลลิเมตร ทำการบันทึกน้ำหนักก่อนแช่น้ำมันไว้ แช่ชิ้นทดสอบในน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล และน้ำมันไฮโดรลิก ภายในภาชนะปิดเป็นเวลา 70 ชั่วโมง อุณหภูมิทดสอบ  $23 \pm 2$  °C นำชิ้นทดสอบขางออกจากน้ำมันซับด้วยกระดาษทิชชู แล้วชั่งน้ำหนักของขาง บันทึกน้ำหนักหลังแช่น้ำมัน ศึกษาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง โดยคิดให้อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์การบวมตัว

$$\text{Oil swell (\%)} = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ Oil swell คือ ร้อยละการบวมตัวในน้ำมัน

$M_1$  คือ น้ำหนักขาก่อนแช่น้ำมัน (g)

$M_2$  คือ น้ำหนักขากหลังแช่น้ำมัน (g)

#### 3.4.10 สมบัติทางความร้อนโดยเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก

การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของยางผสมสูตรด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ใช้น้ำหนักตัวอย่างประมาณ 20 กรัม โดยใช้บรรยากาศ Air zero และสภาวะที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

- อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ = 10 °C/min
- ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ = 50-800 °C

#### 3.4.11 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของยางผสมสูตรที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 20 นาที และทำการหักชิ้นงานตัวอย่างทันที จากนั้นนำตัวอย่างมาเคลือบทองที่ผิวและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยดูการกระจายตัวของสารในยางผสมสูตร

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติ โดยการใช้สารเติมแต่งในการปรับปรุงยางธรรมชาติเพื่อใช้ในงานเอนกประสงค์ ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป หลังจากนั้นทดสอบสมบัติต่างๆ ที่มีต่ออย่างผสมสูตร เช่น สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่

- อุณหภูมิ เวลาการเชื่อมโยงและปริมาณเขม่าดำ (Carbon black loading)
- ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antioxidant loading)
- ปริมาณดินเบาหรือไดอะทอมไมต์ (Diatomite loading)
- ปริมาณเซลแล็ก (Shellac loading)

#### 4.1 การศึกษาอุณหภูมิ เวลาการเชื่อมโยง และปริมาณเขม่าดำ

ในกระบวนการการเชื่อมโยงยาง อุณหภูมิการเชื่อมโยงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งการเลือกอุณหภูมิการเชื่อมโยง จะต้องเลือกอุณหภูมิที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพที่สม่ำเสมอโดยใช้เวลาการเชื่อมโยงน้อยที่สุด [2] ในการเลือกอุณหภูมิการเชื่อมโยงสำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการเชื่อมโยง สามารถเชื่อมโยงได้รวดเร็วที่อุณหภูมิปานกลางและไม่ควรที่จะใช้อุณหภูมิสูงเกินไปในการเชื่อมโยง จนทำให้สมบัติทางกายภาพของยางลดลงไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกอุณหภูมิในการเชื่อมโยงเป็น 3 อุณหภูมิ คือ  $150\text{ C}^{\circ}$   $160\text{ C}^{\circ}$  และ  $170\text{ C}^{\circ}$

การผสมสารเคมีลงในยางดิบแล้วให้ความร้อนจนกระทั่งเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง เพื่อให้สมบัติของยางดีขึ้นตรงกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน เช่น ทนทานต่อความร้อน ทนน้ำมัน เป็นต้นเท่าที่ทราบกันทั่วไปว่าการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้น ด้วยการเพิ่มหรือลดปริมาณสารเติมแต่งสำหรับยาง เช่น สารเชื่อมโยง สารตัวเติม และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ [29] ซึ่งเขม่าดำนับเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากสามารถเติมลงในยางได้ปริมาณมากเพื่อลดต้นทุนและทำให้สมบัติเชิงกลของยางดีขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำชนิดเฟอร์เนส เกรด N 550 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 40-48 นาโนเมตร [30]

จากผลการศึกษาเวลาการเชื่อมโยงยางโดยใช้เครื่องวัดการเชื่อมโยง (ODR) เปรียบเทียบผลของยางธรรมชาติและแปรค่าปริมาณเขม่าดำ 0 10 20 30 40 50 และ 60 phr แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า เวลาการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 170 °C เร็วกว่าการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C และเร็วกว่าการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 150 °C ซึ่งสอดคล้องกับการประมาณเวลาการเชื่อมโยงของยางที่อุณหภูมิต่างๆ จากการใช้สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของการเชื่อมโยง (Temperature coefficient of vulcanization) [21] ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง โดยสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเกือบทั้งหมดจะมีค่าประมาณ 2 กล่าว คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 °C (18 °F) เวลาการเชื่อมโยงจะลดลงเป็น 2 เท่า และ เนื่องจากอุณหภูมิมิมีผลต่อเวลาการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเช่นเดียวกับปฏิกิริยาเคมีอื่นๆ โดยเป็นไปตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) [3] แสดงดังสมการที่ 4.1

$$\log k = -E / 2.303RT + C \quad (4.1)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยา (Reaction rate constant)

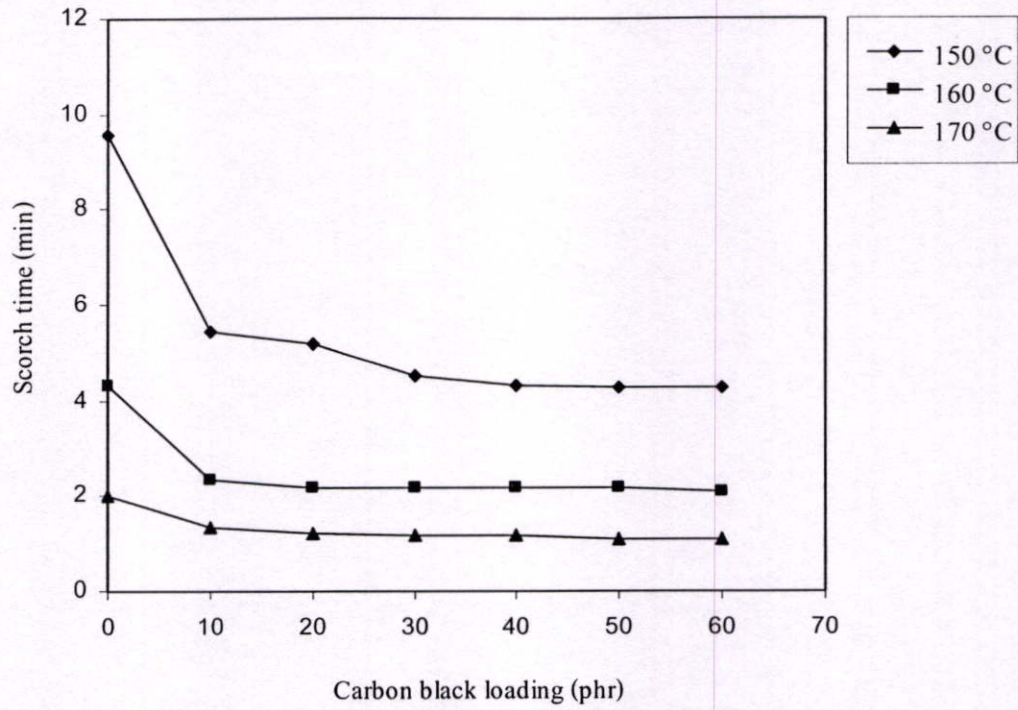
$E$  คือ พลังงานกระตุ้น (Activation energy)

$R$  คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas constant)

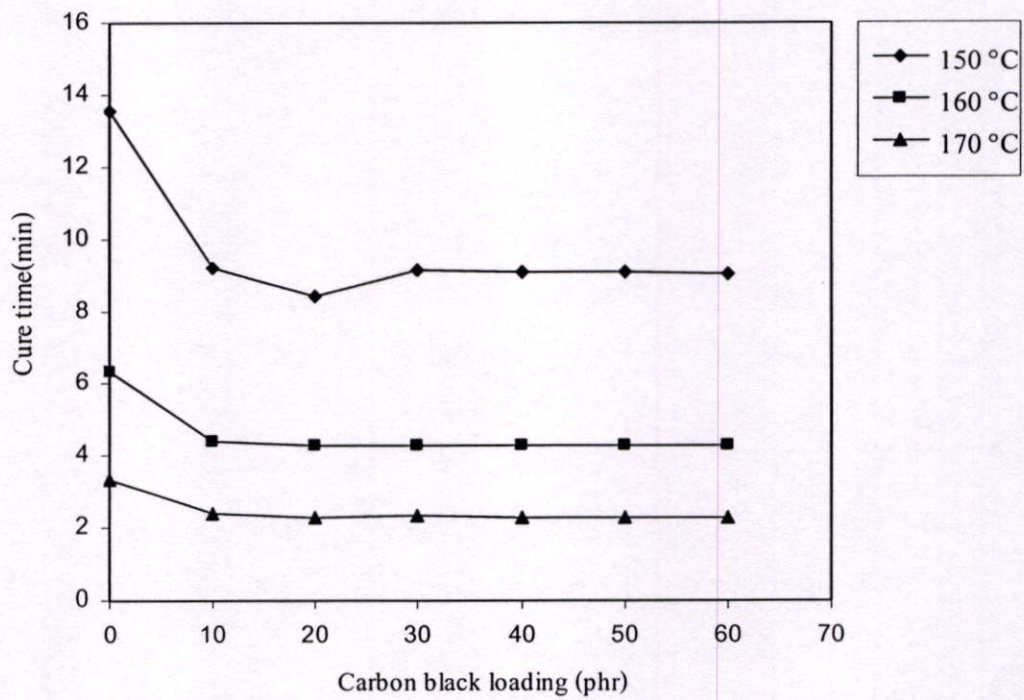
$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)

$C$  คือ ค่าคงที่สำหรับปฏิกิริยาหนึ่งๆ (Constant)

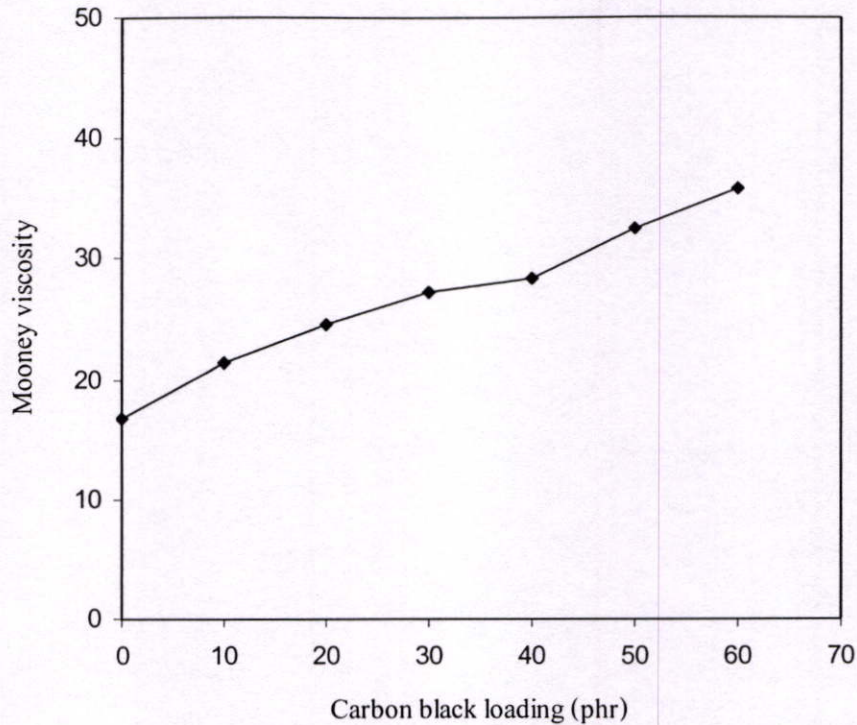
จากการศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณเขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง ปริมาณ 0 10 20 30 40 50 และ 60 phr จะเห็นว่าเมื่อมีปริมาณเขม่าดำ ทำให้เวลาเริ่มเกิดการเชื่อมโยงหรือสกอร์ช (Scorch) และเวลาการเชื่อมโยงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณเขม่าเพิ่มมากขึ้นเวลาเริ่มเกิดการเชื่อมโยงหรือสกอร์ช (Scorch) และเวลาการเชื่อมโยงไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากเขม่าดำชนิดเฟอร์เนสมีความเป็นค่า จะเป็นตัวกระตุ้นให้ตัวเร่งทำงานได้เร็วขึ้น แต่ปริมาณเขม่าดำไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเวลา [32] ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงเวลา Scorch time เมื่อแปรค่าปริมาณเขม่าดำที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงเวลา Cure time เมื่อแปรค่าปริมาณเขม่าดำที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 (100 °C)) เมื่อแปรค่าปริมาณเขม่าดำ

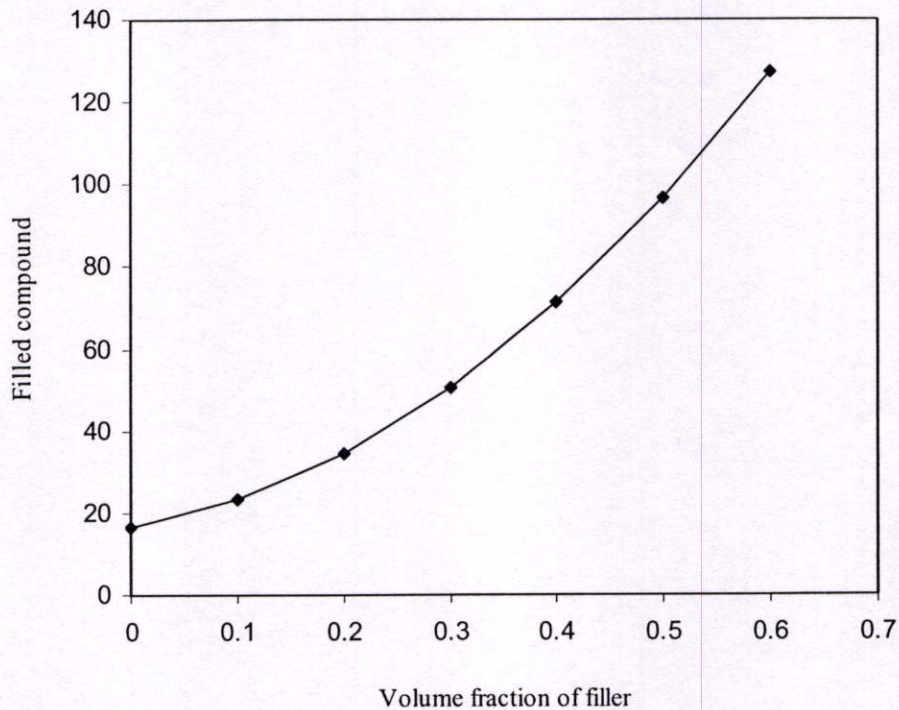
จากรูปที่ 4.3 แสดงค่าความหนืดมูนนี่ เมื่อแปรปริมาณเขม่าดำ 10 20 30 40 50 และ 60 phr ในยางธรรมชาติ พบว่าความหนืดมูนนี่ของยางเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างเขม่าดำกับสายโซ่โมเลกุลยางมากขึ้น ซึ่งเป็นการลดความสามารถในการไหลหรือการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลยาง ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ตามสมการของกัธ-โกลด์ (Guth-Gold equation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของยางที่เพิ่มขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมที่ใส่ในยางดังสมการที่ 4.2 [30] ดังรูปที่ 4.4 อย่างไรก็ตามสมการของกัธ-โกลด์ จะประมาณค่าความหนืดได้ถูกต้องแม่นยำเมื่อใช้กับยางที่ผสมสารตัวเติมก้อนกลมที่มีโครงสร้าง (Structure) น้อย และผสมสารตัวเติมปริมาณไม่สูงมาก (ไม่เกิน 30 phr)

$$\eta_r = \eta_u (1 + 2.5C + 14.1C^2) \quad (4.2)$$

เมื่อ  $\eta_r$  = ความหนืดของยางผสมสารตัวเติม (Filled compound)

$\eta_u$  = ความหนืดของยางไม่ผสมสารตัวเติม (Unfilled compound)

C = สัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมในยาง (Volume fraction of filler)

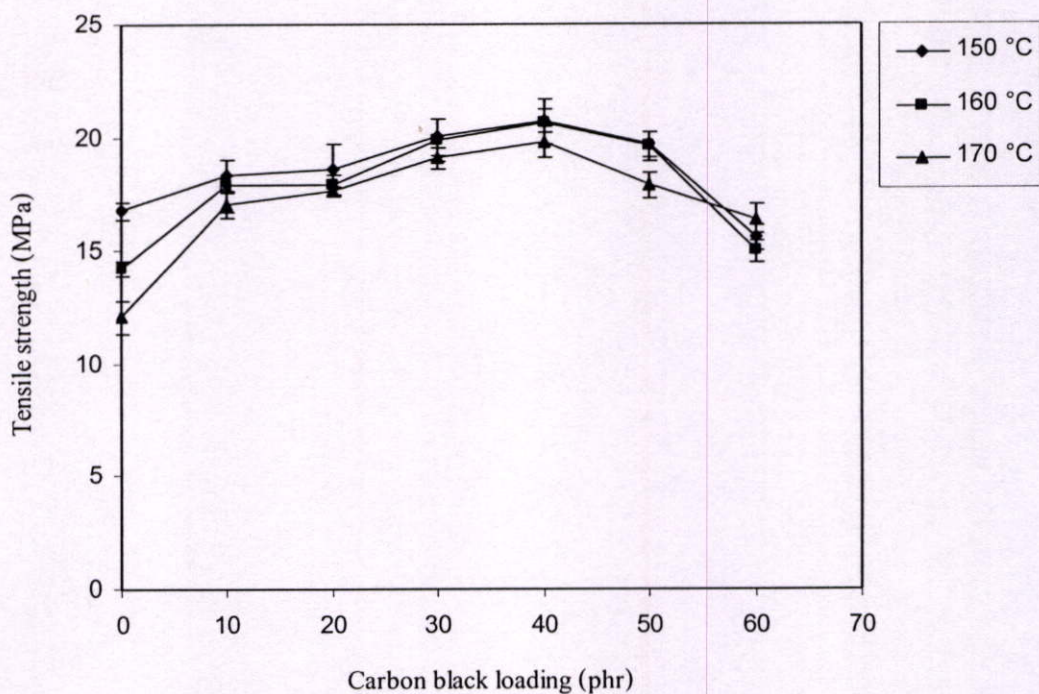


**รูปที่ 4.4** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของยางที่เพิ่มขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมที่ได้ในยางตามสมการของกซ์-โกลด์

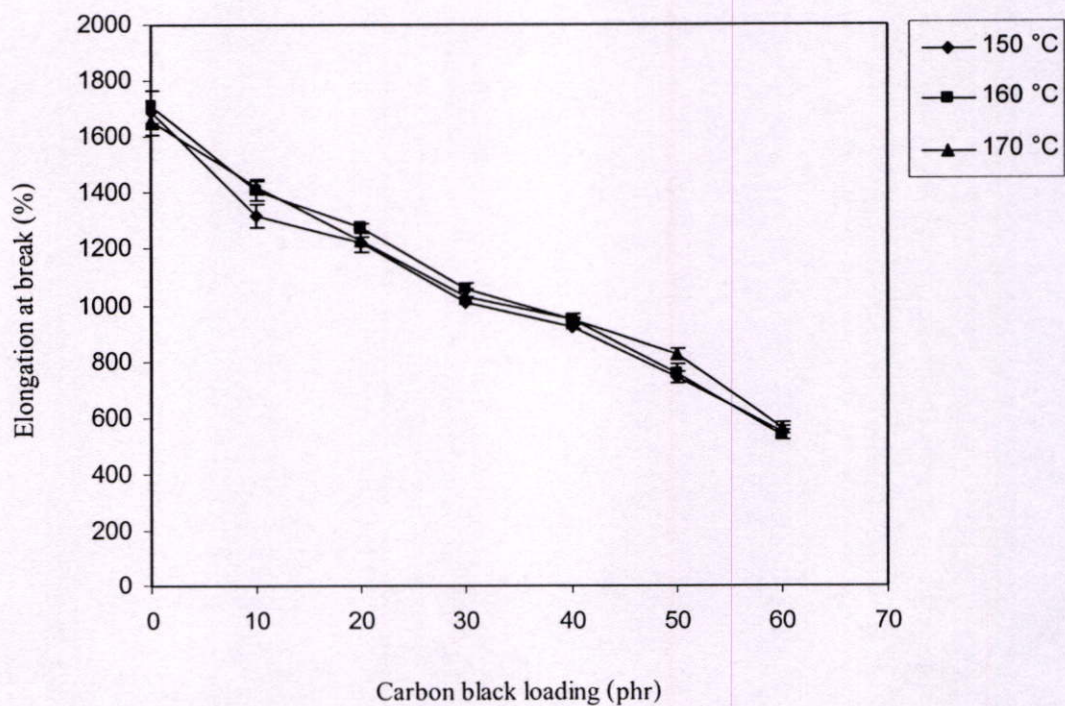
จากรูปที่ 4.5 และ 4.8 เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นในช่วง 10- 60 phr ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.5) และความแข็งแรงฉีกขาด (รูปที่ 4.8) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ที่ปริมาณเขม่าดำมากกว่า 40 phr ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเขม่าดำเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างเขม่าดำและยางมากขึ้น โดยเกิดการยึดเกาะของยางบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของโครงสร้างเขม่าดำมากขึ้น เป็นผลให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณเขม่าดำมากเกินไปทำให้เกิดการผสมที่ไม่ดี ทำให้การกระจายตัวของเขม่าดำไม่สม่ำเสมอ เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือแอกโกลเมอเรต (Agglomerates) ทำให้เกิดช่องว่าง (Voids) ภายในกลุ่มก้อนเขม่าดำและภายในยาง เป็นผลให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดลดลง

จากรูปที่ 4.6 4.7 และ 4.9 เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.6) มีแนวโน้มลดลง ส่วนมอดุลัส (รูปที่ 4.7) และความแข็งแรงกด (รูปที่ 4.9) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเขม่าดำเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมาก มีมอดุลัสมากเมื่อเทียบกับยาง (มากกว่าประมาณ 1,000 เท่า) เขม่าดำจึงไม่มีการเปลี่ยนขนาดหรือเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรง ส่วนยางเป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนขนาดหรือเปลี่ยนรูปได้มาก ดังนั้นเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นจึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น และมีความสามารถในการเปลี่ยนขนาดหรือรูปได้น้อยลง ซึ่งส่งผลสอดคล้องกับผลของปริมาณ

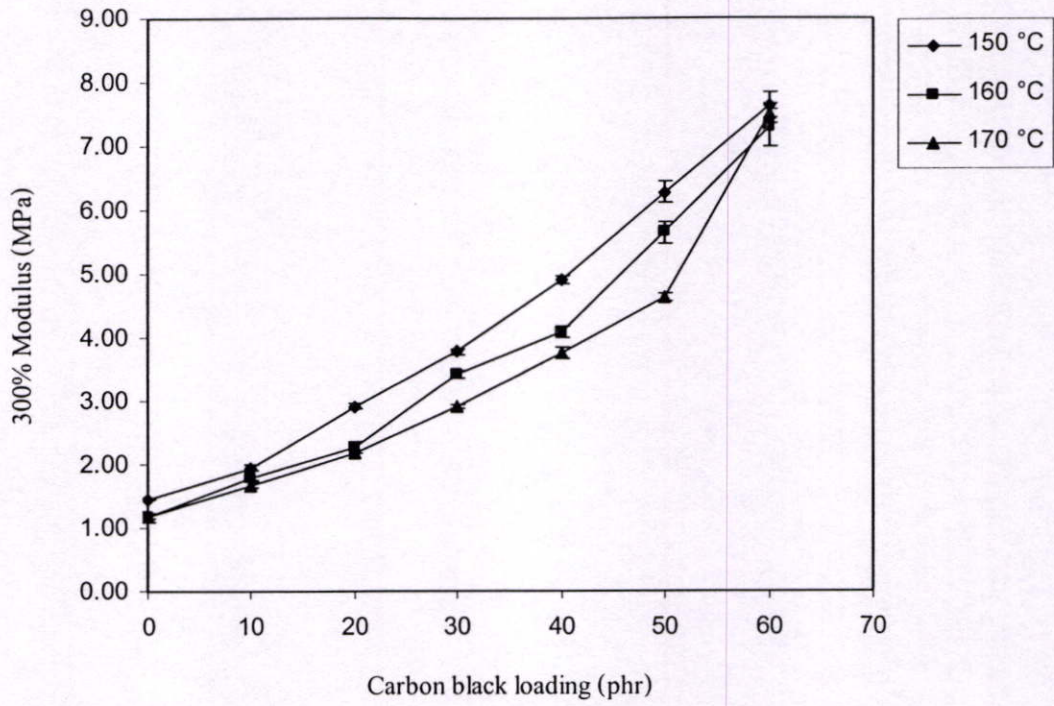
เขม่าดำต่อสมบัติต่างๆ ของยาง ดังรูปที่ 4.10



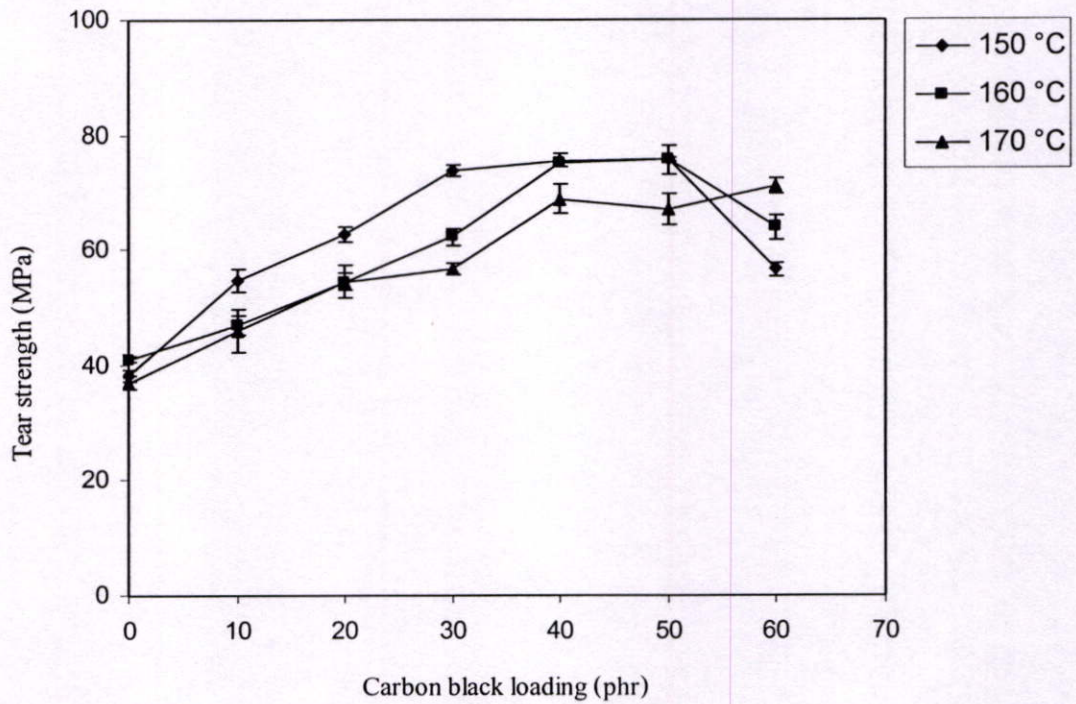
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน



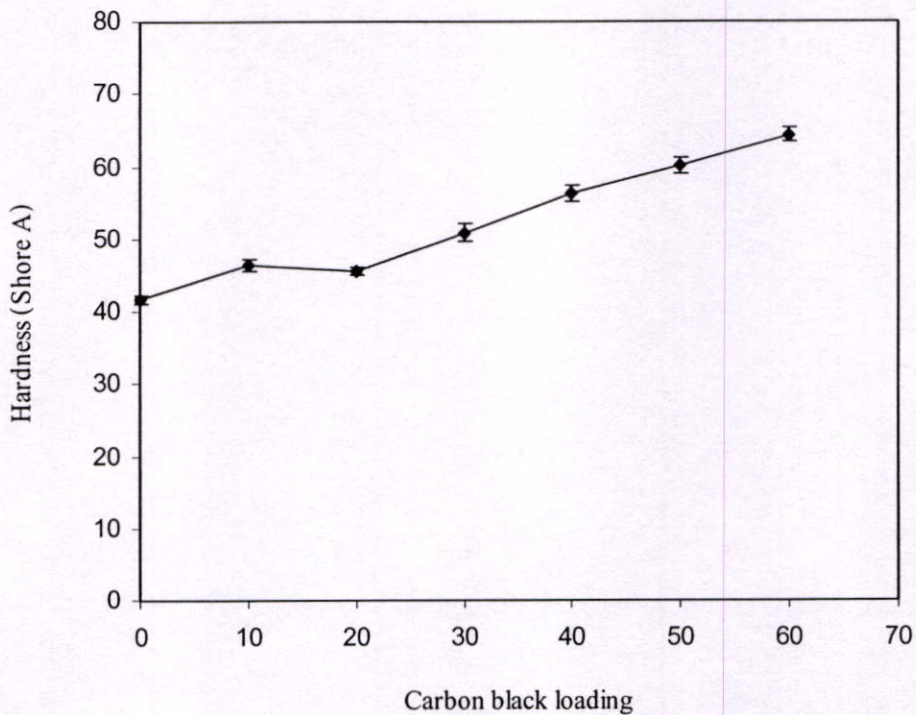
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน



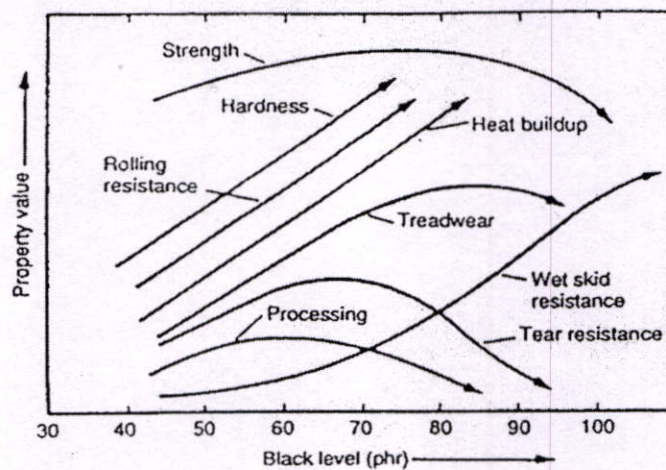
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 300 % ของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความแข็งกคของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน



รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณเขม่าดำต่อสมบัติของยาง [30]

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมช่วยเสริมแรงทำให้ความแข็งแรงของยางสูงขึ้น ทำหน้าที่ลดต้นทุนหรือเพิ่มปริมาณการผลิต และจากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเมื่อแปรปริมาณเขม่าดำต่างกันพบว่า ที่ปริมาณ เขม่าดำ 40 phr มีสมบัติเชิงกลดีกว่าที่ปริมาณเขม่าดำอื่นๆ ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงถึงสูงสุด เมื่อพิจารณาอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงในขั้นตอนนี้จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C มีค่าความแรงถึงใกล้เคียงกันแต่เวลาในการเชื่อมโยงต่างกันคือ ที่

อุณหภูมิ 150 °C ใช้เวลาในการเชื่อมโยงมากกว่าที่อุณหภูมิ 160 °C หากนำยางผสมสูตรไปใช้ในการผลิตทางอุตสาหกรรมทำให้ประหยัดเวลาและได้ชิ้นงานจำนวนมากกว่า ดังนั้นจึงใช้ปริมาณเขม่าดำ 40 phr ที่อุณหภูมิ 160 °C ทำการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

## 4.2 การศึกษาปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ

โดยทั่วไปแล้วการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายนอกอาคารต้องสัมผัสกับแสงแดด ความร้อน ออกซิเจนและโอโซน ซึ่งเป็นปัจจัยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวยางได้ง่าย อย่างไรก็ตามในภาวะปกติผลิตภัณฑ์ยางจะเกิดการเสื่อมสภาพอย่างช้าๆ ต้องใช้ระยะเวลาอันยาวนาน ดังนั้นได้มีผู้ที่พยายามลดระยะเวลาทดสอบ ด้วยการจำลองภาวะหนึ่งขึ้นมา ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางให้เสื่อมสภาพเร็วขึ้น [5]

การทดสอบการเร่งให้ยางเสื่อมเร็ว ออกแบบให้สามารถเปรียบเทียบถึงความต้านทานของยางต่อการเสื่อมเมื่อเวลาผ่านไป โดยจุดมุ่งหมายนี้ ยางจะถูกนำไปอยู่ในภาวะที่ควบคุมแล้วปล่อยให้ยางเสื่อมภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นนำยางไปหาสมบัติบางประการ และเปรียบเทียบกับสมบัติของยางดังกล่าวก่อนนำยางเข้าสู่ภาวะนั้น

จากการศึกษาอุณหภูมิ เวลาการเชื่อมโยง และปริมาณเขม่าดำที่กล่าวมาข้างต้น นำผลการทดสอบของปริมาณเขม่าดำ 40 phr ที่อุณหภูมิ 160 °C มาทดสอบต่อโดยแปรปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antioxidant) ที่ปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 phr

### 4.2.1 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งที่ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่างกัน

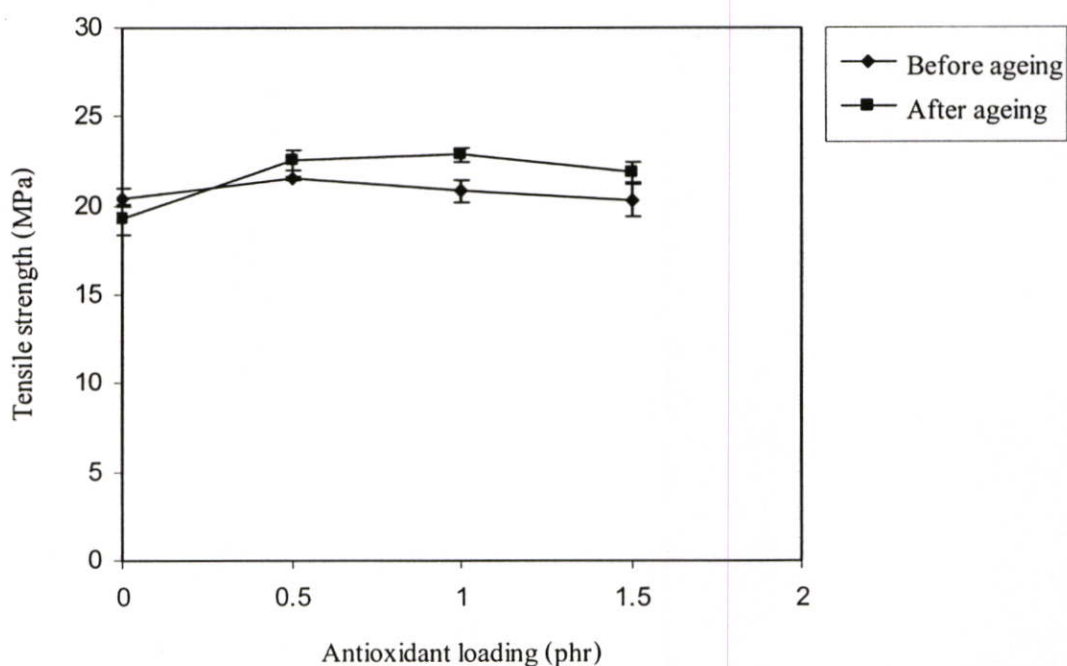
จากการทดสอบผลของปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 0.5 1.0 และ 1.5 phr ต่อสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางผสมสูตร อุณหภูมิที่ทำการทดสอบสำหรับการบ่มเร่ง (Ageing) คือ 70 °C นาน 96 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.11 แสดงค่าความแข็งแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่ง เมื่อแปรปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 0.5 1.0 และ 1.5 phr ตามลำดับ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงก่อนบ่มเร่งมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้น แต่เมื่อนำยางไปอบและทดสอบสมบัติหลังบ่มเร่งพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มเร่งเมื่อไม่มีปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพมีค่าลดลงกล่าวคือ การให้ความร้อนแก่ยางส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลขาดง่าย และความยาวของสายโซ่โมเลกุลสั้นลง แต่เมื่อยางมีปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงกลับมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการทดสอบก่อนบ่มเร่ง เนื่องจากสารป้องกันการเสื่อมสภาพจะเป็นตัวต้านการเกิดออกซิเดชัน ทำให้อนุมูลอิสระหมดไป นั่นคือปฏิกิริยาถูกโซ่ในการเกิดออกซิเดชันยุติไปด้วย [4] โดยค่ามอดูลัสที่ 300 % ก่อนและหลังบ่มเร่ง (รูปที่ 4.13) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้พบว่า ค่ามอดูลัสที่ 300 % หลังบ่มเร่งมีค่าสูงขึ้นจากเดิมเมื่อเทียบกับการ

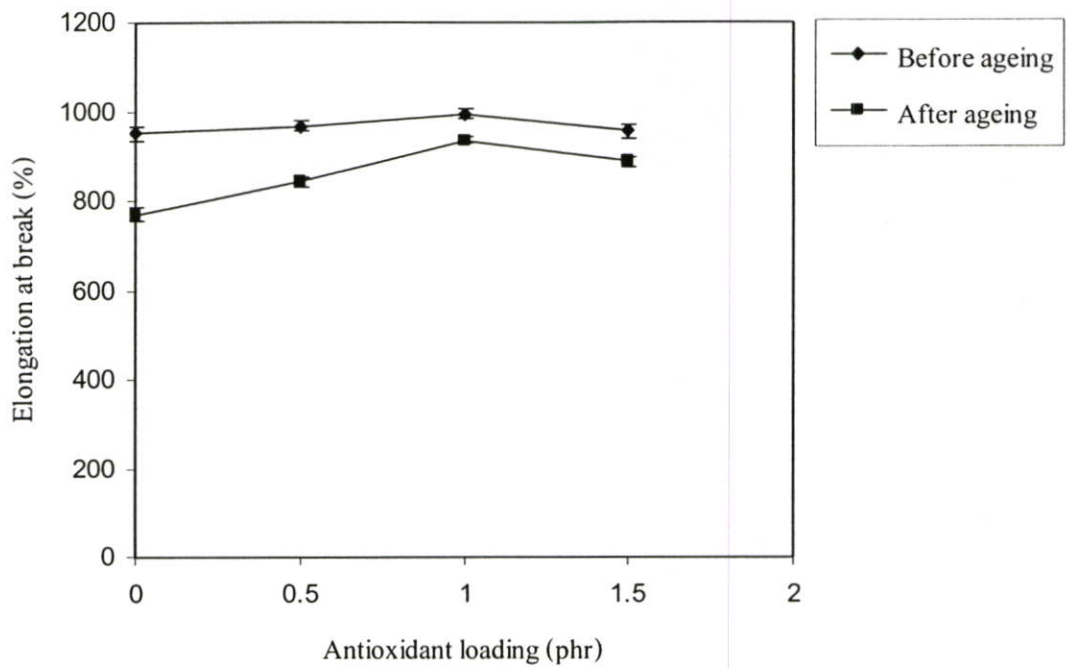
ทดสอบก่อนบ่มเร่ง ส่งผลให้ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ก่อนและหลังบ่มเร่ง (รูปที่ 4.12) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนหลังบ่มเร่งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้น และเห็นได้ว่าค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการทดสอบก่อนบ่มเร่ง

เมื่อนำผลการทดสอบก่อนบ่มเร่งคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดสอบหลังบ่มเร่งๆ ได้ผลดังรูป 4.16 4.17 และ 4.18 พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.16) ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.17) และ ค่ามอดูลัสที่ 300 % (รูปที่ 4.18) ที่เปลี่ยนแปลงหลังบ่มเร่งของยางผสมสูตรมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น กล่าวคือ เมื่อแปรค่าปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพเพิ่มมากขึ้น ร้อยละที่ยืดอยู่ของยางผสมสูตรมีมากขึ้น เทียบกับยางผสมสูตรที่ไม่ได้เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลดลง แต่เมื่อเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไปในช่วงทำให้การเปลี่ยนแปลงของยางดีขึ้น ทำให้ยางผสมสูตรเสียดสภาพลดลงและสามารถเพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้น

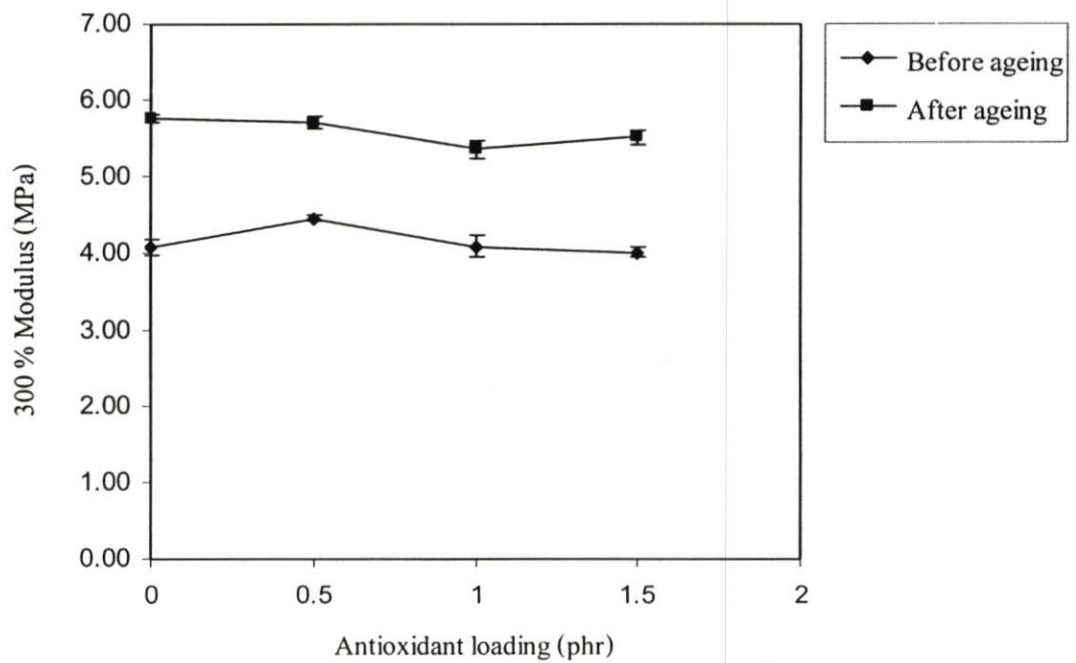
จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงค่าความแข็งแรงดึงขาด และค่าความแข็งแรงกดของยางผสมสูตรก่อนบ่มเร่ง พบว่าการเพิ่มปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ค่าความแข็งแรงดึงขาดและค่าความแข็งแรงกดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากภาวะที่ทดสอบเป็นภาวะปกติสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงไม่แสดงประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงกับยางผสมสูตร และบทบาทของสารป้องกันการเสื่อมสภาพไม่มีหน้าที่ในการเสริมแรงยาง ทำให้ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร



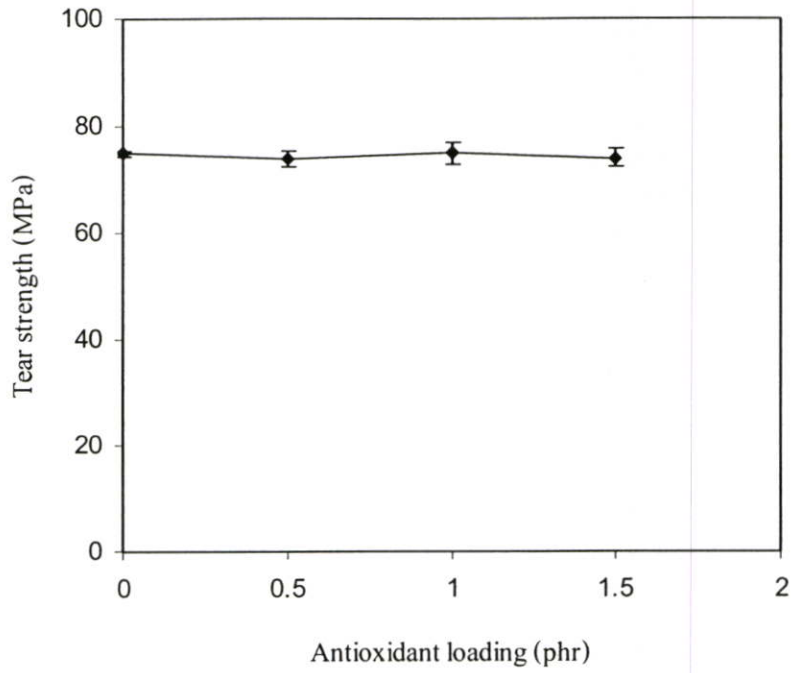
รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่างกัน



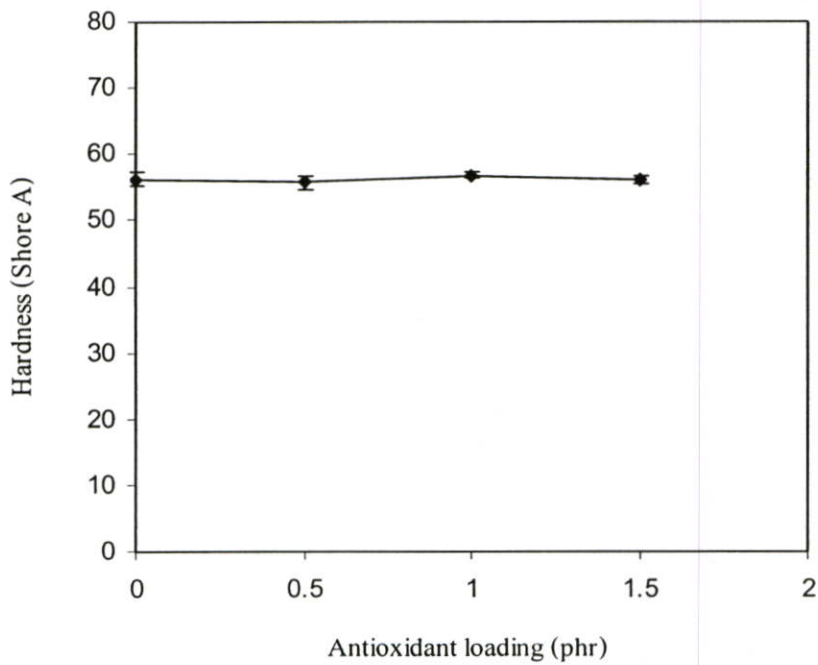
รูปที่ 4.12 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่างกัน



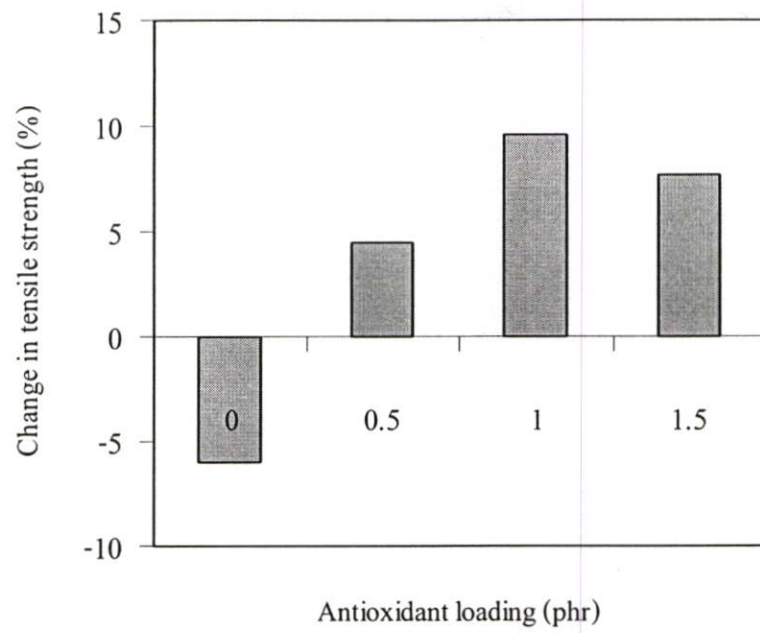
รูปที่ 4.13 ค่ามอดุลัสที่ 300 % ของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่างกัน



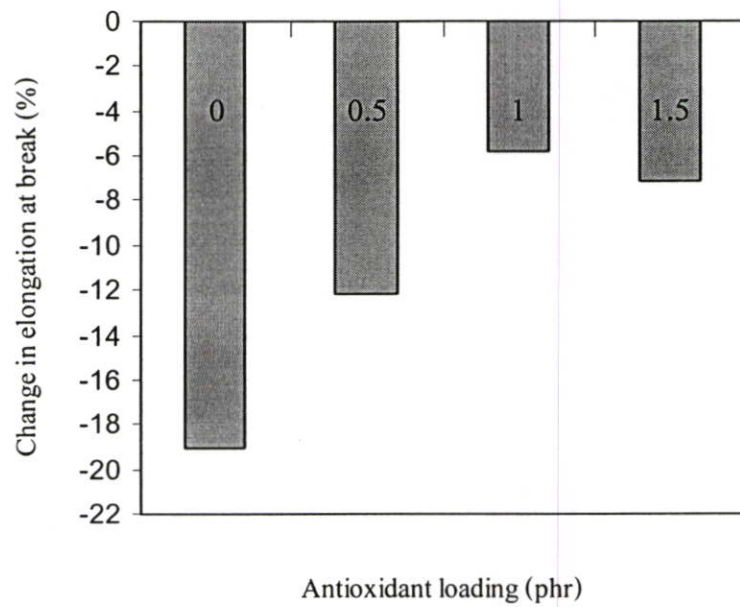
รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่างกัน



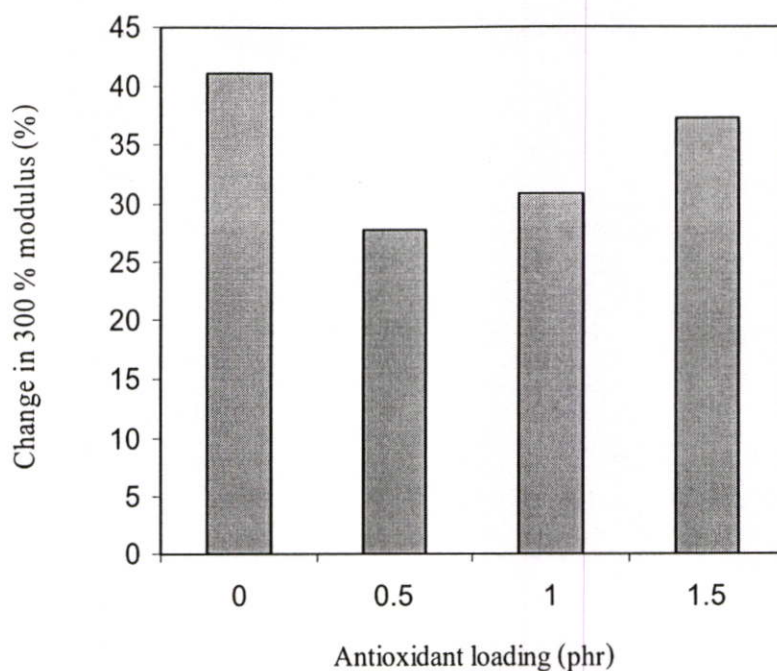
รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่างกัน



รูปที่ 4.16 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ



รูปที่ 4.17 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่างกัน



**รูปที่ 4.18** ค่าร้อยละมอดูลัส 300 % ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่างกัน

สารป้องกันการเสื่อมสภาพ ช่วยป้องกันการเสียหายและเพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 0.5 1.0 และ 1.5 phr พบว่าที่ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 1.0 phr มีค่าร้อยละความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตรดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 1.0 phr อุณหภูมิ 160 °C ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

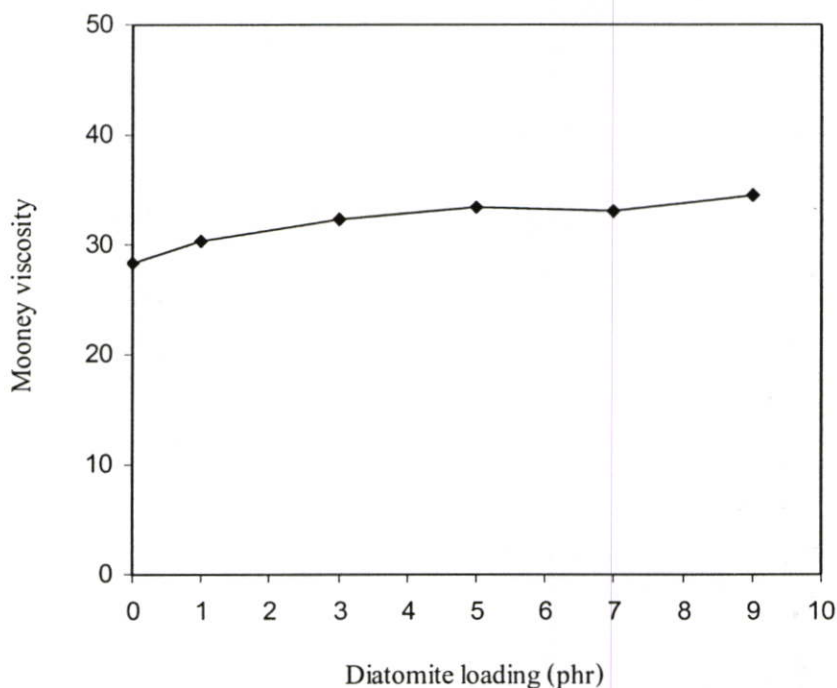
#### 4.3 การศึกษาปริมาณดินเบาหรือไดอะทอมไมต์

จากการศึกษาปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าปริมาณการใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพ 1.0 phr สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเป็นปัจจัยหลักสำคัญที่ทำให้ยางเสื่อม และตัวแปรที่กระตุ้นให้ยางเสื่อมเร็วได้แก่ แสง ความร้อน เป็นต้น

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทำให้ยางสามารถใช้งานได้นานขึ้น ทนความร้อนได้ดีขึ้น และใช้งานได้มากขึ้น การใช้สารเคมีและสารเติมแต่งชนิดต่างๆ เป็นอีกทางเลือกที่สามารถนำมาปรับปรุงให้สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของยางดีขึ้น ตรงกับความต้องการสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ และเพื่อให้ได้ต้นทุนที่แข่งขันในตลาดได้

ในงานวิจัยนี้เลือกทำการศึกษาปริมาณและบทบาทของไดอะทอมไมต์ซึ่งเป็นแร่ธาตุสาหร่าย ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และมีองค์ประกอบหลักคือซิลิกา เพื่อให้เกิดการนำมาใช้ประโยชน์ได้

หลากหลายและกว้างขวางขึ้น จึงได้นำสมบัติของโคอะทอไมต์มาทดสอบถึงความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้งานกับยางธรรมชาติ โดยทำการศึกษาเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้ยางมีสมบัติทนต่อความร้อนได้ที่ปริมาณ 1 3 5 7 และ 9 phr อุณหภูมิในการขึ้นรูป  $160^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 ( $100^{\circ}\text{C}$ )) เมื่อแปรค่าปริมาณโคอะทอไมต์

จากรูปที่ 4.19 แสดงค่าความหนืดมูนนี่ เมื่อแปรปริมาณโคอะทอไมต์ 0 1 3 5 7 และ 9 phr ในยางผสมสูตร พบว่าเมื่อปริมาณโคอะทอไมต์เพิ่มขึ้น ความหนืดของยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณโคอะทอไมต์เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างโคอะทอไมต์กับสายโซ่โมเลกุลของยาง ซึ่งเป็นการลดความสามารถในการไหลของยางหรือการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยาง ส่งผลให้ความหนืดของยางผสมสูตรเพิ่มสูงขึ้น

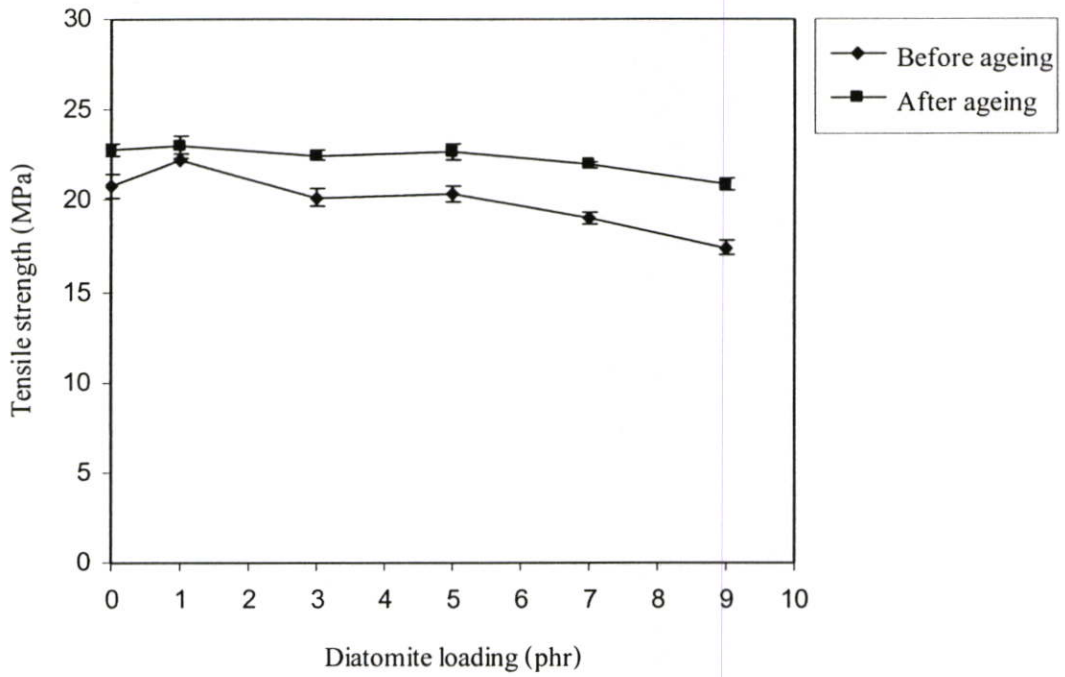
#### 4.3.1 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งที่ปริมาณโคอะทอไมต์ต่างกัน

จากการทดสอบผลของปริมาณโคอะทอไมต์ที่ศึกษา คือ 1 3 5 7 และ 9 phr ต่อสมบัติเชิงกลก่อนบ่มและหลังบ่มเร่ง เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมทำให้ยางทนต่อความร้อนได้ดี

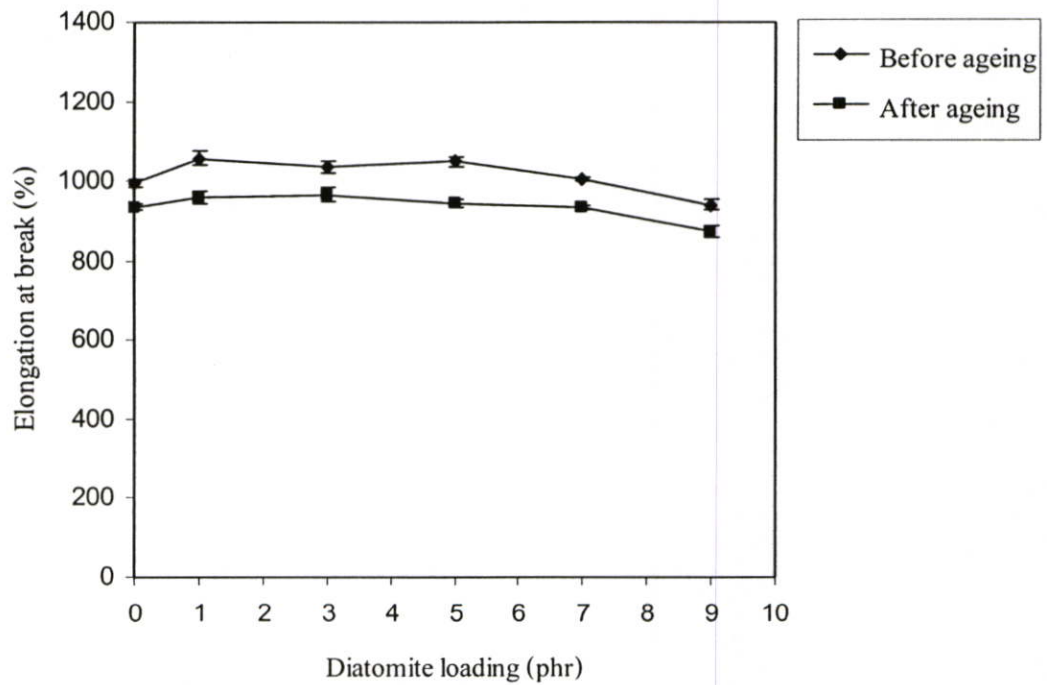
จากรูปที่ 4.20 แสดงค่าความแข็งแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่ง เมื่อแปรปริมาณโคอะทอไมต์ 1 3 5 7 และ 9 phr ตามลำดับ พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง และ ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดก่อนบ่มเร่ง (รูปที่ 4.21) ที่ปริมาณโคอะทอไมต์ 1 phr มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับยางผสมสูตรเมื่อไม่มีปริมาณโคอะทอไมต์เนื่องจาก โคอะทอไมต์สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติได้ [33] ซึ่งทำให้ยางมีความเสถียรและมีความแข็งแรงขึ้น แต่เมื่อปริมาณโคอะทอไมต์เพิ่ม

มากขึ้นส่งผลให้ ค่าความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.20) ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.21) และค่าความแข็งแรงฉีกขาดก่อนบ่มเร่ง (รูปที่ 4.23) มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากไดอะทอไมด์มีซิติกาเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีขั้วค่อนข้างสูง และมีหมู่ของไฮดรอกซิลอยู่ในปริมาณมาก จึงทำให้กลุ่มของไดอะทอไมด์บางส่วนเกิดการรวมตัวเข้ากันกับยางได้ไม่ดี และบางส่วนเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้น (รูปที่ 4.28) ทำให้แรงยึดระหว่างยางและสารตัวเติมลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของยางผสมสูตรลดลง โดยค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งเมื่อปริมาณไดอะทอไมด์เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับก่อนบ่มเร่ง ส่วนค่ามอดูลัสที่ 300 % ก่อนและหลังบ่มเร่ง (รูปที่ 4.22) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเติมปริมาณไดอะทอไมด์ลงไปในช่วงค่าความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.20) มอดูลัสที่ 300 % (รูปที่ 4.22) หลังบ่มเร่งมีค่าสูงขึ้น ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.21) หลังบ่มเร่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการทดสอบก่อนบ่มเร่ง เนื่องจากการเสื่อมสภาพทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่ แล้วเกิดการเชื่อมต่อเป็นพันธะเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการแตกออกของพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic crosslinks) แล้วเชื่อมโยงใหม่เป็นพันธะเชื่อมโยงเดี่ยวโมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic crosslinks) หลายๆ พันธะซึ่งแข็งแรงและมีเสถียรภาพมากขึ้น [4,38]

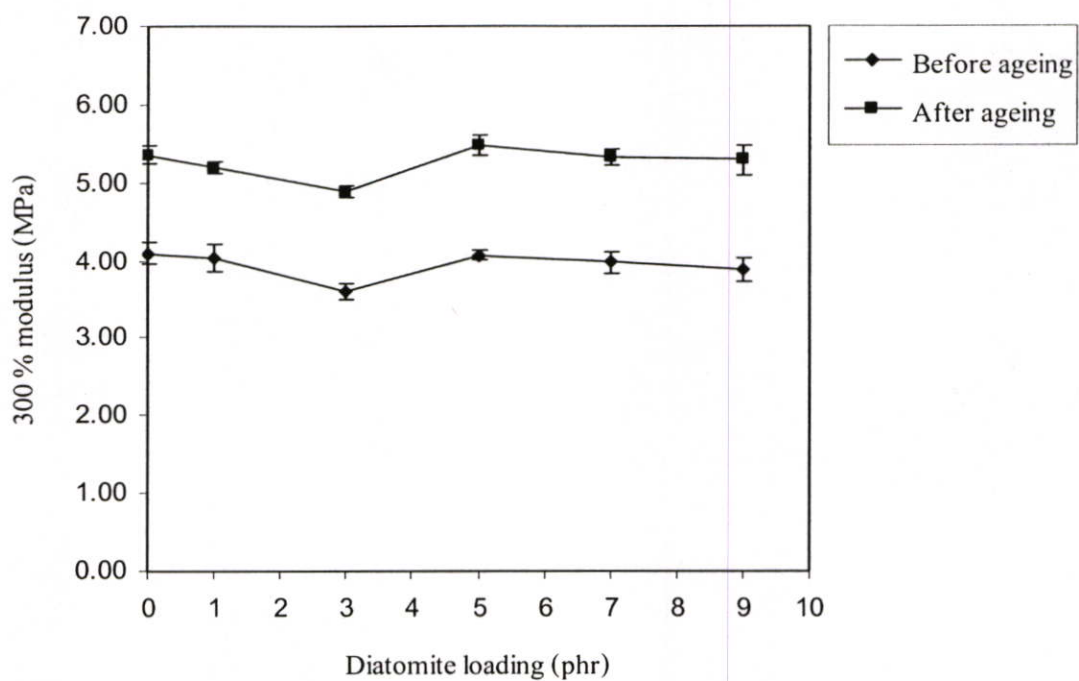
จากรูปที่ 4.24 แสดงค่าความแข็งแรงกด เมื่อแปรค่าปริมาณไดอะทอไมด์ 1 3 5 7 และ 9 phr พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากไดอะทอไมด์เป็นสารตัวเติมชนิดหนึ่งจัดเป็นอนุภาคของแข็ง เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ไดอะทอไมด์จึงไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนรูปร่างเมื่อได้รับแรงเมื่อเติมลงไปในช่วงทำให้ความยืดหยุ่น (Elasticity) ลดลง ส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงกดเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงกดเป็นการวัดบริเวณผิวหน้าของยางเพียงอย่างเดียวจึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังกล่าว



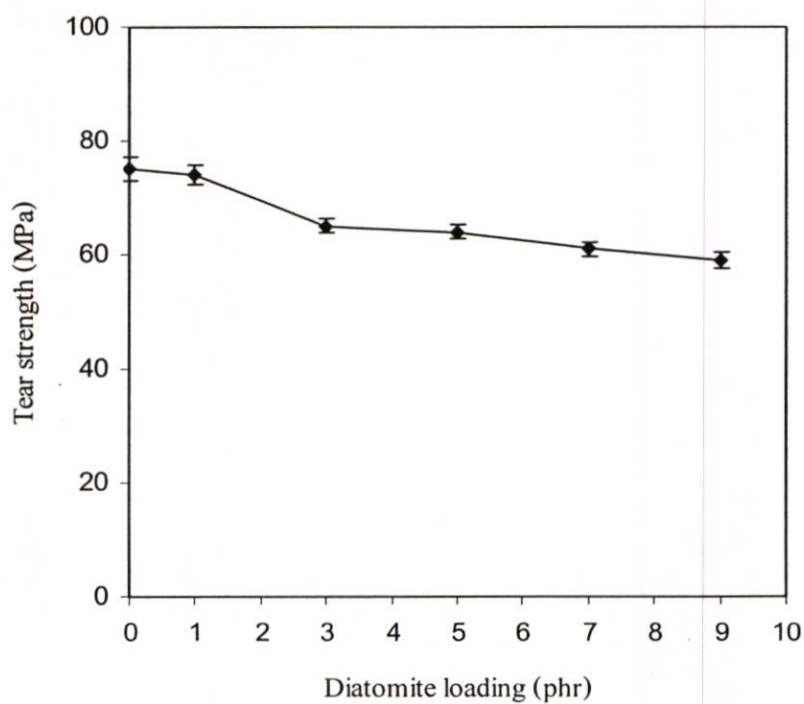
รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งแรงดึงก่อนบ่มแรงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณไดอะทอมไมต์ต่างกัน



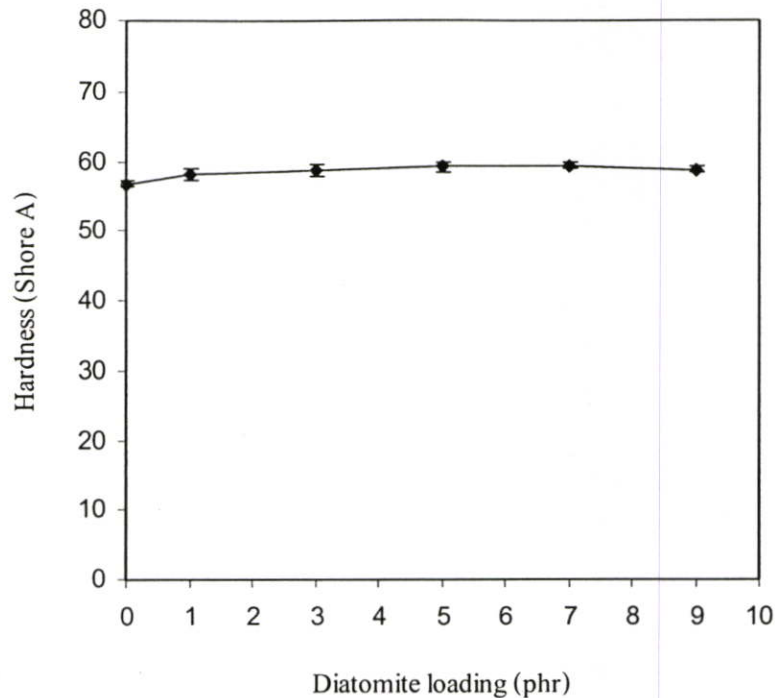
รูปที่ 4.21 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดก่อนบ่มแรงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณไดอะทอมไมต์ต่างกัน



รูปที่ 4.22 ค่ามอดูลัสที่ 300 % ก่อนบ่มแรงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณไดอะทอมไมต์ต่างกัน

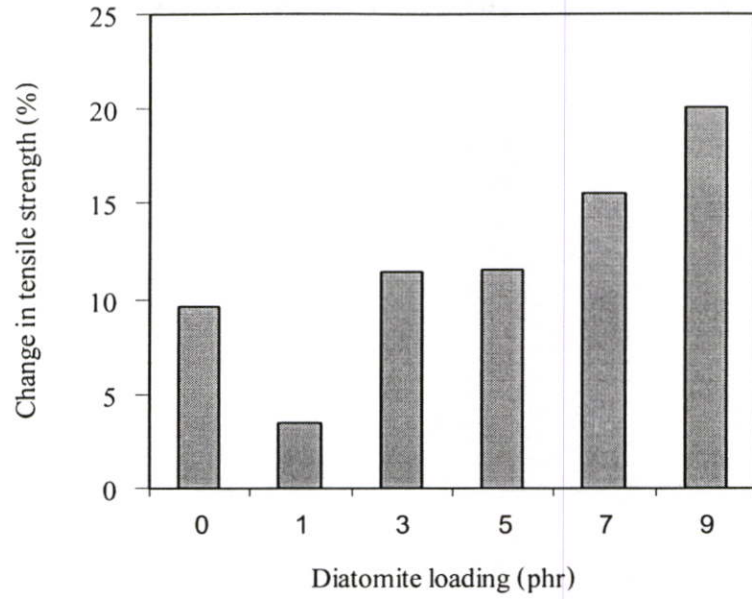


รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดก่อนบ่มแรงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณไดอะทอมไมต์ต่างกัน

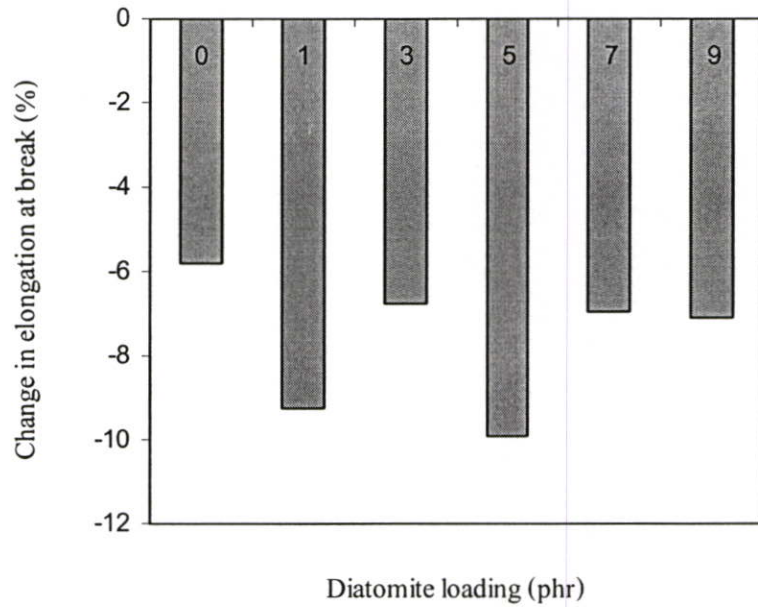


รูปที่ 4.24 ค่าความแข็งกดก่อนบ่มแรงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณไดอะทอมไมต์ต่างกัน

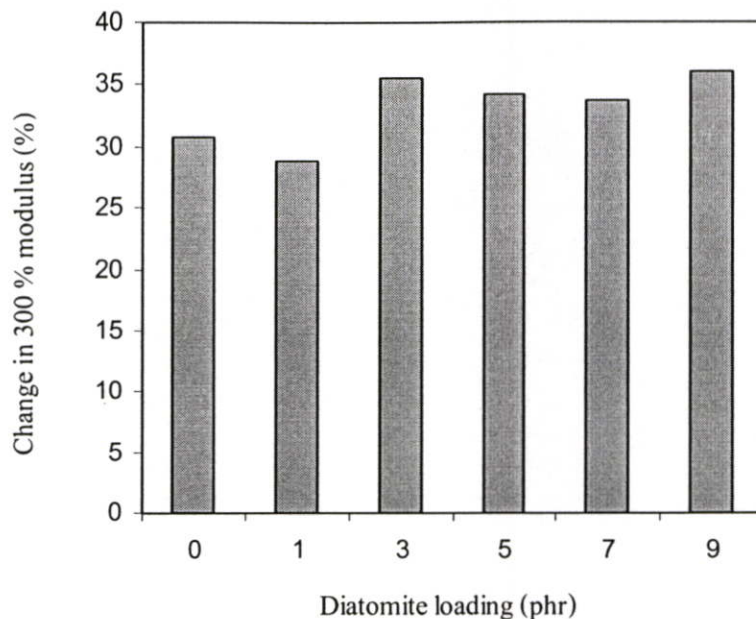
เมื่อนำผลการทดสอบก่อนบ่มแรงคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดสอบหลังบ่มแรงดังรูป 4.25 4.26 และ 4.27 พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.25) และ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ 300 % มอดูลัส (รูปที่ 4.27) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไดอะทอมไมต์เพิ่มขึ้น เนื่องจาก พันธะซิลิกอน-ออกซิเจน (Si-O bond) เป็นพันธะที่แข็งแรงมีพลังงานพันธะสูงกว่า พลังงานพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน(C-C bond) ทำให้ไดอะทอมไมต์มีความทนต่อความร้อนได้[33,34] และการเกิดโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของไดอะทอมไมต์ค่อนข้างเสถียรและแข็งแรง เพราะแรงดึงดูดระหว่างกลุ่มก้อนของไดอะทอมไมต์เป็นแรงที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bridge) [33] การเกิดโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของไดอะทอมไมต์ ทำให้ยางมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างสูงขึ้น นั่นคือความสามารถในการรักษาสสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงเพิ่มขึ้น ส่วนร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มแรง (รูปที่ 4.26) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.25 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณไดอะทอมไมต์ต่างกัน



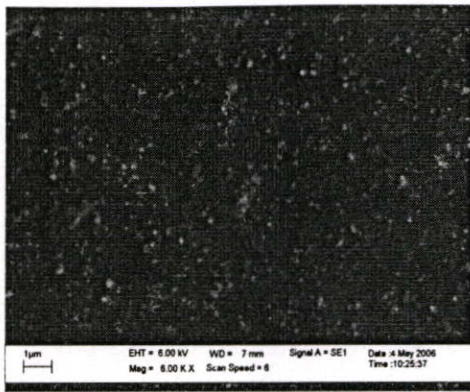
รูปที่ 4.26 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณไดอะทอมไมต์ต่างกัน



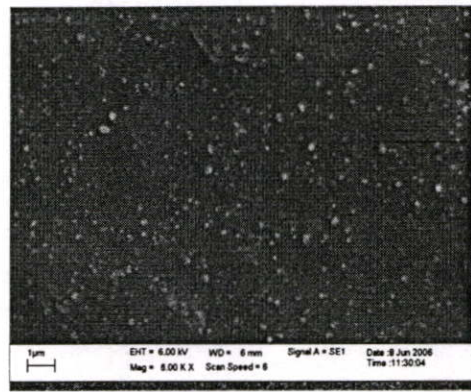
รูปที่ 4.27 ค่าร้อยละมอดูลัส 300 % ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณไดอะทอมไมต์ต่างกัน

#### 4.3.2 ลักษณะวิทยาของยางผสมสูตร ที่ปริมาณไดอะทอมไมต์ต่างกัน

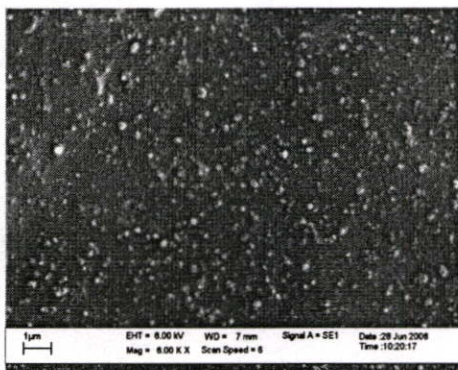
การศึกษาลักษณะวิทยาของยางผสมสูตรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นการศึกษาลักษณะวิทยาของพื้นผิววัสดุ ที่เตรียมได้จากการหักที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างเช่นไนโตรเจนเหลว จากนั้นทำการหักชิ้นงาน ในการทดลองนี้ทำการศึกษา SEM ของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการศึกษาปริมาณของไดอะทอมไมต์ 0 1 3 5 7 และ 9 phr เนื่องจากเป็นยางผสมสูตรที่เลือกเพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป ซึ่งสามารถศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิว เมื่อมีการเติมไดอะทอมไมต์ลงในยางผสมสูตร โดยผลการศึกษา SEM แสดงดังรูป 4.28



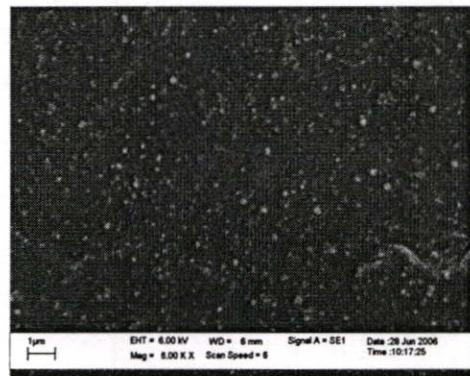
รูป ก



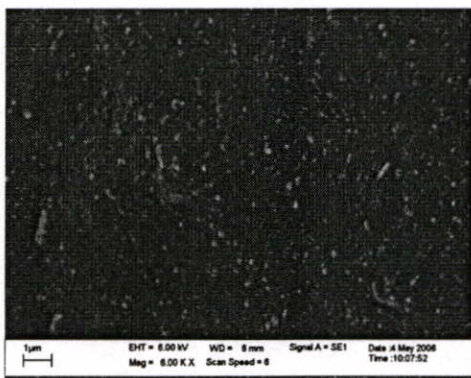
รูป ข



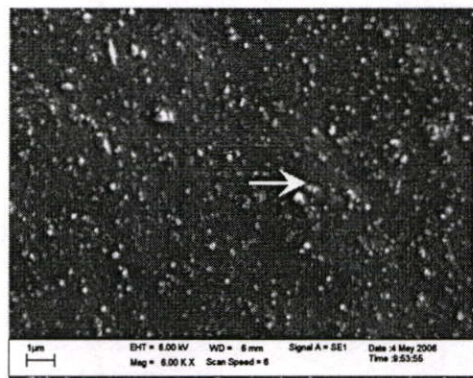
รูป ค



รูป ง



รูป จ



รูป ฉ

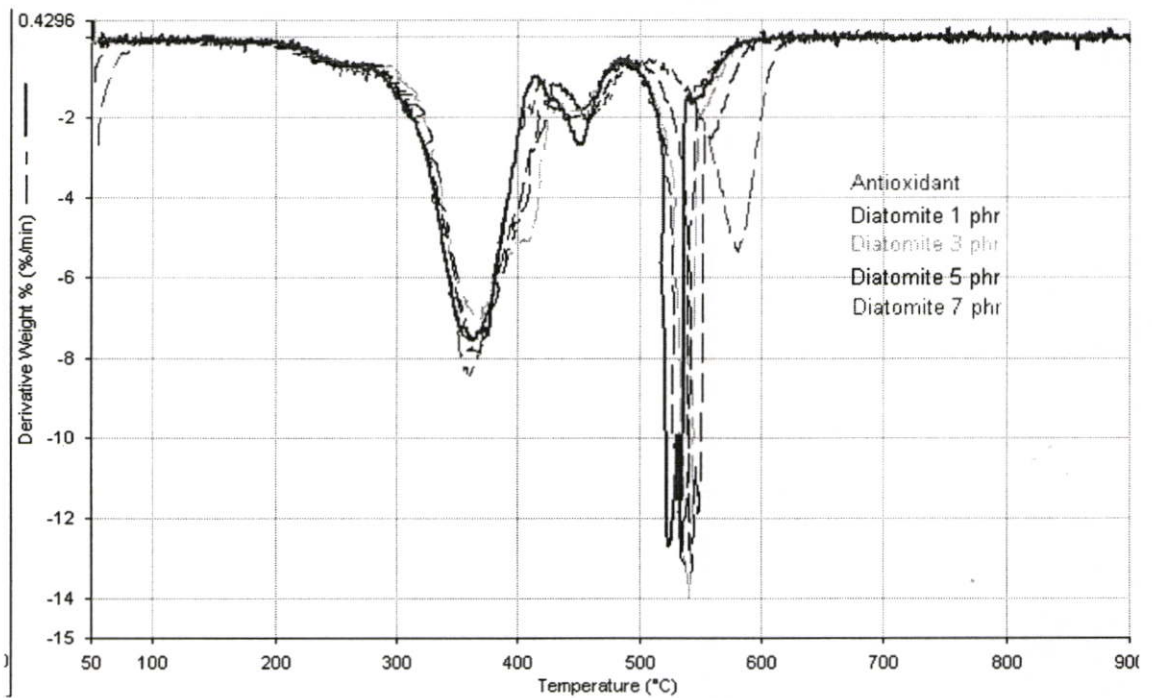
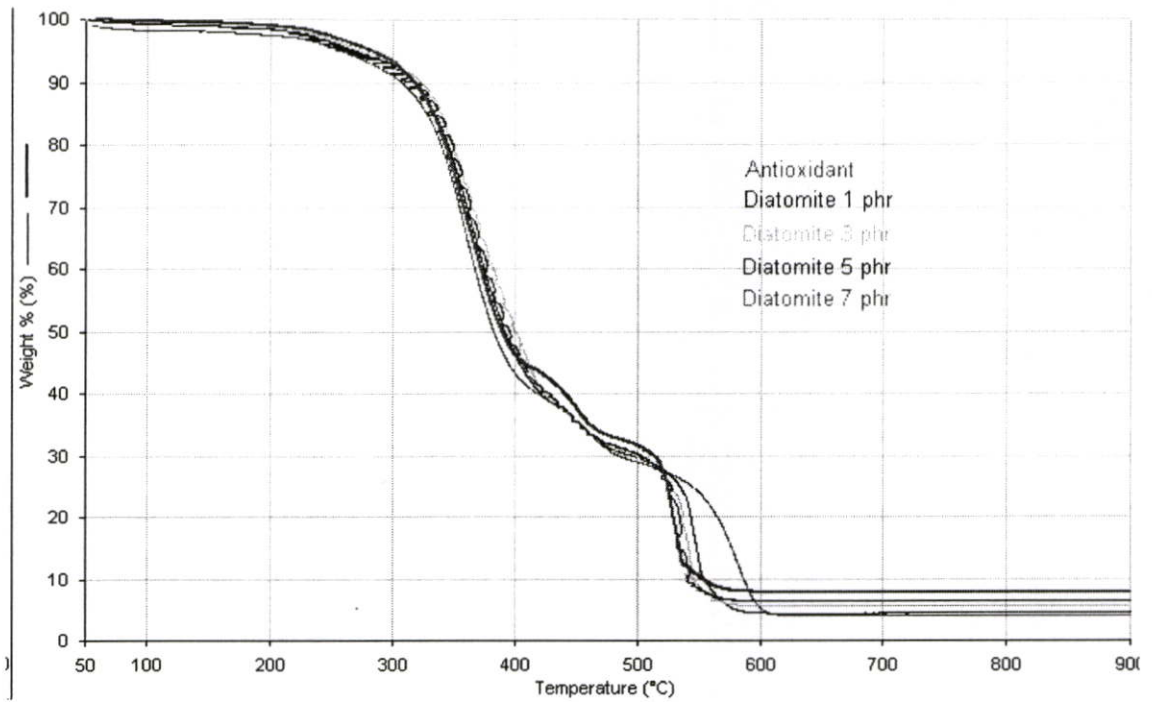
รูปที่ 4.28 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อใช้ ปริมาณไดอะทอไมต์ต่างกัน (ภาพ ก ข ค ง และ ฉ ปริมาณไดอะทอไมต์ 0 1 3 5 7 และ 9 phr ตามลำดับ) กำลังขยาย 6000 เท่า

จากรูปที่ 4.28 แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรที่มีปริมาณของไดอะทอไมต์ 0 1 3 5 7 และ 9 phr รูปที่ 4.28 ก ยางผสมสูตรที่มีปริมาณเขม่าดำ 40 phr และปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 1 phr ไม่มีปริมาณของไดอะทอไมต์ สังเกตเห็นบริเวณเม็ดกลมสีขาวกระจายตัวอยู่ทั่วไป แต่เมื่อมีปริมาณของไดอะทอไมต์เพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 4.28 ข ก ง จ และ ฉ) ของยางผสมสูตรแปรปริมาณไดอะทอไมต์ 1 3 5 7 และ 9 phr จะเห็นว่าบริเวณเม็ดกลมสีขาวมีการกระจายตัวและมีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ เนื่องจากไดอะทอไมต์สามารถกระจายตัวได้ดีในยางและเขม่าดำได้ และเมื่อปริมาณไดอะทอไมต์เพิ่มมากขึ้นจนเกิดการรวมตัวกันเองเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองสมบัติเชิงกล ทำให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง

#### 4.3.3 สมบัติทางความร้อนของยางผสมสูตร ที่ปริมาณไดอะทอไมต์ต่างกัน

สมบัติทางความร้อนของยางเป็นสมบัติหนึ่งที่สำคัญต่อการใช้งาน เพื่อให้ยางทนความร้อนได้ดีขึ้น ใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermal Gravimetric, TGA) ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน โดยบอกเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุ

จากรูปที่ 4.29 เมื่อใช้ปริมาณไดอะทอไมต์ 0 1 3 5 และ 7 phr พบว่ายางผสมสูตรมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกิดจากการสูญเสียน้ำหนักของยาง 3 ช่วง โดยการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกเป็นการระเหยของน้ำและความชื้นที่เป็นองค์ประกอบของยางที่อุณหภูมิประมาณ  $80^{\circ}\text{C}$  ส่วนในช่วงที่ 2 เป็นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของการสลายตัวของโครงสร้างยางธรรมชาติ ในช่วงอุณหภูมิ  $309 - 468^{\circ}\text{C}$  (รูปที่ 1 ภาคผนวก ก) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของยางผสมสูตร พบว่าเมื่อปริมาณไดอะทอไมต์เพิ่มขึ้นอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของยางผสมสูตรมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากไดอะทอไมต์มีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิว สามารถเกิดพันธะเคมีหรือแรงกระทำ (Interaction) กับสายโซ่โมเลกุลยาง และเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารตัวเร่งซึ่งเชื่อมโยงกับโครงสร้างของยาง [36] ทำให้สายโซ่ของยางเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของยางผสมสูตรมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนในช่วงที่ 3 เป็นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของการสลายตัวของเขม่าดำในช่วงอุณหภูมิประมาณ  $582 - 626^{\circ}\text{C}$  (รูปที่ 2 ภาคผนวก ก) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเขม่าดำ พบว่าเมื่อปริมาณไดอะทอไมต์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของเขม่าดำมีค่าต่ำลง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากความเป็นกรดบนพื้นผิวของไดอะทอไมต์ ส่งผลถึงประสิทธิภาพของเขม่าดำลดลง และในโครงสร้างที่เป็นรูปทรงของไดอะทอไมต์ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กมาก และมีพื้นที่ผิวสูงเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางกับเขม่าดำทำให้เกิดช่องว่างระหว่างสายโซ่ของยางและเขม่าดำห่างกันขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิการเริ่มสลายตัวของเขม่าดำลดต่ำลง



รูปที่ 4.29 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณไดอะทอมไมต์ 0 1 3 5 และ 7 phr

จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวของยางผสมสูตรในรูป 4.29 สามารถสรุปอุณหภูมิการเริ่มสลายตัวของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณไดอะทอไมต์ 0 1 3 5 และ 7 phr ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการสลายตัวของยางผสมสูตร เมื่อปริมาณไดอะทอไมต์ 0 1 3 5 และ 7 phr ที่ได้จากเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก

ชนิดของตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว (°C)	
	ยางธรรมชาติ	เขม่าดำ
Antioxidant 1 phr	315	552
Diatomite 1 phr	317	535
Diatomite 3 phr	319	525
Diatomite 5 phr	319	523
Diatomite 7 phr	318	518

ไดอะทอไมต์ซึ่งเป็นซิลิกาจากธรรมชาติ เป็นสารตัวเติมเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำชนิดอื่นๆ และช่วยเพิ่มสมบัติการทนความร้อนให้กับยาง จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวของไดอะทอไมต์ (รูปที่ 9 ภาคผนวก ก) พบว่าอุณหภูมิการเริ่มสลายตัวของไดอะทอไมต์มีค่าสูงกว่า 700 °C แสดงให้เห็นว่าไดอะทอไมต์สามารถทนความร้อนได้ดี

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสมสูตรกับตารางที่ 4.2 พบว่า การใช้ยางธรรมชาติผสมไดอะทอไมต์ในปริมาณ 7 phr มีสมบัติอยู่ในเกณฑ์ของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด (ความแข็งแรงดึง 17.65 MPa) ในขณะที่ค่าความแข็งแรงดึงก่อนบ่มแรง ของยางธรรมชาติผสมไดอะทอไมต์ในปริมาณ 9 phr ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดสำหรับใช้ในการผลิตยางสายพานคือ 17.43 MPa แต่สามารถนำไปใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณไดอะทอไมต์ 7 phr ในการศึกษาปัจจัยอื่นต่อไป

ตารางที่ 4.2 สมบัติของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

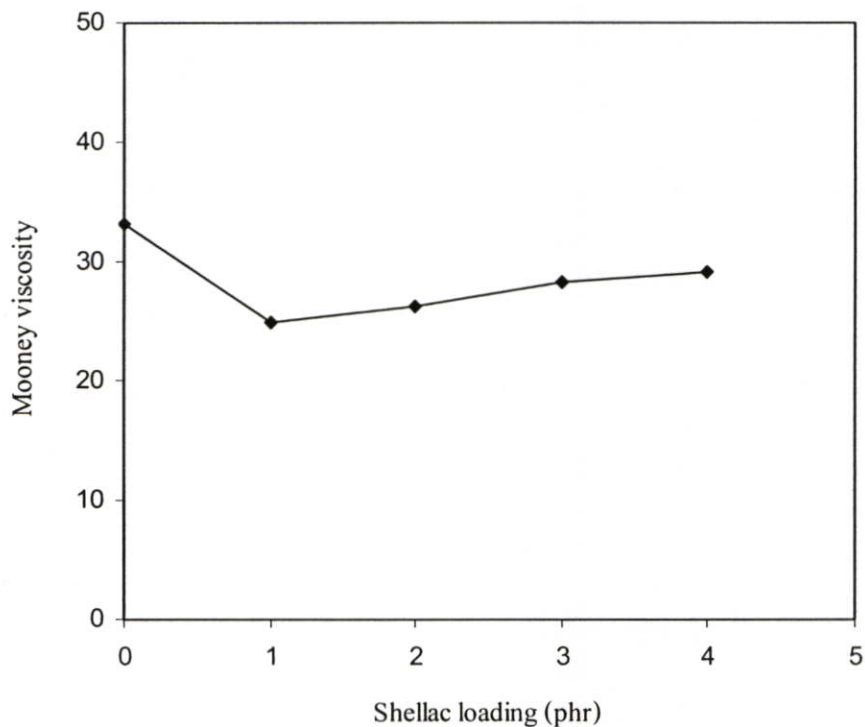
สมบัติของยาง	มาตรฐานที่กำหนด						
	สายพาน ดำเดี่ยว	ยางปูพื้น รถยนต์	ยางรถยนต์ (ดอกยาง)	ยางหุ้มขอบ กระถางรถยนต์	ยางในรถ จักรยานยนต์	%ต่อท่อไมท์ 7 phr	%ต่อท่อไมท์ 9 phr
- สมบัติก่อนบ่มแรง							
ความแข็งแรงดึง (MPa) ไม่น้อยกว่า	17.65	10.2	13	7.0	11.77	19.03	17.43
ร้อยละการขีด ฉีกขาด (%) ไม่น้อยกว่า	450	250	350	300	500	1006	942
ความแข็งแรงฉีกขาด (MPa) ไม่น้อยกว่า	-	52.5	-	15	-	61	59
- สมบัติหลังบ่มแรง							
ความแข็งแรงดึง (MPa) ไม่น้อยกว่า	14.71	8.3	-	-	-	21.99	20.94
ร้อยละการขีด ฉีกขาด (%) ไม่น้อยกว่า	380	200	-	-	-	936	875
ร้อยละความแข็งแรงดึงที่เปลี่ยนแปลง (%)	-	-	20	25	10	15.55	20.13

#### 4.4 การศึกษาปริมาณเซลแล็ก

การใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางบ่อยครั้งต้องมีการแช่หรือสัมผัสของเหลวเป็นเวลานานๆ เช่น ท่อน้ำมันรถยนต์ ซิลสำหรับเครื่องซักผ้า ยางรองแท่นเครื่องจักร เป็นต้น ระหว่างที่แช่อยู่นั้นยางจะดูดซึมของเหลวเข้าไปในตัวเอง ทำให้เกิดการบวมพอง ความแข็งแรงและความแข็งของยางจะลดลงเมื่อมีของเหลวอยู่

การทำให้ยางคอมปาวด์มีความต้านทานต่อของเหลวดี ต้องใช้ปริมาณของสารตัวเติมและ พลาสติไซเซอร์ให้มาก [4] อย่างไรก็ตาม การบวมพองของยางมิใช่ว่าจะลดน้อยลงเพียงเมื่อการใช้สารตัวเติมปริมาณมากเท่านั้น ในกรณีเมื่อใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม เขม่าดำจะมีปฏิกิริยากับยางเกิดการเชื่อมโยง (Filler-rubber bonding) ซึ่งทำให้การบวมพองมากขึ้นไปอีก

ในงานวิจัยนี้เลือกทำการศึกษาปริมาณและบทบาทของเซลแล็ก (Shellac) เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติทนต่อน้ำมัน นำมาทดสอบต่อโดยแปรค่าปริมาณเซลแล็กที่ 1 2 3 และ 4 phr



รูปที่ 4.30 แสดงความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 (100 °C)) เมื่อใช้ปริมาณเซลแล็กต่างกัน

จากรูปที่ 4.30 แสดงค่าความหนืดมูนนี่ เมื่อใช้ปริมาณเซลแล็ก 0 1 2 3 และ 4 phr ในยางผสมสูตร พบว่าเมื่อเติมเซลแล็กค่าความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตรลดลง เนื่องจากเซลแล็กมีองค์ประกอบของแว็กซ์อยู่ประมาณ 6-7 % ซึ่งช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นกับยาง ทำให้แปรรูปได้ง่าย

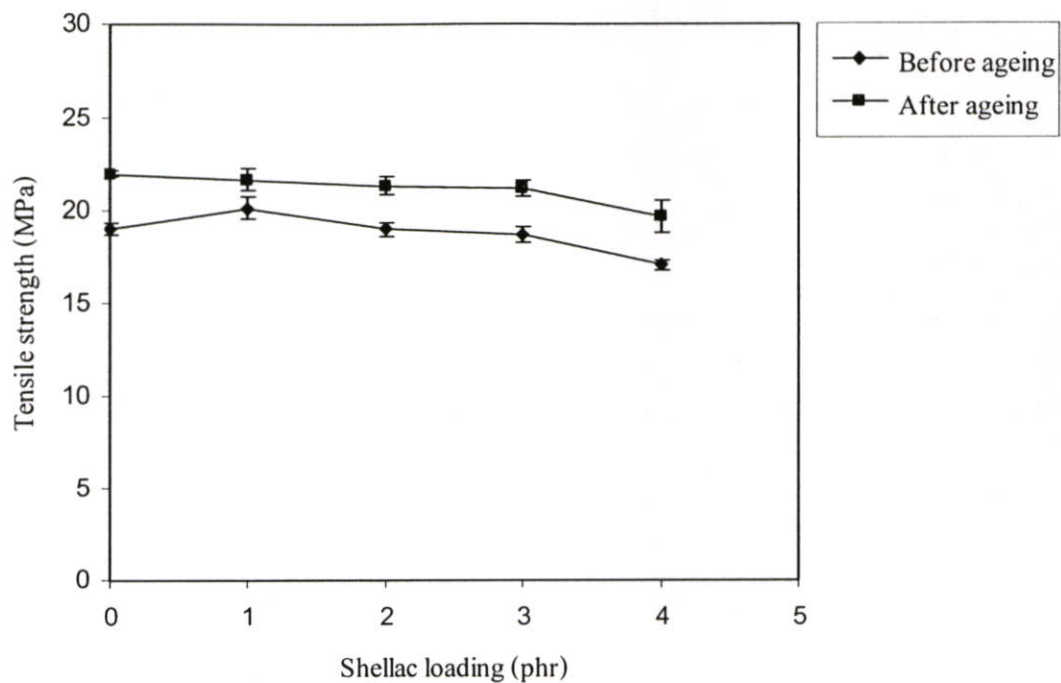
ขึ้น เมื่อปริมาณเซลล์เล็กเพิ่มมากขึ้นความหนืดมูนิมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเซลล์เล็กมีเรซินเป็นองค์ประกอบประมาณ 70-80 % ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวได้น้อยลง และลดความสามารถในการไหลของยางผสมสูตร[3]

#### 4.4.1 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งที่ปริมาณเซลล์ต่างกัน

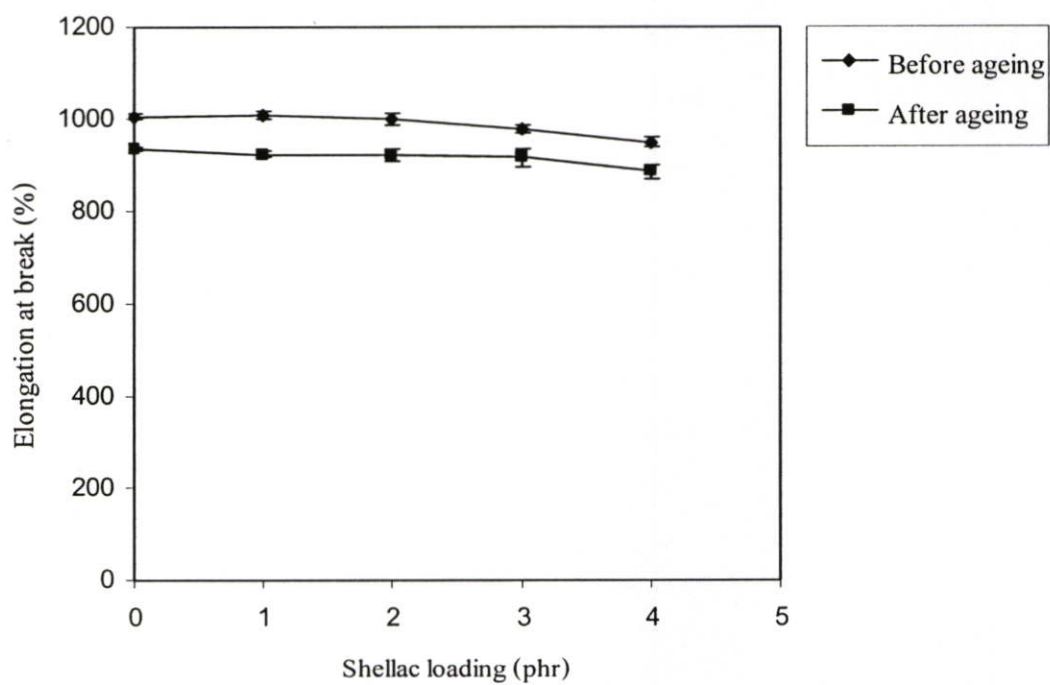
จากการทดสอบผลของปริมาณเซลล์ที่ศึกษา คือ 1 2 3 และ 4 phr ต่อสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมทำให้ยางทนต่อน้ำมันได้ดี แสดงดังรูปที่ 4.31 4.32 4.32 4.34 และ 4.35

จากรูปที่ 4.31 แสดงค่าความแข็งแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่ง เมื่อแปรปริมาณเซลล์เล็ก 1 2 3 และ 4 phr ตามลำดับ พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่ง (รูปที่ 4.31) มีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกับค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.32) และ ค่าความแข็งแรงฉีกขาด (รูปที่ 4.34) เนื่องจากเซลล์เล็กประกอบด้วยส่วนผสมของพอลิเอสเทอร์หลายชนิดซึ่งมีความยาวไม่มาก และเป็นสารอินทรีย์เช่นเดียวกับเขม่าดำและยาง ทำให้เกิดการรวมตัวเกิดเป็นช่องว่าง (Voids) ขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อยางได้รับแรงดึง ทำให้โมเลกุลของยางเกิดการฉีกขาดได้ง่ายขึ้น [3] เนื่องจากเซลล์เล็กเป็นสารอินทรีย์และมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกับเขม่าดำและยาง เมื่อผสมกับเขม่าดำและยางธรรมชาติ จึงเพิ่มความมีขั้วให้กับยาง ทำให้เกิดการรวมเป็นกลุ่มใหญ่ และเกิดช่องว่างระหว่างความไม่มีขั้วขององค์ประกอบคาร์บอนกับความมีขั้วของไดอะทอไมด์ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง ค่าความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.31) มอดูลัสที่ 300 % หลังบ่มเร่ง (รูปที่ 4.33) มีค่าสูงขึ้น ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.32) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการทดสอบก่อนบ่มเร่ง โดยการคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.36) และ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ 300 % มอดูลัส (รูปที่ 4.38) มีแนวโน้มลดลง ส่วนร้อยละการยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.37) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

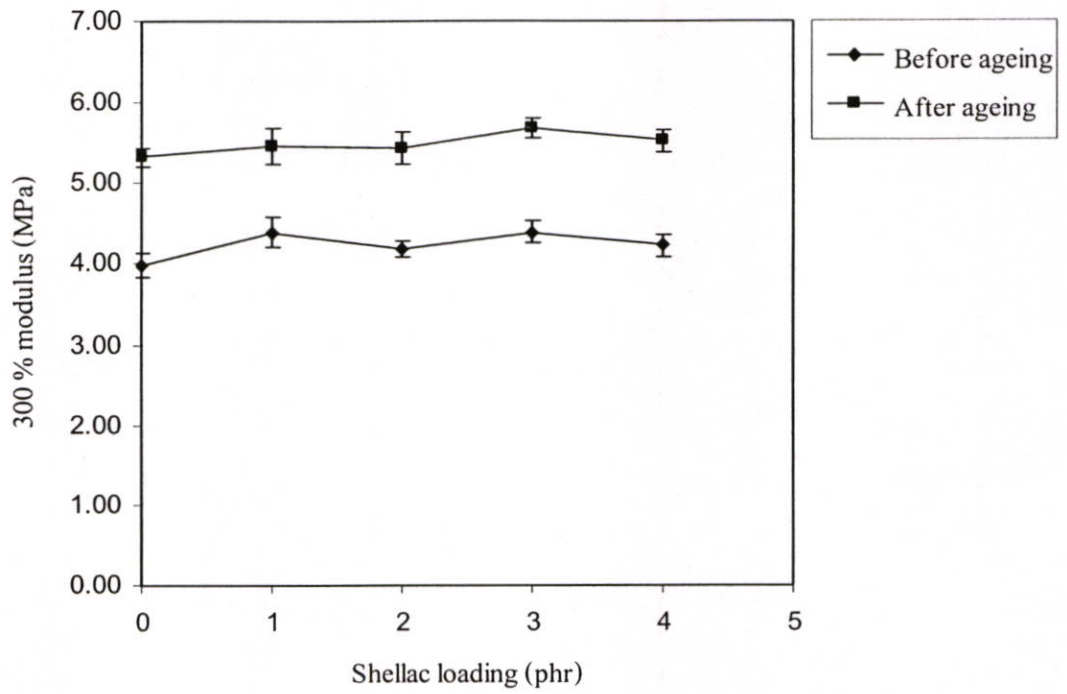
จากรูปที่ 4.33 แสดงค่า 300% มอดูลัส เมื่อแปรค่าปริมาณเซลล์เล็ก 1 2 3 และ 4 phr พบว่าค่า 300 % มอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเซลล์เล็กประกอบด้วยส่วนผสมของเรซินร้อยละ 70 - 80 สามารถผสมกระจายตัวในยางธรรมชาติได้โดยเฉพาะเมื่อมีสารตัวเติมเขม่าดำ จึงทำให้ยางเมื่อมีสารตัวเติมมากขึ้นทำให้สายโซ่เคลื่อนไหวได้ยากขึ้น [3] ค่ามอดูลัสจึงเพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งกด (รูปที่ 4.35) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากปริมาณของเซลล์ที่เติมลงไปในยางผสมสูตรค่อนข้างน้อย และการทดสอบเป็นการวัดบริเวณผิวหน้าเพียงอย่างเดียวจึงไม่ส่งผลต่อการทดสอบ



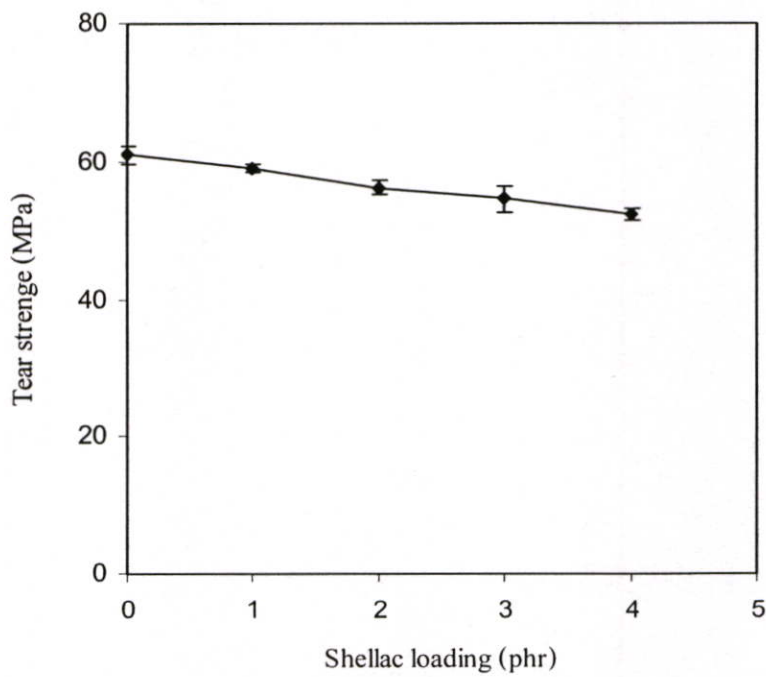
รูปที่ 4.31 ค่าความแข็งแรงดึงก่อนบ่มแรงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลลैคต่างกัน



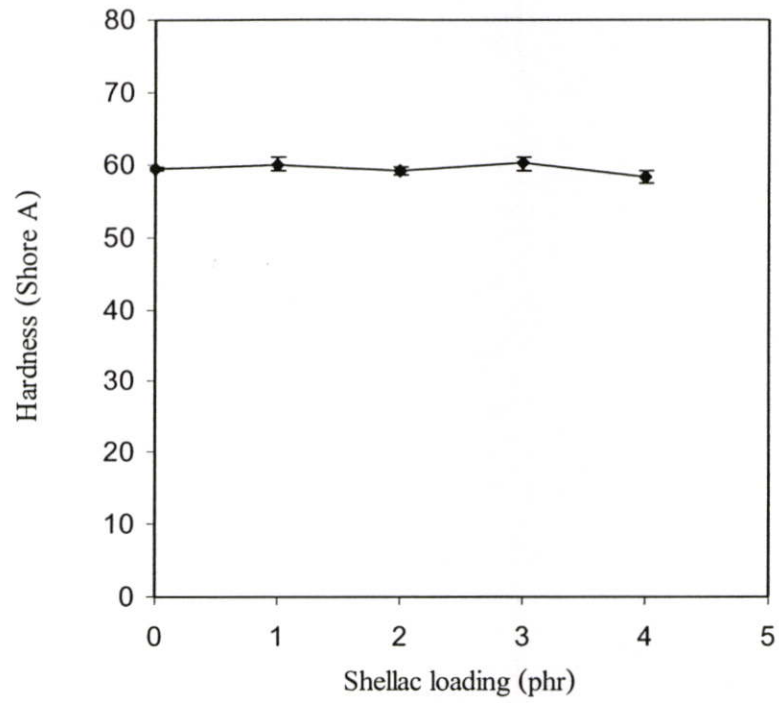
รูปที่ 4.32 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดก่อนบ่มแรงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลลैคต่างกัน



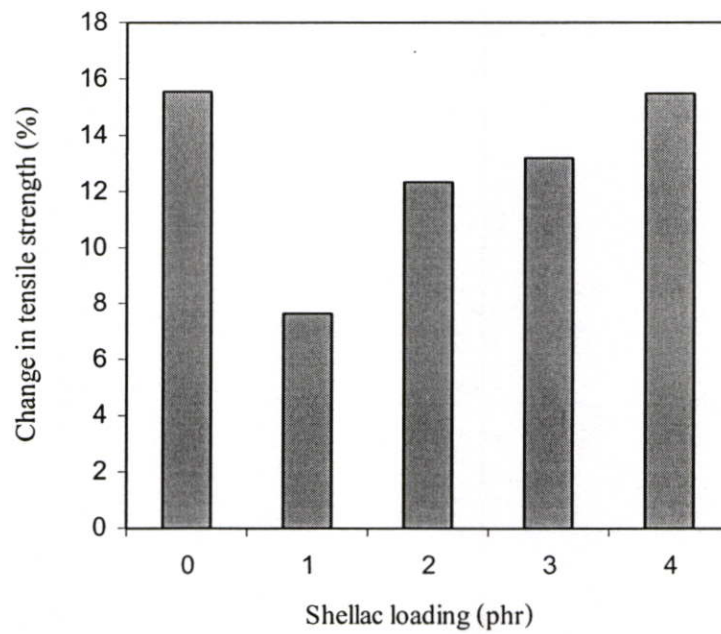
รูปที่ 4.33 ค่ามอดูลัสที่ 300% ก่อนบ่มแรงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลลูล์ต่างกัน



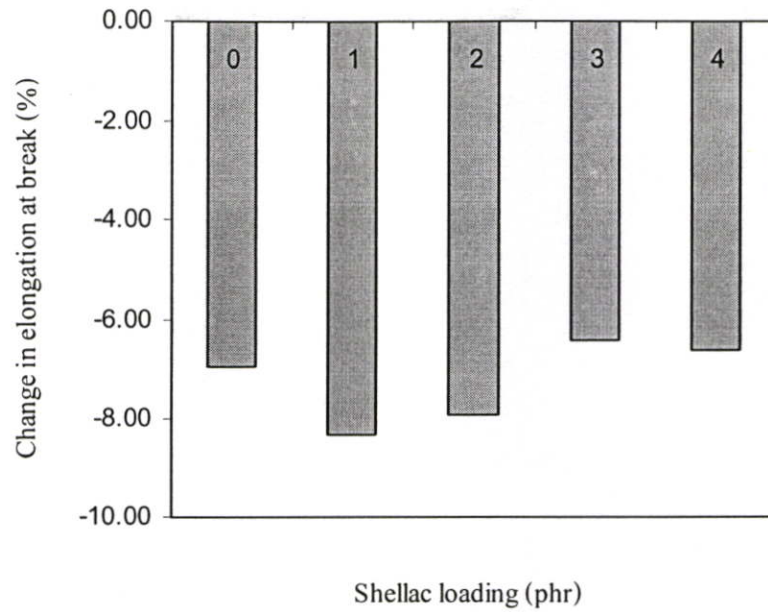
รูปที่ 4.34 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดก่อนบ่มแรงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลลูล์ต่างกัน



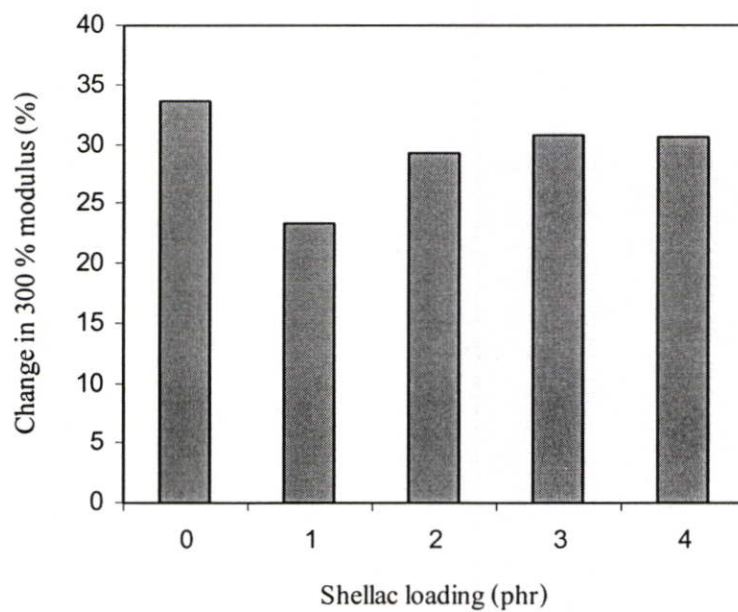
รูปที่ 4.35 ค่าความแข็งกดก่อนบ่มแรงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลแล็กต่างกัน



รูปที่ 4.36 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลแล็กต่างกัน



รูปที่ 4.37 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลลูล์กต่างกัน



รูปที่ 4.38 ค่าร้อยละมอดูลัส 300 % ที่เปลี่ยนแปลงของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลลูล์กต่างกัน

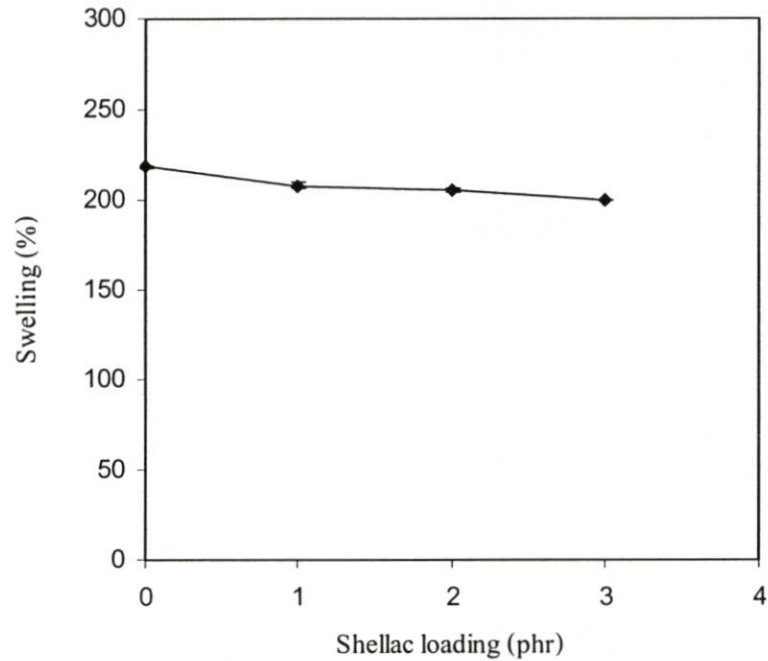
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อใช้เซลเล็กผสมลงในยาง ปริมาณ 1 2 และ 3 phr มีสมบัติอยู่ในเกณฑ์ของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กำหนด (ความแข็งแรงดึง 17.65 MPa) ส่วนปริมาณเซลเล็ก 4 phr ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่า เกณฑ์ที่กำหนดสำหรับใช้ในการผลิตยางสายพานคือ 17.03 MPa แต่สามารถนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ ยางชนิดอื่นได้ และค่าความแข็งแรงฉีกขาดต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดสำหรับใช้ในการผลิตยางปูพื้น รถยนต์คือ 52 MPa โดยเกณฑ์ของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด (ความ แข็งแรงฉีกขาด 52.5 MPa) จึงเลือกปริมาณเซลเล็ก 1 2 และ 3 phr เพื่อนำไปทดสอบความ ทนทานต่อน้ำมันของยางผสมสูตรต่อไป

ตารางที่ 4.3 สมบัติของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

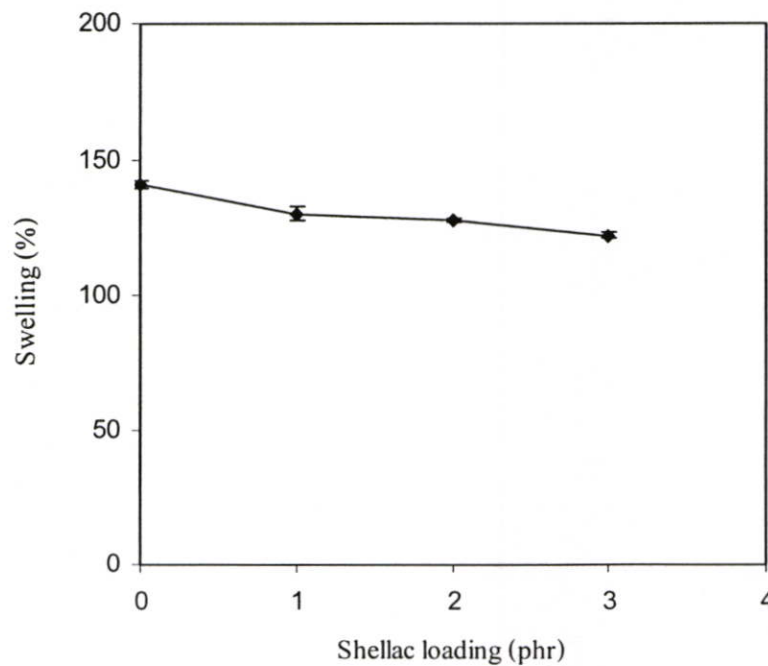
สมบัติของยาง	มาตรฐานที่กำหนด					
	สายพาน ลำเลียง	ยางปูพื้น รถยนต์	ยางรถยนต์ (ดอกยาง)	ยางหุ้มขอบ กระจกยนต์	ยางในรถ จักรยานยนต์	เชลเด็ก 4 phr
- สมบัติก่อนบ่มเร่ง						
ความแข็งแรงดึง (MPa) ไม่น้อยกว่า	17.65	10.4	13	7.0	11.77	17.03
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%) ไม่น้อยกว่า	450	250	350	300	500	949
ความแข็งแรงฉีกขาด (MPa) ไม่น้อยกว่า	-	52.5	-	15	-	52
- สมบัติหลังบ่มเร่ง						
ความแข็งแรงดึง (MPa) ไม่น้อยกว่า	14.71	8.3	-	-	-	19.67
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%) ไม่น้อยกว่า	380	200	-	-	-	886
ร้อยละความแข็งแรงดึงที่เปลี่ยนแปลง (%)	-	-	20	25	10	15.5

#### 4.4.2 ความทนทานต่อน้ำมันของยางผสมสูตร ที่ปริมาณเซลลैคต่างกัน

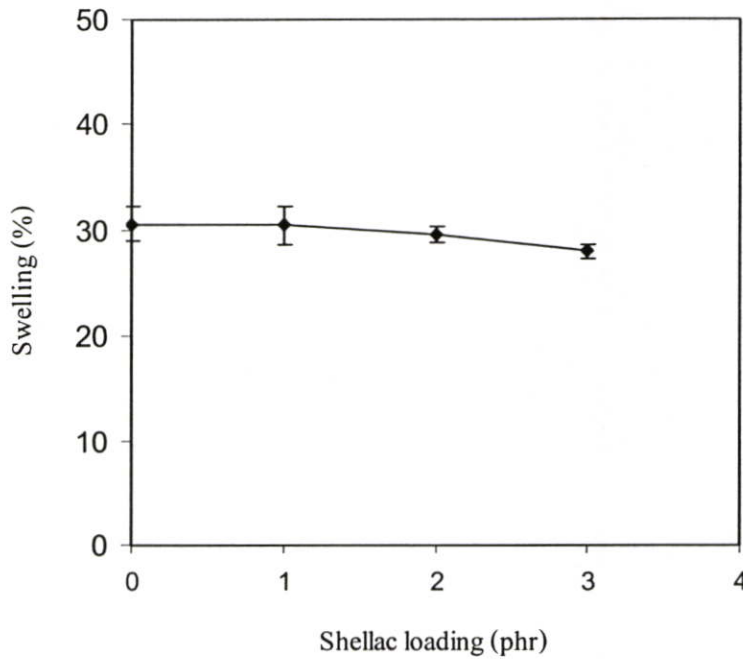
จากการทดสอบผลของปริมาณเซลลैค 1 2 และ 3 phr ที่มีความทนทานต่อน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล และน้ำมันไฮโดรลิก แสดงดังรูปที่ 4.39 4.40 และ 4.41



รูปที่ 4.39 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสมสูตรในน้ำมันเบนซิน เมื่อใช้ปริมาณเซลลैคต่างกัน



รูปที่ 4.40 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสมสูตรในน้ำมันดีเซล เมื่อใช้ปริมาณเซลลैคต่างกัน

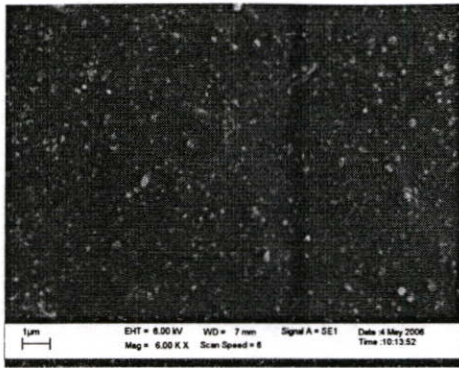


**รูปที่ 4.41** ค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสมสูตรในน้ำมันไฮโดรลิก เมื่อใช้ปริมาณเซลแล็กต่างกัน

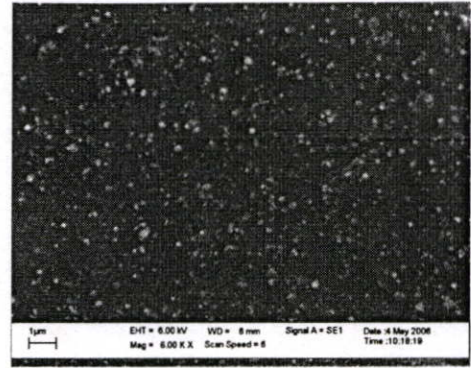
จากรูปที่ 4.39 4.40 และ 4.41 แสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสมสูตร เมื่อใช้ปริมาณเซลแล็ก 1 2 3 และ 4 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเซลแล็ก ค่าร้อยละการบวมตัวในน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล และน้ำมันไฮโดรลิก มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก เซลแล็กประกอบด้วยส่วนผสมของพอลิเอสเตอร์ (Polyester) หลายชนิดที่มีสมบัติทนน้ำมันได้ดี [38] เมื่อเติมลงไปในยางธรรมชาติเกิดการกระจายตัวได้ดี ในขณะที่ยางบวมพองในน้ำมันแต่เซลแล็กไม่บวมพอง เมื่อปริมาณเซลแล็กเพิ่มมากขึ้น สัดส่วนปริมาณยางในส่วนผสมน้อยลง การบวมพองจึงลดลงด้วย

#### 4.4.3 สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตร แปรปริมาณเซลแล็ก

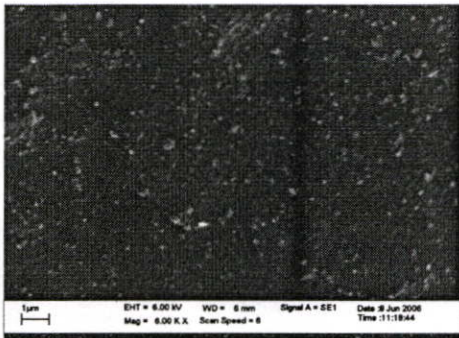
การทดลองส่วนนี้ ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการศึกษาปริมาณของเซลแล็ก 1 2 3 และ 4 phr ซึ่งสามารถศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิว โดยผลการศึกษา SEM แสดงดังรูปที่ 4.42



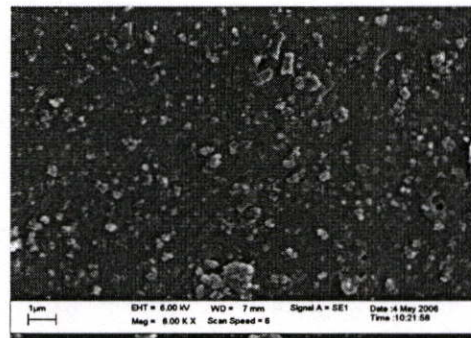
รูป ก



รูป ข



รูป ค



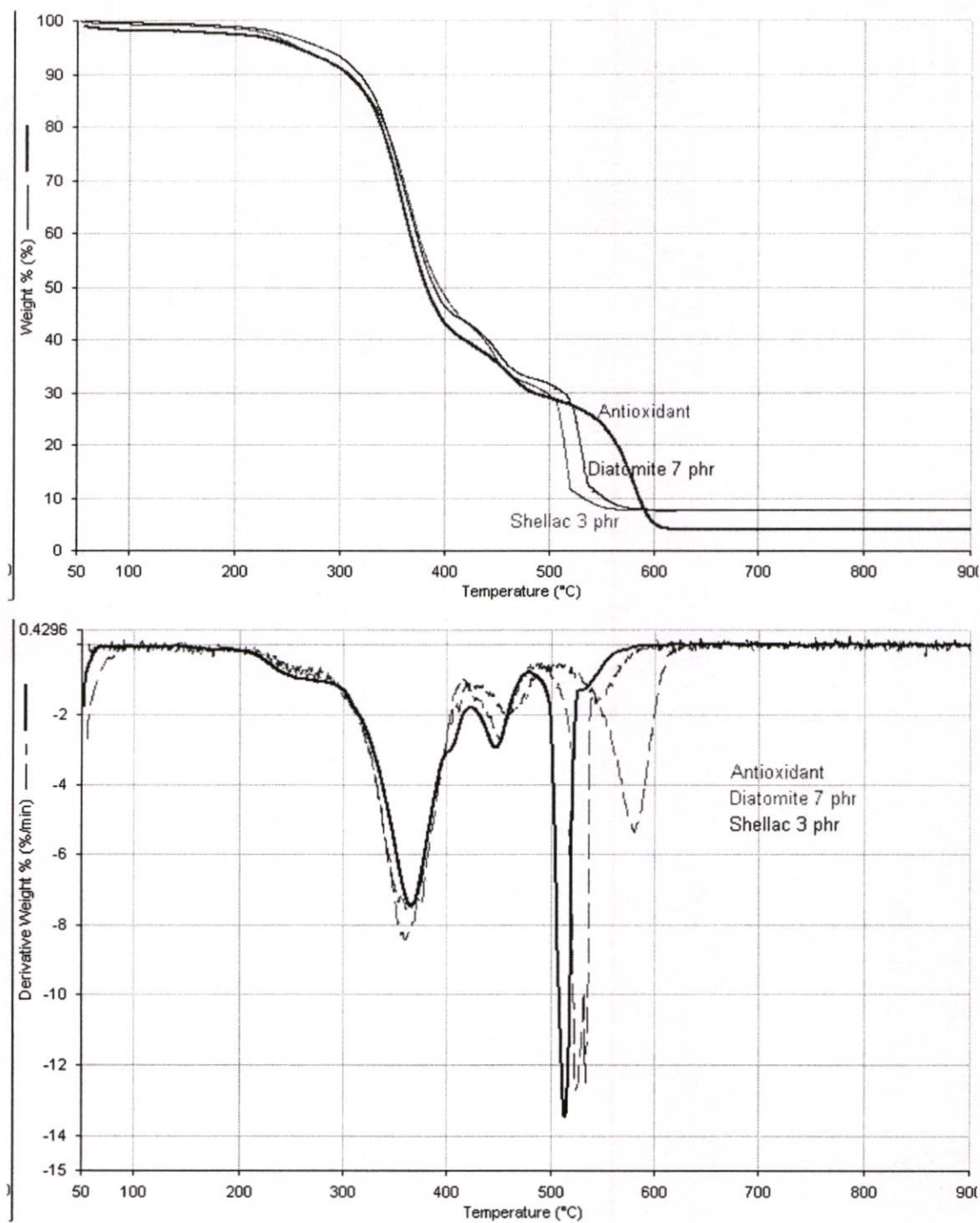
รูป ง

รูปที่ 4.42 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อใช้ปริมาณเซลลูล์ต่างกัน (ภาพ ก ข ค และ ง ปริมาณเซลลูล์ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ) กำลังขยาย 6000 เท่า

จากรูปที่ 4.42 ก ข ค และ ง แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรที่มีปริมาณเซลลูล์ 1 2 3 และ 4 phr ตามลำดับ สังเกตเห็นบริเวณสีขาวหรือเม็ดกลมมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเซลลูล์สามารถเกิดการรวมตัวอยู่ในกลุ่ม โครงสร้างของยางธรรมชาติ เมื่อปริมาณเซลลูล์เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยสังเกตเห็นได้ชัดในรูปที่ 4.42 ง ซึ่งมีปริมาณเซลลูล์มากเกินไปจนทำให้ปริมาณของเซลลูล์เกิดการรวมตัวกันเอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของสมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง และเนื่องจากเซลลูล์มีส่วนประกอบของพอลิเอสเทอร์ช่วยเพิ่มสมบัติความแข็งแรงให้กับยาง เมื่อปริมาณเซลลูล์เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถของการทนต่อน้ำมันดีขึ้น

#### 4.4.4 สมบัติทางความร้อนของยางผสมสูตร

การทดลองส่วนนี้ ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของยางผสมสูตร โดยทดสอบเปรียบเทียบกันระหว่างยางผสมสูตรเมื่อใช้โคอะทอไมด์ 7 phr แล้วเติมปริมาณเซลลูล์ไป 3 phr ทดสอบว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนจากเดิมหรือไม่



รูปที่ 4.43 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของยางผสมสูตร เปรียบเทียบกันระหว่าง ไดอะทอมไมต์ 7 phr และเติมเซลลูล์ก 3 phr

จากรูปที่ 4.43 เป็นการสลายตัวทางความร้อนของยางผสมสูตร เปรียบเทียบระหว่างยางผสมสูตรที่เหมาะสมคือปริมาณเซลลูล์ 3 phr และปริมาณไดอะทอไมต์ 7 phr พบว่ายางผสมสูตรที่มีปริมาณเซลลูล์ 3 phr มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกิดจากการสูญเสียน้ำหนักของยาง 3 ช่วง เหมือนกับปริมาณไดอะทอไมต์ 7 phr คือ ช่วงแรกเป็นการระเหยของน้ำและความชื้นที่เป็นองค์ประกอบของยาง ช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของการสลายตัวของโครงสร้างยางธรรมชาติ พบว่าเมื่อเติมปริมาณเซลลูล์อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อยคือในช่วงอุณหภูมิประมาณ 316-446 °C อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของไดอะทอไมต์ 7 phr คือ 318 °C ส่วนอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของเซลลูล์ 3 phr คือ 316 °C เนื่องจากองค์ประกอบของเซลลูล์มีส่วนผสมของเว็กซ์ปนอยู่เล็กน้อยทำให้เพิ่มความยืดหยุ่นของยาง ส่งผลให้แรงกระทำระหว่างยางกับสารเคมีลดลง ช่วงที่สามเป็นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของการสลายตัวของเขม่าดำ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อยคือ อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของไดอะทอไมต์ 7 phr คือ 518 °C ส่วนอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของเซลลูล์ 3 phr คือ 507 °C

เซลลูล์สามารถช่วยในกระบวนการแปรรูปยางและช่วยให้ยางไหลเต็มแม่พิมพ์ได้ดีขึ้นรูป นอกจากนั้นยังช่วยให้ยางทนต่อน้ำมันดีเซล เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับตารางที่ 4.4 และนำยางผสมสูตรที่มีปริมาณเซลลูล์ 1 2 และ 3 phr มาทดสอบสมบัติความทนทานต่อน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล และน้ำมัน ไฮโดรลิก พบว่าปริมาณเซลลูล์ที่ 3 phr มีค่าร้อยละการบวมตัวของยางผสมสูตรในน้ำมันทั้งสามชนิดน้อยที่สุด จึงเลือกใช้ปริมาณของเซลลูล์ที่ 3 phr สำหรับงานวิจัยนี้

#### 4.5 สรุปสูตรที่เหมาะสม

จากการทดลอง พบว่าองค์ประกอบของยางและสารเคมี สำหรับยางเอนกประสงค์ที่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพเหมาะสมในการใช้งาน ประกอบด้วย

- ปริมาณเขม่าดำ 40 phr ทำให้สมบัติเชิงดีเซล
- ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 1.0 phr ทำให้การออกซิเดชันของยางช้าลง
- ปริมาณไดอะทอไมต์ 7 phr ทำให้ยางทนความร้อนได้ดีขึ้น
- ปริมาณเซลลูล์ 3 phr ทำให้ยางทนน้ำมันดีเซล

จากนั้นทำการบดผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C นำมาทดสอบสมบัติเชิงกล โดยเปรียบเทียบสมบัติกับสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 4.4 พบว่าสมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงของค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาดของยางที่เตรียมได้ผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรง สามารถนำยางผสมสูตรใช้ในการผลิตสายพานลำเลียง ยางปูพื้นรถยนต์ และยางในรถจักรยานยนต์

ตารางที่ 4.4 สมบัติของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

สมบัติของยาง	มาตรฐานที่กำหนด					
	สายพาน ดำเสียง	ยางปูพื้น รถยนต์	ยางรถยนต์ (ดอกยาง)	ยางหุ้มขอบ กระทอร์รถยนต์	ยางในรถ จักรยานยนต์	ยางที่เตรียมได้
- สมบัติก่อนบ่มแรง						
ความแข็งแรงดึง (MPa) ไม่น้อยกว่า	17.65	10.4	13	7.0	11.77	18.69
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%) ไม่น้อยกว่า	450	250	350	300	500	979
ความแข็งแรงฉีกขาด (MPa) ไม่น้อยกว่า	-	52.5	-	15	-	55
- สมบัติหลังบ่มแรง						
ความแข็งแรงดึง (MPa) ไม่น้อยกว่า	14.71	8.3	-	-	-	21.16
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%) ไม่น้อยกว่า	380	200	-	-	-	916
ร้อยละความแข็งแรงดึงที่เปลี่ยนแปลง (%)	-	-	20	25	10	13.21

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางผสมสูตรเพื่อใช้ในงานอเนกประสงค์ บดผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป สามารถสรุปผลการทดลองดังนี้

#### 5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางเพื่อใช้ในงานอเนกประสงค์

##### 1. การศึกษาอุณหภูมิ เวลาการเชื่อมโยง และปริมาณเขม่าดำ

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ  $10^{\circ}\text{C}$  ทำให้เวลาการเชื่อมโยงยางลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ พบว่าเวลาเริ่มเกิดการเชื่อมโยงและเวลาการเชื่อมโยงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ความหนืดมูนนี้ มอดูลัส และความแข็งกดยของยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงปริมาณ 40 phr เมื่อปริมาณเขม่าดำมากกว่า 40 phr ทำให้สมบัติทั้งสองมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอุณหภูมิ เวลาการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกล พบว่าปริมาณเขม่าดำ 40 phr ที่อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  ให้ผลดีที่สุด

##### 2. การศึกษาปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ

- สมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่ง

เมื่อเพิ่มปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มอดูลัส ความแข็งแรงฉีกขาดและความแข็งกดย มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

- สมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่ง

ค่าความแข็งแรงดึงเมื่อไม่มีปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพมีค่าลดลง แต่เมื่อมีปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงกลับมีค่าสูงขึ้นจากการทดสอบก่อนบ่มเร่ง ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้น และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการทดสอบก่อนบ่มเร่ง ค่ามอดูลัสที่ 300 % หลังบ่มเร่งมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบก่อนบ่มเร่ง พบว่า ค่ามอดูลัสที่ 300 % หลังบ่มเร่งมีค่าสูงขึ้น ขณะที่ร้อยละความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และร้อยละมอดูลัสที่เปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง พบว่าที่ปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 1 phr อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  มีค่าร้อยละความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่เปลี่ยนแปลงดีที่สุด จึงเลือกใช้เพื่อทำการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

### 3. การศึกษาปริมาณไคอะทอไมด์

#### - สมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่ง

เมื่อเพิ่มปริมาณไคอะทอไมด์ พบว่าความหนืดมูนีและความแข็งกคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ที่ปริมาณไคอะทอไมด์ 1 phr มีค่าสูงขึ้นแต่เมื่อปริมาณไคอะทอไมด์เพิ่มมากขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มอดูลัส และความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง

#### - สมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่ง

เมื่อเพิ่มปริมาณไคอะทอไมด์ พบว่าสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับสมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่ง แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่งพบว่าร้อยละความแข็งแรงดึง และร้อยละมอดูลัสที่เปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่เปลี่ยนแปลงหลังบ่มเร่งมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

#### - สัณฐานวิทยา

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าไคอะทอไมด์กระจายตัวได้ดีในยาง และเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

#### - สมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) พบว่ายางผสมสูตรมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกิดจากการสูญเสียน้ำหนัก 3 ช่วง คือช่วงแรกเป็นการระเหยของน้ำและความชื้น ช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของการสลายตัวของโครงสร้างยาง พบว่าเมื่อปริมาณไคอะทอไมด์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของยางมีค่าสูงขึ้น ส่วนช่วงที่สามเป็นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของการสลายตัวของเขม่าดำ พบว่าเมื่อปริมาณไคอะทอไมด์เพิ่มขึ้นอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของเขม่าดำมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง กับสมบัติผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ที่ปริมาณไคอะทอไมด์ 7 phr มีสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐาน จึงเลือกใช้ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

### 4. การศึกษาปริมาณเซลลูล์

#### - สมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่ง

เมื่อเพิ่มปริมาณเซลลูล์ พบว่าความหนืดมูนี ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด มีแนวโน้มลดลง มอดูลัส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความแข็งกคมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

- สมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่ง

เมื่อเพิ่มปริมาณเซลลิ่ง พบว่าสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่ง แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งพบว่า ร้อยละความแข็งแรงดึงและร้อยละมอดูลัสที่เปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มลดลง ส่วนร้อยละการยืด ณ จุด ขาดที่เปลี่ยนแปลง มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

- ความทนทานต่อน้ำมัน

เมื่อเพิ่มปริมาณเซลลิ่ง พบว่าค่าร้อยละการบวมตัวในน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล และน้ำมันไฮโดรลิก มีแนวโน้มลดลง

- สัณฐานวิทยา

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเซลลิ่งกระจายตัวได้ดีในยาง และเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวอยู่ในกลุ่ม โครงสร้างของยางธรรมชาติ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลง

- สมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก พบว่ายางผสมสูตรที่มีปริมาณเซลลิ่งผสมอยู่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนโดยสูญเสียน้ำหนัก 3 ช่วง เช่นเดียวกับเมื่อมีปริมาณไดอะทอไมต์ คือช่วงแรกเป็นการระเหยของน้ำและความชื้น ช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของการสลายตัวของโครงสร้างยาง พบว่าเมื่อมีเซลลิ่งผสมอยู่อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวมีค่าลดลงเล็กน้อย ส่วนช่วงที่สามเป็นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของการสลายตัวของเขม่าดำ พบว่าเมื่อมีเซลลิ่งผสมอยู่อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของเขม่าดำมีค่าลดลงเล็กน้อยเช่นกัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่ง กับสมบัติของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ที่ปริมาณเซลลิ่ง 3 phr มีสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานและให้ผลดีที่สุด

จากการวิจัยเพื่อนำยางมาใช้ในงานอเนกประสงค์ พบว่าสูตรยางที่เหมาะสมประกอบด้วยเขม่าดำ 40 phr สารป้องกันการเสื่อมสภาพ 1 phr ไดอะทอไมต์ 7 phr และเซลลิ่ง 3 phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยในการปรับปรุงยางธรรมชาติเพื่อใช้ในงานอเนกประสงค์ สามารถสรุปข้อเสนอแนะต่างๆ ที่น่าสนใจซึ่งอาจเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไปดังนี้

1. ศึกษาชนิดและปริมาณของยางสังเคราะห์ผสมกับยางธรรมชาติ ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติกายภาพ สมบัติทางความร้อน ความทนทานต่อน้ำมัน และสัณฐานวิทยา

2. ศึกษาปริมาณและผลของ Silane coupling agent เพื่อช่วยให้การยึดติดระหว่างโคอะทอไมด์กับยางให้ดีขึ้น
3. ศึกษาสารเติมแต่ง (Additive) ชนิดอื่นที่สามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของยางให้ดีขึ้น เช่น สารลดความเสียดทาน สารระงับกลิ่น และสารชนิดอื่น
4. ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อโอโซน (Ozone resistance) ของยางผสมสูตรที่เตรียมได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Rubber Research Institute. **Statistic**. [Online] Available : <http://www.Rubberthai.com>
- [2] พรพรรณ นิธิอุทัย. **ยางเทคนิคการออกสูตร**. ปัตตานี : ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2528.
- [3] อธิพิณ แจ่มชัด. **เทคโนโลยียาง**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [4] พรพรรณ นิธิอุทัย. **สารเคมีสำหรับยาง**. ปัตตานี : ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2528.
- [5] บุญธรรม นิธิอุทัย, พรพรรณ นิธิอุทัยและปรีชา ป็องภัย. **สารเคมีสำหรับยางและเทคนิคการออกสูตรยาง**. ปัตตานี : ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2530.
- [6] น้าทิพย์ ศรีมอด้. **การดูดซับโลหะไอออนโดยใช้ไดอะทอมไมต์**. กรุงเทพฯ : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2544.
- [7] The Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology. **Diatomite**. [Online] Available: <http://www.ipst.ac.th>
- [8] S. Limmatvapirat., C. Limmatvapirat., M. Lunagtana-anan and J. Nunthanid. "Modification of Physicochemical and mechanical properties of shellac by partial hydrolysis". **International Journal of Pharmaceutics**. Vol.284, 2004. pp 41-49
- [9] Plant Clinic Search **ครึ่ง** [Online] Available: <http://www.giswebro2.idd.go.th>
- [10] Blow C. M. **Rubber Technology and Manufacture**. 3<sup>rd</sup> Ed. London : Butterworth and Co. Publication Ltd. 1978
- [11] บุญธรรม นิธิอุทัย, ปรีชา ป็องภัย. **คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง I**. ปัตตานี : ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2530.
- [12] คณะอาจารย์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. **การทดสอบยางและผลิตภัณฑ์**. ปัตตานี : ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2534.
- [13] National Metal and Material Technology Center. **TGA** [Online] Available: <http://www.mtec.or.th>
- [14] Scientific Equipment Center. **TGA** [Online] Available: <http://www.sec.psu.ac.th>

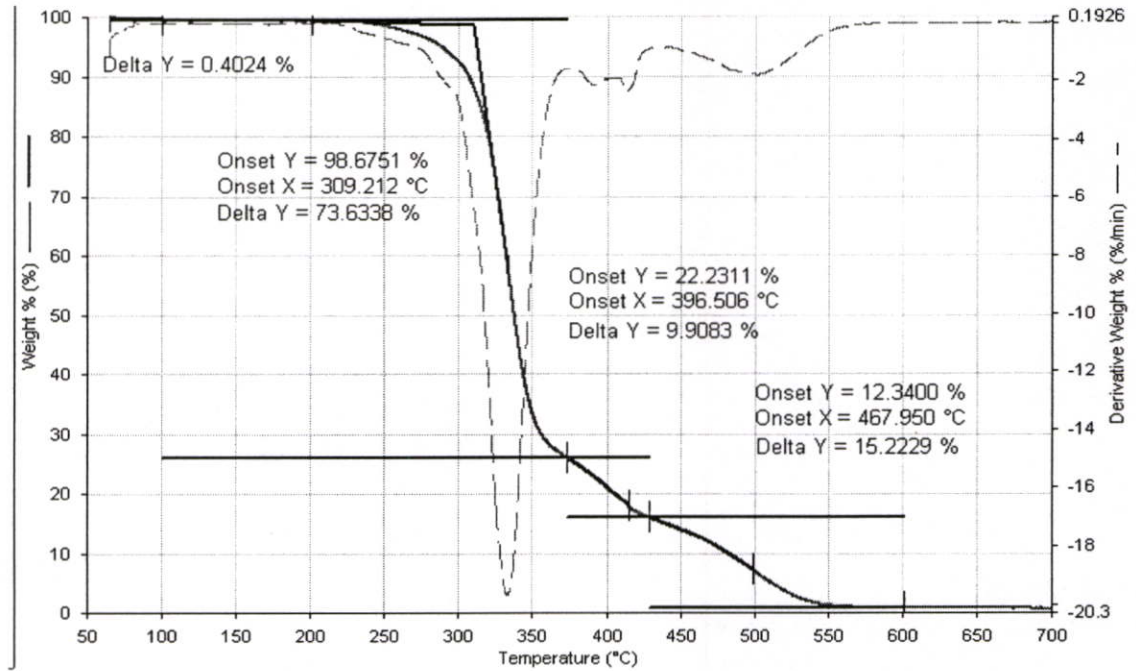
- [15] Fan R.L.,Zhang Y.,Li F.,Zhang Y .X., Sun K. and Fan Y. Z. "Effect of high Temperature Curing on the Crosslink Structure and Dynamic Mechanical Property Of Gum and N 330 Filled NR Vulcanizates" **Polymer Testing**. Vol. 20, 2001. pp. 925-936
- [16] Kundu P. P. 2000. "Improvement of Filler-Rubber Interaction by the Coupling Action of Vegetable Oil in Carbon Black Reinforced Rubber. **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 75 : 735-739
- [17] Daniele F. Castro, Joao Carlos Miguez Suarez, Regina C.R. Nunes, Leila L. Y. Visconte "Effect of Mica Addition on the Properties of Natural Rubber and Polybutadiene Rubber Vulcanizates." **Journal of Applied Polymer Science**. Vol.90, 2002. pp 2156-2162
- [18] Varaporn T., Boonsit W., Adul T. and Putsadee M. "In Situ Epoxidized Natural Rubber: Improved Oil Resistance of Natural Rubber" **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 90, 2003. pp.261-269
- [19] H.M. da Costa, L.L.Y. Visconte, R.C.R. Nunes and C.R.G. Furtado. "Rice Husk Ask Filled Rubber. I. Overall Rate Constant Determination for the Vulcanization Process from Rheometric Data" **Journal of Applied Polymer Science**. Vol.87, 2003. pp.1194-1203
- [20] T.R. Kukreja., R.C. Chauhan., S. Choe.and P.P. Kundu. "Effect of Dose and Nature of Vegetable Oil on Carbon Black/Rubber Interaction: Studies on Castor Oil and Other Vegetable Oils" **Journal of Applied Polymer Science**. Vol.87, 2003. pp.1574-1578
- [21] A.Gregorova., B. Kosikova and R. Moravcik. "Stabilization effect of lignin in natural rubber" **Polymer Degradation and Stability**. 2005
- [22] ASTM D 1646 Committee on Standard "Standard Test Methods for Rubber Viscosity, Stress Relexation and Pre-Vulcanization Characterristics (Mooney Viscometer)." Philadelphia : **American Society for Testing and Materials**. 2003.
- [23] ASTM D 2084 Committee on Standard "Standard Test Methods for Rubber – Property Vulcanization Using Oscillating Disk Cure Meter." Philadelphia : **American Society for Testing and Materials**. 2001.
- [24] ASTM D 412 Committee on Standard "Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer-Tension." Philadelphia : **American Society for Testing and Materials**. 2002.

- [25] ASTM D 624 Committee on Standard "Standard Test Methods for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers ." Philadelphia : **American Society for Testing and Materials**. 2000.
- [26] ASTM D 2240 Committee on Standard "Standard Test Methods for Rubber – Property Durometer Hardness." Philadelphia : **American Society for Testing and Materials**. 2002.
- [27] ASTM D 471 Committee on Standard "Standard Test Methods for Rubber Property-Effect of Liquids." Philadelphia : **American Society for Testing and Materials**. 1999.
- [28] ASTM D 4818 Committee on Standard "Standard Classification for Rubber Compounding Material-Vulcanization Accelerators." Philadelphia : **American Society for Testing and Materials**. 1999
- [29] ASTM D 573 Committee on Standard "Standard Test Methods for Rubber-Deterioration in Air Oven." Philadelphia : **American Society for Testing and Materials**. 1999.
- [30] International Rubber Quality and Packing Conferences. **International Standards of Quality and Packing for Natural Rubber Grades (The Green Book)**.New York : The Rubber Manufactures Association, Inc. 1996
- [31] A. D. Robert. **Natural Rubber Science and Technology**. Oxford Science Publication 1990.
- [32] 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
- [33] จารุมาลย์ ผาสุกวนิช. **อนินทรีย์เคมี 1**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2545
- [34] นิตยากรณัฏฐ์ ใจสะอาด. **ปฏิบัติการเคมีอนินทรีย์**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2540
- [35] S. Wolff . **Rubber Chemistry Technology**. Ed. London : Elsevier Science Publishers Ltd. 1996
- [36] R. M. Barrer., J. A. Barrer and N. K. Raman. "Studies on natural rubber-bound diphenylamine antioxidants" **Journal of Applied Polymer Science**. Vol.42, 2004.pp. 577-732
- [37] สนทยา ลีหมั้วทวาริวัฒน์ มานี เหลืองชนะอนันต์ และสาธิต พุทธิพัฒน์ขจร. **การพัฒนาเซลล์จากแหล่งวัตถุดิบที่มีในประเทศไทยเพื่อใช้เป็นสารเคลือบสำหรับการนำส่งยาสู่ลำไส้**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2545

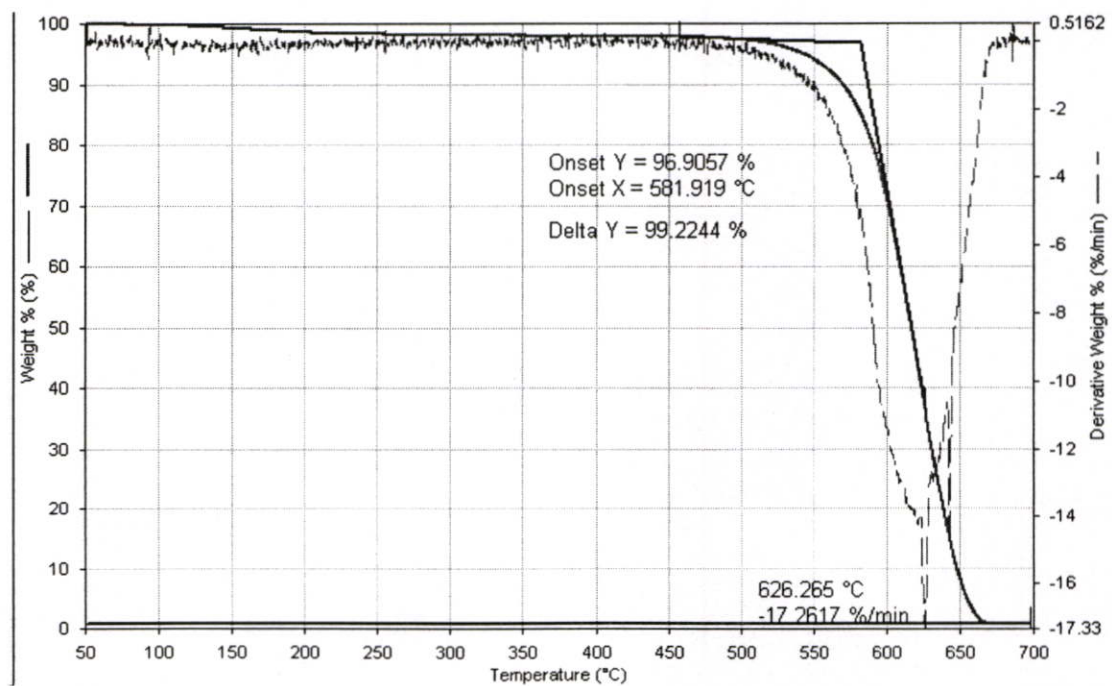
- [38] V. S. Vinod, S. Varghese and B Kuriakose. 2002. "Degradation behaviour of natural rubber-Aluminium powder composites effect of heat ozone and high energy radiation"  
**Polymer Degradation and Stability**. Vol.75, pp.405-412

## ภาคผนวก ก

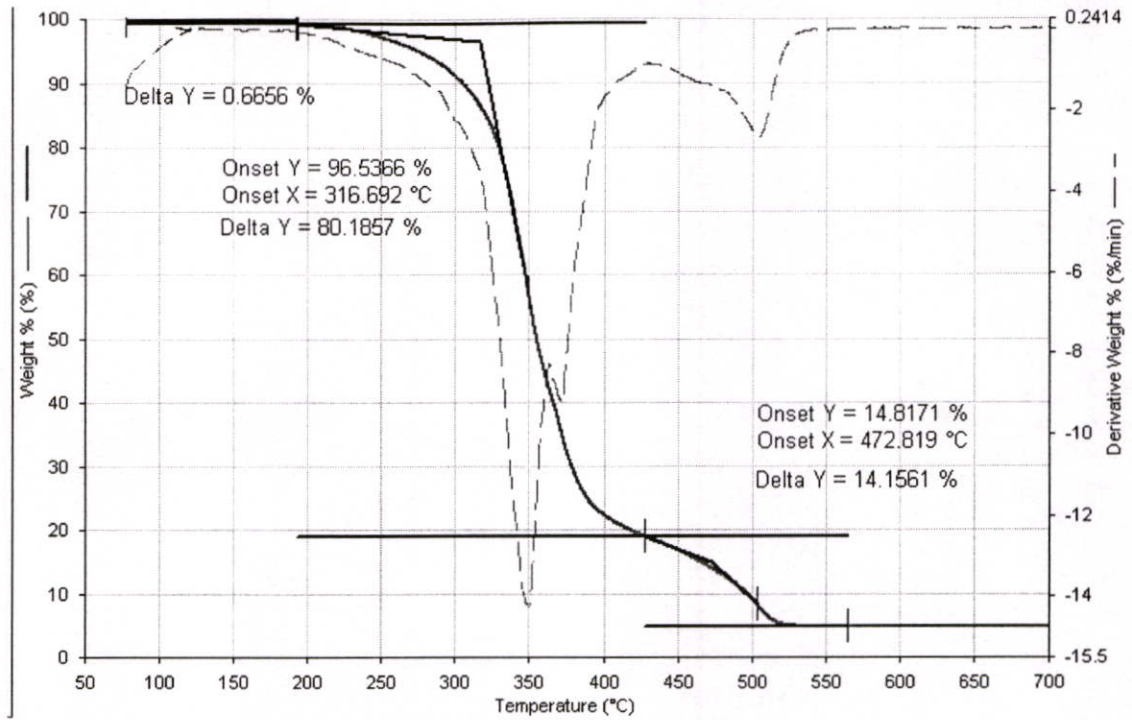
### สมบัติทางความร้อนโดยเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก



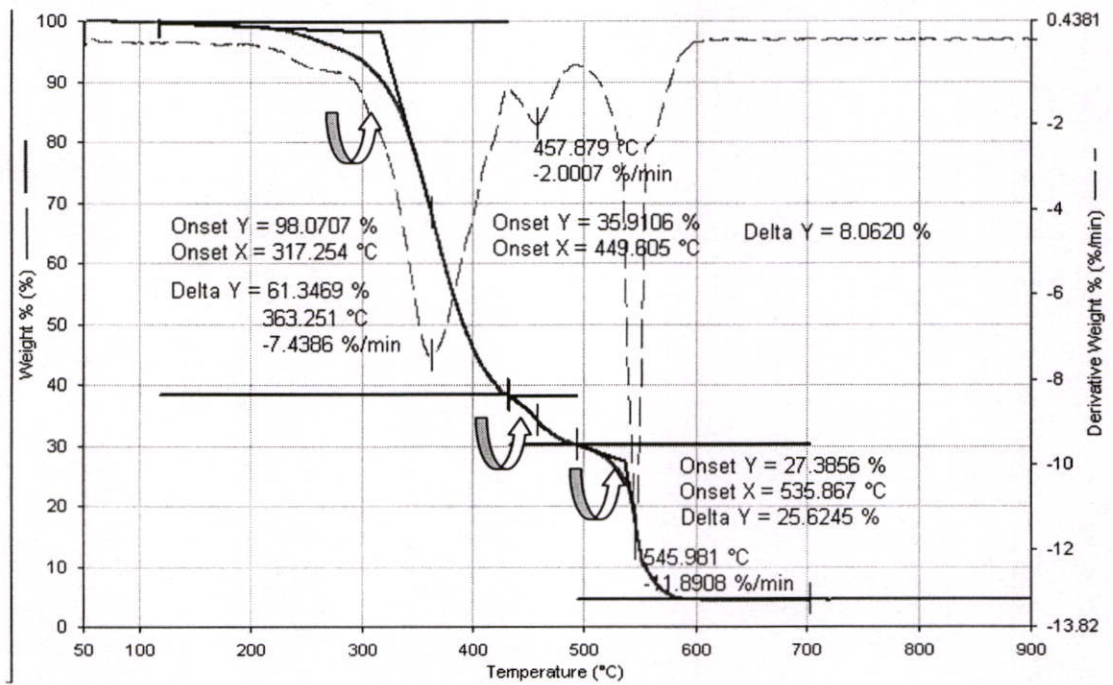
รูปที่ ก.1 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของยางธรรมชาติ



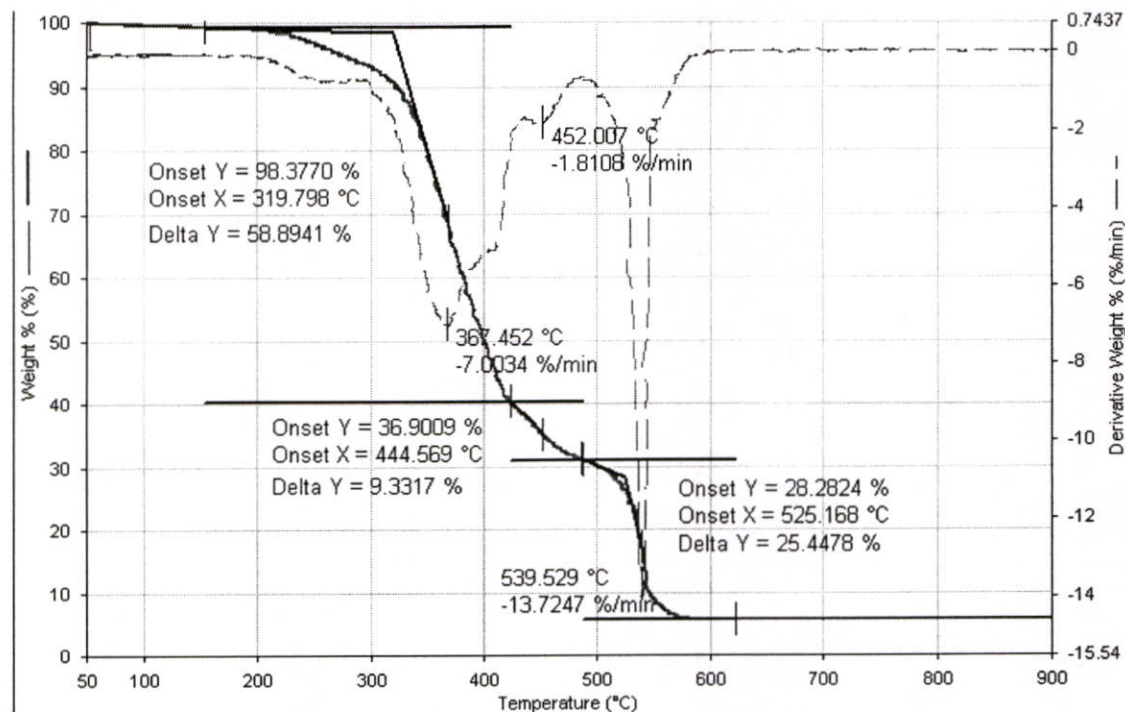
รูปที่ ก.2 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของเขม่าดำ



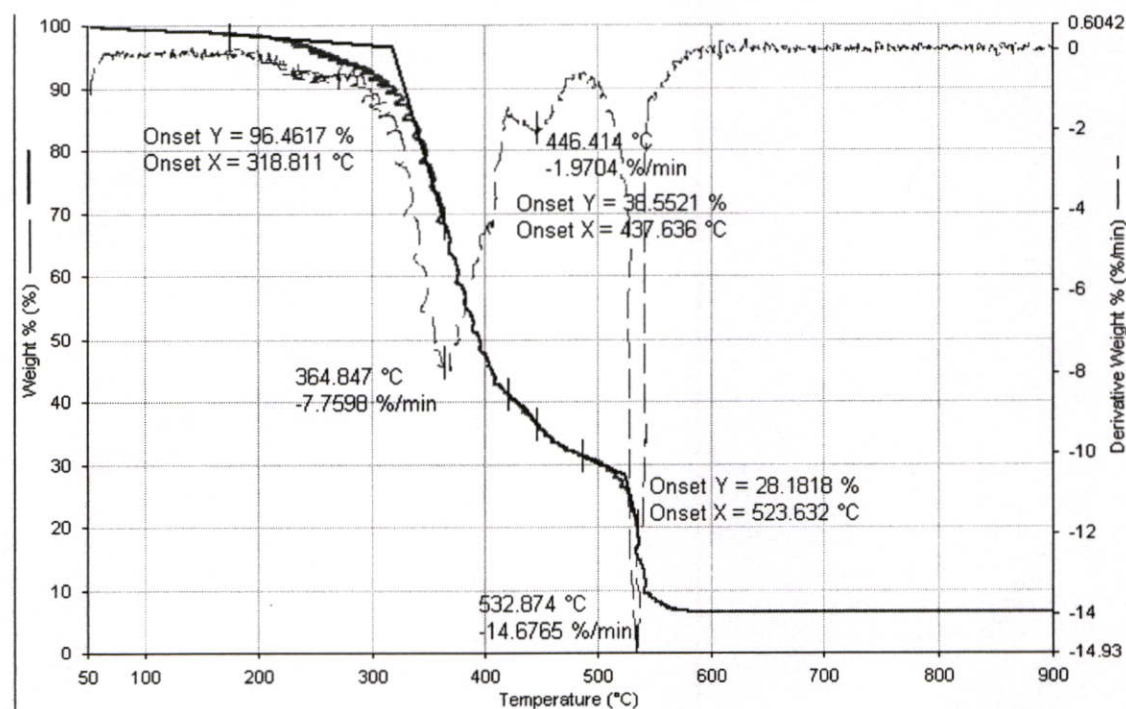
รูปที่ ก.3 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของยางธรรมชาติ (Compound)



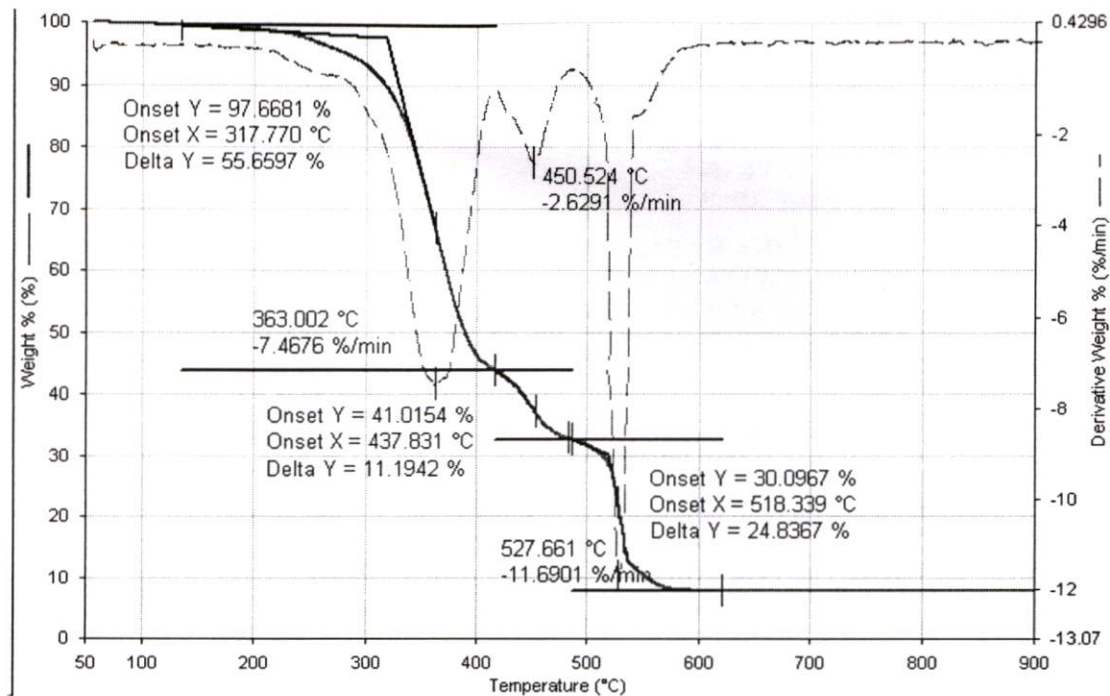
รูปที่ ก.4 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของยางผสมสูตร ปริมาณไดอะทอไมด์ 1 phr



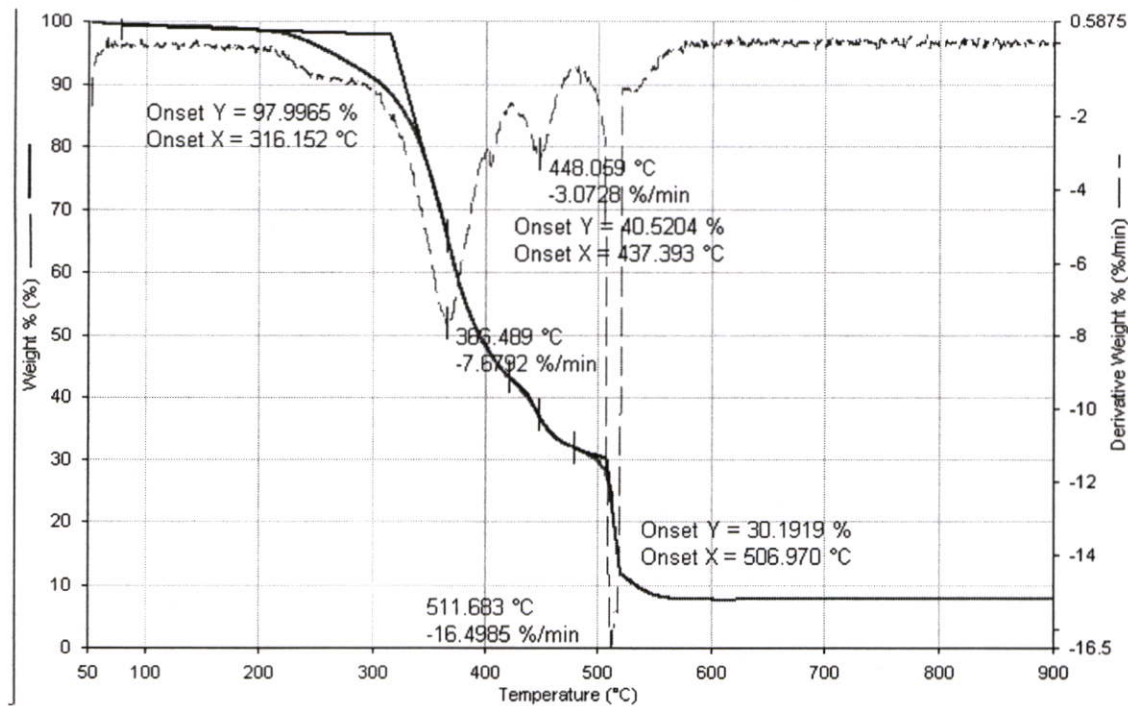
รูปที่ ก.5 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของยางผสมสูตร ปริมาณ คีโอะทอไมต์ 3 phr



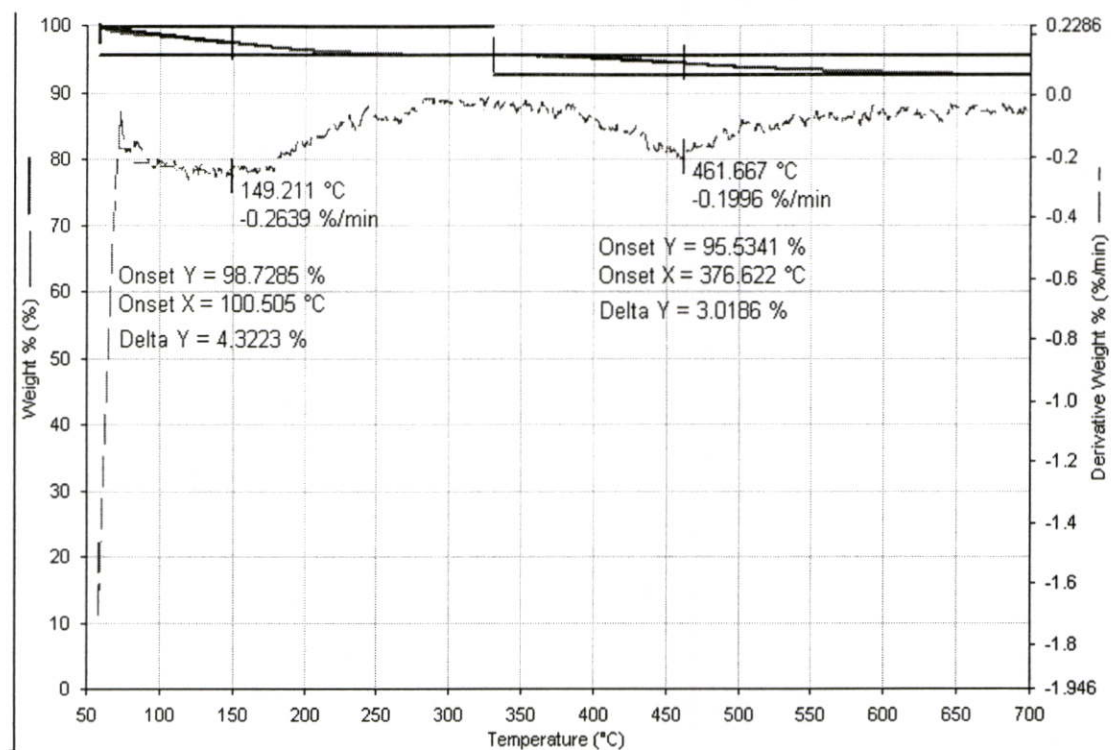
รูปที่ ก.6 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของยางผสมสูตร ปริมาณ คีโอะทอไมต์ 5 phr



รูปที่ ก.7 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของยางผสมสูตร ปริมาณไดอะทอมไมต์ 7 phr



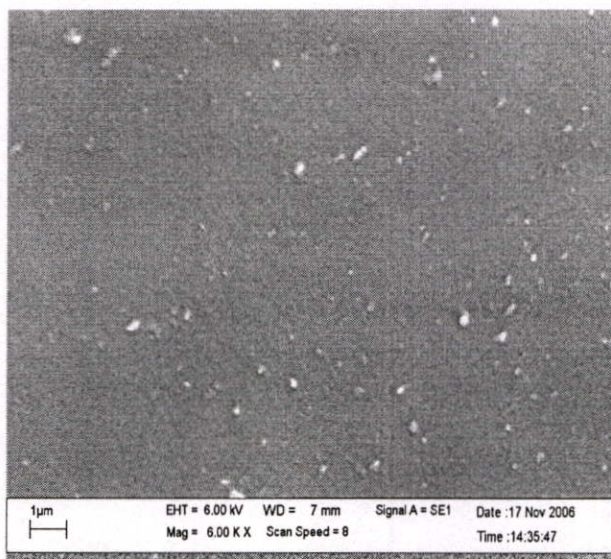
รูปที่ ก.8 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของยางผสมสูตร ปริมาณเซลแล็ก 3 phr



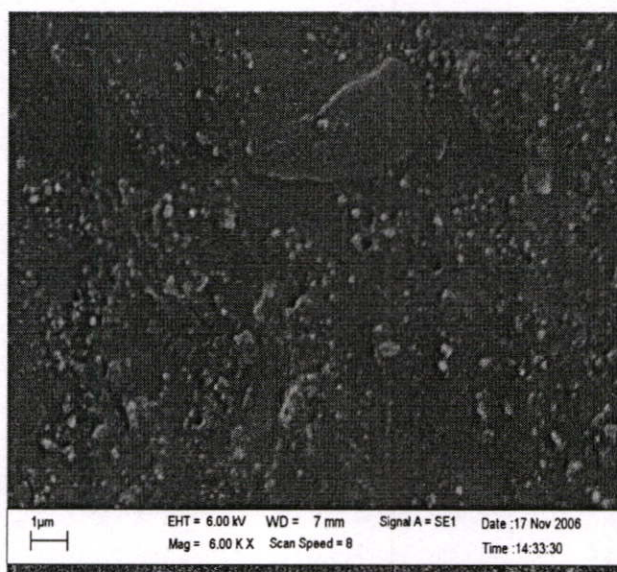
รูปที่ ก.9 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของไคอะทอไมด์

## ภาคผนวก ข

### สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตร



รูปที่ ข.1 แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ปริมาณเขม่าดำ 40 phr



รูปที่ ข.2 แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อไม่มีปริมาณเขม่าดำ

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายเสวตพงษ์ นवलศิลป์
วัน เดือน ปีเกิด	22 กรกฎาคม 2519
ที่อยู่	124 ถ.ราชดำเนิน ต.บ่อข่าง อ.เมือง จ.สงขลา
ประวัติการศึกษา	2545 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง