

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การใช้ประโยชน์เส้นใยพลาจากยางรถยนต์ใช้แล้วเป็นสารตัวเติมในยาง



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 62071  
วัน,เดือน,ปี. 27 ก.ค. 2549

b.....  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Applications of Ply Fibers from Waste Tires as Fillers  
In Rubber Compounds



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of  
Bachelor of Science  
Department of Chemistry  
Faculty of Science  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**โครงการพิเศษเรื่อง** การใช้ประโยชน์เส้นใยพลาจากยางรถยนต์ใช้แล้วเป็นสารตัวเติมในยาง  
**นักศึกษา** นายธีระวัฒน์ ชาติวีระธรรม  
 นายนรินทร์ ธนมงคฤทธิ  
 นางสาววรางคณา สมชีพ  
**ภาควิชา** เคมี  
**สาขาวิชา** เคมีอุตสาหกรรม  
**ปีการศึกษา** 2547  
**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ดร.ชลลดา ฤตวิรุพณ์	
กรรมการ ผศ.ดร.วันฉัตร ชื่นชม	
กรรมการ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	



(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 , ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การใช้ประโยชน์เส้นใยพลาไคจากยางรถยนต์ใช้แล้วเป็นสารตัวเติมในยาง	
นักศึกษา	นายธีระวัฒน์	ชาติวีระธรรม
	นายนรินทร์	ธนมงคลฤทธิ
	นางสาววรางคณา	สมชีพ
ภาควิชา	เคมี	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2547	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำเส้นใยพลาไค (Ply) ในยางรถยนต์ที่หมดสภาพแล้ว มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางผสมสูตรเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและลดต้นทุน ในงานวิจัยใช้ยางธรรมชาติและสารเติมแต่งอื่นๆ ผสมกันโดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) จากนั้นทำการศึกษาปัจจัยที่มีต่อสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติความร้อน และสัณฐานวิทยาของยางแต่ละสูตร โดยมีปัจจัยศึกษาที่มีผลต่อสมบัติของยางคือ ปริมาณเส้นใยที่ใส่ (0 - 40 phr) ชนิดของเส้นใย (เส้นใยพลาไคหยาบและเส้นใยพลาไคละเอียด) ทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใย (ตามแนวเครื่องจักรและตั้งฉากกับเครื่องจักร) จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง แต่ค่ามอดุลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การยืด 100 200 และ 300% ค่าความแข็งแรงฉีกขาด และค่าความแข็งกมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบสมบัติในการจัดเรียงตัวของเส้นใยพบว่าการจัดตัวของเส้นใยตามแนวเครื่องจักรให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเส้นใยที่จัดเรียงตั้งฉากกับแนวเครื่องจักร จากนั้นทำการศึกษาสมบัติของยางเมื่อทำการใส่เรซอร์ซินคลปริมาณ 0-5 phr เพื่อเป็นสารเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยพลาไคและยาง โดยแบ่งการผสมเรซอร์ซินคลออกเป็นสองวิธีคือผสมในรูปของแข็งและผสมในรูปของสารละลายโดยการสเปรย์ลงบนเส้นใย จากผลการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกลไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อใส่สารเรซอร์ซินคล จากผลทดสอบโดยใช้เครื่อง DMTA พบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของสูตรที่ใส่เรซอร์ซินคลและไม่ใส่เรซอร์ซินคลมีค่าประมาณ - 55 องศาเซลเซียส และภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) พบว่าสูตรที่ใส่เส้นใยพลาไคละเอียดมีการกระจายตัวของเส้นใยดีกว่าสูตรที่ใส่เส้นใยพลาไคหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Applications of Ply Fibers from Waste Tires as Fillers in Rubber Compounds	
Name	Mr. Theerawat Chartweeratham	44050084
	Mr. Narin Thanamongkollit	44050086
	Miss Warangkhana Somcheep	44050120
Department	Chemistry, Bachelor of Science	
Program	Industrial Chemistry	
Academic Year	2004	
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud	

### Abstract

This research work was focused on applications of recycled ply fibers from waste tires to be used as fillers in rubber compounds for improving mechanical properties and cost reduction. Natural rubber (NR) and other additives were compounded by a two-roll mill and shaped into specimens by a compression molding machine. Then, the rubber samples were characterized for their properties, e.g., mechanical, thermal and morphological properties. Factors affecting rubber properties were studied including fiber loading (0-40 phr), fiber types (long ply fibers and ground short ply fibers), fiber directions i.e. machine direction (MD) vs. transverse direction (TD). It was found that tensile strength and % elongation at break had a trend to decrease but rubber modulus at 100, 200, and 300%, tear strength and hardness were increased as the fiber loading was increased. By comparing two fiber directions, MD samples yielded higher mechanical properties compared to those of TD samples. In this work, addition of resorcinol (0-5 phr) as a tackifier in order to improve adhesion between fibers and rubber was also studied. Two methods of resorcinol addition were compared, i.e., solid form and solution spraying into fibers. It was found that both methods yielded rubber compounds with insignificant difference in properties. From DMTA results,  $T_g$  of the rubber compounds with and without resorcinol revealed at about  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . From SEM micrographs, it was found that rubber compounds with ground short ply fibers appeared to have better fiber distribution in rubber matrix compared to the long fibers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้ จะสำเร็จลุล่วงมิได้ ถ้าหากขาดความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่างๆ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้ให้ลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และผศ.ดร.วันฉัตร ชื่นชม ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท แสงไทยผลิตยาง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เส้นใยพลาสติก

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไชมีส ไรร์ จำกัด และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี สจล. ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้จัดทำจนประสบความสำเร็จในด้านการศึกษา

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมาย ที่มีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

นายธีระวัฒน์ ชาติวีระธรรม

นายนรินทร์ ธนมงคลฤทธิ์

นางสาววรางคณา สมชีพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 สมบัติของยาง (Properties of rubbers).....	5
2.2 ยางรถยนต์ (Tires).....	6
2.2.2 โครงสร้างของยางรถยนต์.....	6
2.2.3 ประเภทของยางรถยนต์.....	8
2.2.4 กระบวนการผลิตยางรถยนต์.....	10
2.3 เส้นใยไนลอน (Nylon).....	15
2.3.1 กระบวนการผลิตเส้นใยไนลอน.....	15
2.3.2 สมบัติทางกายภาพ.....	18
2.3.3 สมบัติทางเคมี.....	18
2.4 เส้นใยพอลิเอสเตอร์ (Polyester).....	19
2.4.1 กระบวนการผลิต.....	20
2.4.2 การใช้งานและชนิดของเส้นด้ายพอลิเอสเตอร์.....	22
2.4.3 สมบัติทางกายภาพ.....	22
2.4.3 สมบัติทางเคมี.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ลักษณะสารเติมแต่งเสริมแรงที่ดี.....	25
2.5.1 กลไกการเสริมแรง.....	25
2.6 สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers).....	27
2.6.1 เรซอร์ซินอล (Resorcinol).....	27
2.7 การเชื่อมโยงยาง (Vulcanization).....	28
2.8 การทดสอบสมบัติของยาง.....	30
2.8.1 เครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น (Oscillating Disc Rheometers).....	30
2.8.2 เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscometer).....	32
2.8.3 เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile testing machine).....	33
2.8.4 เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer).....	34
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>36</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.3 วิธีทดลอง.....	38
3.3.1 ยางผสมสูตร.....	38
3.3.2 การทดสอบยางผสมสูตร.....	39
3.3.2.1 การทดสอบความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscosity).....	39
3.3.2.2 การทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics).....	39
3.3.2.3 การขึ้นรูปยางผสมสูตร.....	40
3.3.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางที่เชื่อมโยง.....	40
3.3.2.5 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	41
3.3.2.6 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน.....	41
3.3.2.6.1 Thermogravimetric Analyzer (TGA).....	42
3.3.2.6.2 Differential Scanning Calorimeter (DSC).....	42
3.3.2.6.3 Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA).....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล</b> .....	44
4.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของเส้นใยพลาวย (Thermal Analysis of fibers).....	44
4.1.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA).....	44
4.1.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC).....	44
4.2 การศึกษาลักษณะของเส้นใยพลาวยด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM).....	45
4.2.1 หา Aspect ratio (l/d ratio) ของเส้นใยพลาวย.....	45
4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรที่มีการเติมเส้นใยพลาวย.....	46
4.3.1 ผลของทิศทางการจัดเรียงตัวและปริมาณเส้นใยพลาวย.....	46
4.3.2 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเส้นใยพลาวยหยาบกับเส้นใยพลาวย ละเอียด.....	56
4.3.3 ผลของการใส่สารเพิ่มการยึดติด Resorcinol ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล.....	61
4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)	68
4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกล (Dynamic Mechanical Thermal Analysis).....	72
4.5.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกลด้วย Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA).....	72
4.6 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต .....	73
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b> .....	75
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติบางประการของไนลอน 6,6 และ ไนลอน 6.....	19
2.2 การเปรียบเทียบเส้นใยพอลิเอสเตอร์ชนิด PET กับ PCDT.....	22
2.3 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของการยืดตัวกลับระหว่างเส้นใยพอลิเอสเตอร์ และ ไนลอน.....	23
3.1 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติ.....	36
3.2 สมบัติบางประการของเรซอร์ซินอล.....	37
3.3 ส่วนผสมยางผสมสูตรที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.4 มาตรฐานอ้างอิงที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่าง.....	41
4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกลด้วยเครื่อง DMTA.....	72
4.2 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตของยางผสมสูตร.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพกองขยะยางรถยนต์ที่ใช้แล้วและไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์.....	2
1.2 ภาพตัวอย่างการนำยางกลับมาใช้ใหม่โดยทำการแยกแต่ละส่วนออกจากกัน.....	3
2.1 การจัดวางเส้นด้ายของโครงผ้าใบยางรถยนต์.....	7
2.2 โครงสร้างของยางรถยนต์.....	7
2.3 ภาคตัดแสดงตำแหน่ง และส่วนประกอบของดินลมยางรถยนต์.....	8
2.4 โครงสร้างยางรถยนต์แบบธรรมดา.....	8
2.5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเส้นใยผ้าใบเมื่อรับน้ำหนักของยางรถยนต์ธรรมดา.....	9
2.6 โครงสร้างยางแบบเรเดียล.....	9
2.7 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเส้นใยผ้าใบเมื่อรับแรงกระทำของยางแบบเรเดียล.....	9
2.8 การผสมวัตถุดิบ.....	11
2.9 การทำลวดขอบยาง การฉาบยาง การขึ้นรูปขอบลวด.....	11
2.10 การทำโครงผ้าใบ และการฉาบยางกับผ้าใบ.....	12
2.11 การทำเส้นลวดเหล็ก และการฉาบยางกับเส้นลวด เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้ เข็มขัดรัดหน้ายาง (Belt).....	12
2.12 การอัดรีดเพื่อขึ้นรูปแก้มยาง และหน้ายาง.....	12
2.13 การประกอบโครงยาง.....	13
2.14 การทำให้ยางสุกด้วยเครื่องเชื่อมโยงยาง.....	13
2.15 การตัดตบแต่งยาง.....	14
2.16 การตรวจสอบสมดุลงยาง.....	14
2.17 ยางที่ผลิตตามลักษณะการใช้งาน.....	14
2.18 โครงสร้างทางเคมีของไนลอน 6,6.....	16
2.19 โครงสร้างทางเคมีของไนลอน 6.....	16
2.20 กระบวนการผลิตไนลอน 6,6.....	17
2.21 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอสเตอร์ (Polyester).....	20
2.22 เส้นใยเสริมแรงที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกซึ่งอยู่ในเมทริกซ์ (a) ในสภาวะที่ยังไม่มี การเปลี่ยนรูปร่าง (b) ภายใต้การให้แรงดึง.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาตรของอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกกับ Aspect ratio ( $a = l / d$ ).....	26
2.24 โครงสร้างทางเคมีของเรซอร์ซินอล.....	27
2.25 การเชื่อมโยงจากกระบวนการวัลคาไนเซชัน.....	29
2.26 โครงสร้างของยางเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน.....	29
2.27 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่อง ORD.....	30
2.28 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve).....	31
2.29 จานหมุนโลหะในเครื่องวัดความหนืดหมุนนี้.....	32
3.1 ตัวอย่างชิ้นงานเพื่อทดสอบตามมาตรฐาน (a) ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ b) ชิ้นงานรูปปีกนก.....	40
3.2 แผนผังสรุปแผนการดำเนินวิจัย.....	43
4.1 ตัวอย่าง SEM Micrographs แสดงรูปสัณฐานวิทยาของเส้นใยปลายละเอียด.....	45
4.2 ตัวอย่าง SEM Micrographs แสดงรูปสัณฐานวิทยาของเส้นใยปลายหยาบ.....	46
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยปลายหยาบ.....	46
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยปลายละเอียด.....	47
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยปลาย หยาบ.....	48
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยปลายละเอียด.....	48
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 100%การยืด กับปริมาณเส้นใยปลายหยาบ.....	49
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 200%การยืด กับปริมาณเส้นใยปลายหยาบ.....	50
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 300%การยืด กับปริมาณเส้นใยปลายหยาบ.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 100%การยืด กับปริมาณเส้นใย พลาวยละเอียด.....	51
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 200%การยืด กับปริมาณเส้นใย พลาวยละเอียด.....	52
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 300%การยืด กับปริมาณเส้นใย พลาวยละเอียด.....	52
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดยของยางผสมสูตร กับ ปริมาณเส้นใยพลาวย หยาบ.....	53
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดยของยางผสมสูตร กับ ปริมาณเส้นใยพลาวย ละเอียด.....	53
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใย พลาวยหยาบ.....	54
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใย พลาวยละเอียด.....	55
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยพลาวย หยาบและละเอียด.....	57
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร กับปริมาณ เส้นใยพลาวยหยาบและละเอียด.....	57
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 100%การยืด กับปริมาณเส้นใยพลาวย หยาบและละเอียด.....	57
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 200%การยืด กับปริมาณเส้นใยพลาวย หยาบและละเอียด.....	58
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 300%การยืด กับปริมาณเส้นใยพลาวย หยาบและละเอียด.....	59
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดยของยางผสมสูตร กับ ปริมาณเส้นใยพลาวย หยาบและละเอียด.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใย พลาซียาและละเอียด.....	60
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง กับปริมาณเรซอร์ซินอล ที่เป็นของแข็ง.....	61
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง กับปริมาณเรซอร์ซินอล ที่เป็นสารละลาย.....	62
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด กับปริมาณ เรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็ง.....	63
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด กับปริมาณ เรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลาย.....	63
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 100%การยืด กับ ปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็ง.....	64
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 200%การยืด กับ ปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็ง.....	64
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 100%การยืด กับ ปริมาณ เรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลาย.....	65
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 200%การยืด กับ ปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลาย.....	65
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาด กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่ เป็นของแข็ง.....	66
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาด กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่ เป็นสารละลาย.....	66
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกด กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็น ของแข็ง.....	67
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกด กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็น สารละลาย.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 ตัวอย่าง SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาศึกษาการกระจายตัวของเส้นใย พลาซหยาบ.....	68
4.37 ตัวอย่าง SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาศึกษาการกระจายตัวของเส้นใย พลาซละเอียดที่ไม่มีกำรใส่เรซอร์ซินอล.....	69
4.38 ตัวอย่าง SEM Micrograph แสดงสัณฐานวิทยาศึกษาการกระจายตัวของเส้นใย พลาซละเอียดที่มีการใส่เรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลายปริมาณ 5 phr.....	69
4.39 ตัวอย่าง SEM Micrograph แสดงสัณฐานวิทยาแสดงเส้นใยพลาซละเอียด.....	70
4.40 ตัวอย่าง SEM Micrograph แสดงสัณฐานวิทยาการเคลือบของสารเพิ่มการยึดติด Resorcinol ที่เป็นสารละลาย ปริมาณ 5 phr บนเส้นใยพลาซละเอียด.....	70
4.41 ตัวอย่าง SEM Micrograph แสดงสัณฐานวิทยาแสดงการยึดติดระหว่างเส้นใย พลาซละเอียดกับเนื้อยางโดยมีการใส่สารเพิ่มการยึดติด (Resorcinol) ที่เป็น สารละลายปริมาณ 5 phr ลงไป.....	71

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัยและแรงจูงใจในการทำงานวิจัย (Motivation)

ประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตยางล้อยานยนต์ที่สำคัญที่สุดแห่งหนึ่งของโลก เนื่องจากเป็นแหล่งผลิตวัตถุดิบยางพาราที่ใหญ่ที่สุดของโลก โดยมีบริษัทในเครือและบริษัทข้ามชาติที่มีส่วนแบ่งทางการตลาดสูงที่สุดในโลก 3 บริษัทมาตั้งฐานการผลิตในประเทศไทย ได้แก่ บริษัทสยามมิชลิน บริษัทบริดจสโตน และบริษัทกั๊ดเยียร์ โดยมีปริมาณการใช้ในประเทศสูงถึงปีละประมาณ 134,194 ตัน หรือ 17 ล้านเส้น [1] ในขณะที่มีปริมาณการทำลายเพียงร้อยละ 9 ดังนั้นสถานการณ์ปริมาณยางยานยนต์ใช้แล้วในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการทิ้งยางเก่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะถูกนำไปทิ้งเป็นขยะ ทำให้สิ้นเปลืองพื้นที่จำนวนมากในการทิ้ง และเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุง ซึ่งไม่ได้ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มแต่อย่างใด

ปริมาณการผลิตยางล้อประเภทต่างๆ ในประเทศไทย มีดังนี้ [2]

- |                         |      |             |
|-------------------------|------|-------------|
| • ยางล้อรถยนต์ รถบรรทุก | 19.7 | ล้านเส้น/ปี |
| • ยางล้อรถจักรยานยนต์   | 12.2 | ล้านเส้น/ปี |

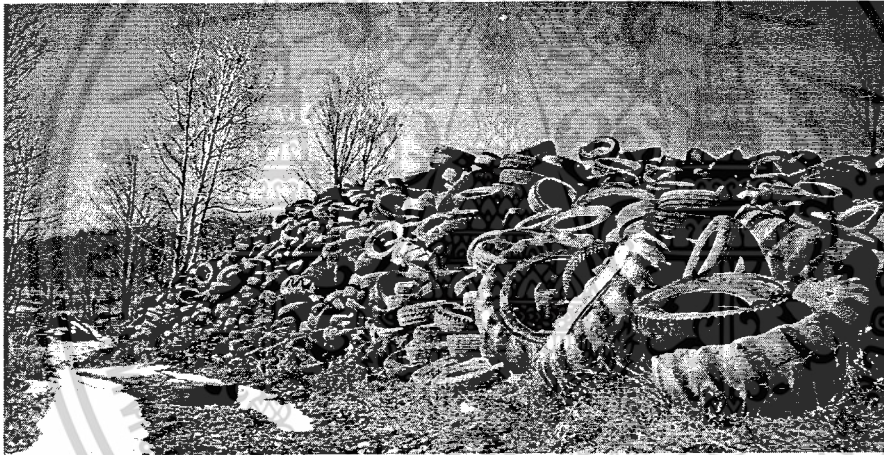
ผลกระทบของยางรถยนต์เก่าต่อสิ่งแวดล้อม มีดังต่อไปนี้

- แหล่งเพาะพันธุ์ของสัตว์พาหะนำโรค เช่น ยุง หนู แมลง
- มลพิษทางอากาศคือสารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง ได้แก่ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) เบนซีน สไตรีน ฟีนอล และปิวดะไดอิน
- มลพิษทางน้ำซึ่งเกิดจากน้ำมันที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะมีสารตะกั่วและสารหนู เป็นองค์ประกอบ

การนำยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพกลับมาใช้ใหม่จะต้องทำการแยกส่วนที่เป็นยางซึ่งจะได้ในรูปวัสดุขั้นทุติยภูมิซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นสินค้าได้ และโครงลวดที่อยู่ในยางรถยนต์นั้นจะทำการแยกออกจากส่วนที่เป็นยางโดยการนำไปเผา ส่วนที่เป็นหน้ายาง (Tread) และส่วนที่เป็นแก้มยาง (Sidewall) จะถูกแยกออก โดยส่วนที่เป็นหน้ายางจะตัดให้เป็นแผ่นบางให้นำมาหุ้มยางล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รถบรรทุกสินค้า แก้มยางจะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น รองเท้าแตะ ถังขยะ เป็นต้น [3] ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้เป็นการเสนอแนวทางการลดปริมาณขยะยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยนำเส้นใยผ้าใบหรือเส้นใยพลาซ (Ply) จากยางรถยนต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตยางรีไซเคิล (Reclaimed rubber) มาใช้เป็นสารตัวเติม (Fillers) ในการผลิตยางผสมสูตร เพื่อลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง โดยทำการศึกษาค่าผลของปริมาณ ขนาด และทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของยาง โดยใช้ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ที่เป็นเมทริกซ์หลัก และมีเขม่าดำ (Carbon black) เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing filler) สมบัติของยางที่ทำการศึกษา ได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) และสัณฐานวิทยา (Morphology)



รูปที่ 1.1 ภาพกองขยะยางรถยนต์ที่ใช้แล้วและไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 ภาพตัวอย่างการนำยางกลับมาใช้ใหม่โดยทำการแยกแต่ละส่วนออกจากกัน [4]

การนำยางรถยนต์ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่มีข้อดีดังนี้

- ยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพที่นำกลับมาใช้ใหม่นั้นมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของยางธรรมชาติ หรือยางสังเคราะห์
- ในการผลิตยางจากยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพนั้นใช้พลังงานโดยรวมต่ำกว่าการใช้ยางใหม่
- เป็นวิธีการหนึ่งที่ดีที่เป็นการกำจัดผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่ต้องการ ซึ่งโดยปกติกระบวนการกำจัดนั้นจะยุ่งยาก
- การทำการรีไซเคิล (Recycle) เป็นการสร้างงานให้เกิดขึ้นในประเทศที่กำลังพัฒนา
- ผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์หลายอย่างได้มาจากยางรถยนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ หรือ ผลิตภัณฑ์ยางอื่น เช่น การทำยางหล่อดอก การทำรองเท้าแตะ เป็นต้น

## 1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย (Objectives)

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยผ้าใบจากยางรถยนต์ใช้แล้วมาเป็นสารตัวเติม ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง และลดต้นทุนการผลิต
2. เพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณการใส่ ขนาด และทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใย และผงยาง ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางรถยนต์ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติการเชื่อมโยง ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา (Scope of study)

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาผลของเส้นใยที่มีต่อสมบัติของยาง ได้แก่ ปริมาณ ขนาด ทิศทางการจัดเรียงตัว
3. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของยางที่เตรียมได้ โดยเปรียบเทียบกับยางที่ไม่มีการเติมเส้นใย
4. ศึกษาผลของสารเพิ่มการยึดติด Resorcinol ในการปรับปรุงสมบัติของยาง
5. ศึกษาวิเคราะห์ต้นทุนของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ได้

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ (Expected results)

1. สามารถใช้เส้นใยผ้าใบจากยางรถยนต์เป็นสารตัวเติมในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ให้มีสมบัติที่เหมาะสมตามความต้องการใช้งาน มีต้นทุนการผลิตต่ำ
2. ช่วยลดปัญหาปริมาณขยะยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพ เป็นการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อีกวิธีหนึ่ง สามารถนำไปพัฒนาให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์
3. สามารถช่วยสร้างงานให้เกิดขึ้นเนื่องจากการทำการรีไซเคิล (Recycle) ยางรถยนต์
4. สร้างมูลค่าเพิ่มของธุรกิจการนำของเหลือใช้มาใช้ประโยชน์ที่ใช้นวัตกรรมให้มีรายได้เพิ่ม
5. ช่วยลดปัญหาการหาพื้นที่ฝังกลบยางรถยนต์ ทำให้มีพื้นที่ไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นที่มีประโยชน์มากกว่า
6. ลดอัตราการเกิดอุบัติเหตุ และแหล่งเพาะพันธุ์สัตว์พาหะนำโรค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สมบัติของยาง (Properties of rubbers) [5]

ยาง (Rubbers) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นได้เมื่อถูกแรงกระทำ และสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อพ้นจากแรงกระทำ เป็นวัสดุที่นิยมใช้และมีการประยุกต์ใช้งานอย่างมาก เนื่องจากยางมีสมบัติที่เด่นคือ มีสมบัติการยืดหด (Elastic) ยืดหยุ่น (Flexible) เหนียว (Tough) แข็งแรง มีการซึมผ่านของน้ำและก๊าซต่ำ สามารถรับแรงดึงหรือแรงกดอัดได้อย่างมาก สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างมากเมื่อได้รับแรง และกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็วเมื่อปล่อยแรง นอกจากนี้ยางบางชนิดยังมีสมบัติพิเศษ เช่น ทนน้ำมัน ทนอุณหภูมิ ทนตัวทำละลาย ฯลฯ สามารถประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวางและหลากหลาย ยางแต่ละชนิดจะมีสมบัติแตกต่างกันไป

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) คือ ยางธรรมชาติที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์เป็นเวลานานแล้ว น้ำยางสดจากต้นยางเมื่อนำมาเติมกรด เช่น กรดฟอร์มิก หรือกรดอะซิติกลงไปจะทำให้ส่วนของน้ำยางตกตะกอน (Coagulation) แยกตัวออกจากน้ำยาง เนื้อยางเป็นพอลิเมอร์ของไอโซพรีน (Isoprene) โดยมีไอโซพรีนเชื่อมต่อกันอยู่ตั้งแต่ 1,500 – 15,000 หน่วย ยางธรรมชาติจะเหนียว และอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน แข็งและเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ สมบัติเช่นนี้ทำให้ไม่เหมาะในการนำไปใช้ จึงมีการนำสารเชื่อมโยง (Crosslinking agents) เช่น กำมะถัน (Sulfur, S) ใส่ลงไปในปริมาณที่พอเหมาะที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของกำมะถัน ทำให้ได้ยางที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้นและมีความคงตัวที่อุณหภูมิต่างๆดีขึ้น ยางที่ได้เรียกว่า ยางวัลคาไนซ์ (Vulcanizates) ปฏิกริยาระหว่างยางกับกำมะถัน เรียกว่าปฏิกิริยา วัลคาไนเซชัน (Vulcanization)

สารเคมีที่ใช้ในการออกสูตรยาง (Compounding formula) เรียกว่า สารเติมแต่งยาง (Rubber Additives) เช่น สารเชื่อมโยง (Crosslinking agents หรือ Vulcanizing agents) สารเร่งการเชื่อมโยง (Accelerators) ตัวกระตุ้น (Activators) สารเพิ่มเนื้อ หรือสารตัวเติม (Fillers) สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) ฯลฯ ชนิดและปริมาณของสารเหล่านี้จะมีผลโดยตรงต่อสมบัติของยางนอกจากนี้วิธีและสภาวะการขึ้นรูป เช่น อุณหภูมิ และเวลาในการขึ้นรูป ก็มีความสำคัญ และมีผลต่อสมบัติของยางเช่นกัน

ยางสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดได้อย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลจะต้องยาว และสามารถเปลี่ยนการจัดเรียงตัวได้ในหลายรูปแบบ โมเลกุลเคลื่อนไหวได้ง่าย และมีความยืดหยุ่นสูง นั่นคือมีโครงสร้างโมเลกุลที่เปลี่ยนโครงรูป (Conformation) ได้ง่ายโดยการหมุนของสายโซ่ (Chain rotation) โดยไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการเปลี่ยนมุมระหว่างพันธะการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Bond angles) หรือความยาวพันธะ (Chain lengths) และมีโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่ถูกขัดขวาง การเคลื่อนที่อื่นเนื่องจากความแข็งของสายโซ่ (Chain rigidity) การเกิดผลึก (Crystallization) หรือความหนืด (Viscosity) ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (Glassy state)

วัสดุคล้ายยางสามารถกลับคืนสู่รูปร่าง และขนาดเดิมได้อย่างสมบูรณ์เมื่อปล่อยแรงโมเลกุล จะต้องมีการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแห (Crosslinking) โดยมีพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ ทุกๆ 100 หน่วย โดยประมาณ เพื่อป้องกันการเคลื่อนผ่านที่ไม่กลับคืนตำแหน่งเดิม (Irreversible sliding) การเชื่อมโยงในยางสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

1. การเชื่อมโยงด้วยพันธะเคมี (Chemical bonding) เช่น การวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ด้วยกำมะถัน (Sulfur, S) หรือเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์ (Covalent bonding) เชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง

2. การเชื่อมโยงเชิงกล (Physical aggregates) บางส่วนของสายโซ่เกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนหรือการยึดติดด้วยแรงเชิงกล เช่น การเกิดผลึกขนาดเล็ก หรือก้อนของแข็งคล้ายแก้ว (Glassy domains) ในโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomers, TPEs)

## 2.2 ยางรถยนต์ (Tires) [6]

ยางรถยนต์ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักยานยนต์อันเกิดจากน้ำหนักบรรทุก น้ำหนักของตัวรถ และการถ่ายทอดแรงขับเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องยนต์ผ่านชุดคลัทช์ ชุดเกียร์ ชุดเพลา ไปยังล้อ ทำให้เกิดการขับเคลื่อน ตลอดจนการสิ้นเปลืองที่ที่เกิดจากสภาพผิวถนนที่ผิดปกติ

### 2.2.1 ตัวอย่างส่วนประกอบของยางรถยนต์โดยน้ำหนัก [7]

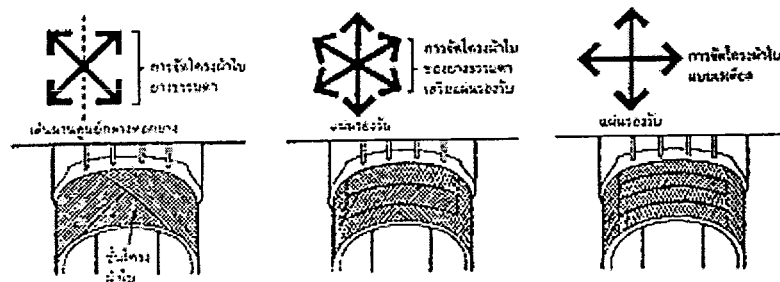
ยางธรรมชาติ 14%	ผงเขม่าดำ 28%	สารเคมี 4%	เส้นลวด 10%
ยางสังเคราะห์ 27%	น้ำมัน 10%	เส้นใย 4%	อื่นๆ 3%

### 2.2.2 โครงสร้างของยางรถยนต์ [6]

โครงสร้างของยางรถยนต์ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1. **โครงผ้าใบ (Carcass)** เนื่องจากยางรถยนต์ต้องทำหน้าที่ในการกักเก็บแรงดันของอากาศไว้ และต้องมีความยืดหยุ่นพอที่จะทำการดูดซับน้ำหนัก และแรงกระแทกที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการออกแบบยางให้มีความคงทน โดยการพันเส้นใยรวมกับเนื้อยาง เส้นใยที่ใช้ทำด้วยไนลอน พอลิเอสเตอร์หรือใยเหล็ก การพันโดยจัดแบ่งตามลักษณะการวางมุมเส้นด้าย โครงผ้าใบแต่ละชั้นของเส้นด้าย จะตัดกันทำมุม 30 – 40

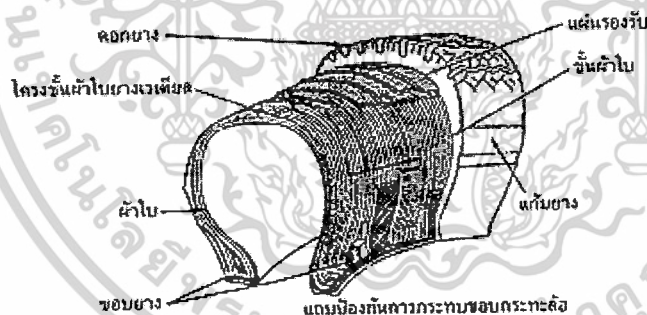
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การจัดวางเส้นด้ายของโครงผ้าใบยางรถยนต์ [6]

2. **หน้ายาง (Tread)** เป็นชั้นของยางภายนอกที่ทำหน้าที่ป้องกันการชำรุดและสึกหรอของโครงผ้าใบ ซึ่งมีสาเหตุมาจากสภาพพื้นผิวถนน หน้ายางเป็นส่วนที่ทำหน้าที่สัมผัสกับพื้นถนนโดยตรง จึงต้องมีการออกแบบหน้ายางให้เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพต่างๆ ของถนน

3. **แก้มยาง หรือ ยางด้านข้าง (Side wall)** เป็นชั้นของยางที่ปกคลุมบริเวณด้านข้างของยาง และทำหน้าที่ปกป้องโครงผ้าใบอันเกิดจากการชำรุดเสียหายภายนอก รวมถึงทำหน้าที่ให้ยางมีความยืดหยุ่นได้มากที่สุด นอกจากนี้แก้มยางยังเป็นตำแหน่งบอกขนาดยางของบริษัทผู้ผลิต และบอกชนิดของยาง



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของยางรถยนต์ [6]

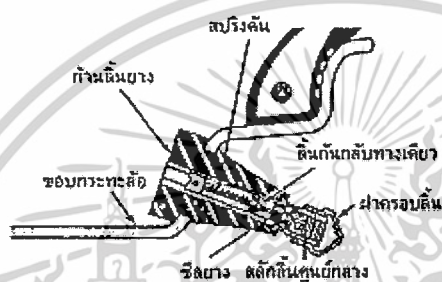
4. **พลาเย (Ply) หรือ ชั้นผ้าใบ (Breaker)** ทำหน้าที่รองรับระหว่างโครงผ้าใบ และหน้ายาง ทำหน้าที่เพิ่มการยึดเหนี่ยว โครงสร้างทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน และยังช่วยลดการกระแทกจากผิวถนนมายังโครงสร้างผ้าใบให้น้อยลง โดยทั่วไปผ้าใบที่ใช้ในการรองรับยางรถบรรทุกจะทำด้วยไนลอน (Nylon) ส่วนรถยนต์นั่งจะทำด้วยพอลิเอสเตอร์ (Polyester)

5. **แผ่นรองรับหรือเข็มขัดรัดหน้ายาง (Belt)** นิยมใช้กับยางรถยนต์แบบเรเดียล (Radial tire) โดยจะรองรับไปตามเส้นรอบวงของยางระหว่างโครงผ้าใบและหน้ายาง ในรถยนต์นั่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะใช้โครงสร้างแผ่นเหล็กเรยอน (Rayon) หรือเส้นใยพอลิเอสเตอร์ (Polyester) แต่ในรถบรรทุกจะใช้เป็นเส้นใยเหล็ก

6. ขอบยาง หรือบีด (Beads) ทำหน้าที่รักษายางให้อยู่ในขอบกระทะล้อ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเหวี่ยงที่ทำกับยาง บริเวณขอบยางจะมีการพันโดยรอบด้วยเส้นลวดแข็งซึ่งเรียกว่าขอบเส้นลวด

7. ลิ้นลมยาง (Tire valve) ลิ้นลมยางจะทำหน้าที่ให้ลมไหลเข้าได้เพียงอย่างเดียว แต่จะไม่ยอมให้ลมยางไหลออกได้

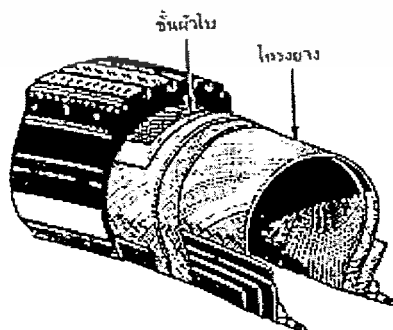


รูปที่ 2.3 ภาคตัดแสดงตำแหน่ง และส่วนประกอบของลิ้นลมยางรถยนต์ [6]

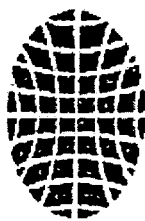
### 2.2.3 ประเภทของยางรถยนต์

ยางรถยนต์สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทที่สำคัญตามลักษณะการจัดวางผ้าใบได้ ดังนี้

1. ยางแบบธรรมดา (Bias ply tire) เป็นยางที่มีชั้นผ้าใบถักจากเส้นด้ายเรยอนหรือพอลิเอสเตอร์เรียงไขว้สลับทำมุม 30 – 40 องศา การจัดวางในลักษณะนี้เพื่อต้องการให้ผ้าใบสามารถรับแรงที่มากระทำตามแนวของเส้นรอบวงยาง และในแนวตัดขวางกับเส้นผ่านศูนย์กลางของยาง จึงทำให้เส้นด้ายผ้าใบเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไป



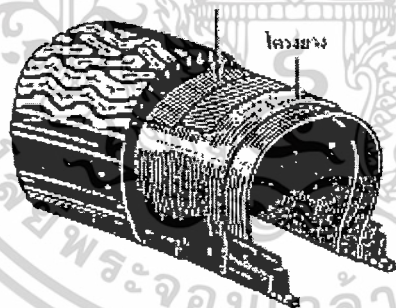
เอก **รูปที่ 2.4** โครงสร้างยางรถยนต์แบบธรรมดา [6] การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



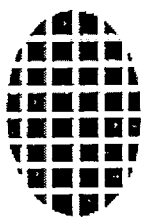
## รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเส้นใยผ้าใบเมื่อรับน้ำหนักของยางรถยนต์ธรรมดา [6]

ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ยางชนิดนี้มีความนิ่มนวลสมรรถนะในการยึดเกาะถนน การเลี้ยว แต่สึกหรอสูงกว่ายางเรเดียล

2. ยางเรเดียล (Radial ply tire) โครงสร้างผ้าใบจะประกอบด้วยชั้นของผ้าใบที่ถักรวมกันวางตั้งฉากกับชั้นของยางตามทิศทางแนวเส้นรอบวงของยาง จึงทำให้มีความแข็งแรงยืดหยุ่น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ยางไม่ต้องรับแรงที่มากกระทำตามแนวเส้นรอบวงของยางทั้งหมด เส้นใยผ้าใบจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งเป็นผลมาจากแผ่นรองรับน้ำยางจะถักด้วยเส้นใยเหล็กกับยาง จึงทำให้ยางเรเดียลมีโครงผ้าใบที่แข็งแรงสูง มีสมรรถนะในการเลี้ยวที่ความเร็วสูง ลดการสึกหรอ ยึดเกาะถนนได้ดี เนื่องจากมีแก้มยางที่อ่อน



## รูปที่ 2.6 โครงสร้างยางรถยนต์แบบเรเดียล [6]



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเส้นใยผ้าใบเมื่อรับแรงกระทำของยางแบบเรเดียล [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 กระบวนการผลิตยางรถยนต์

### ขั้นที่ 1 การผสมวัตถุดิบ (Mixing)

#### ส่วนผสม

- ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตยางรถยนต์ คือ ช่วยทำให้ยางมีความยืดหยุ่น ทนต่อแรงกระแทก และแรงดึงได้ดี แต่ยางธรรมชาติมีข้อจำกัด คือ เหมาะที่ใช้ในอุณหภูมิช่วง -40 ถึง 70 °C และไม่สามารถทนต่อน้ำมันบางประเภทได้

- ยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber, SR) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องให้มีสมบัติเหมือนยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ
  - กลุ่มที่ 1 ยางที่มีสมบัติทนความร้อนได้ดีกว่าธรรมชาติ แต่สมบัติทางด้านความเหนียว และความยืดหยุ่นด้อยกว่ายางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์กลุ่มนี้ ได้แก่ SBR (Styrene – Butadiene Rubber), BR (Polybutadiene Rubber)

- กลุ่มที่ 2 เป็นยางที่มีสมบัติทนน้ำมัน ทนต่อความร้อน และโอโซน ยางสังเคราะห์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ CR (Chloroprene หรือ Neoprene rubber), NBR (Acrylonitrile Butadiene Rubber)

- ผงเขม่าดำ (Carbon black, CB) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันดิบ มีสมบัติช่วยให้ยางแข็งแรง เพื่อเพิ่มความทนทานของยาง และทนต่อรอยขีดข่วนต่างๆ

- สารเคมีต่างๆ เป็นส่วนประกอบสำคัญ ในการผสมยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ และผงเขม่าดำ เพื่อเร่งปฏิกิริยาในการผลิต และเตรียมเป็นยางผสมสูตร หรือยางคอมปาวด์ (Compound rubbers) ที่พร้อมนำไปขึ้นรูป สารเคมีที่ใช้แบ่งเป็น 4 กลุ่มคือ

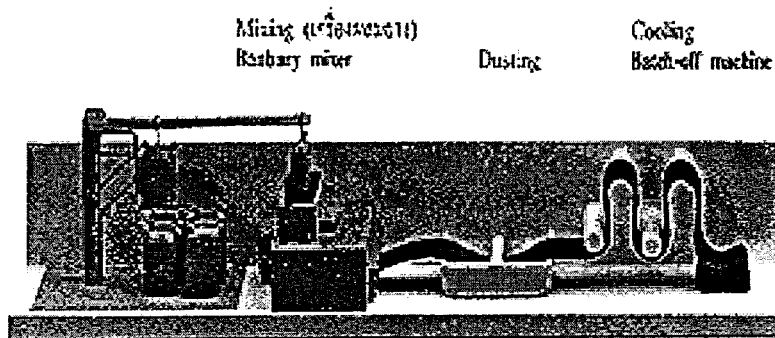
1. สารที่ทำให้ยางคงรูป หรือสารเชื่อมโยง (Vulcanizing agents) ใส่เพื่อให้สถานะของยางอยู่ในสถานะยืดหยุ่นได้ กลุ่มนี้ ได้แก่ กำมะถัน (Sulfur, S)

2. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Protective agents) สารกลุ่มนี้ ได้แก่ สารป้องกันโอโซน (Antioxidants)

3. สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids) เช่น น้ำมัน (Oils) ช่วยทำให้ยางที่ทำการผสมมีสมบัตินิ่มนวลลดความเหนียว

4. สารอื่นๆ เช่น สารให้ฟอง (Blowing agents) หรือสีให้ยางมีสีต่างๆ (Colorants)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การผสมวัตถุดิบ [6]

ขั้นที่ 2 การทำลวดขอบยาง (Bundling), การฉาบบาง (Coating) การขึ้นรูปขอบลวด (Forming)

ฉาบลวดด้วยยาง จะได้เป็นขอบลวด หรือขอบยาง (Bead rings) ออกมาเส้นลวดที่ใช้ในการผลิตแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. เส้นลวดประเภท Bead Wire สำหรับทำขอบยาง
2. เส้นลวดประเภท Steel Cord เป็นเส้นลวดใยเหล็กที่ใช้กับยางเรเดียล

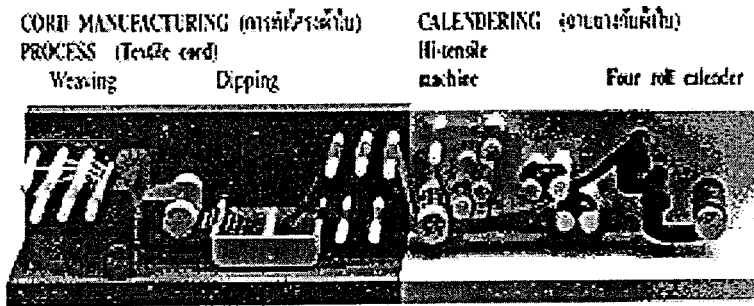


รูปที่ 2.9 การทำลวดขอบยาง การฉาบบาง การขึ้นรูปขอบลวด [6]

ขั้นที่ 3 การทำโครงผ้าใบ และการฉาบบางกับผ้าใบ

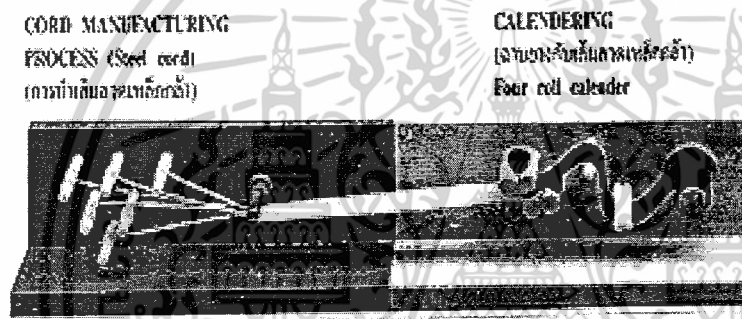
เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วนำแผ่นยางไปตัด ก็จะได้เส้นใยผ้าใบ (Ply) และเข็มขัดรัดหน้ายางเส้นลวดเหล็กกล้า (Belt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



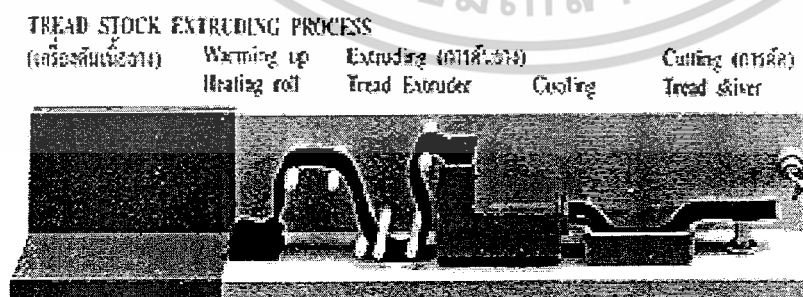
รูปที่ 2.10 การทำโครงผ้าใบ และการฉาบยางกับผ้าใบ (Calendering) [6]

ขั้นที่ 4 การทำเส้นลวดเหล็ก และการฉาบยางกับเส้นลวด (Calendering)



รูปที่ 2.11 การทำเส้นลวดเหล็ก และการฉาบยางกับเส้นลวด เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้เข็มขัดรัดหน้ายาง (Belt) [6]

ขั้นที่ 5 การอัดรีดเพื่อขึ้นรูปแก้มยาง (Side wall) และหน้ายาง (Tread)



รูปที่ 2.12 การอัดรีดเพื่อขึ้นรูปแก้มยาง และหน้ายาง [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

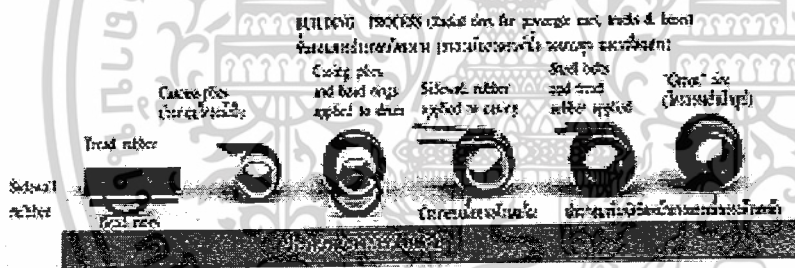
เครื่องจักรสำหรับขึ้นรูปยาง เป็นการนำเอายางที่ผสมแล้ว มาขึ้นรูปเป็นลักษณะของชิ้นส่วนต่างๆ โดยอาจนำปัจจัยการผลิตอื่นๆ เช่นมาเป็นส่วนประกอบ เครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปยางมี 2 ลักษณะ คือ

1. เครื่องจักรประเภทอัดรีด (Extrusion) เป็นเครื่องจักรที่ใช้ขึ้นรูปยางโดยอาศัยแรงดันจากการหมุนของสกรูดันยางผสมผ่านหัวตาย (Die) ออกมา Extrusion ใช้ในการขึ้นรูปยางในส่วนของโครงยาง และขอบยาง

2. เครื่องจักรประเภทลูกกลิ้ง หรือคาลเอนเดอร์ริง (Calendering) เป็นเครื่องจักรที่ขึ้นรูปยาง โดยลักษณะการรีดยาง โดยลักษณะการรีดยางผสมที่เคลือบหรือฉาบกับวัสดุอื่นๆ ให้เป็นแผ่นที่มีความหนา โดยอาศัยการรีดผ่านลูกกลิ้งจำนวน 2 ลูก ในเครื่องจักร ใช้สำหรับขึ้นรูปในส่วนของชั้นผ้าใบหรือพลาซ (Ply) และเข็มขัดรัดหน้ายาง (Belt) ในกรณีที่เป็นยางเรเดียล

### ขั้นที่ 6 การประกอบโครงยาง

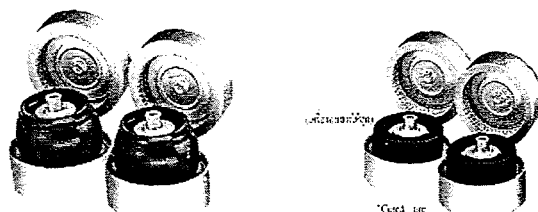
เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้ว จะได้โครงยางสำเร็จรูป (Green tire)



รูปที่ 2.13 การประกอบโครงยาง [6]

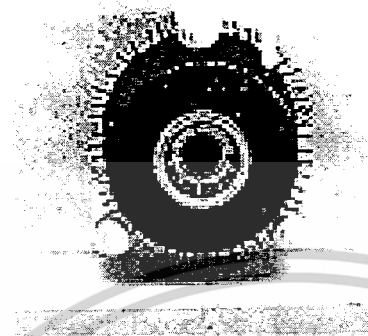
### ขั้นที่ 7 การอบยาง (Curing Machine)

เครื่องเชื่อมโยงยาง (Curing Press) เป็นเครื่องจักรที่ทำหน้าที่อัดลายหน้ายางลงบนโครงยางสำเร็จรูป เครื่องจักรมีลักษณะเป็นฝาครอบเปิด-ปิดได้ ภายในมีแม่พิมพ์ของลายหน้ายาง และช่องผ่านไคความร้อนเพื่ออัดลายหน้ายาง และอบให้ยางสุก (Vulcanization)



รูปที่ 2.14 การทำให้ยางสุกด้วยเครื่องเชื่อมโยงยาง [6] เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นที่ 8 การตัดแต่ง (Trimming)



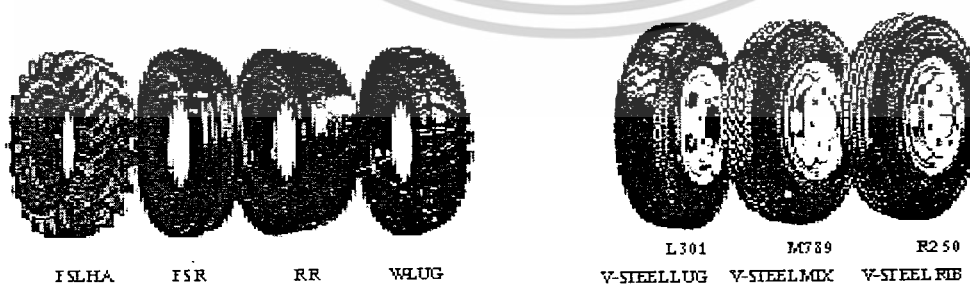
รูปที่ 2.15 การตัดแต่งยาง [6]

## ขั้นที่ 9 ตรวจสอบความสมดุลของยาง



รูปที่ 2.16 การตรวจสอบสมดุลยาง [6]

## ขั้นที่ 10 ได้ยางที่มีคุณภาพตามลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 2.17 ยางที่ผลิตตามลักษณะการใช้งาน [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เส้นใยไนลอน (Nylon) [8]

ไนลอนเป็นเส้นใยสังเคราะห์ชนิดแรกที่มีมนุษย์ค้นพบมาอย่างบังเอิญ โดยบริษัท ดูปองท์ ในประเทศสหรัฐอเมริกา นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dr. Wallace H. Carothers และทีมงานให้ความสนใจกับงานวิจัยพื้นฐานเพื่อสร้างความเข้าใจถึงโครงสร้างโมเลกุลที่ต่อกันเป็นโซ่ยาวและมีน้ำหนักโมเลกุลสูงเรียกว่าพอลิเมอร์ เหมือนที่เกิดในโครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ เช่น ฝ้าย หรือ ไหม ในปี ค.ศ. 1928 ผู้ช่วยของ Carothers ได้ค้นพบพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีลักษณะชั้น เหลวใส สามารถยืดดึงออกเป็นเส้นยาว เมื่อให้เย็นตัวลงก็ยังสามารถยืดให้ยาวขึ้นได้อีก นับเป็นจุดเริ่มแห่งการสนใจการศึกษาพอลิเอสเทอร์ (Polyester) แต่ปรากฏว่าเส้นใยที่ได้ออกมามีปัญหามากมายในการทำให้ได้สมบัติที่ต้องการ จนในที่สุดได้หันเหความสนใจไปพัฒนาการสังเคราะห์พอลิเอไมด์ (Polyamides) แทนในปี ค.ศ. 1935 ก็ได้มีการสังเคราะห์พอลิเอไมด์ขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของเฮกซะเมทิลีนไดเอมีน (Hexamethylene diamine) และกรดอะดิปิก (Adipic acid) ได้พอลิเมอร์ที่เรียกว่า 6,6 ซึ่งมาจากจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุล ต่อมาจึงได้มีการเผยแพร่ออกสู่สาธารณะในปี ค.ศ. 1938 โดยเรียกพอลิเมอร์ที่ได้ว่า ไนลอน (Nylon) ซึ่งเป็นชื่อตระกูล นับเป็นความสำเร็จอย่างสูงสุดในวงการสิ่งทอ ไนลอน 6,6 ที่ได้มีสมบัติเด่นแตกต่างจากเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยประดิษฐ์ที่มีมาก่อนหน้านี้ ด้วยการที่มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการขัดถูที่ดี การยืดตัวสูง และสามารถทำจีบถาวรได้ด้วยความร้อน มีความทนทาน ชักได้ด้วยเครื่อง จนในเวลาไนลอนกลายเป็นเส้นใยมหัศจรรย์ที่เหมาะสมกับงานที่หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปทำเป็นถุงน่อง เข็มขัด ผ้าใบยางรถยนต์ ไปจนถึงเครื่องนุ่งห่ม

ในวงการอุตสาหกรรมสิ่งทอ ไนลอนที่ใช้นักมากคือ ไนลอน 6 สำหรับใช้ทำเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่มทั่วไป ทั้งผ้าทัก ผ้าทอ ส่วนไนลอน 6,6 มักนิยมใช้ในกิจการอุตสาหกรรม เช่น ผ้าใบยางรถยนต์ อวน ตาข่าย แปรง เส้นเอ็นในอุปกรณ์กีฬา เป็นต้น

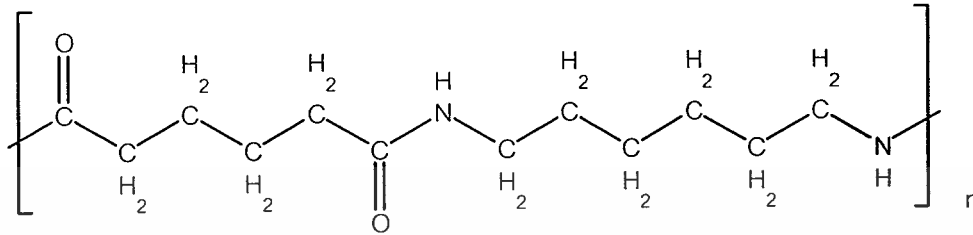
### 2.3.1 กระบวนการผลิตเส้นใยไนลอน

ได้มีการกำหนดนิยามของไนลอนไว้ว่า “ไนลอนเป็นเส้นใยประดิษฐ์ที่เนื้อเส้นใยเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวของพอลิเอไมด์สังเคราะห์ ซึ่งมีปริมาณของแกนเอไมด์ถูกแทนที่โดยตรงด้วยวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic) น้อยกว่า 85% ของปริมาณทั้งหมด” [8]

เส้นใยไนลอนที่คุ้นเคยในวงการสิ่งทอและใช้กันกว้างขวางคือ ไนลอน 6,6 และไนลอน 6 ที่มีความคล้ายกันมาก โครงสร้างทางเคมีเป็นลักษณะองค์ประกอบของพอลิเอไมด์ ประกอบด้วยธาตุหลักคือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) มีความต่างกันที่การจัดเรียงตัวทางเคมีซึ่งส่งผลให้มีสมบัติต่างกันบ้าง

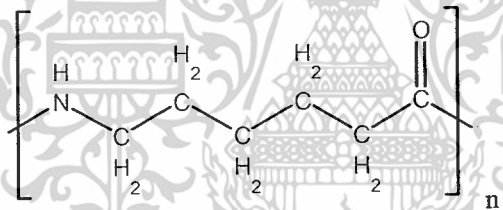
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนลอน 6,6 ได้จากการสังเคราะห์ระหว่างเฮกซะเมทิลีนไดเอมีน และกรดอะดิปิก ทำให้มีโครงสร้างทางเคมีดังนี้



รูปที่ 2.18 โครงสร้างทางเคมีของไนลอน 6,6 [8]

ในขณะที่ไนลอน 6 ได้จากการนำวัตถุดิบคือคาโปรแลกแทม (Caprolactam) มาทำการพอลิเมอไรส์ (Polymerization) ได้โครงสร้างทางเคมีคือ

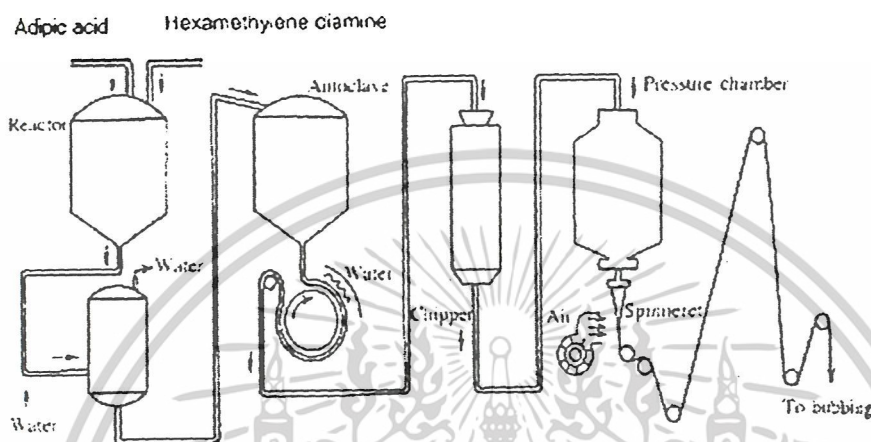


รูปที่ 2.19 โครงสร้างทางเคมีของไนลอน 6 [8]

กระบวนการผลิตไนลอน 6,6 นั้นเริ่มจากการใช้วัตถุดิบเช่น ถ่านหิน หรือน้ำมันปิโตรเลียม เพื่อสังเคราะห์ให้ได้เฮกซะเมทิลีนไดเอมีนและกรดอะดิปิก จากนั้นจึงนำสารเคมีทั้งสองตัวมาทำปฏิกิริยากัน ซึ่งสารเคมีสองตัวนี้ ตัวหนึ่งคือด่างและอีกตัวคือกรด ดังนั้นผลของปฏิกิริยาทำให้ได้เกลือออกมาเป็นเกลือไนลอน ต่อมาทำการพอลิเมอไรส์เกลือที่ได้ ณ อุณหภูมิสูงปราศจากอากาศ (บรรยากาศของไนโตรเจน) ในหม้อความดัน ดังรูปที่ 2.22 โดยทำการสกัดเอาน้ำออกตลอดเวลา ได้พอลิเมอร์เป็นเส้นคล้ายริบบิ้น แล้วตัดออกเป็นชิ้นเล็กๆ เป็นเกล็ดหรืออาจเป็นเม็ด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นวัตถุดิบในการนำไปหลอมเพื่อขึ้นรูปเป็นเส้นใยต่อไป ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวคือการปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว หรือ Melt spinning ขั้นตอนต่อไปคือการนำไปทำการยืดดึงเย็น (Cold drawing) เพื่อให้โมเลกุลภายในจัดเรียงตัวกันให้เป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติของเส้นใยดีขึ้นด้วย อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่าหลักการสำคัญของการผลิตเส้นใยไนลอนประกอบด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1. การเตรียมวัตถุดิบ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทำปฏิกิริยาควบแน่นเพื่อให้ได้พอลิเมอร์
3. การหลอมเม็ดพอลิเมอร์ที่ได้แล้วทำการปั่นให้เป็นเส้นใย
4. ทำการยืดดึงเย็นให้กับเส้นใย



รูปที่ 2.20 กระบวนการผลิตไนลอน 6,6 [8]

ในกรณีของการผลิตไนลอน 6 ซึ่งเริ่มจากถ่านหินมีขั้นตอนทางเคมีที่สลับซับซ้อนหลายขั้นตอนด้วยกันโดยเริ่มจาก ไซโคลเฮกซะโนน - ออกซิม (Cyclohexanone - oxime) ซึ่งเปลี่ยนสภาพไปเป็นคาโปรแลกแทมเมื่อกวนนำไปทำปฏิกิริยากับกรดกำมะถัน ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของคาโปรแลกแทมเริ่มจากการให้ความร้อนที่ละน้อย โดยการใช้ไอน้ำกระทำให้หม้อที่ทำจากเหล็กไร้สนิม ซึ่งภายในมีการผสมสารเคมีดังกล่าว เกิดปฏิกิริยาอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นกรองให้สะอาดแล้วป้อนเข้าถังปฏิกรณ์เพื่อการเกิดพอลิเมอร์ ซึ่งมีการควบคุมความร้อนและความดันอย่างระมัดระวัง ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีความเสถียรมาก ขั้นตอนต่อไปคือการนำพอลิเมอร์เหลวมาเปลี่ยนรูปให้เป็นเม็ดเช่นเดียวกับการผลิตไนลอน 6,6

เม็ดพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ถูกนำไปเข้ากระบวนการปั่นเส้นใย ซึ่งอาจทำได้หลายวิธี ที่สำคัญที่สุดคือการหลอมเหลวซึ่งขึ้นกับความละเอียดของเส้นใยที่ต้องการผลิต โดยทั่วไปที่ใช้กันเป็นระบบที่เรียกว่า Grid spinning และ Extruder spinning ในระบบที่สองมักนิยมใช้กับการผลิตเส้นใยที่หยากกว่า ข้อแตกต่างของสองระบบนี้คือ การทำให้เม็ดพอลิเมอร์หลอมตัวด้วยความร้อน โดยในระบบ Grid spinning ความร้อนอยู่บนแผ่นตะแกรง เมื่อเม็ดพอลิเมอร์ตกลงมาสัมผัสจะเกิดการหลอมเหลวขึ้นได้ทันที ในขณะที่ระบบหลัง เม็ดพอลิเมอร์ตกลงมาตามแรงดึงดูดของโลก เข้าสู่โซนร้อนในลักษณะของการขั้วเกลียวด้วยแรงบิด และด้วยความร้อนกับความดันของแรงนี้เองทำให้

เม็ดพอลิเมอร์หลอมตัว แล้วจึงปั่นเข้าสู่หัวรีด ออกมาเป็นเส้นใยยาวเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 สมบัติทางกายภาพ

1. ลักษณะภายนอก เส้นใยในลอนโดยทั่วไปพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นทรงกลม ผิวเรียบ คล้ายแท่งแก้วยาว ความยาวตลอดเส้นใยมีความต่อเนื่องสม่ำเสมอ มีทั้งเส้นใยาวและเส้นใยสั้นที่มีความยาวขนาดต่างๆ ตามต้องการ

2. สี โดยทั่วไปเส้นใยในลอนจากการผลิตมีสีขาว และความมันค่อนข้างสูง แต่ในกระบวนการการผลิตมีการควบคุมระดับความมันตามความต้องการของลูกค้าในทุกระดับ

3. ความคงทน ในลอนเป็นเส้นใยที่มีความคงทนสูง ความแรงทนดึง ณ จุดขาดของเส้นใยมีค่า 3.0 – 6.0 g/d สำหรับที่ใช้ทำเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม และถึง 6.0 – 9.5 g/d สำหรับชนิดความแข็งแรงสูง ใช้ในการทำเข็มขัดนิรภัย ผ้าใบบางรอยย่น เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถทนทานต่อการขัดถูได้ดี และสภาพยืดหยุ่นสูงมาก การคืนตัวจากแรงอัดดีมาก ไม่มีปัญหาด้านการยับ การใช้งานของในลอนจึงเป็นไปอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานด้านอุตสาหกรรม เช่น ทำเป็นเต็นท์ ใบของเรือใบ และแท็งก์เก็บน้ำ เป็นต้น

4. ความสามารถในการดูดซึ่มความชื้น มีการดูดซึ่มความชื้นต่ำ ความสามารถในการดูดความชื้นประมาณ 4.0 – 4.5 % เนื่องจากมีการเกาะตัวกันระหว่างเส้นใยชิดกันมากในโครงสร้างของเส้นด้าย ทำให้เส้นด้ายแน่นและการมีภาวะระบายความชื้นไม่ดี

5. การทนต่อความร้อน ในลอนเมื่อได้รับความร้อนสูงจะหลอมตัว ในลอน 6 มีจุดหลอมเหลวที่ 216 °C

6. การติดไฟ เส้นใยในลอนสามารถติดไฟได้ เมื่อเข้าสู่เปลวไฟจะเกิดการหลอมและหดตัวออกจากเปลวไฟ จากนั้นจึงเกิดการติดไฟ ทำให้เส้นใยหลอมเหลวและเกิดเป็นหยด กลิ่นคล้ายคีนไซ้ มีควันขาว ซ้ำถ้าที่เหลือมีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาลดำ

7. ความถ่วงจำเพาะ ในลอนมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.7

### 2.3.3 สมบัติทางเคมี

1. กรด ในลอนถูกทำลายด้วยสารละลายกรดเข้มข้น เช่น กรดไนตริก กรดกำมะถัน กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น หากต้มในสารละลาย 5% ของกรดไฮโดรคลอริก ในลอนจะสลายตัวได้

2. ด่าง ในลอนมีความทนทานต่อต่างได้ดี

3. สารละลายอินทรีย์ ทนทานต่อสารละลายอินทรีย์ได้ดี สามารถซักแห้งได้ ในลอนไม่ละลายในสารละลายอะซิโตน แต่ละลายได้ในกรดฟอร์มิกเข้มข้น

4. การย้อมสี ในลอน 6 ย้อมสีได้ดีติดทนนานกว่าในลอน 6,6 และย้อมได้ง่ายกว่า

เอกในลอนทั้งสองชนิดสามารถรักษาสีไว้ได้นานเพื่อการศึกษานี้ ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของไนลอน 6,6 และไนลอน 6 [8]

สมบัติ	ไนลอน 6,6	ไนลอน 6
ความหนาแน่น	1.14	1.14
การทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (เส้นใยยาว) (g/d)	3.0 – 6.0	6.0 – 9.5
การยืด (%)	23	23
ความสามารถในการดูดซึมความชื้น (%)	4.0 – 4.5	4.5
จุดหลอมเหลว	482 °F(250°C)	414 °F(212°C)
จุดเหนียวติด	445 °F(229°C)	340 °F(171°C)
การทนต่อแสงแดด	ไม่ดี	ไม่ดี
ความสามารถในการรับน้ำมัน	ดูดซึมน้ำมันได้ดี	ดูดซึมน้ำมันได้ดี
ไฟฟ้าสถิตย์	มีปัญหาที่ความชื้นต่ำ	มีปัญหาที่ความชื้นต่ำ

## 2.4 เส้นใยพอลิเอสเตอร์ (Polyester) [8]

พื้นฐานของการพัฒนาพอลิเอสเตอร์เริ่มจากโครงการวิจัยพอลิเมออร์ของ Dr. W.H. Carothers ในช่วงต้นของปี 2473 (ค.ศ. 1930) แต่เนื่องจากระยะเวลาเดียวกันนี้เองงานที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาไนลอนกำลังเป็นที่สนใจอย่างยิ่งทำให้เกิดการชะลอลง ในขณะที่นักวิทยาศาสตร์ในอังกฤษ ดำเนินการต่อไป ศึกษาค้นคว้าจนในช่วงของปี 2482 – 2489 (ค.ศ. 1939 – 1946) ก็ได้พัฒนาพอลิเอสเตอร์ขึ้นโดยใช้ชื่อเรียกว่า Terylene ปี 2489 (ค.ศ. 1946) บริษัทดูปองท์ของสหรัฐอเมริกาและสามารถผลิตออกสู่ตลาดในชื่อทางการค้าว่า Dacron<sup>®</sup> นับเป็นเส้นใยที่รู้จัก และใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุด ในบรรดาเส้นใยสังเคราะห์ทั้งหมด อีกทั้งเมื่อเป็นเส้นใยเส้นพอลิเอสเตอร์สามารถผสมกับเส้นใยชนิดอื่นๆ ได้แทบทุกชนิดโดยไม่ทำให้สมบัติที่ดีเด่นของเส้นใยที่ผสมนั้นเปลี่ยนแปลงไป จึงมีผู้เรียกพอลิเอสเตอร์ว่าเป็นผู้ยิ่งใหญ่ในการผสม (Big mixer) นอกจากนั้นแล้วด้านการศึกษาและพัฒนาของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ก็มีการดำเนินงานอย่างต่อเนื่องมาตลอด โดยทั่วไปอาจกล่าวได้ว่าพอลิเอสเตอร์ที่ผลิตในปัจจุบันมีเพียงสองชนิดใหญ่ๆ เท่านั้นคือ ที่เรียกว่า PET (polyethylene terephthalate) และ PCDT (poly 1,4 cyclohexylene-dimethylene terephthalate) แต่ส่วนมากที่ผลิตมักเป็นชนิด PET โดยมีสมบัติคล้ายกันดังนี้

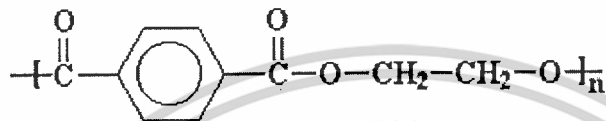
- สมบัติของการคืนตัวดี ทั้งในขณะเปียกและแห้ง เมื่อใช้ทำเป็นเครื่องนุ่งห่มแล้วดูแลรักษาได้ง่ายเหมาะต่อการใช้ประโยชน์ด้านทำการตกแต่งบ้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

- เป็นผลิตภัณฑ์ที่รักษารูปทรงได้ดี สามารถซักด้วยเครื่องได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทนทานต่อแสงแดด เหมาะกับการทำเป็นผ้าร่ม
- มีความคงทนต่อการขูดถูดี สามารถใช้งานเชิงอุตสาหกรรมได้ และอาจใช้ถักเป็นด้าย เย็บจักร ตลอดจนเสื้อผ้า
- ความสวยงามเหนือกว่าไนลอน สามารถผสมกับเส้นใยอื่นทั้งใยธรรมชาติและใยประดิษฐ์ มีลักษณะเหมือนไหม



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอสเตอร์ (Polyester) [8]

อุตสาหกรรมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ในประเทศไทยนับเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่ใช้เงินลงทุนสูงและเป็นลักษณะเป็นลักษณะของการร่วมทุนจากต่างประเทศ ดังนั้นเทคโนโลยีที่ใช้จะมาพร้อมการลงทุนของบริษัทที่ร่วมทุนด้วย ปัจจุบันจำนวนโรงงานที่ผลิตพอลิเอสเตอร์มีรวมอยู่ 10 แห่ง ส่วนใหญ่ผลิตชนิดเส้นใยสั้น เส้นใยชนิด POY และเส้นด้ายใยยาวโดยข้อมูลในเอกสารสถิติสิ่งทอไทย 2540 ได้แสดงตัวเลขของกำลังการผลิตในปี พ.ศ. 2539 รวมทั้งสิ้น 366,700 ตัน แบ่งเป็นชนิดเส้นใยสั้น 174,000 ตัน เส้นใยยาว POY 139,100 ตัน และ เส้นด้ายยาว 52,900 ตัน ทั้งนี้มีการนำเข้าวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตคือ เอทิลีนไกลคอล กรดเทเรฟทาลิก และไดเมทิลเทเรฟทาเลตจากต่างประเทศ แต่มีวัตถุดิบจำนวนหนึ่งซึ่งสามารถผลิตได้แล้วภายในประเทศ

#### 2.4.1 กระบวนการผลิต

โดยนิยามในการให้คำจำกัดความของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ไว้ว่า “เส้นใยพอลิเอสเตอร์ผลิตจากเส้นใยซึ่งวัสดุของเส้นใยนั้นเป็นพอลิเมอร์ลูกโซ่โมเลกุลยาวประกอบด้วยอย่างน้อย 85% โดยน้ำหนักของเอสเตอร์ที่ได้จากไดไฮดริก แอลกอฮอล์และกรดเทเรฟทาลิก”

พอลิเอสเตอร์ที่ผลิตออกขายในตลาด ปัจจุบันได้จากพอลิเมอร์ของเทเรฟทาเลตสองชนิด ชนิดแรกที่ใช้ผลิต Terylene<sup>®</sup> และ Dacron<sup>®</sup> จะเป็น polyethylene terephthalate ใช้ตัวย่อว่า PET และชนิดที่สองในปี 2501 (ค.ศ.1958) โดยบริษัท Eastman Chemical Products Inc. ได้ผลิตพอลิเอสเตอร์ชนิดใหม่ใช้ชื่อทางการค้าว่า Kodel<sup>®</sup> โดยทำจาก 1,4 cyclohexylene - dimethylene terephthalate ใช้ตัวย่อว่า PCDT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกระบวนการผลิต PET รูปแบบคล้ายกับการผลิตไนลอน เพียงแต่ต่างกันที่สารเคมีเริ่มต้นที่ใช้ โดยวัตถุดิบนี้เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เริ่มจากการนำเอทิลีนมาทำการออกซิไดส์ให้ได้มอนอเมอร์ที่เป็นไกลคอลในลักษณะไดไฮดริก ในถึงความดันสูงภายใต้สุญญากาศ โดยการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป กระบวนการเกิดพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของมอนอเมอร์สองตัวที่กล่าวมาแล้ว พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นของเหลวที่หลอมตัวอยู่ ไม่มีสีและใส จากนั้นตัดเป็นชิ้นเป็นเม็ดที่เรียกว่า (Chip) อบให้แห้งเพื่อขจัดความชื้น แล้วทำการผสมเพื่อให้มีความสม่ำเสมอในการเตรียมทำเป็นเส้นใยต่อไป

การผลิตพอลิเอสเตอร์ชนิด PET นี้แต่เดิมโรงงานใช้วัตถุดิบตั้งต้นคือ ไดทิลเทรฟทาเลต หรือ ตัวย่อว่า DMT ทำปฏิกิริยากับเอทิลีนไกลคอล หรือ EG ข้อดีของการใช้สารตั้งต้น DMT คือ ราคาค่อนข้างถูก แต่เมทานอลที่เป็นผลจากปฏิกิริยาจะไวต่อไฟ และมีความเป็นพิษ การแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้โดยใช้กรดเทรฟทาลิก หรือ TPA แทน DMT แต่ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นบ้าง

กระบวนการผลิตพอลิเอสเตอร์ชนิด PCDT ได้จากการทำปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ชนิดควบแน่นระหว่างกรดเทรฟทาลิกกับ 1,4 cyclohexane – dimethanol ทำให้ได้ 1,4 cyclohexylene – dimethylene terephthalate (PCDT) การเปรียบเทียบเส้นใยพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.2

พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาผ่านการหลอมให้เหลวเพื่อเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นของการปั่นเส้นใย โดยกระบวนการผลิตแบบหลอมเหลว อัดผ่านหัวรีดที่กำหนดรูปแบบของรูให้ได้ตามต้องการมีลักษณะแตกต่างกันไปทั้งชนิดทรงกลม สามเหลี่ยมมุมมนห้าก้าน หกก้าน แปดก้าน เป็นต้น เส้นใยที่ได้ออกมาจะเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการยืดดึงที่ต้องทำในขณะร้อนหรือที่เรียกว่าการยืดดึงร้อน (Hot drawing) ขณะเดียวกันเส้นใยอาจถูกทำเทกเจอร์ไปในเวลาเดียวกัน คือ การทำ Draw-texturing ลดขั้นตอนการทำงาน ประหยัดเวลา ลดต้นทุนการผลิต อีกทั้งสามารถทำการควบคุมคุณภาพได้อย่างดีด้วย

ในประเทศไทยโรงงานผลิตพอลิเอสเตอร์ส่วนใหญ่ใช้สารตั้งต้น TPA ทำปฏิกิริยากับ EG โดยมีส่วนของการผลิตแยกส่วนระหว่างกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ให้ได้ออกมาเป็นเม็ดของพอลิเอสเตอร์ ซึ่งอาจนำไปขายเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นเม็ดพอลิเอสเตอร์นั้น หรือ อาจนำไปเป็นวัตถุดิบเพื่อเข้าสู่โรงงานผลิตเส้นใยทั้งการผลิตเส้นใยยาว และเส้นใยสั้น ซึ่งเรียกระบบแยกส่วนแบบนี้ว่า Batch-wise polymerization process ในขณะที่บางโรงงานจะดำเนินการรวมส่วนของกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ เข้ากับกระบวนการผลิตเส้นใย เป็นกระบวนการต่อเนื่องตลอดกันไป เรียกกระบวนการนี้ว่าเป็น Continuous polymerization process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



มีค่าอยู่ในช่วง 4.0 – 5.5 g/d สำหรับเส้นยาวชนิดทั่วไป แต่สูงขึ้นไปอยู่ในช่วง 6.3 – 9.5 g/d ในเส้นยาวชนิดความแข็งแรงสูง ในกรณีของเส้นใยสั้นมีค่า 2.5 – 5.5 g/d เส้นใยยาวชนิดความแข็งแรงสูงมักใช้ในงานพิเศษเฉพาะด้าน เช่น ทำเป็นผ้าใบยางรถยนต์ และผ้าใบในงานอุตสาหกรรม

ด้วยสมบัติที่มีความแข็งแรงสูงประกอบกับการที่ไม่มีการยืดหดตัวเมื่อมีความชื้น และยังไม่เกิดผลจากสารเคมีที่ใช้ทำการตกแต่งสำเร็จ ทำให้การใช้พอลิเอสเตอร์ในการผลิตเส้นด้ายเย็บจักรประสบความสำเร็จ และแก้ปัญหาจากการใช้ฝ้ายได้เป็นอย่างดี

3. สภาพยืดหยุ่น อยู่ในระดับปานกลางไปถึงดี โดยทั่วไปพอลิเอสเตอร์ เป็นเส้นใยที่ไม่มีสภาพยืดหยุ่น หรือการยืดตัวดีนัก โดยเฉพาะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงจะคืนกลับสภาพไม่ดี ในขณะที่ถ้ามีการยืดตัวเพียงเล็กน้อยจะสามารถคืนกลับตัวได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับไนลอน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของการคืนตัวกลับระหว่างเส้นใยพอลิเอสเตอร์ และไนลอน [8]

เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ของเส้นใย	เปอร์เซ็นต์ของการคืนตัวกลับ	
	พอลิเอสเตอร์ 56	ไนลอน 200
1	91	81
3	76	88
5	63	86
15	40	77

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทดูปองท์

4. การคืนตัวจากแรงอัด อยู่ในระดับดีถึงดีมากทนทานต่อการยับทั้งในสภาพแห้งและเปียก นับเป็นสมบัติเด่นที่เหมาะสมกับการนำเส้นใยพอลิเอสเตอร์ไปใช้บรรจุภายในผลิตภัณฑ์หมอน ผ้าห่ม ที่ต้องการรับน้ำหนักโดยไม่เสียรูปทรง หรือสามารถคืนตัวกลับอยู่ในสภาพเดิมได้ดีภายหลังการใช้งาน

5. ความสามารถในการดูดซึมความชื้น ค่อนข้างต่ำมาก โดยมีความสามารถดูดซึมความชื้น อยู่ระหว่าง 0.4 – 0.8 % ส่งผลในเชิงบวกต่อผลิตภัณฑ์ ในลักษณะที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่แห้งเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อนจะเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต การคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมายและจะดำเนินคดีตามกฎหมายต่อไป

ที่มากับน้ำสามารถกำจัดออกได้งานเพียงเซ็ดออกเท่านั้น แต่ก็มีผลในเชิงลบเช่นเดียวกัน คือ ทำให้การนำมาใช้งานทำเป็นเสื้อผ้าแล้วมีความรู้สึกไม่สบายตัวเนื่องจากมีความชื้นจากเหงื่อ มีปัญหาการสะสมประจุไฟฟ้า และมีการจับเกาะของคราบที่มาจากน้ำมันได้ง่าย ปัญหาของจุดอ่อนนี้มักแก้ด้วยการผสมกับเส้นใยชนิดอื่นเช่น ฝ้าย เป็นต้น

6. ผลจากความร้อน ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเอสเตอร์ ซึ่งเริ่มเกิดการเหนียวหรืออ่อนตัวลงที่อุณหภูมิ 227 -242 องศาเซลเซียส ดังนั้นหากต้องการรีดต้องใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าระดับนี้เสมอ ที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปในช่วง 249 – 290 องศาเซลเซียส พอลิเอสเตอร์จะหลอมตัวและติดไฟ แต่ดับได้ด้วยตัวมันเอง ด้วยความที่พอลิเอสเตอร์เป็นวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถทำให้อยู่ตัวด้วยความร้อนได้ ทำจีบถาวรในเสื้อผ้าได้รูปทรงที่สวยงามและทนทาน

7. การติดไฟ เมื่อพอลิเอสเตอร์ถูกเปลวไฟ จะคล้ายไนลอน คือ เกิดการหดหนีเปลวไฟเล็กน้อย แต่ไม่มีเปลวไฟติด จากนั้นเกิดการหลอมตัวและจับตัวเป็นหยด เมื่อเย็นตัวลงก็จะแข็งเป็นเม็ดสีดำ ข้อแตกต่างจากไนลอนก็คือ กลิ่นที่ออกมามีกลิ่นคล้ายน้ำมันเบนซิน และมีเขม่าดำเป็นผงเกิดขึ้นด้วย

8. ความถ่วงจำเพาะ แล้วแต่ชนิดของพอลิเอสเตอร์ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.22 – 1.38 เป็นเส้นใยที่หนักกว่าไนลอนและอะคริลิก แต่ใกล้เคียงกับ แอซีเตต

#### 2.4.4 สมบัติทางเคมี

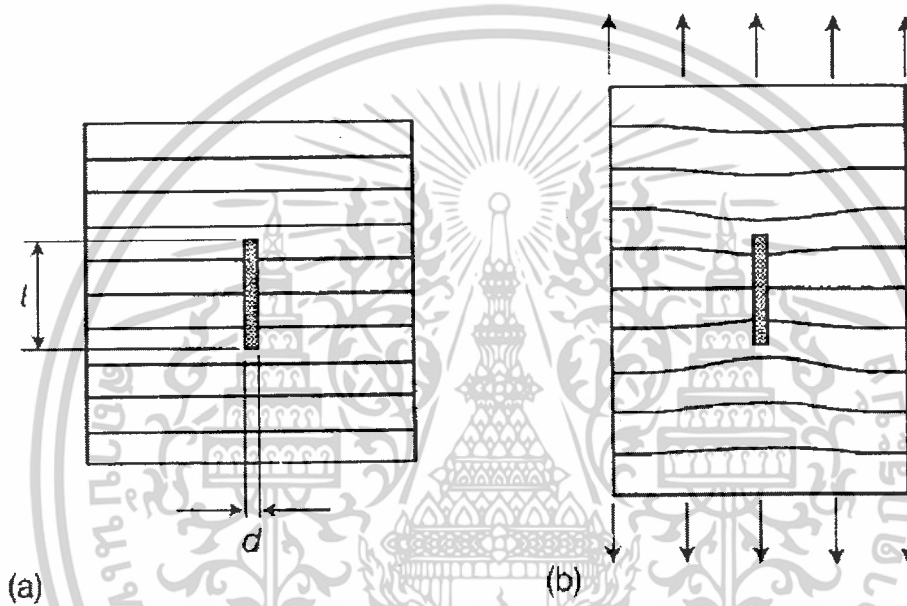
1. กรดและด่าง โดยทั่วไปจะทนสารเคมีทั้งกรดและด่างได้ แต่ในสถานะที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความทนทานจะลดลงเช่น กรดกำมะถันที่อุณหภูมิสูงเส้นใยจะเสื่อมสภาพลงได้ เหงื่อไม่มีผลต่อเส้นใย
2. สารซักฟอก สามารถใช้สารซักฟอกทั้งชนิดออกซิไดซ์และชนิดรีดิวซ์ที่มีจำหน่ายในตลาดได้ทุกชนิดโดยไม่มีผลเสียแต่อย่างใด
3. ภาและแมลง พอลิเอสเตอร์ทนทานต่อราและแมลงได้ดีหากมีปัญหบ้างก็เนื่องมาจากสารที่ใช้ทำการตกแต่งสำเร็จมากกว่าเนื่องจากตัวเส้นใยเอง
4. แสงแดด ภายใต้ภาวะปกติพอลิเอสเตอร์ทนต่อแสงแดดได้ดี แต่ถ้าหากถูกแสงแดดโดยตรงเป็นเวลานานๆ เส้นใยอาจมีสมบัติเสื่อมลงได้ ในกรณีที่ได้รับแสงผ่านกระจกเช่น หน้าต่างประตู ความสามารถในการทนต่อแสงจะยืดยาวออกไปดังนั้น จึงนิยมนำพอลิเอสเตอร์ทำเป็นผ้าม่านภายในบ้าน
5. การย้อมสี ที่เหมาะสมกับพอลิเอสเตอร์ คือสีประเภทดิสเพอร์ส ที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง นอกจากนั้นก็มีความพยายามในการดัดแปลงเพื่อให้พอลิเอสเตอร์สามารถรับสีประเภท

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ลักษณะของสารเติมแต่งเสริมแรงที่ดี [9]

- มีความแข็ง และแข็งแรงกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์
- มีขนาดอนุภาค รูปร่าง และลักษณะของพื้นผิวที่ดี สำหรับการเชื่อมโยงเชิงกลที่มีประสิทธิภาพกับเมทริกซ์

### 2.5.1 กลไกการเสริมแรง (Mechanism of reinforcement)



รูปที่ 2.22 เส้นใยเสริมแรงที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกซึ่งอยู่ในเมทริกซ์ (a) ในสถานะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปร่าง (b) ภายใต้การให้แรงดึง [9]

เส้นใยที่อยู่ภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์จะทำหน้าที่ลดความเครียด (Strain) แต่จะเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ซึ่งก็คือเส้นใย ที่อยู่ภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์จะต้องมีความแข็งแรงกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์และต้องมีการเปลี่ยนรูปร่างน้อยกว่าจึงจะทำให้ความเครียดโดยรวมของพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งตรงบริเวณที่ใกล้กับเส้นใย หรือสารเสริมแรงอื่นๆ

การเสริมแรงที่ดีต้องมีพื้นที่ผิวระหว่างวัฏภาคเสริมแรง (เส้นใยหรืออนุภาค) กับ เมทริกซ์ (Matrix) มากๆ คือ ต้องมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาตร (Surface-area to volume ratio, AV) มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรูปร่างของอนุภาคเป็นทรงกระบอก (Cylindrical particle)

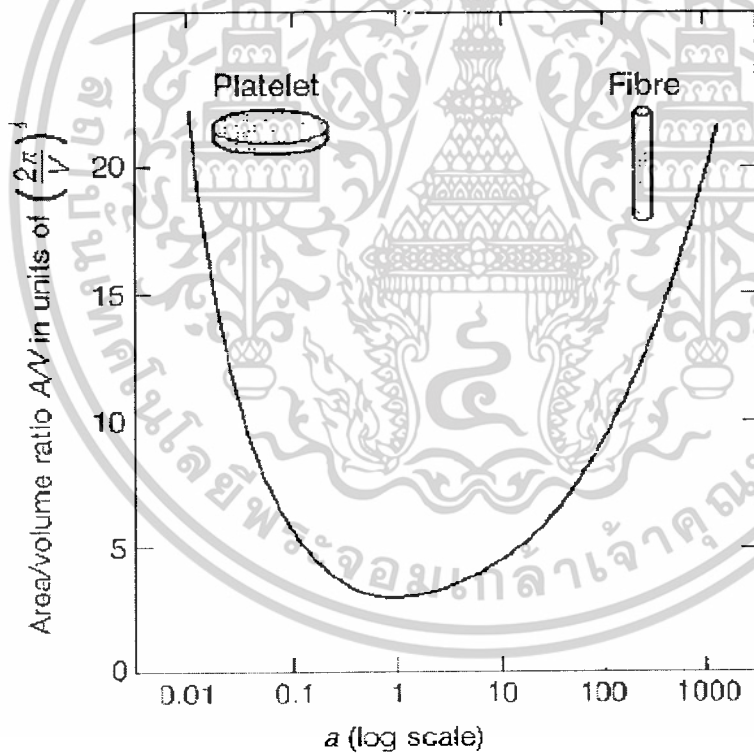
จะได้

$$A = \pi d^2/2 + \pi dl$$

$$V = (\pi d^2 l) / 4$$

$$\frac{A}{V} = \left( \frac{2\pi}{V} \right)^{1/3} (a^{-2/3} + 2a^{1/3})$$

$a = l/d$  : aspect ratio = length  $l$  / diameter  $d$



รูปที่ 2.23 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาตรของอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกกับ

Aspect ratio ( $a = l / d$ ) [9]

จากรูปข้างต้น รูปร่างที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่า  $AV$  มากที่สุด คือ

- $a \gg 1$  เมื่อเป็นเส้นใย (Fiber)

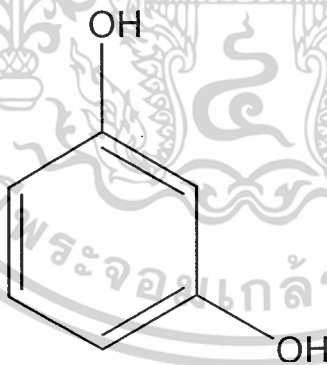
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) [5]

สารเพิ่มการยึดติด เป็นสารที่ใส่ในยางเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติด (Tack) ของยางกับวัสดุอื่นหรือยางด้วยกันเอง มักใช้อยู่ในช่วง 1 – 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยาง (Part per hundred of rubber, phr) ขึ้นกับความสามารถการยึดติดที่ต้องการ มักเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง (500 – 2,000 g/mol) และมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้าง (Broad MWD) ตัวอย่างสารเพิ่มการยึดติด ได้แก่ ชันสน (Rosins) คูมาโรนอินดีนเรซิน (Coumarone-indene resins) ปิโตรเลียมเรซิน (Aliphatic petroleum resins) เทอร์พีน (Terpene oligomers) และ ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Phenol-formaldehyde resins) ซึ่งสารเพิ่มการยึดที่ใช้นในงานวิจัยนี้คือ เรซอร์ซินอล (Resorcinol)

### 2.6.1 เรซอร์ซินอล (Resorcinol) [10]

เป็นสารเคมีที่ใส่ในยางเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติดของยางกับวัสดุอื่น หรือยางด้วยกันเองให้มีประสิทธิภาพที่ดี เนื่องจากเรซอร์ซินอลเป็นสารเคมีที่ความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเรซอร์ซินอลอยู่ในสถานะที่มีฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เรซอร์ซินอลสามารถทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ได้อย่างรวดเร็วจะได้เป็นสารประกอบจำพวกเรซินเทอร์โมเซตที่สามารถแข็งตัวได้ ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งเรซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน สามารถใช้ในการยึดติดกันระหว่างเส้นใย ถักทอได้ เช่น ในอุตสาหกรรมยาง



รูปที่ 2.24 โครงสร้างทางเคมีของเรซอร์ซินอล (Resorcinol) [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สมบัติและการใช้งาน

- นิยมใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการทำให้เพิ่มการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติ หรือยางสังเคราะห์กับเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งอยู่ในรูปของกาวเรซอร์ซิน-ฟอर्मาลิน (Resorcin formaline-latex)
- เป็นสารป้องกันการเกิดเชื้อจุลินทรีย์ และเชื้อรา ซึ่งสามารถใส่เรซอร์ซินอลในการผสมยางได้โดยตรง
- เรซอร์ซินอลมีผลกระทบต่อการใช้เชื่อมโยง และสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ยางน้อยมาก
- นิยมใช้เรซอร์ซินอลเป็นกาวในยางรถยนต์ หรือเป็นกาวยึดติดระหว่างพื้นผ้าใบกับยางที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์

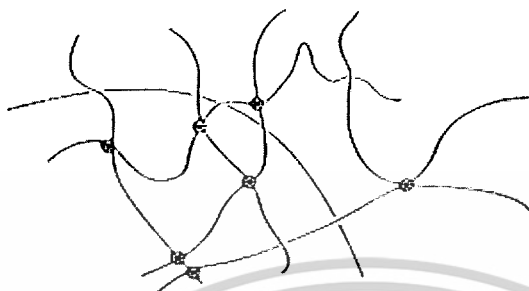
### 2.7 การเชื่อมโยงยาง (Vulcanization) [5]

วัลคาไนเซชัน หรือการเชื่อมโยงยาง (Crosslinking) เป็นการทำให้เกิดโครงสร้างร่างแห 3 มิติ (3-Dimensional network) ของสายโซ่พอลิเมอร์ในโมเลกุลของยาง หรืออาจเรียกว่าการทำให้ยางสุก (Curing) หรือทำให้ยางคงรูป การเข้าประโยชน์จากยางจะต้องนำยางมาทำการเชื่อมโยงยางที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้วจะมีสมบัติที่ดีขึ้น มีความเสถียรของรูปร่าง และทนอุณหภูมิสูง การเชื่อมโยงยางที่ผลทำให้สมบัติยางเปลี่ยนไป กล่าวคือ

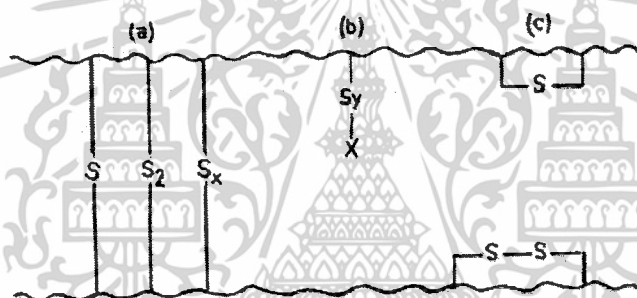
- มีความแข็งแรงดึง (Strength) เพิ่มขึ้น
- มีความแข็ง (Stiffness) เพิ่มขึ้น
- มีมอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
- มีความทนต่อแรงฉีก (Fatigue resistance) และการขัดสี (Abrasion resistance) เพิ่มขึ้น
- มีความแข็งกด (Hardness) เพิ่มขึ้น
- มีความคงตัวทางเคมี (Chemical stability) เพิ่มขึ้น
- ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น
- มีการเปลี่ยนรูป (Deformation) ลดลง

การเชื่อมโยงยางสามารถทำได้โดยใช้สารเคมีซึ่งเป็นสารเชื่อมโยง (Vulcanizing agents) ได้แก่ กำมะถัน (Sulfur) เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) หรือสารประกอบออกไซด์ของโลหะบางชนิด (Metal oxide และ polyvalent metal ions) ใช้นร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 การเชื่อมโยงจากกระบวนการวัลคาไนเซชัน [11]



รูปที่ 2.26 โครงสร้างของยางเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน [12]

พันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน ในสภาวะที่อาจมีหรือไม่มีสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงและสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง สามารถเกิดได้หลายลักษณะดังรูปที่ 2.27 คือ

1. พันธะเชื่อมโยงกำมะถันอะตอมเดี่ยว (Monosulfidic linkage)
2. พันธะเชื่อมโยงกำมะถันหลายอะตอม (Polysulfidic linkage)
3. การเชื่อมโยงบนสายโซ่เดียวกัน ทำให้เกิดโครงสร้างเป็นวง (Ring) หรือไซคลิก (Cyclic)
4. การเชื่อมโยงด้านเดียว ทำให้เกิดโครงสร้างห้อย (Dangling)

ผลของการเชื่อมโยงสามารถศึกษาได้จากกราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Torque) กับเวลา ได้จากเครื่องวัดการเชื่อมโยง เช่น เครื่อง ODR (Oscillating disc rheometer) โดยศึกษาแรงบิดของจานหมุนที่เกิดขึ้นระหว่างยางกับจานหมุนที่หมุนไปมาเป็นมุมคงที่ (1, 3 หรือ 5 องศา) เทียบกับเวลา

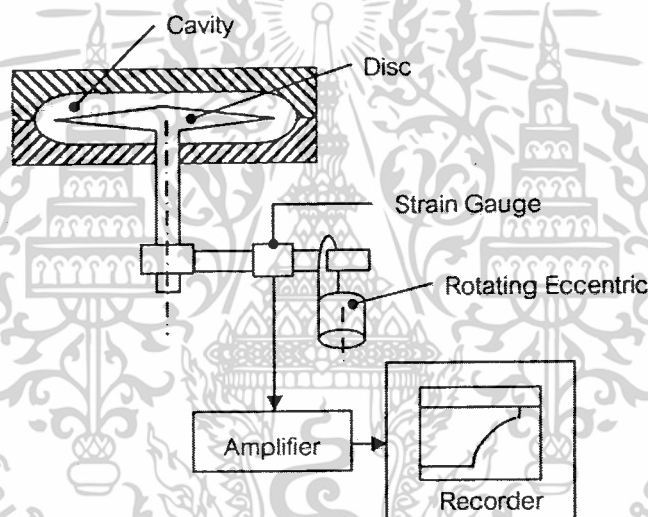
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 การทดสอบสมบัติของยาง [5]

### 2.8.1 เครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น (Oscillating Disc Rheometers, ODR)

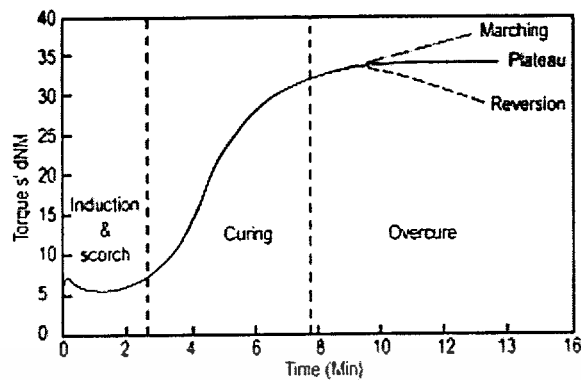
เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้วัดการเชื่อมโยงของยาง (Curemeters for rubber compounds) สามารถวัดการเชื่อมโยงของยางได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ใช้หาสภาวะในการเชื่อมโยงที่เหมาะสม ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตยาง และใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง

หลักการทำงานของเครื่อง ODR คือ การตรวจวัดความแข็งของยาง โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงบิดหรือทอร์ค (Torque) ของจานรูปโคนครึ่งวงกลม (Biconical disc) หมุนสั้นอยู่ในตัวอย่างยางที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.27 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่อง ODR [5]

ในการทดสอบ เครื่องจะวัดแรงบิดที่เพิ่มขึ้นของชิ้นยางที่อยู่ระหว่างจานโลหะที่หมุนแบบสั้นไปมาที่มุม  $\pm 1, 3$  หรือ  $5$  องศา ตามแนวระนาบ เนื่องจากการทดสอบทำที่อุณหภูมิสูง จึงไม่มีผลของการเปลี่ยนแปลงบิดอันเนื่องมาจากความหนืด ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การเพิ่มขึ้นของแรงบิดตัวอย่างยางที่เกิดการเชื่อมโยงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนจุดเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของยาง



รูปที่ 2.28 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) [5]

การเชื่อมโยงแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วงระยะเวลาในการขึ้นรูป และเวลา ก่อนเชื่อมโยงหรือ “เวลาสกอร์ช” (Scorch time) เมื่อเริ่มให้แรงบิด ยางจะนิ่มตัวเล็กน้อย เนื่องจากแรงเฉือน (Shear thinning effect) เป็นผลให้แรงบิดมีค่าต่ำลงเล็กน้อยและคงที่ ในช่วงนี้มีความหนืดต่ำ เคลื่อนที่และไหลได้ สามารถนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) และการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ได้ โดยกระบวนการขึ้นรูปจะดำเนินการได้ในช่วงก่อนที่จะถึงเวลาสกอร์ช ซึ่งเป็นช่วงที่ยางเริ่มเกิดการเชื่อมโยง

2. ช่วงระยะเวลาเชื่อมโยง (Curing) สารเชื่อมโยงทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห จุดที่เกิดแรงบิดเริ่มเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับจุดที่เริ่มปฏิกิริยาเชื่อมโยง ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่ตรงเป็นสายโซ่กิ่งหรือเกิดโครงสร้างร่างแหสามมิติ ทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นจึงใช้แรงบิดจานหมุนเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดคงที่ เป็นช่วงเวลาที่ยางเกิดการเชื่อมโยงดีที่สุด และจะให้ข้อมูลอัตราเร็วของการเชื่อมโยง

3. ช่วงระยะเวลาหลังการเชื่อมโยง (Overcure) สามารถให้ข้อมูลการเสื่อมสลาย (Degradation) ของยางได้ถ้ายังทำการทดสอบต่อไป เส้นกราฟจะเป็นไปได้ใน 3 ลักษณะ คือ

- เส้นกราฟคงที่ (Plateau) เมื่อเวลาผ่านไป ยางมีองศาการเชื่อมโยง (Degree of crosslinking) คงที่ ไม่เกิดการเสื่อมสลายของยาง

- เส้นกราฟสูงขึ้น (Marching) แสดงว่ายางมีองศาการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางบางชนิดเกิดการเสื่อมสลายแบบเกิดการเชื่อมโยง ยางที่เกิดปรากฏการณ์นี้ได้แก่ ยางคลอโรพรีน (CR) ยางไนไตรล์ (NBR)

- เส้นกราฟลดลง (Reversion) เนื่องจากยางบางชนิดเกิดการเสื่อมสลายแบบเกิดการขาดของสายโซ่ หรือเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ (Reversion) ยางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบนี้ ได้แก่ ยางธรรมชาติ (NR) ยางไอโซพรีน (IR) และยางบิวทิล (IIR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

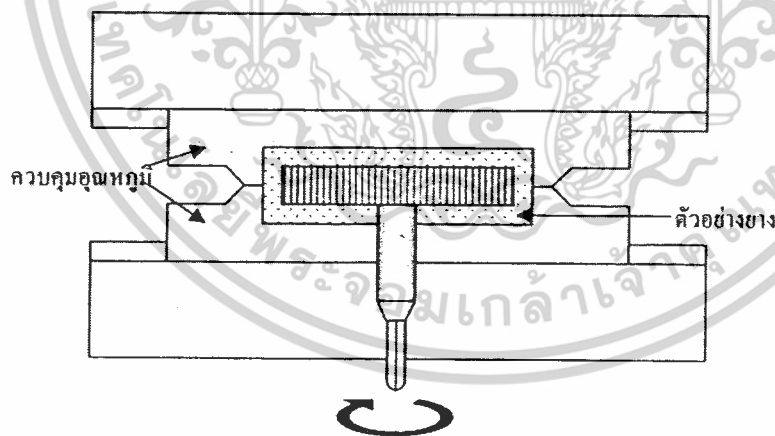
## 2.7.2 เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscometer) [5]

เป็นเครื่องมือทดสอบสมบัติการไหลหรือความหนืดของยางทุกชนิด สามารถใช้ประโยชน์จากการทดสอบในหลายลักษณะ คือ

1. หาค่าความหนืดมูนนี่ของยางดิบและยางผสมสูตร เพื่อทดสอบมาตรฐานของยางหรือเพื่อควบคุมคุณภาพ

2. ตรวจสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ของยางผสม ทำให้ทราบเวลาเริ่มเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช เวลาเชื่อมโยง และอัตราการเชื่อมโยง (Cure rate index) เป็นต้น

เครื่องวัดความหนืดประกอบด้วยจานหมุนโลหะ (Rotor) “มูนนี่” อยู่ในตัวอย่างยางที่อยู่ภายในห้องทดลองตัวอย่างปิด ที่อุณหภูมิและความดันตามกำหนด จานหมุนโลหะจะหมุนด้วยความถี่คงที่ เท่ากับ  $2 \pm 0.02$  รอบต่อนาที (rpm) ให้อัตราเร็วเฉือน (Shear rate) ต่ำ (ประมาณ  $1-2 \text{ s}^{-1}$ ) อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ (Test chamber) จะเท่ากับอุณหภูมิขึ้นรูปหรืออุณหภูมิเชื่อมโยงยาง ผิวด้านในของห้องทดสอบจะมีลักษณะเป็นร่อง เพื่อเพิ่มแรงเสียดทานและป้องกันการเลื่อนไถลของยางกับผิวโลหะ เครื่องจะวัดแรงบิดที่เกิดขึ้นเมื่อหมุนจานโลหะที่ห่อหุ้มด้วยตัวอย่างยาง และเปลี่ยนให้เป็นหน่วยความหนืดแบบมูนนี่ ซึ่งไม่มีหน่วย โดยกำหนดให้แรงบิด (Torque)  $8.30 \pm 0.02$  นิวตัน-เมตร (Nm) มีค่าเท่ากับความหนืดมูนนี่  $100 \pm 0.5$  หน่วยมูนนี่



รูปที่ 2.29 จานหมุนโลหะในเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ [5]

จานหมุนโลหะจะมีลักษณะผิวเป็นร่อง เพื่อเพิ่มผิวสัมผัสและแรงเสียดทาน เป็นการป้องกันลื่นไถลระหว่างจานหมุนโลหะกับยางตัวอย่าง ในการทดสอบค่าความหนืดมูนนี่ มีการใช้จานหมุนเอกสารที่ขนาดคือ 2 นิ้ว สำหรับที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. จานหมุนขนาดใหญ่ (Larger rotor, L) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.10±0.03 มิลลิเมตร หนา 5.54±0.03 มิลลิเมตร ใช้สำหรับทดสอบยางทั่วไป

2. จานหมุนขนาดเล็ก (Small rotor, S) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30.48±0.03 มิลลิเมตร หนา 5.54±0.03 มิลลิเมตร ใช้สำหรับทดสอบยางที่มีความหนืดสูงมาก เมื่อวัดความหนืดด้วยจานขนาดใหญ่ ทำให้ได้ค่าความหนืดมุนนี้้นน้อยกว่าจานขนาดใหญ่

### 2.8.3 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine) [5]

เป็นเครื่องมือที่ใช้ทดสอบสมบัติเชิงกลที่สำคัญที่สุดของวัสดุ เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืด (% Elongation) การทดสอบแรงดึงคือการวัดความทนทานของวัสดุต่อแรงดึงยึดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียหาย ค่ามอดุลัสแรงดึงบอกถึงความแข็ง (Stiffness) ของวัสดุ หาได้จากความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) การทดสอบแรงดึงทำได้โดยการยึดชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน โดยใช้ที่จับ (Grips) สองชุด ที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่ และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่โดยมีเซลล์วัดแรง (Load cells) เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานตัวอย่าง โดยมากชิ้นงานตัวอย่างมักมีรูปร่างคล้ายดัมเบลล์ (Dumb-bell) เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการขาดในส่วนที่เป็นช่วงเว้าของดัมเบลล์ การยืดออกของชิ้นงานวัดจากระยะห่างระหว่างสองเส้น (Gauge marks) บนชิ้นงานที่ห่างกันเป็นระยะห่างเท่ากับ "ความยาวเกจ" หรือ Gauge length ตามมาตรฐานใช้ความยาวเกจ 20 25 หรือ 50 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์ (Extensometer) แบบสัมผัส (Contacting extensometer) หนีบกับชิ้นงาน หรือแบบไม่สัมผัส (Non-contacting extensometer)

อัตราเร็วการดึงที่ใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง เช่นวัสดุคล้ายยาง (Elastomers) จะดึงด้วยอัตราเร็ว 500 มิลลิเมตร/นาที (mm/min) ตัวอย่างที่แข็งแรงมาก เช่นวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-reinforced composites) จะทำการดึงที่ความเร็วช้าถึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที พลาสติก โดยทั่วไปใช้ความเร็วในการดึง 50-100 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราเร็วในการดึงมีผลต่อการทดสอบแรงดึง การใช้อัตราเร็วที่น้อยเปรียบเทียบกับกรณีการดึงธรรมดา ในขณะที่อัตราเร็วสูงเปรียบเสมือนการกระแทกหรือกระตุกชิ้นงานตัวอย่าง การเพิ่มอัตราเร็วการดึงจะทำให้ความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด หรือมอดุลัสที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง

ความเค้น (Stress) และมอดุลัส (Modulus) มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm<sup>2</sup>) หรือเมกะปาสคาล (MPa) ส่วนความเครียด (Strain) จะไม่มีหน่วย มอดุลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus หรือ Modulus of elasticity) ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) หรือ มอดุลัสดึง (Tensile modulus) คือค่าอัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดของส่วนเส้นกราฟที่ยังเป็นเส้นตรง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวัสดุจำพวกยางสามารถดึงยืดได้หลายเท่าของขนาดเดิมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจึงไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ "มอดุลัสของยาง" (Rubber modulus) เป็นค่าความเค้นที่เปอร์เซ็นต์ความเครียดหนึ่งๆ เช่น M100 คือความเค้นที่ 100% การยืด

#### 2.8.4 เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer) [5]

เป็นเครื่องที่ใช้ในการทดสอบความแข็งกด (Hardness) ของชิ้นงาน ใช้แรงสปริงในการกด (Spring-loaded durometer) สเกลสำหรับเครื่องวัดความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์คือ 0 ถึง 100 ค่าความแข็งกด 0 คือค่าความแข็งของของเหลว และค่าความแข็งกด 100 คือค่าความแข็งของวัสดุแข็งมากไม่ยุบตัว เช่น กระจก ดูโรมิเตอร์ชนิด A หรือ ชอร์ A (Type A or Shore A durometer) ใช้กับวัสดุอ่อนนิ่ม เช่น ยาง และวัสดุที่มีความแข็งไม่เกิน 90 ถ้าวัสดุมีความแข็งเกิน 90 จะใช้ ดูโรมิเตอร์ชนิด D หรือ ชอร์ D (Type D or Shore D durometer) ซึ่งมีรูปร่างของหัวกดและความแข็งของสปริงแตกต่างกันไป

ข้อเสียของเทคนิคการวัดความแข็งด้วยดูโรมิเตอร์คือความไม่แน่นอนของค่าที่วัดได้ซึ่งขึ้นกับผู้ทำการทดสอบ ค่าที่อ่านได้ยังขึ้นกับอัตราเร็วในการกด และระยะเวลาในการกด ทั้งนี้เนื่องจากการคืนตัวเนื่องจากความยืดหยุ่น (Elastic recovery) และปรากฏการณ์ "คืบ" (Creep) ของพอลิเมอร์ บางมาตรฐานใช้ค่าที่อ่านได้สูงสุด บางครั้งอาจใช้ค่าที่อ่านได้หลังจากกระยะเวลาหนึ่ง เช่น 5 วินาที หรือ 30 วินาที เป็นต้น

ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบต้องมีความหนาอย่างน้อย 0.25 นิ้ว อาจทำการขึ้นรูปตัวอย่างโดยวิธีการหล่อแบบหรือตัดจากแผ่น อาจใช้การซ้อนตัวอย่างหลายแผ่นเพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการ

### 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A.L.G. Saad และ A.F. Younan [13] ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล และสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมขาว (White fillers) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ทัลค์ (Talc) และควอซซ์ (Quartz) และเสริมแรงด้วยเส้นใยไนลอน 6 เส้นใยสั้น พบว่าปริมาณเส้นใย 25 phr ให้ยางที่มีสมบัติดังกล่าวดีที่สุด และเมื่อเติมสารตัวเติม 40 phr จะให้สมบัติที่แตกต่างกันดังนี้แคลเซียมคาร์บอเนตใช้เวลาในการเชื่อมโยงต่ำที่สุด ทัลค์ให้ยางที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด และควอซซ์มีค่ามอดุลัสของยังสูงที่สุดและมีเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A.F.Younan, M.N.Ismail และ A.A. Yehia [14] ทำการศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติที่มีการเสริมแรงด้วยไนลอน 6 เส้นใยสั้น และมี Hydrated silica-resorcinol-hexamethylene tetramine เป็นสารเชื่อมพันธะ (Tricomponent system, HRH) พบว่าชิ้นงานยางเชื่อมโยง (Vulcanizates) ที่ทดสอบตามแนวเส้นใยมีค่าของความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของยัง ลดลงในช่วงแรก และเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้น และค่าการยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทดสอบผลของเขม่าดำ (Carbon black) ชนิด HAF (High-abrasion furnace) ที่มีต่อสมบัติของยาง พบว่าค่าความแข็งแรงดึงตามแนวเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น และไม่มีผลต่อการทดสอบชิ้นงานตามแนวขวางเส้นใย

T.D.Sreeja และ S.K.N.Kutty [15] ศึกษาผลของสารเชื่อมพันธะชนิดที่เป็นยูรีเทน (Urethane based bonding agent) ที่มีต่อลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตยางธรรมชาติ/ยางรีเคลม และไนลอนเส้นใยสั้น หาค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด การยืด ณ จุดขาด และการสะสมความร้อน (Heat build-up) ที่มีการเรียงตัวทั้งสองแนวของเส้นใย จากการทดลองพบว่า 4,4-diphenylmethane diisocyanate/polyethylene glycol resin มีผลต่อค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque) ของคอมโพสิต นอกจากนี้ ค่าความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ Isocyanate เพิ่มขึ้น แต่การคงรูปถาวรด้วยแรงกดอัด (Compression set) ลดลง และพบว่าการสะสมความร้อนน้อยลงเมื่อมีการใช้สารเชื่อมพันธะ

A.F.Younan, M.N.Ismail และ A.I.Khalaf [16] ศึกษาผลของความเสถียรต่ออุณหภูมิ (Thermal stability) ของยางธรรมชาติและพอลิเอสเทอร์เส้นใยสั้นคอมโพสิตที่มี Hydrated silica resorcinol-hexamethylene tetramine เป็นสารเชื่อมพันธะ พบว่าเส้นใยสั้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับยางธรรมชาติ นอกจากนี้เส้นใยพอลิเอสเทอร์ชนิดเส้นใยสั้นที่เป็นขยะ (Waste) ยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอมโพสิตด้วยเช่นกัน ค่าการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงดึงลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้นจนถึง 25 phr และความทนทานต่อการใช้งานเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเสริมแรงด้วยเส้นใย

T.D.Sreeja และ S.K.N.Kutty [17] ทำการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) และสมบัติเชิงกลของไนลอนเส้นใยสั้นที่เสริมแรงยางธรรมชาติผสมยางรีเคลม ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque) ค่าแรงบิดสูงสุด-ต่ำสุด (Maximum-minimum torque) อัตราการเชื่อมโยง ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาด เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมเส้นใย ในทางกลับกันความยืดหยุ่น (Resilience) และการสูญเสียเนื่องจากการขัดถู (Abrasion loss) มีค่าลดลง การสะสมความร้อน (Heat build-up) และการคงรูปถาวรด้วยแรงกดอัด (Compression set) มีค่า

เพิ่มสูงขึ้น เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเสนอแนวทางการลดปริมาณขยะยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยนำเส้นใยพลาซ จากยางรถยนต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตยางรีเคลม (Reclaimed rubber) มาใช้เป็นสารตัว เต็ม (Fillers) ในการผลิตยางผสมสูตร เพื่อลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ ยาง โดยทำการศึกษาผลของปริมาณ ขนาด และทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติ ของยาง โดยใช้ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ที่เป็นเมทริกซ์หลัก และมีเขม่าดำ (Carbon black) เป็นสารตัวเต็มชนิดเสริมแรง (Reinforcing filler) สมบัติของยางที่ทำการศึกษา ได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สมบัติทาง ความร้อน (Thermal properties) และสัณฐานวิทยา (Morphology)

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ยางธรรมชาติ (ยางแท่ง 5L) บริษัท Teck Bee Hang Co.,Ltd.

#### ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติ

การทดสอบ	ผลการทดสอบ
ปริมาณสิ่งสกปรก(%)	0.01
ปริมาณเถ้า(%)	0.33
ปริมาณสิ่งระเหย(%)	0.13
ปริมาณไนโตรเจน(%)	0.28
ดัชนีความอ่อนตัว(%)	76.33

หมายเหตุ ข้อมูลจากผู้ผลิต

2. เส้นใยผ้าใบยางรถยนต์ บริษัท ยูเนี่ยนพัฒนากิจ จำกัด
3. เขม่าดำ (Carbon black, CB) N550 เกรด Commercial
4. กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรด Commercial

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
5. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เกรด Commercial  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. น้ำมันเนฟทานิก (Napthanic oil) เกรด Commercial
7. สารเพิ่มเสถียรภาพ (Antioxidant Winstay<sup>®</sup>L) เกรด Commercial
8. กำมะถัน (Sulfur) เกรด Commercial
9. สารตัวเร่ง Tetramethyl thiurammonosulfide (TMTM) เกรด Commercial
10. สารตัวเร่ง Mercaptobenzothiazole disulfide (MBTS) เกรด Commercial
11. สารช่วยผสม (Resorcinol) บริษัท Sumitomo Chemical Company,Limited  
เกรด Commercial

### ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของสารช่วยผสม (Resorcinol)

สมบัติ	ผลการทดสอบ
สี	ขาว-เหลือง
ความบริสุทธิ์	ไม่น้อยกว่า 99.7%
จุดหลอมเหลว(เริ่มต้น)	110.3 °C
จุดหลอมเหลว(สิ้นสุด)	111.2 °C
การส่องผ่านของแสง	97.5%

หมายเหตุ ข้อมูลได้จากผู้ผลิต

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บริษัท Lab Technology Engineering Ltd.
2. เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscometer) บริษัท Shimazu Automatic Mooney Viscometer รุ่น SMV-201
3. เครื่องวัดการเชื่อมโยงของยาง (Curelaster<sup>®</sup>) บริษัท Nichigo Shoji รุ่น IIF 150
4. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) บริษัท Lab Tech Co.,Ltd.
5. เครื่องตัดชิ้นงาน
6. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) บริษัท LLOYD Instruments รุ่น LR30K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เครื่องทดสอบความแข็งแรงกดแบบดูโรมิเตอร์ (Shore A Durometer hardness tester) บริษัท Yasuda Seiki Seisakusho Ltd.
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น LEO1450 VP บริษัท ลีโอ จำกัด
9. เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) รุ่น Pyris 1 TGA บริษัท Perkinelmer Ltd
10. เครื่อง Differeantial scanning calorimeter (DSC) รุ่น DSC-7 บริษัท Perkin Elmer จำกัด
11. เครื่อง Dynamic mechanical thermal analyzer (DMTA) รุ่น EPLEXOR QC25 ยี่ห้อ GABO ประเทศ Germany
12. เครื่องอัดแรงดันลม บริษัท Ceast รุ่น 602
13. เครื่องชั่ง

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 ยางผสมสูตร

1. ชั่งส่วนผสมต่างๆดังตารางที่ 3.3
2. บดยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง และปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้น้อยที่สุด ทำการบดยางจนยางสามารถพันเป็นแถบรอบลูกกลิ้ง กรีดและพับกลับหน้ายางจนยางนิ่ม ใช้เวลาประมาณ 1 นาที
3. ผสมกรดสเตียริก สารเพิ่มเสถียรภาพ (Wingstay<sup>®</sup> L) และเส้นใยผ้าใบยางรถยนต์ ทำการผสมโดยการกรีดและพับยาง ใช้เวลาประมาณ 2-5 นาที
4. เติมน้ำมันดำ โดยผสมสลับกับการเติมน้ำมันเนฟทานิก กรีดและพับยางเพื่อให้ส่วนผสมกระจายในเนื้ออย่างสม่ำเสมอ ใช้เวลาประมาณ 4-7 นาที จากนั้นปรับลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร กรีดยางออกแล้วตัดยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2 X 2 นิ้ว จำนวน 2 แผ่น เพื่อนำไปวัดความหนืดมูนนี้
5. ทำการผสมชั้นตอนสุดท้าย โดยเติมซิงค์ออกไซด์ กำมะถัน MTBS และTMTM กรีดและพับกลับหน้ายาง ใช้เวลาผสมต่อไปอีกประมาณ 2-4 นาที จากนั้นปรับลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร กรีดแผ่นยางออกจากลูกกลิ้ง ระวังอย่าให้พับติดกัน ทั้งให้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมยางผสมสูตรที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	สูตรยางผสม (ส่วนโดยน้ำหนัก,phr)
ยางธรรมชาติ	100
เส้นใยผ้าใบยางรถยนต์*	0,10,20,30,40
Carbon black N550	30
Antioxidant Winstay® L	1
Napthanic oil	10
Stearic acid	2
ZnO	5
Resorcinol*	0,3,5
Sulfur	1.5
MBTS	1
TMTM	0.5

หมายเหตุ \* เป็นปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

### 3.3.2 การทดสอบยางผสมสูตร

#### 3.3.2.1 การทดสอบความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscosity)

วัดค่าความหนืดแบบมูนนี่ ด้วยเครื่อง Mooney Viscometer โดยใช้แกนหมุนขนาดใหญ่ (L) ที่อุณหภูมิ 100 °C โดยหาค่าความหนืด ML 1+4(100°C) ตามมาตรฐาน ASTM D1646

#### 3.3.2.2 การทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic)

ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่มีการเติมสารเชื่อมโยงแล้วจากข้อ 3.3.1 เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2 X 2 นิ้ว แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงด้วยเครื่อง Curelaster เพื่อหาค่าเวลาการเชื่อมโยง (Cure time,  $t_c$ ) และเวลาสกอร์ช (Scorch time,  $t_{s2}$ ) ที่อุณหภูมิ 150 °C ตามมาตรฐาน ASTM D 2084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

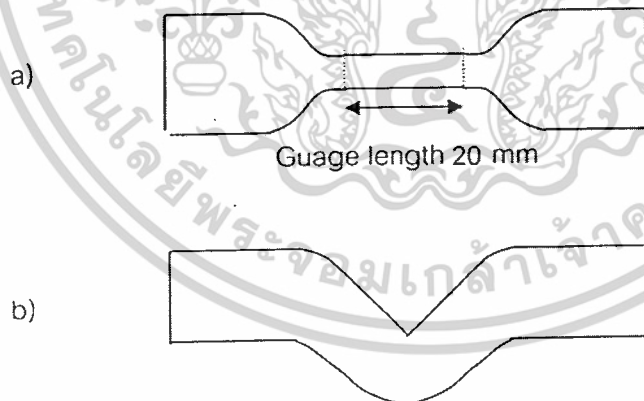
### 3.3.2.3 การขึ้นรูปร่างผสมสูตร

ตัดแผ่นยางใส่แม่แบบขนาดประมาณ 6 X 6 นิ้ว ขึ้นรูปร่างผสมสูตรโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปเพื่อทำการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น โดยใช้อุณหภูมิ 150 °C และเวลาเท่ากับ 1.2 เท่าของ  $t_c(90)$  ที่หาได้ของยางผสมสูตรแต่ละสูตร

### 3.3.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเชื่อมโยง

1. ใช้แม่แบบมีดและเครื่องอัดแรงดันลมตัดชิ้นงานตัวอย่างทั้งในแนวการเรียงตัวเส้นใย (Longitudinal) และแนวขวางการเรียงตัวเส้นใย (Transverse) กับเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ให้เป็นรูปดัมเบลล์ เพื่อทดสอบสมบัติค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัสของยัง มอดุลัสที่ 100% และ 300% การยืด และ Work done ด้วยหัวตัดแบบ C (Gauge length = 20 mm) และตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนก เพื่อทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ด้วยหัวตัดแบบ C ทดสอบสมบัติชิ้นงานโดยใช้อัตราเร็วการดึง 500 mm/min

2. นำแผ่นยางที่เหลือจากการตัดไปทดสอบความแข็งกด (Hardness) ด้วยเครื่อง Durometer แบบ Shore A โดยซ้อนแผ่นยางให้มีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 มิลลิเมตร ทำการวัดความแข็งที่จุดต่างๆ 10 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างชิ้นงานเพื่อทดสอบตามมาตรฐาน a) ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ b) ชิ้นงานรูปปีกนก

ตารางที่ 3.4 มาตรฐานอ้างอิงที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่าง

สมบัติ	มาตรฐาน
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D 412
มอดุลัสที่ 100% และ 300% การยืด (Modulus at 100%, 300% strain)	ASTM D 412
การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	ASTM D 412
ความแข็งกด (Hardness)	ASTM D 2240-02
ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)	ASTM D 624

### 3.3.2.5 การศึกษาสัณฐานวิทยา

โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัว และจัดเรียงตัวของเส้นใย โดยนำชิ้นงานในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 20 นาที แล้วทำการหักชิ้นงานทันที นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้มาเคลือบด้วยทองคำเพื่อทำการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM

### 3.3.2.6 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

#### 3.3.2.6.1 Thermogravimetric Analyzer (TGA)

1. ชั่งชิ้นงานตัวอย่างประมาณ 1-10 mg
2. บรจุชิ้นงานตัวอย่างใส่ภาชนะทดสอบและตั้งอัตราการให้ความร้อน  $10\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{min}$  ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$
3. ทำการวิเคราะห์ผลหาค่าอุณหภูมิในการสลายตัว ( $T_d$ ) และ องค์ประกอบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.6.2 Differential Scanning Calorimeter (DSC)

1. ชั่งชิ้นงานตัวอย่างประมาณ 5-10 mg
2. บรรจุชิ้นงานตัวอย่างใส่ภาชนะทดสอบและตั้งอัตราการให้ความร้อน  $10^{\circ}\text{C} / \text{min}$  ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ถึง  $300^{\circ}\text{C}$
3. ทำการวิเคราะห์ผลโดยหาค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_m$ ) และ % ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของยางตัวอย่าง
4. จากการทดลองสามารถหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ได้จากกราฟ

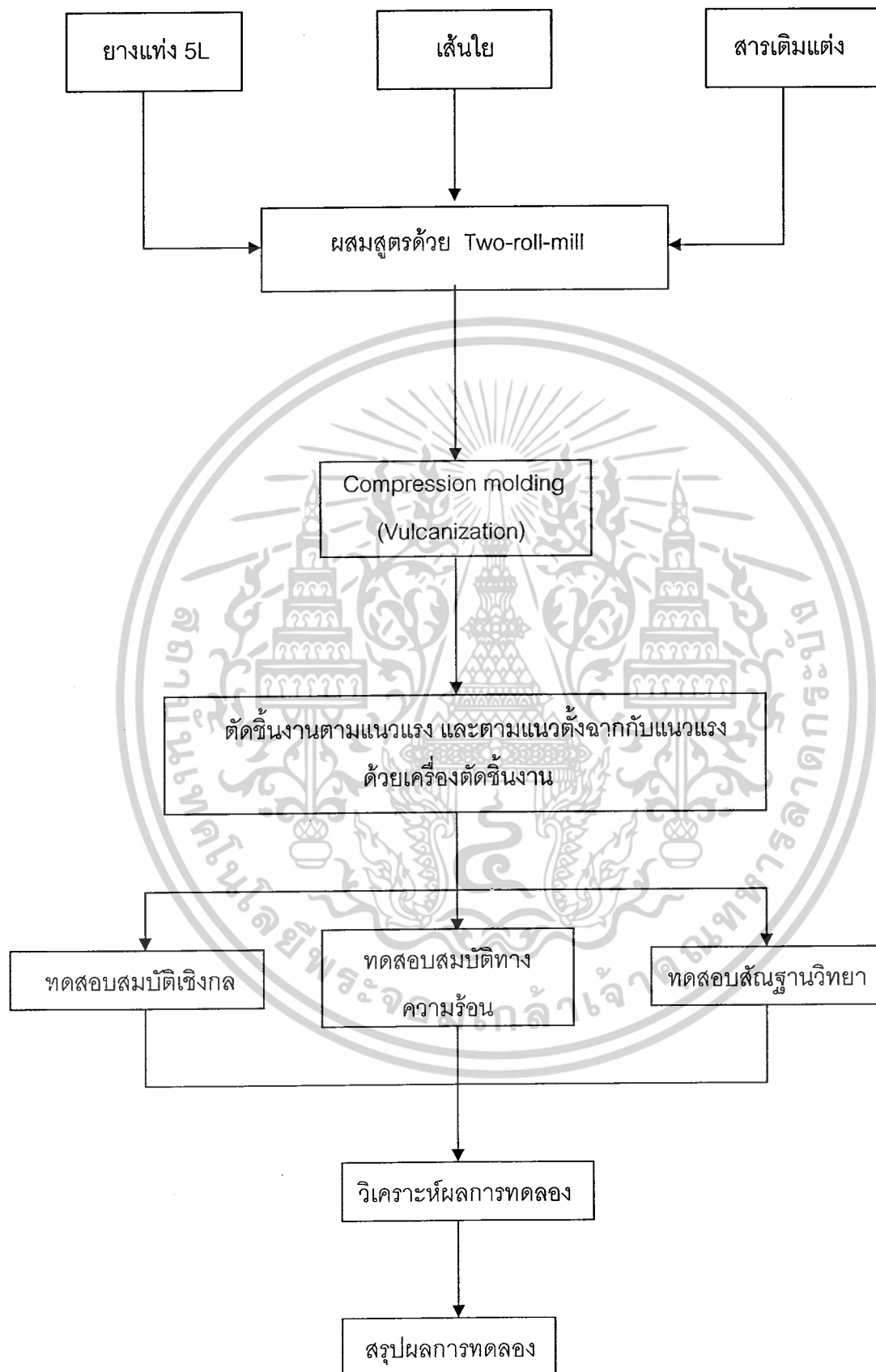
### 3.3.2.6.3 Dynamic Mechanical Thermal analyzer (DMTA)

1. ตัดชิ้นงานให้มีความกว้างประมาณ 5.8 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร และหนา 2.5 มิลลิเมตร
2. นำชิ้นงานที่ได้ไปใส่ในเฟรมขนาดใหญ่ (Large Frame) 34 มิลลิเมตร แล้วหมุนเกลียว (Nut) โดยให้แรง 20 kN และเลือก Single Cantilever Bending Geometry
3. ตั้งอุณหภูมิเครื่องให้อยู่ระหว่าง  $-80^{\circ}\text{C}$  ถึง  $50^{\circ}\text{C}$  โดยค่าความเครียด (Strain) ที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 0.01 ค่าความถี่ (Frequency) ในการสั่นชิ้นงานเท่ากับ 1 Hz อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ  $5^{\circ}\text{C} / \text{min}$
4. จากการทดลองสามารถหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ได้จากกราฟ

## 3.4 ปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัย

1. ปริมาณเส้นใย (% Fiber loading) : 0, 10, 20, 30, 40 phr
2. ขนาดเส้นใยแบบบดหยาบและบดละเอียด
3. การจัดเรียงตัวของเส้นใยแบบตามแนวแรงและตั้งฉากกับแนวแรง
4. ผลของการใช้สารเพิ่มการยึดติด Resorcinol และปริมาณที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 3.2** แผนผังสรุปแผนการดำเนินงาน  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการเสนอแนวทางการลดปริมาณขยะยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยนำเส้นใยพลาซจากยางรถยนต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตยางรีเคลม (Reclaimed rubber) มาใช้เป็นสารตัวเติม (Fillers) ในการผลิตยางผสมสูตร เพื่อลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง โดยทำการศึกษาผลของปริมาณ ขนาด และทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของยาง โดยใช้ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ที่เป็นเมทริกซ์หลัก และมีเขม่าดำ (Carbon black) เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing filler) สมบัติของยางที่ทำการศึกษา ได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) และสัณฐานวิทยา (Morphology)

#### 4.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของเส้นใยพลาซ (Thermal Analysis of ply fibers)

##### 4.1.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA)

การทดสอบด้วยเครื่อง TGA เป็นการวิเคราะห์หาอุณหภูมิสลายตัว ส่วนประกอบ และปริมาณเถ้าที่เหลืออยู่ของพอลิเมอร์ได้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิในอัตราที่คงที่และเทียบกับน้ำหนักที่หายไปโดยกราฟที่ได้จะเป็นเส้นกราฟรูปตัวเอสกลับด้าน แต่ในการวิเคราะห์ให้ทำให้อยู่รูปของกราฟ Derivative ซึ่งให้พีคที่ชัดเจนกว่า ตัวอย่างเทอร์โมแกรม TGA แสดงในภาคผนวก ค (รูปที่ ค-1 - ค-2)

จากกราฟเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างเส้นใยในลอนบริสุทธี และเส้นใยจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วพบว่า กราฟของเส้นใยในลอนบริสุทธีเริ่มมีอุณหภูมิการสลายตัวที่อุณหภูมิ 376°C และกราฟของเส้นใยจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมีพีคของอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 367°C

แต่ในกราฟของเส้นใยจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วยังมีพีคการสลายตัวเกิดอีก 2 ช่วงคือ

1. ที่อุณหภูมิประมาณ 258 °C ณ จุดนี้เป็นช่วงการสลายตัวของพอลิเมอร์กลุ่มของยาง
2. ที่อุณหภูมิประมาณ 468 °C และ 539 °C ณ จุดนี้เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของพวกลสารประกอบอนินทรีย์ [20]

##### 4.1.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC)

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยการหาอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature:  $T_m$ ) ตัวอย่างเทอร์โมแกรมของ DSC แสดงในภาคผนวก ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(รูปที่ ค-3 – ค-5)

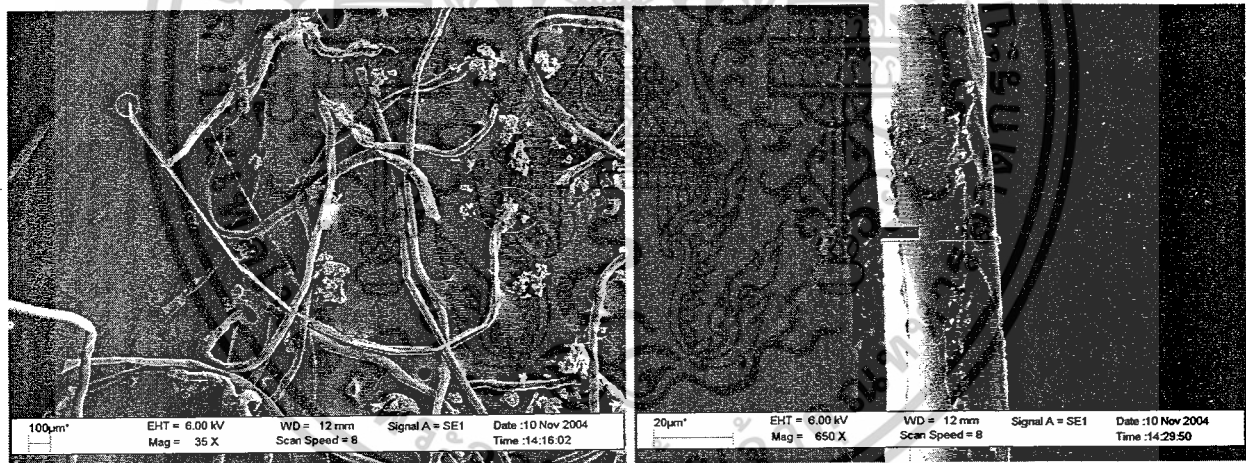
จากผลการทดลองพบว่าเส้นใยจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมีจุดหลอมเหลวอยู่ 2 จุดคือที่อุณหภูมิ 222 °C และ 260 °C ตามลำดับ จึงมีความเป็นไปได้ว่าเส้นใยพลาซที่นำมาทดสอบจะประกอบด้วยไนลอน 6 และ ไนลอน 6,6 [20]

#### 4.2 การศึกษาลักษณะของเส้นใยพลาซด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

จากการศึกษาลักษณะของเส้นใยพลาซที่ทำการเติมลงไปนยางผสมสูตรทั้ง 2 ชนิด คือเส้นใยพลาซหยาบ และเส้นใยพลาซละเอียดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) พบว่าค่า Aspect ratio (l/d ratio) ของเส้นใยพลาซทั้ง 2 ชนิด แสดงได้ดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 หา Aspect ratio (l/d ratio) ของเส้นใยพลาซ

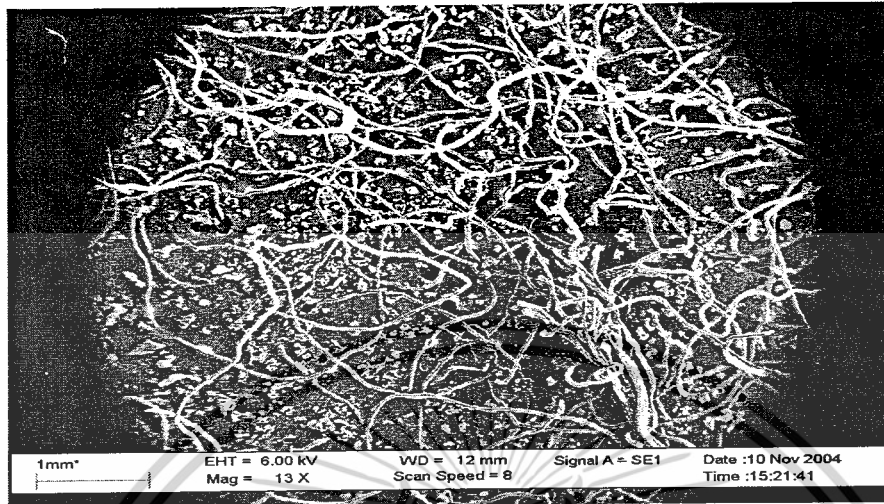
- ค่า Aspect ratio (l/d ratio) ของเส้นใยพลาซละเอียด ประมาณ 99.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่าง SEM Micrographs แสดงรูปปลั๊กรฐานวิทยาของเส้นใยพลาซละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่า Aspect ratio (l/d ratio) ของเส้นใยพลาซายหยาบ ประมาณ 680

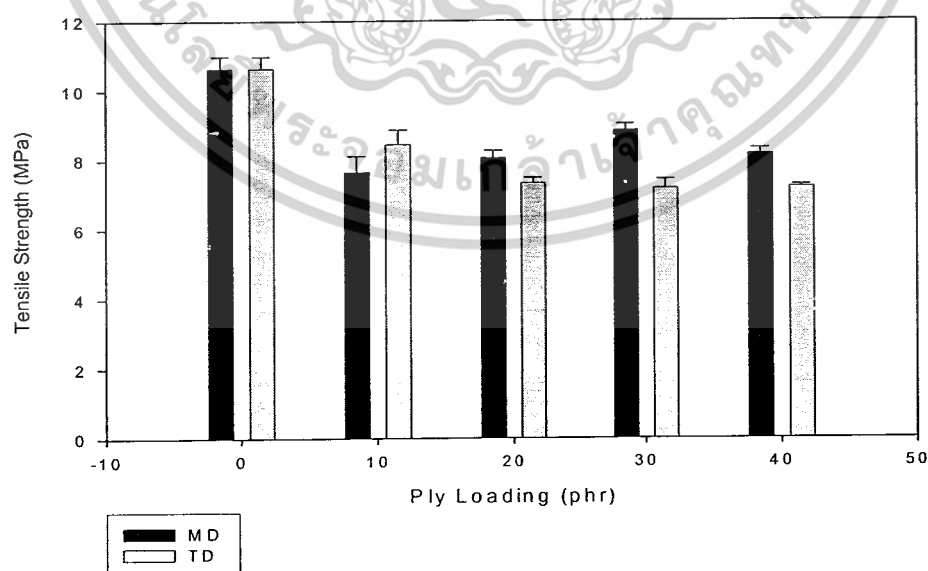


รูปที่ 4.2 ตัวอย่าง SEM Micrographs แสดงรูปสัณฐานวิทยาของเส้นใยพลาซายหยาบ

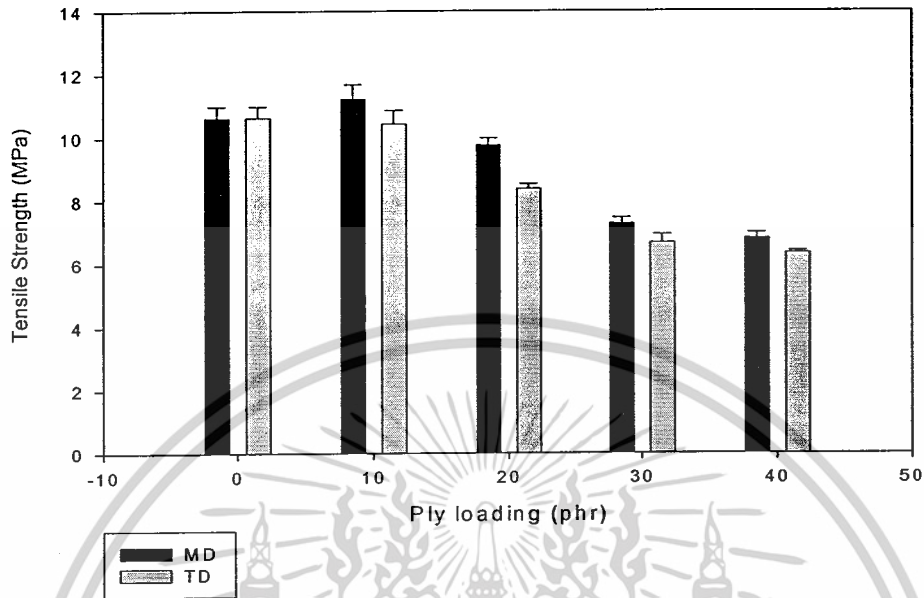
#### 4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรที่มีการเติมเส้นใยพลาซาย

จากการใช้เส้นใยพลาซายเป็นสารตัวเติมในยางผสมสูตร (ไม่มีการเติมปริมาณเรซอร์ซินอล) ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณขนาดและทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยาง ผลการวิจัยแสดงได้ดังต่อไปนี้

##### 4.3.1 ผลของทิศทางการจัดเรียงตัวและปริมาณเส้นใยพลาซาย



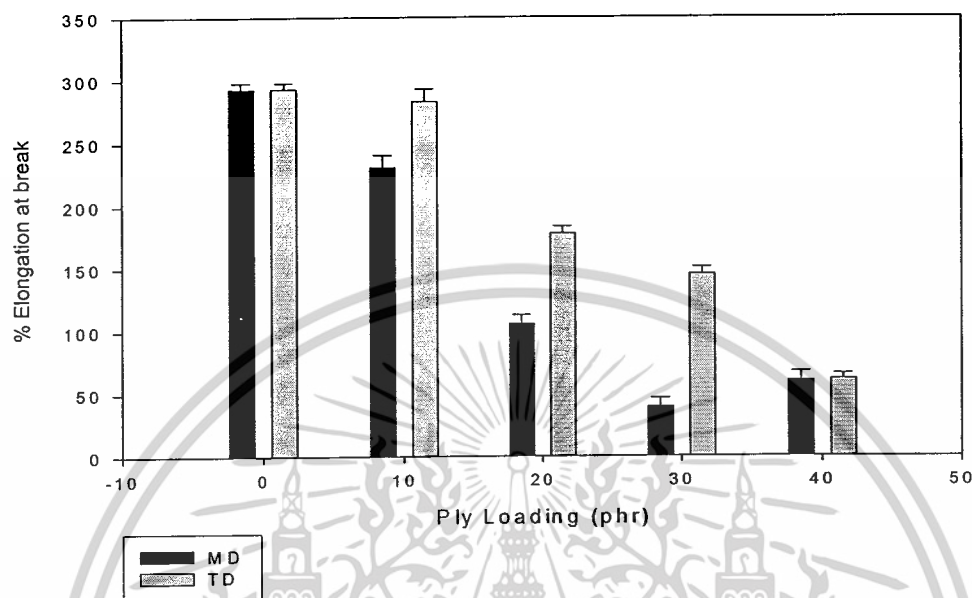
รูป 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยพลาซายหยาบ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



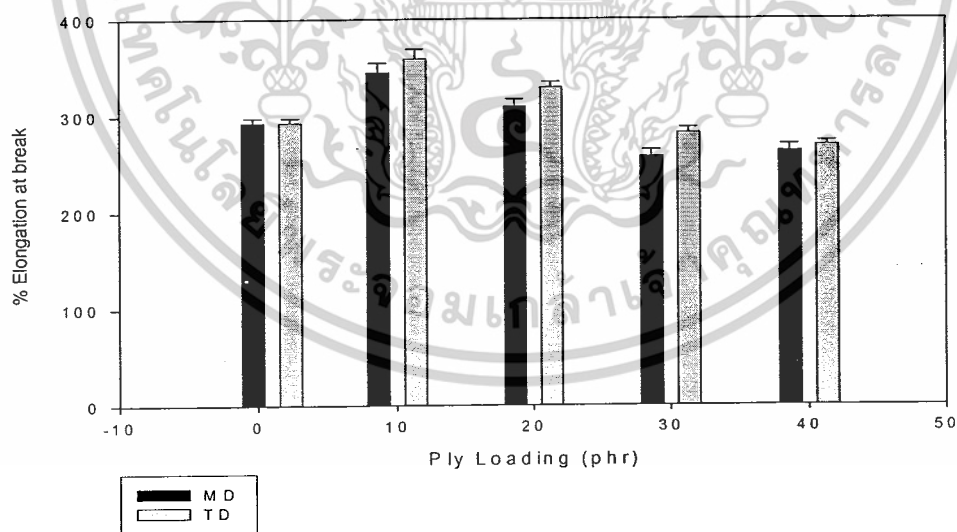
รูป 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยพลาซาละเอียด

ค่าความแข็งแรงดึงเป็นค่าที่ใช้บอกถึงสมบัติเชิงกลที่สำคัญอีกค่าหนึ่งของยาง ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับค่าความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ต่อพื้นที่ของวัสดุเมื่อให้แรงดึง สามารถหาได้จากกราฟความเค้น - ความเครียด (Stress - Strain Curve) ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงแสดงถึงความทนทานของยางต่อแรงดึงยึด จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่ายางผสมสูตรที่ไม่มีการเติมปริมาณเส้นใยพลาซาลงไปจะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด แต่ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยพลาซาลงไป ไม่ว่าจะเป็นเส้นใยพลาซาละเอียดหรือเส้นใยพลาซาละเอียด และทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยทั้งตามแนวลูกกลิ้ง (Machine direction; MD) และตั้งฉากกับแนวแรงของลูกกลิ้ง (Transverse direction; TD) เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยพลาซาลงไปในยางผสมสูตร เส้นใยพลาซาละเอียดซึ่งเป็นไนลอนซึ่งมีความมีขั้ว แต่เนื้อยางซึ่งเป็นเมทริกซ์นั้นไม่มีขั้วจึงทำให้เมื่อใส่ปริมาณเส้นใยพลาซาลงไปนั้นไม่ยึดติดกับเนื้อยางทำให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใยพลาซาละเอียดกับเนื้อยางทำให้เป็นจุดเสียสภาพ (Defect point) ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรที่มีการใส่เส้นใยพลาซาลงไปมีค่าต่ำกว่ายางผสมสูตรที่ไม่มีการใส่เส้นใย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยพลาซาละเอียดเป็น 30 และ 40 phr พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากเกิดความผิดพลาดระหว่างทำการผสม และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยพลาซาละเอียดกับเส้นใยพลาซาละเอียด พบว่าการใส่เส้นใยพลาซาละเอียดจะให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่าเส้นใยพลาซาละเอียดเนื่องจากเส้นใยพลาซาละเอียดซึ่งเป็นเส้นใยยาวจึงเกิดการเกี่ยวพันของการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใยมากกว่าเส้นใยพลาวยละเอียดซึ่งเป็นเส้นใยสั้นทำให้บริเวณในกลุ่มก้อนของเส้นใยพลาวยหยาบมีช่องว่างอยู่ซึ่งไม่มีเนื้อใยเข้าไปแทรกอยู่ทำให้เกิดเป็นจุดเสียสภาพขึ้นมา



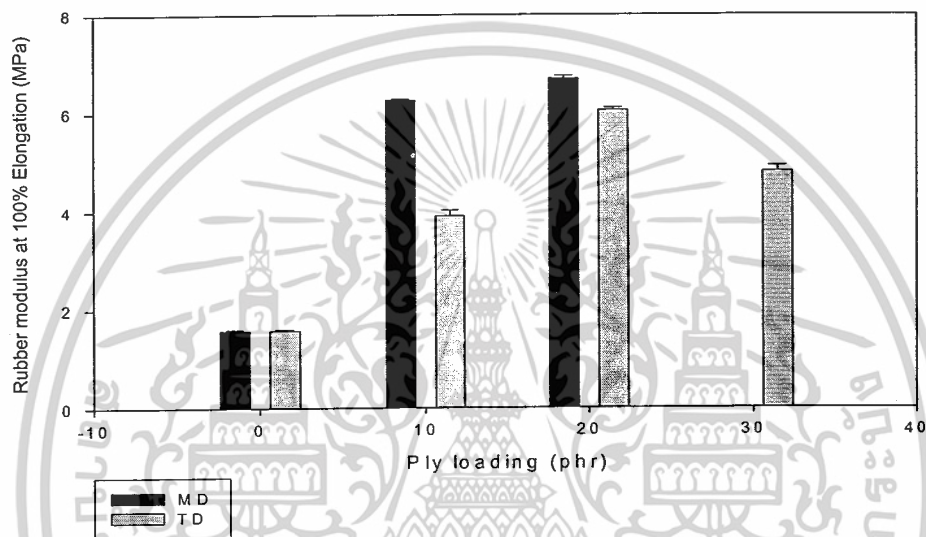
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยพลาวยหยาบ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยพลาวยละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

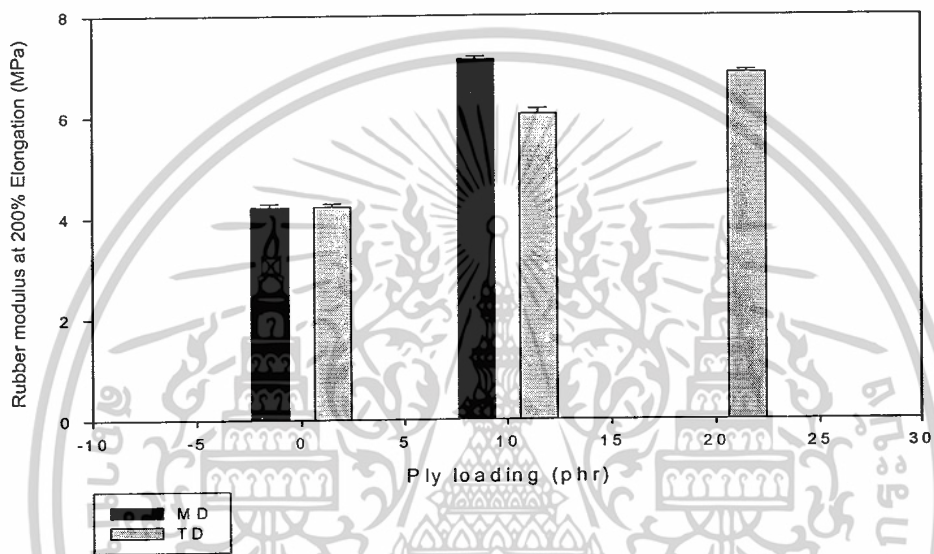
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด เป็นค่าการยืดตรงจุดที่วัสดุเกิดการเสียหายขาดออกจากกัน (Break point) คือ ค่าที่บอกถึงการยืด หรือการเพิ่มขึ้นของความยาวเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับความยาวเกจเริ่มต้น (Gauge length) ของตัวอย่าง เมื่อได้รับแรงดึง จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่ายางผสมสูตรที่ไม่มีการเติมปริมาณเส้นใยจะให้ค่า % การยืด ณ จุดขาดสูงสุด เนื่องจากเมื่อเติมเส้นใยลงไปผสมกับยางผสมสูตร เมื่อให้แรงดึงยึดเส้นใยจะไปขัดขวางการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้ยึดตัวได้น้อยเมื่อได้รับแรงดึงยึด



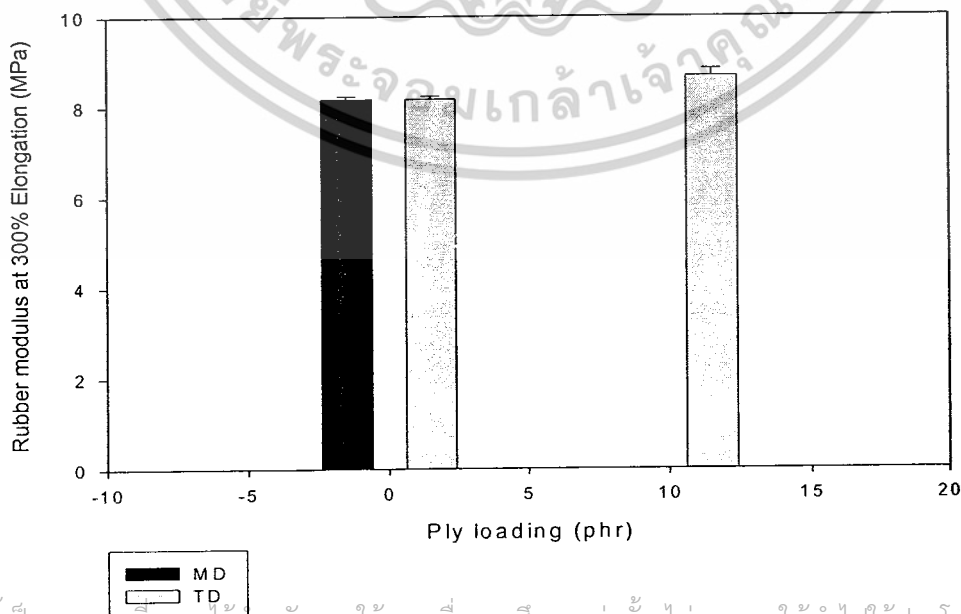
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 100% การยืด กับปริมาณเส้นใยหลายหยาบ

มอดุลัสของยาง คือค่าความเค้นดึง (Tensile stress) ที่ค่าความเครียดหนึ่งๆ โดยในงานวิจัยทำการวัดที่เปอร์เซ็นต์การยืด 100% 200% และ 300% โดยที่สามารถย่อได้เป็น M100 M200 และ M300 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.7 ที่ 100% การยืดพบว่ายางผสมสูตรที่มีการเติมปริมาณเส้นใยหลายหยาบ 10 และ 20 phr ให้ค่า M100 สูงกว่ายางผสมสูตรที่ไม่มีการเติมปริมาณเส้นใยหลายหยาบลงไป เนื่องจากเส้นใยหลายที่ใส่เข้าไปในยางจะช่วยทำหน้าที่เสริมแรงต่อยาง โดยเมื่อได้รับแรงดึงยึดเส้นใยสามารถกระจายแรงที่ได้รับไปตลอดทั่วทั้งเส้นใย ทำให้ค่ามอดุลัสของยางสูงขึ้น ซึ่งสูตรที่มีการเติมปริมาณเส้นใย 20 phr จะให้ M100 สูงกว่าสูตรที่มีการเติมปริมาณเส้นใย 10 phr แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมเส้นใยหลายหยาบเป็น 30 และ 40 phr ไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากชิ้นงานขาดก่อนถึง 100 % การยืด เนื่องจากเมื่อเติมเส้นใยหลายเพิ่มขึ้น ทำให้ในการทำการผสมเส้นใยหลายลงไปในยาง เส้นใยหลายที่ทำการเติมลงไปมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนไม่กระจายตัวทั่วทั้งแผ่นยางส่งผลให้ค่าการทดสอบที่ออกมาไม่คงที่เท่าที่ควร และบางส่วนของชิ้นงานจะมีปริมาณของเส้นใยหลายเกินกว่าที่ระบุไว้ ซึ่งหากพบปัญหานี้ควรแจ้งวิศวกรที่เกี่ยวข้องเพื่อทำการแก้ไขทันที ไม่เช่นนั้นจะเห็นประโยชน์ของการคำนวณที่ผิดพลาดได้ทันที ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าเนือยง ทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดออกมาต่ำโดยเกิดขึ้นกับเส้นใยพลาซหยาบมากกว่าที่เกิด  
 ขึ้นกับเส้นใยพลาซละเอียด และผลเนื่องจากการทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยพลาซพบว่าเส้นใย  
 พลาซที่มีการจัดเรียงตัวทิศทางตามแนวลูกกลิ้งมีความอดุศลมากกว่าเส้นใยพลาซที่มีทิศทาง  
 การจัดเรียงตัวตั้งฉากกับแนวลูกกลิ้ง เนื่องจากเส้นใยพลาซที่มีทิศทางการจัดเรียงตัวตามแนวลูกกลิ้ง  
 ช่วยด้านการเปลี่ยนรูปร่างได้มากกว่าเส้นใยพลาซที่มีทิศทางการจัดเรียงตัวตั้งฉากกับแนวลูกกลิ้ง



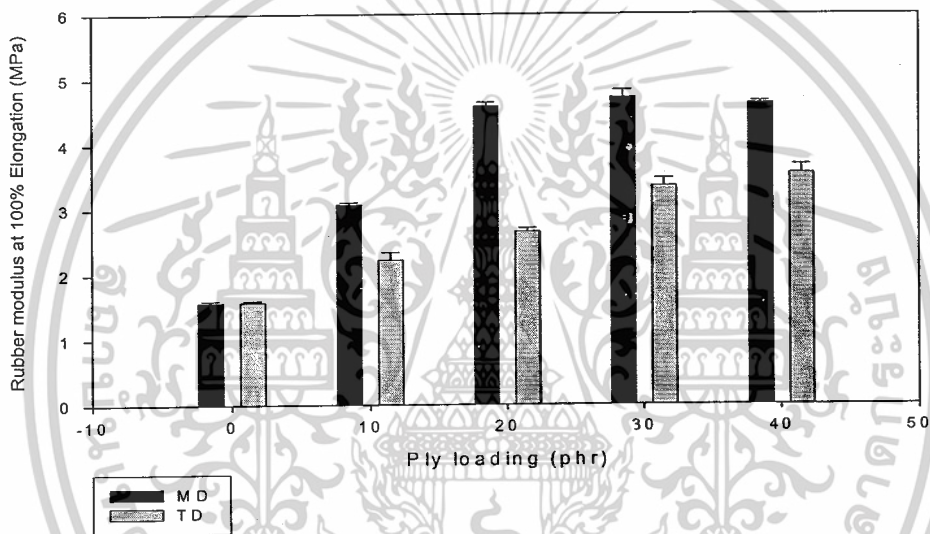
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุศลของยางที่ 200% การยืด กับปริมาณเส้นใยพลาซหยาบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

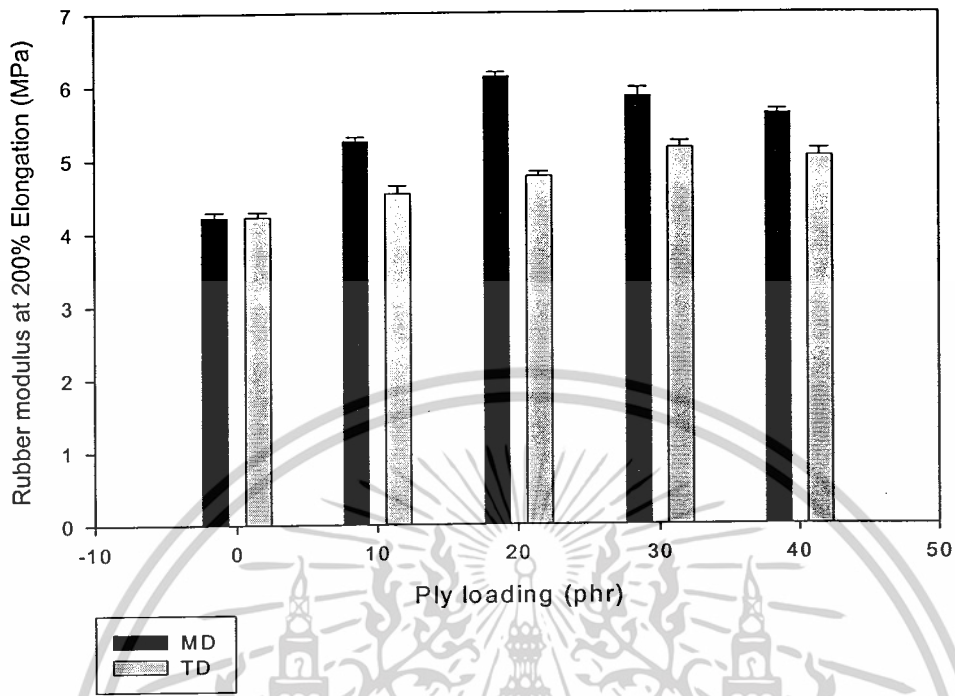
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 300% การยืด กับปริมาณเส้นใยพลาซายหายาบ

จากการทดลองรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าที่ M200 เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยพลาซายค่ามอดุลัสมีแนวโน้มสูงขึ้นตามลำดับแต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยสูงกว่า 20 phr ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากชิ้นงานขาดก่อนถึงการยืดที่ 200% ในขณะที่ M300 ไม่สามารถเปรียบเทียบค่ากับสูตรที่เติมปริมาณเส้นใยเพิ่มได้เนื่องจากเมื่อเติมเส้นใยพลาซายมากกว่า 10 phr จะไม่สามารถวัดผลการทดลองได้เนื่องจากชิ้นงานขาดก่อนถึงเปอร์เซ็นต์การยืดที่ 300 %

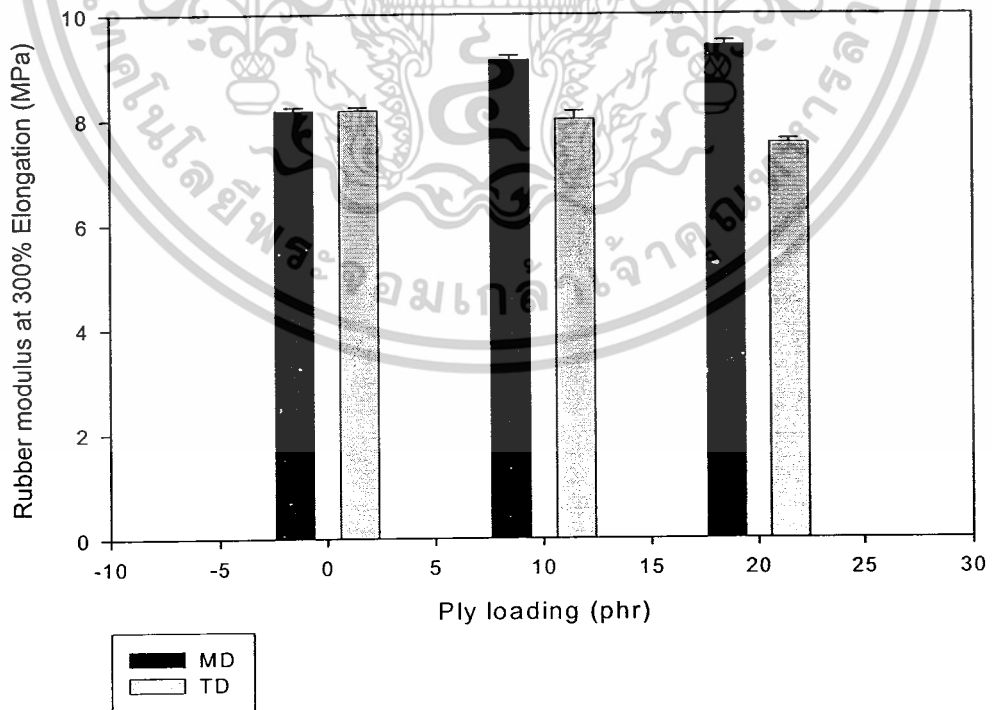


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 100% การยืด กับปริมาณเส้นใยพลาซายละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

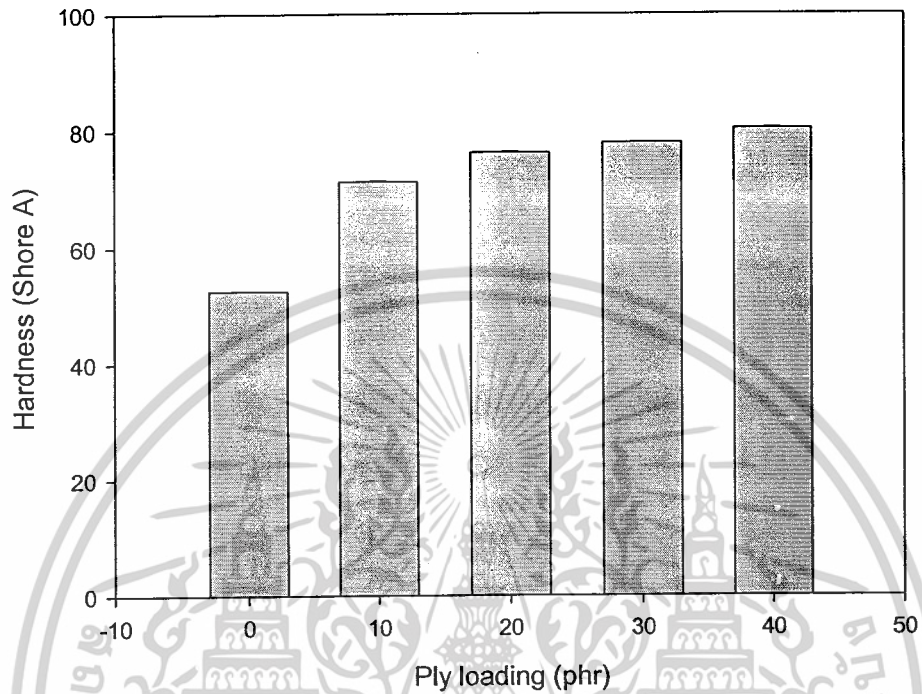


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 200% การยืด กับปริมาณเส้นใยพลาซลอะเอียด

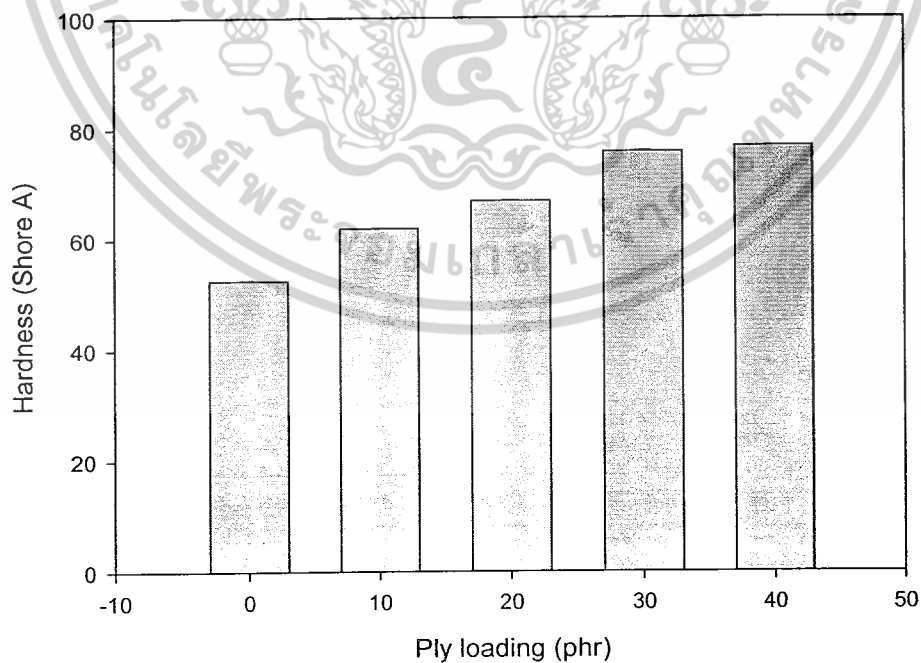


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 300% การยืด กับปริมาณเส้นใยพลาซลอะเอียด  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ระหว่างทางวิชาการ ซึ่งให้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองรูปที่ 4.10 4.11 และ 4.12 พบว่าที่ M100 M200 และ M300 เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยพลาซาค่ามอดุลัสมีแนวโน้มสูงขึ้นตามลำดับ



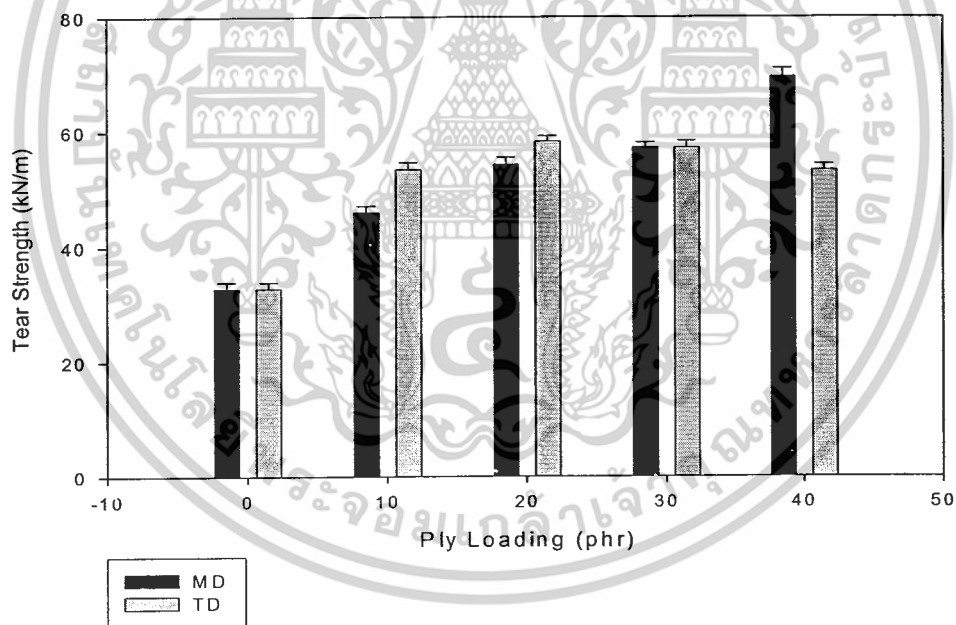
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยพลาซา



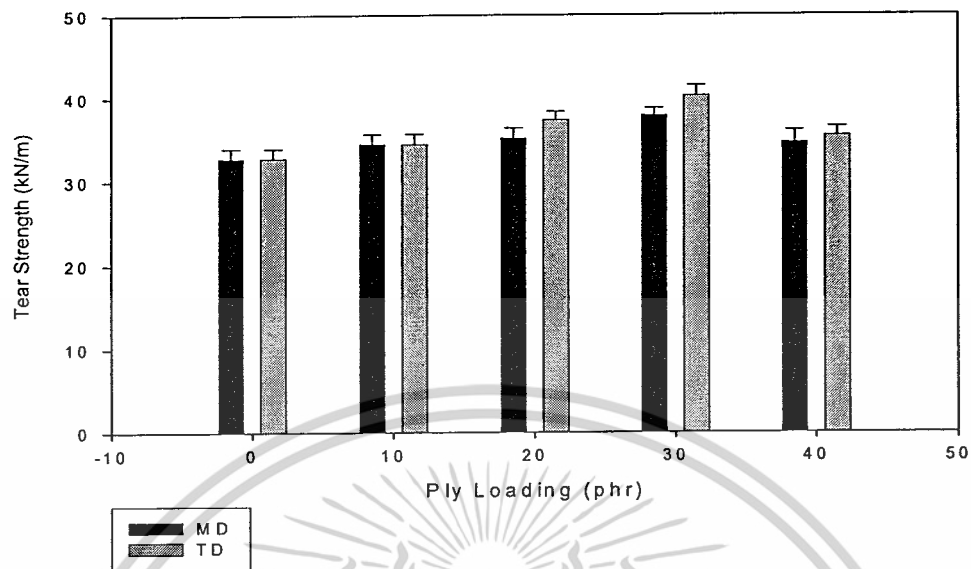
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยพลาซาละเอียด  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งกด (Hardness) เป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงความต้านทานของวัสดุหนึ่งๆ ในการให้แรงกดบนผิวของวัสดุให้ยุบตัว (Indentation) แต่ไม่ทะลุ ภายใต้สภาวะการทดสอบหนึ่ง ซึ่งในการดำเนินการวิจัย ได้ศึกษาค่าความแข็งกด โดยใช้ Durometer Hardness Shore A จากผลการวิจัยดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเติมปริมาณเส้นใยพลาซายมากขึ้นเนื่องจากเส้นใยพลาซายที่นำมาใช้ ส่วนมากทำมาจากไนลอน (Nylon) ซึ่งมีความแข็งหรือมอดุลัสมากกว่ายาง เมื่อทำการเติมเส้นใยพลาซายลงไปในยางผสมสูตร จึงทำให้ยางผสมสูตรมีความแข็งกดมากขึ้น

จากการดำเนินงานวิจัยเบื้องต้น ทำให้ทราบว่าค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสของยางที่ 100% และ 200% การยืด ของทิศทางการจัดเรียงตัวตามแนวลูกกอล์ฟ (MD) จะให้ค่าสูงกว่า ทิศทางการจัดเรียงตัวตั้งฉากกับแนวแรง (TD) เนื่องจากปริมาณเส้นใยพลาซายที่จัดเรียงตัวตามแนวแรงสามารถกระจายแรง เมื่อได้รับแรงดึงได้ดีกว่าเส้นใยที่จัดเรียงตัวตั้งฉากกับแนวแรง



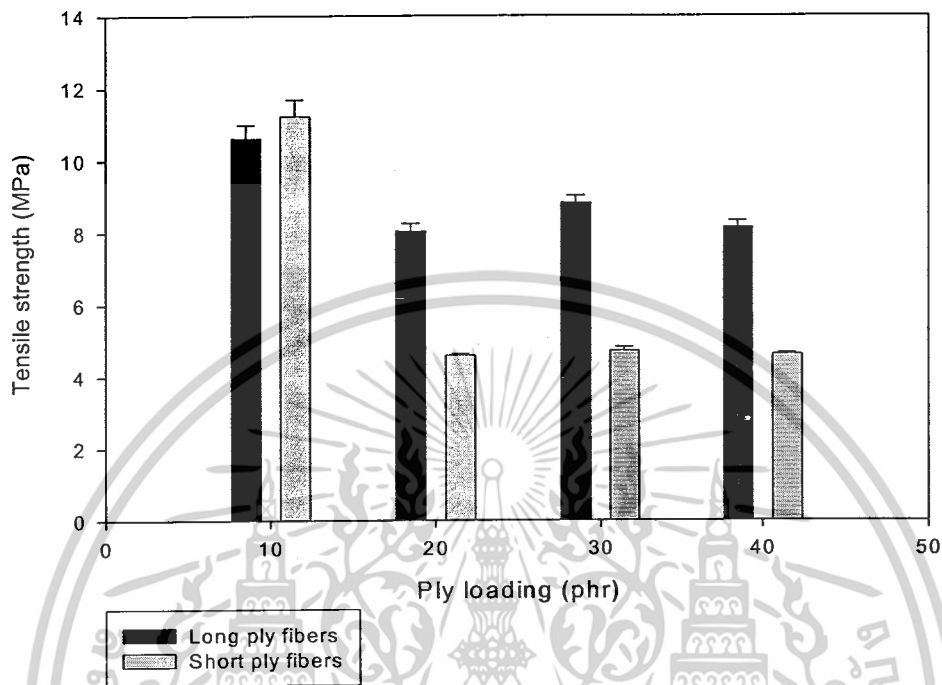
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยพลาซาย



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยพลาซลอะเซียด

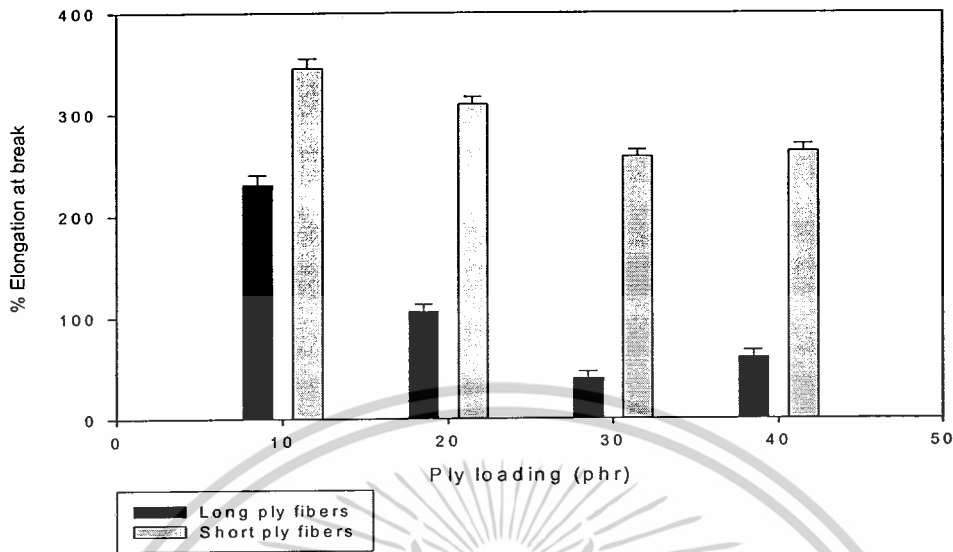
จากการทดลองดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ได้ทำการทดสอบความแข็งแรงฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM โดยชิ้นงานจะมีรอยขาดตั้งฉากกับแนวแรงที่ให้ พบว่ายางผสมสูตรที่มีการเติมเส้นใยพลาซลอะเซียดและเส้นใยพลาซลอะเซียด จะมีค่าความแข็งแรงฉีกขาดที่สูงกว่าสูตรที่ไม่มีการเติมเส้นใย เนื่องจากเมื่อเติมปริมาณเส้นใยพลาซลอะเซียดเข้าไป เส้นใยพลาซลอะเซียดจะจัดเรียงตัวตามแนวแรง ดังนั้นเมื่อให้แรงเกิดการฉีกขาด ทิศทางการฉีกขาดจะตั้งฉากกับทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยพลาซลอะเซียด ทำให้เส้นใยพลาซลอะเซียดต้านแรงการฉีกขาด ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงขึ้น

#### 4.3.2 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเส้นใยพลาซายหยาบ กับเส้นใยพลาซายละเอียด



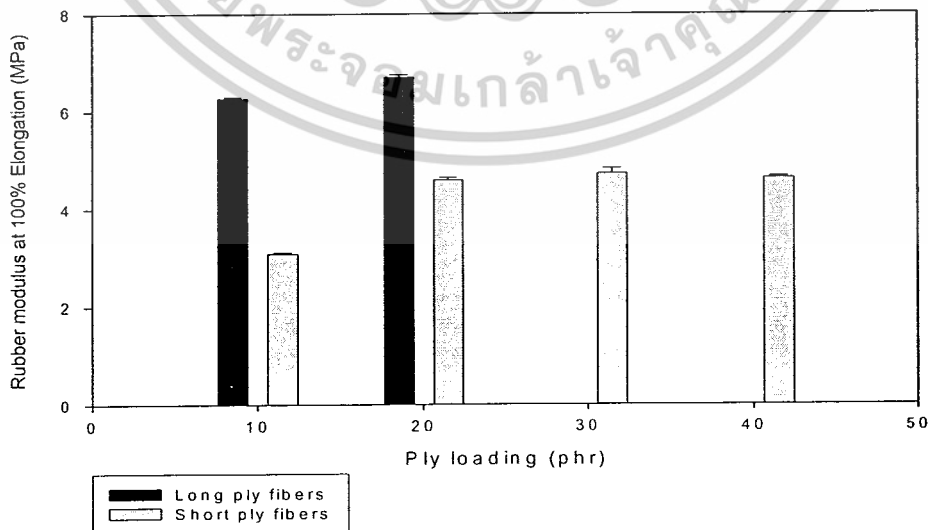
รูป 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยพลาซายหยาบและละเอียด

จากผลการทดลองรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงระหว่างยางผสมสูตรที่ใช้เส้นใยพลาซายหยาบและเส้นใยพลาซายละเอียดที่จัดเรียงตัวตามแนวลูกกอล์ฟ (MD) พบว่ายางผสมสูตรที่ใช้เส้นใยพลาซายหยาบมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าเส้นใยพลาซายละเอียด ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยพลาซายหยาบมี Aspect ratio มากกว่าเส้นใยพลาซายละเอียดทำให้มีการเสริมแรงที่ดีกว่า ถึงแม้ว่าจะกระจายตัวไม่ดีแต่เส้นใยมีการพันกัน และเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลงและเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยสูงกว่า 20 phr ทั้งของเส้นใยพลาซายหยาบและละเอียด พบว่าค่าความแข็งแรงดึงไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง



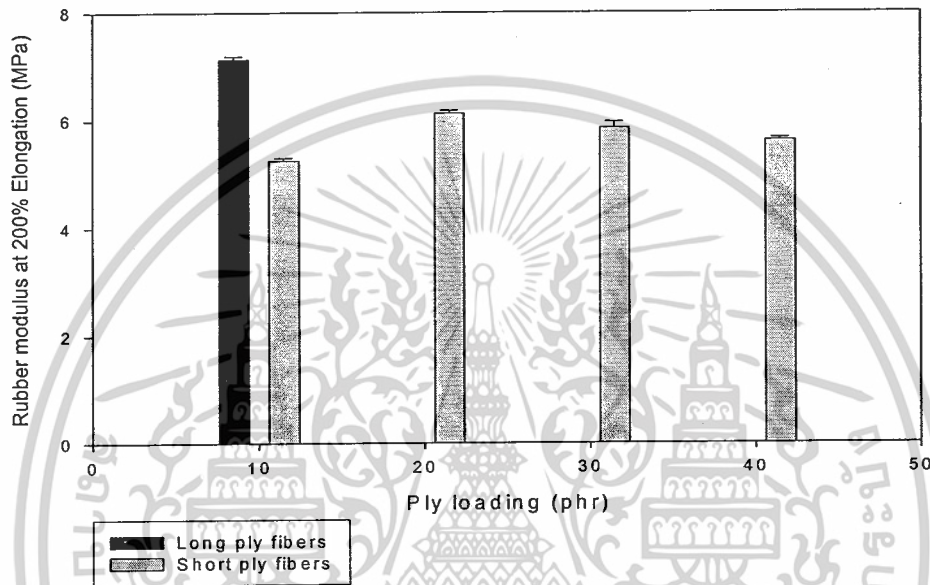
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยพลาซายหยาบและละเอียด

จากการทดลองรูปที่ 4.18 พบว่าการใช้เส้นใยพลาซายหยาบจะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดต่ำกว่าของเส้นใยพลาซายละเอียดเนื่องจากเส้นใยพลาซายหยาบมีช่องว่างในเส้นใยที่เกิดเนื่องจากการเกี่ยวพันของเส้นใยพลาซาย (Fiber entanglement) มากกว่าของเส้นใยพลาซายละเอียดเนื่องจากเส้นใยพลาซายหยาบมีความยาวเส้นใยมากทำให้เกิดการเกี่ยวพันของเส้นใย ทำให้ตรงกลางเส้นใยไม่มีเนื้อยางทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่อง (Defect) ขึ้นมาทำให้เส้นใยพลาซายหยาบมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด น้อยกว่าเส้นใยพลาซายละเอียด



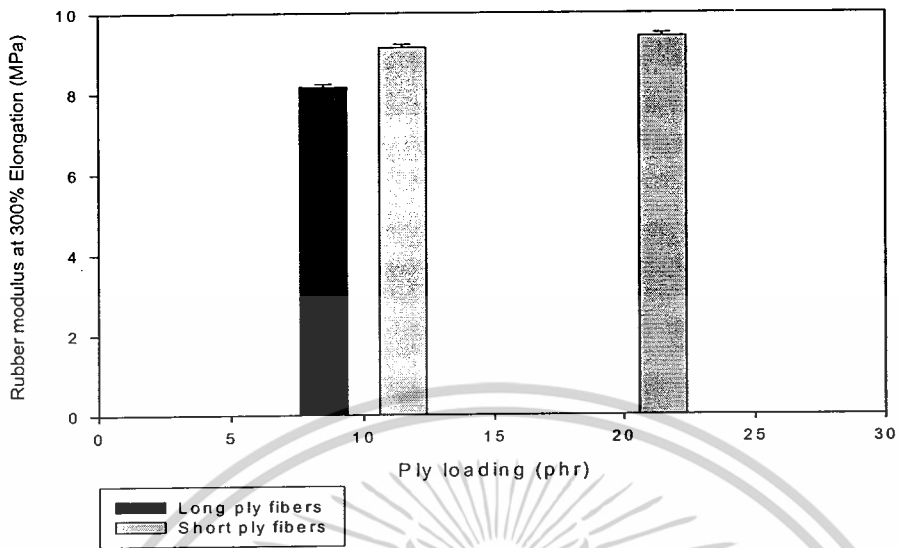
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 100% การยืด กับปริมาณเส้นใยพลาซายหยาบและละเอียด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สูงงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองรูปที่ 4.19 พบว่าสูตรที่ใส่เส้นใยพลาซายหยาบจะให้ค่ามอดุลัสของยางที่ 100 % การยืดของยางสูงกว่าสูตรที่ใส่เส้นใยพลาซายละเอียดที่ 10 และ 20 phr เนื่องจาก Aspect ratio ของเส้นใยพลาซายหยาบสูงกว่าเส้นใยพลาซายละเอียดทำให้เสริมแรงได้ดีกว่า แต่ที่ปริมาณการเติมเส้นใยที่ 30 และ 40 phr มีเพียงผลของเส้นใยพลาซายละเอียดเพราะเมื่อทำการทดสอบเพื่อหาค่ามอดุลัสของยาง สูตรที่ใส่เส้นใยพลาซายหยาบให้เปอร์เซ็นต์การยืดไม่ถึง 100 %



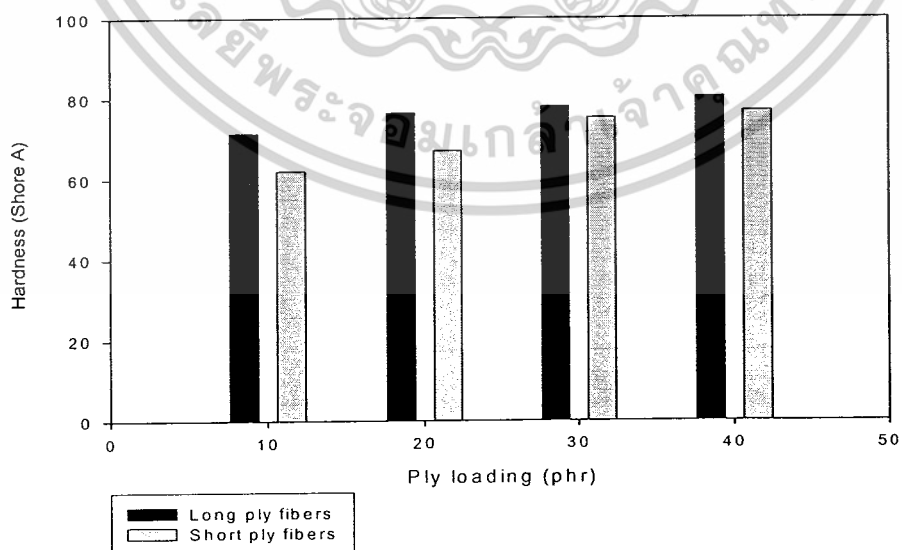
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 200% การยืด กับปริมาณเส้นใยพลาซายหยาบและละเอียด

จากผลการทดลองรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของยาง ที่ 200 % การยืดของยางให้ผลแนวโน้มเดียวกับค่ามอดุลัสของยาง ที่ 100% การยืดของยางข้างต้นคือเส้นใยพลาซายหยาบจะให้ค่ามอดุลัสสูงกว่าเส้นใยพลาซายละเอียด ทั้งนี้เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากกว่า 10 phr ผลการทดลองที่ได้พบเพียงของเส้นใยพลาซายละเอียด เพราะสูตรที่ใส่เส้นใยพลาซายหยาบให้เปอร์เซ็นต์การยืดไม่ถึง 200 %



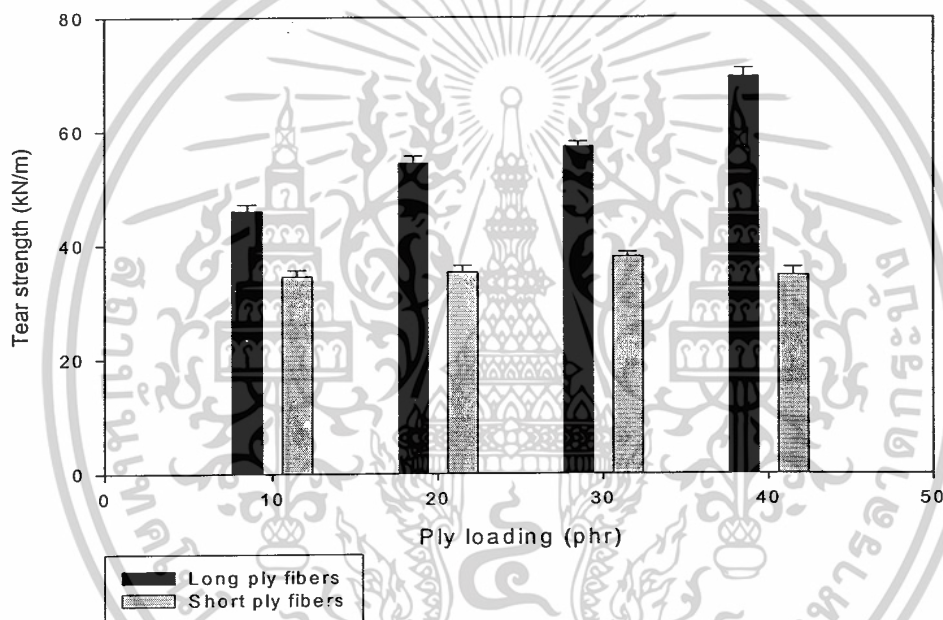
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยางที่ 300% การยืด กับปริมาณเส้นใยพลาซายหยาบ และละเอียด

จากผลการทดลองรูปที่ 4.21 พบว่าค่ามอดูลัสของยาง ที่ 300 % การยืดของยางจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกันเมื่อเทียบระหว่างสูตรที่ใส่เส้นใยพลาซายหยาบ และพลาซายละเอียด และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากกว่า 10 phr ผลการทดลองที่ได้มีเพียงสูตรที่ใส่เส้นใยพลาซายละเอียด และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยทั้งเส้นใย พลาซายหยาบ และพลาซายละเอียดมากกว่า 20 phr จะไม่ให้ค่ามอดูลัสของยาง ณ 300 % การยืดของยางเพราะตัวอย่างขาดก่อนถึง 300 % การยืด



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยพลาซายหยาบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และละเอียด ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงระหว่างสูตรที่ใส่เส้นใยพลาซายหยาบและสูตรที่ใส่เส้นใยพลาซายละเอียดที่ปริมาณการใส่เส้นใยเท่ากันพบว่า สูตรที่ใส่เส้นใยพลาซายหยาบจะให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าสูตรที่ใส่เส้นใยพลาซายละเอียด ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยพลาซายหยาบมีการพัน (Fiber entanglement) เกี่ยวกันเป็นกระจุกทำให้มีความแข็งแรงมากกว่า ถึงแม้ว่าเส้นใยบดละเอียดก็มีการพันเกี่ยวกันระหว่างเส้นใยแต่ไม่มากเท่ากับเส้นใยพลาซายหยาบ เนื่องจากเส้นใยพลาซายละเอียดมีความยาวน้อยกว่า และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้น ค่าความแข็งแรงก็มีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงขึ้น

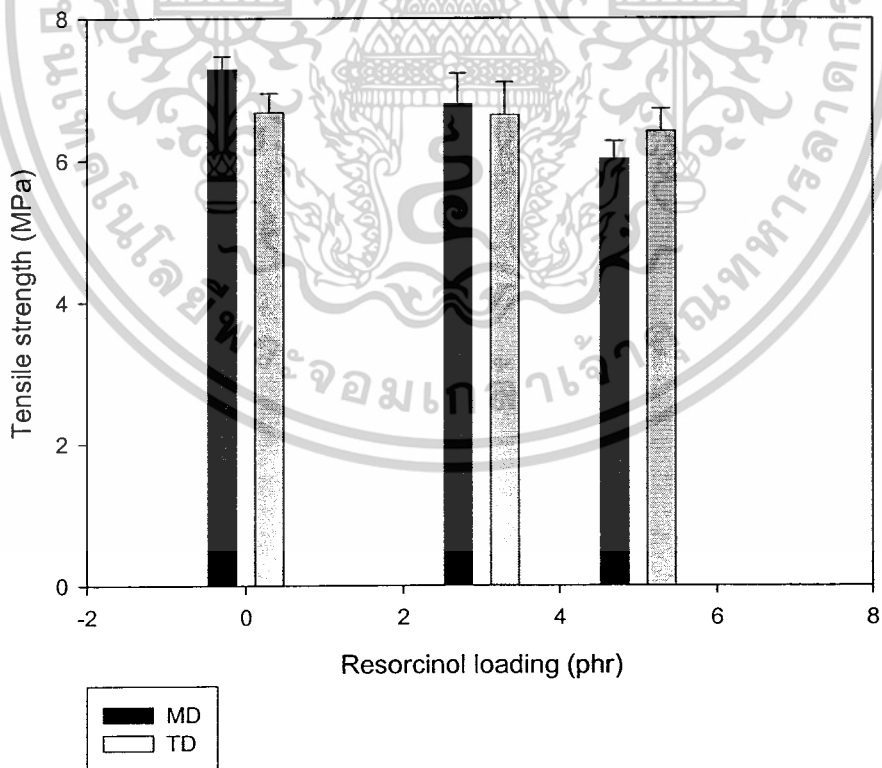


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร กับปริมาณเส้นใยพลาซายหยาบและละเอียด

จากการทดลองรูปที่ 4.23 พบว่าค่าความแข็งแรงฉีกขาดของเส้นใยพลาซายหยาบมีค่ามากกว่าของเส้นใยพลาซายละเอียดเนื่องจากเส้นใยพลาซายหยาบมีความยาวของเส้นใยมากกว่าของเส้นใยพลาซายละเอียด เมื่อเกิดรอยฉีกขาดตามแนวตั้งฉากกับแนวการจัดเรียงตัวของเส้นใย เส้นใยพลาซายหยาบซึ่งมีความยาวมากกว่าจะประพุดิตัวเป็นสะพานเชื่อมรอยฉีกขาดได้ดีกว่าเส้นใยพลาซายละเอียด

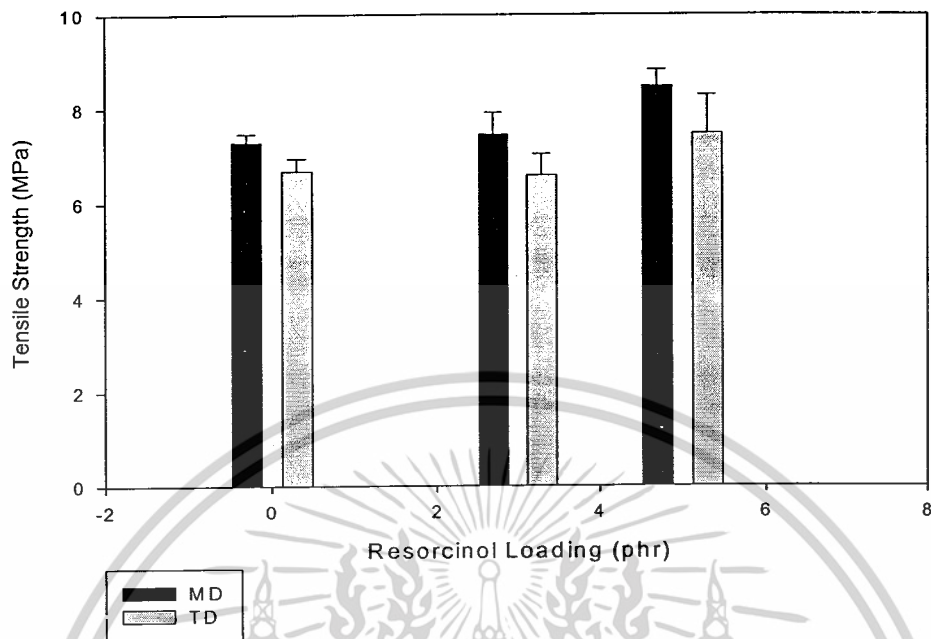
#### 4.3.3 ผลของการใส่สารเพิ่มการยึดติด Resorcinol ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล

จากผลการวิจัยข้างต้นทำการเลือกยางผสมสูตรที่มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมมาเพียง 1 สูตรซึ่งเป็นสูตรที่มีการเติมเส้นใยพลาซลอะเอียดปริมาณ 30 phr ซึ่งเหตุผลที่ใช้สูตรนี้เนื่องจากเน้นที่การลดต้นทุนการผลิตเป็นประเด็นหลัก และการเลือกใช้เส้นใยพลาซลอะเอียดเนื่องจากการใส่เส้นใยพลาซลอะเอียดไม่มีปัญหาเรื่องการผสมระหว่างทำการคอมปาวด์ยางเมื่อทำการเลือกสูตรยางผสมสูตรตามข้างต้นมาทำการศึกษาศักยภาพเชิงกลเมื่อใส่สารเพิ่มการยึดติด โดยสารเพิ่มการยึดติดช่วยให้การยึดติดระหว่างยางและเส้นใยดีขึ้น ในงานวิจัยนี้จะใช้เรซอร์ซินอลเป็นสารเพิ่มการยึดติด (Tackifier) ซึ่งเป็นสารเพิ่มการยึดติดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ ซึ่งคาดว่าเรซอร์ซินอลที่ทำการเติมลงไปจะช่วยให้สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรดีขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการใส่เรซอร์ซินอลเข้าไปในยางผสมสูตร 2 วิธี คือการใส่เป็นแผ่นเรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็ง ขณะทำการผสมสูตรยาง และอีกวิธีคือการนำเรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็งไปละลายด้วยเอทานอลแล้วจึงนำไปสเปรย์บนเส้นใยพลาซ โดยการทำวิธีที่ 2 นี้ เนื่องการใส่เรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็งนั้น มีปัญหาเรื่องการผสม ซึ่งผลของสมบัติเชิงกลของการใส่เรซอร์ซินอลทั้ง 2 วิธีแสดงได้ดังรูปที่ 4.24-4.35



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็ง

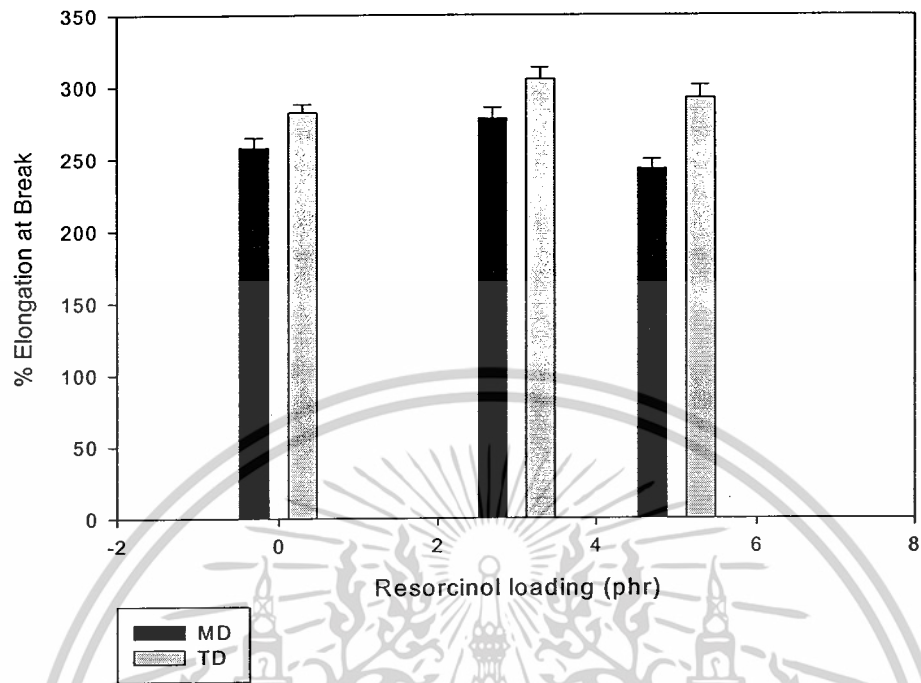
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



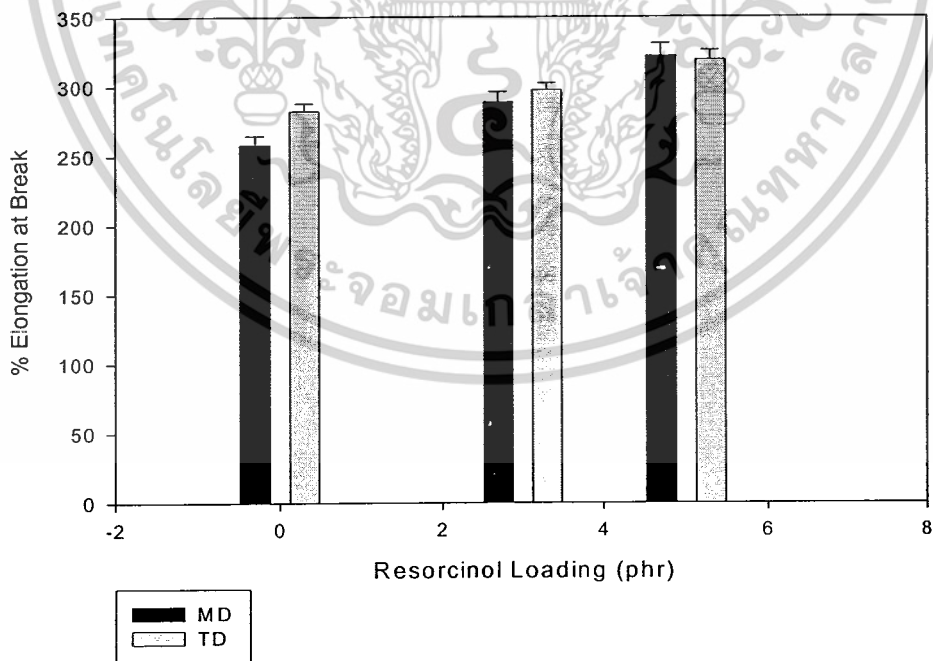
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลาย

จากผลการทดสอบรูปที่ 4.24 และ 4.25 การใส่เรซอร์ซินอล 0 – 5 phr ในการทดลองทั้งสองวิธีคือ การผสมแบบเรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็งและแบบที่เป็นสารละลาย พบว่าการใส่เรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็งจะให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง ในขณะที่การใส่เรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลายจะให้ค่าความแข็งแรงดึงมากขึ้น เพราะว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเรซอร์ซินอลนั้นสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมเรซอร์ซินอลนั้นเข้ากับเนื้อยางจึงทำให้เรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็งผสมเข้าได้ไม่ดีกับเนื้อยาง เวลาทำการขึ้นรูปขึ้นงานจะมีเรซอร์ซินอลบางส่วนแพร่ออกมาที่พื้นผิวของขึ้นงานเป็นผลให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่าการใส่เรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลาย เพราะเรซอร์ซินอลที่ผสมในรูปของของแข็งเมื่อผสมเสร็จแล้วจะพบว่าเรซอร์ซินอลยังเกาะกันอยู่เป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ มีบางส่วนอยู่ใกล้บริเวณพื้นที่ผิวของยางผสมสูตรเมื่อทำการขึ้นรูปโดยวิธีกดอัดจะเกิดหลุมจำนวนมากที่พื้นผิวของขึ้นงาน โดยที่พื้นผิวแม่พิมพ์จะมีเรซอร์ซินอลไปติดอยู่และถ้าเรซอร์ซินอลบางส่วนที่ผสมเข้าไปเป็นตัวผสมระหว่างยางกับยางแทนที่จะเป็นตัวผสมระหว่างเส้นใยกับยางก็จะมีผลต่อสมบัติเชิงกลได้เหมือนกัน แต่ในขณะที่การผสมเรซอร์ซินอลแบบสารละลายไม่จำเป็นต้องให้อุณหภูมิระหว่างทำการผสมสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเรซอร์ซินอลและเรซอร์ซินอลที่ใช้จะเคลือบอยู่บนเส้นใยโดยเรซอร์ซินอลจะไม่เกิดเป็นตัวผสมระหว่างยางกับยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



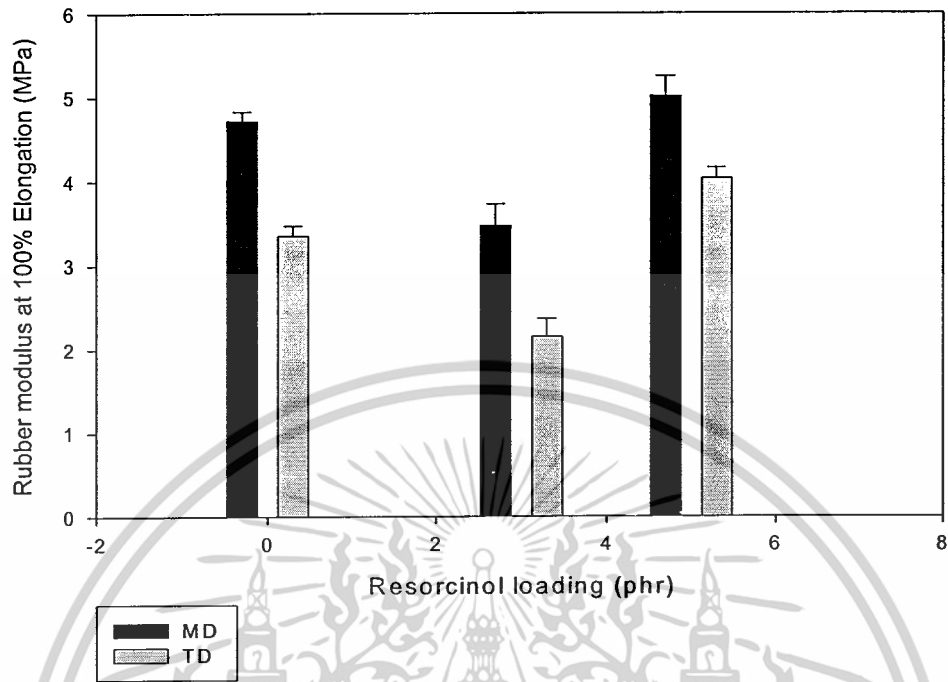
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็ง



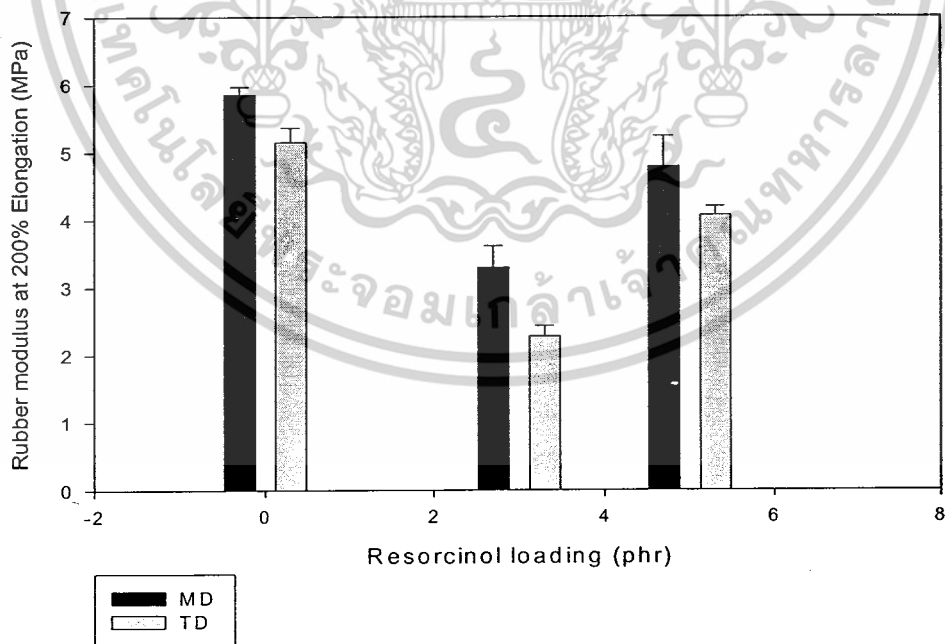
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด กับปริมาณเรซอร์ซินอล

ที่เป็นสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

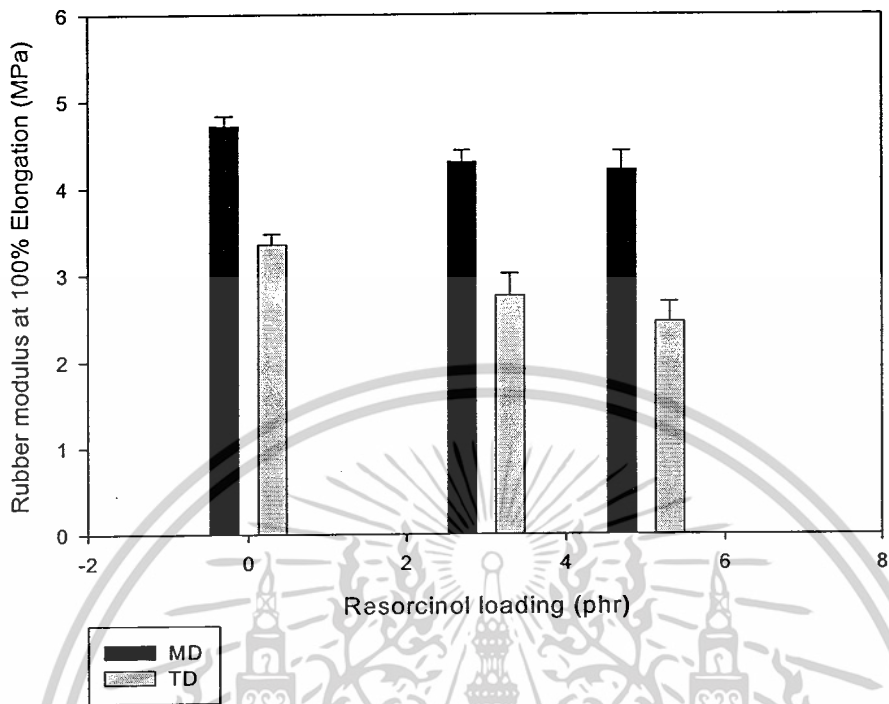


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 100% การยืด กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็ง

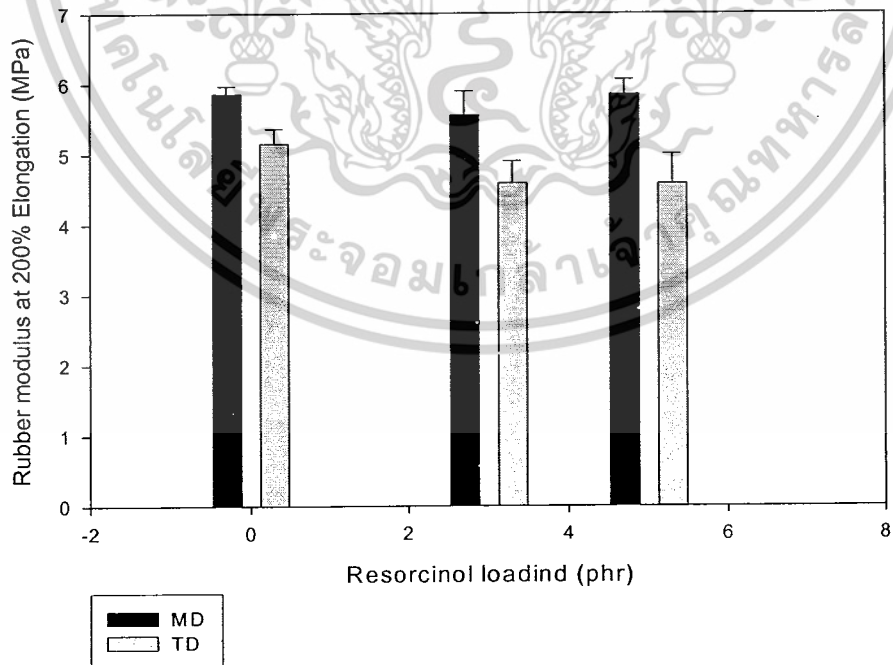


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 200% การยืด กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



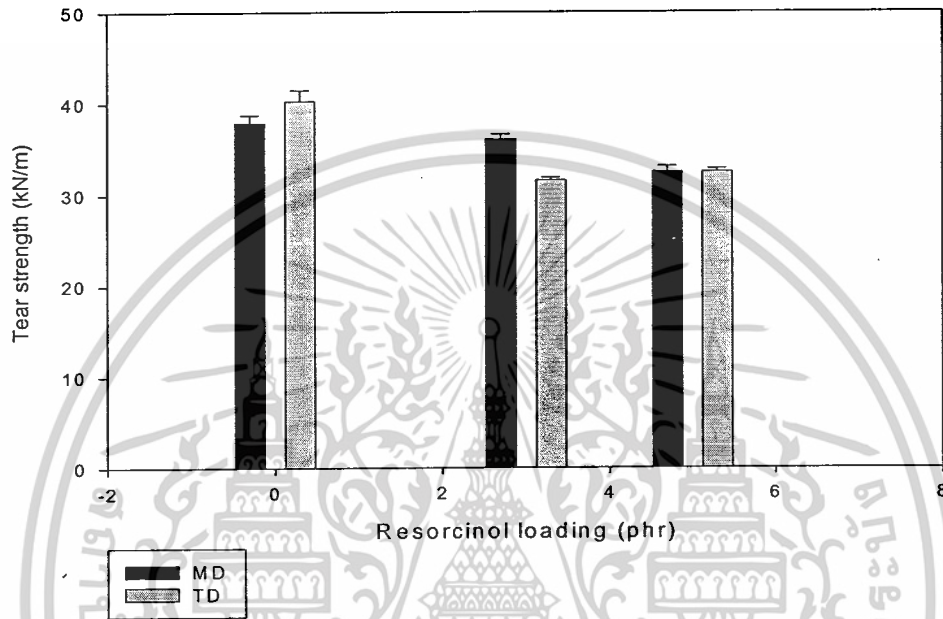
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 100% การยืด กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลาย



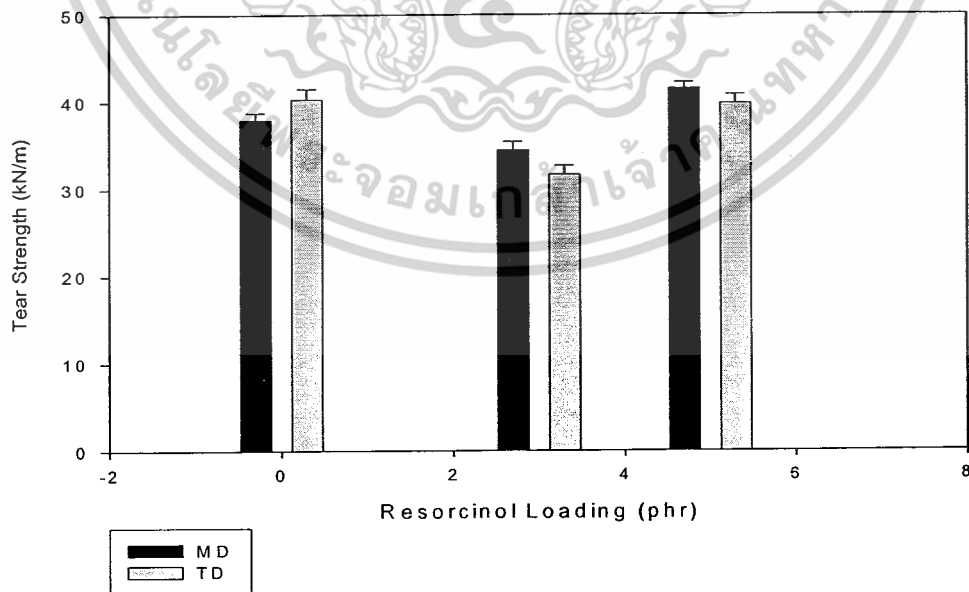
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยางที่ 200% การยืด กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบค่ามอดุลัสที่เปอร์เซ็นต์การยัด 100 200 และ 300% ทั้ง 2 วิธีการคือ การผสมแบบเรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็ง และแบบที่เป็นสารละลาย 0 - 5 phr พบว่าค่ามอดุลัสไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวของเรซอร์ซินอลไม่ดี ซึ่งเกิดจากระหว่างการผสม มีสภาวะผสมที่ไม่ดี เพราะเป็นข้อจำกัดของเครื่องผสม

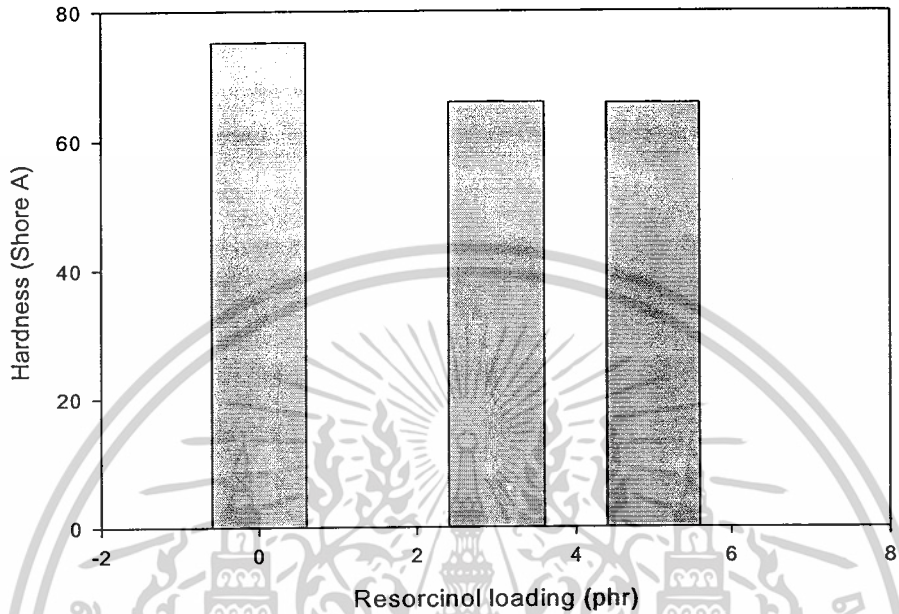


รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาด กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็ง

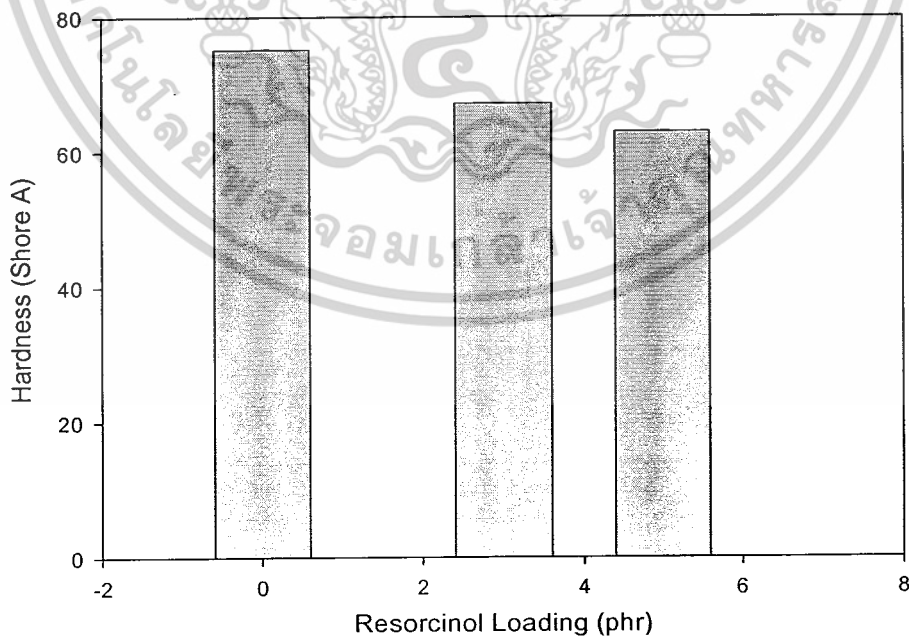


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาด กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงจิกชาระหว่างสูตรที่ใส่และไม่ใส่เรซอร์ซินอลมีค่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับค่ามอดุลัสที่กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกต กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็ง



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกต กับปริมาณเรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลาย  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

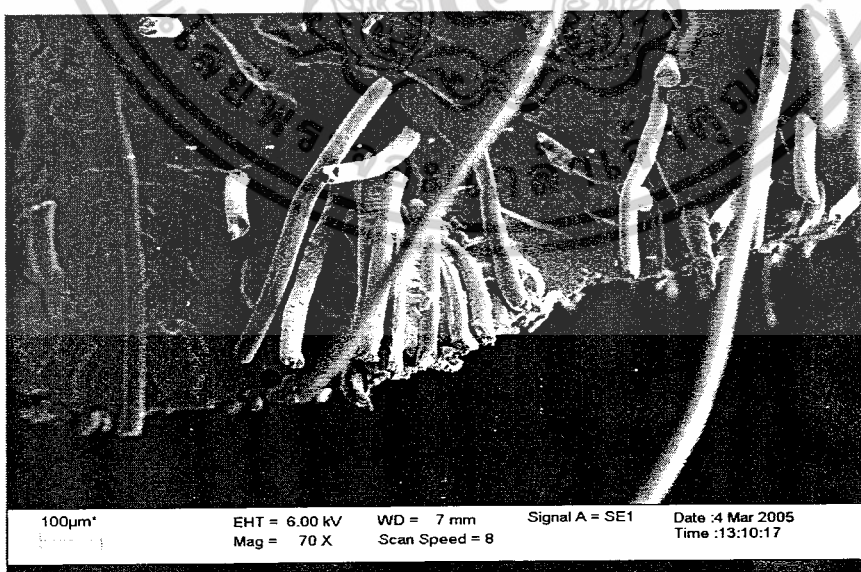
จากการทดลองหาค่าความแข็งแรง พบว่าเมื่อใส่เรซอร์ซินอลจะให้ค่าความแข็งแรงลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณเรซอร์ซินอลมากขึ้นค่าความแข็งแรงจะลดลงมากกว่าการใส่ที่ปริมาณที่น้อยกว่า ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลเนื่องมาจากเรซอร์ซินอลเป็นสารโมเลกุลเล็กๆ จึงทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของเนื้อยางผสมสูตรจึงทำให้มีค่าความแข็งแรงลดลงกว่าสูตรที่ไม่ได้ใส่เรซอร์ซินอล

#### 4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

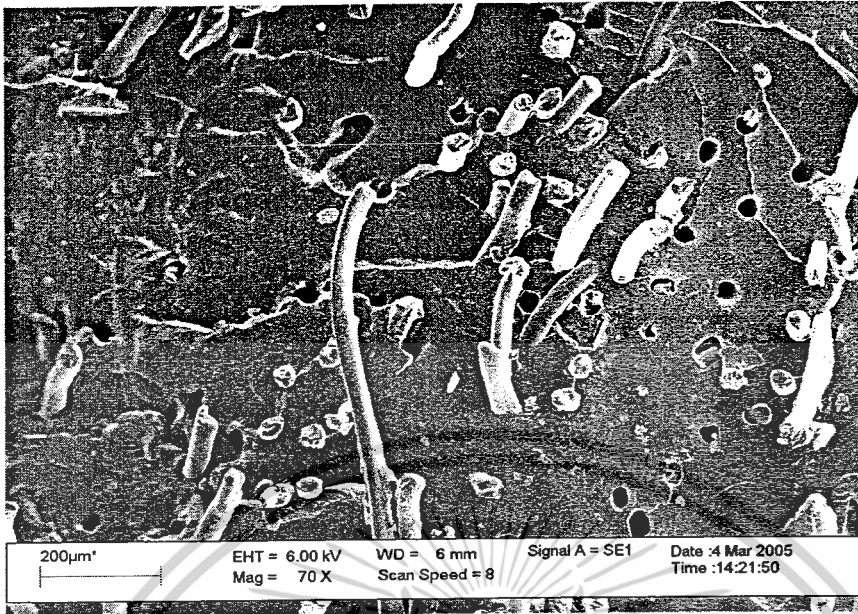
จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยพลาซที่ทำการเติมลงไปในยางผสมสูตรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) เพื่อดูการกระจายตัวของเส้นใยพลาซที่ทำการเติมลงไป และการยึดติดระหว่างเส้นใยพลาซ กับเนื้อยางหลังจากการเติมเรซอร์ซินอลเมื่อเปรียบเทียบกับ การใส่เส้นใยพลาซลงไปในยางผสมสูตรโดยที่ไม่มีการเติมเรซอร์ซินอลลงไป โดยทำการหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic Crack) แล้วไปทำการทดสอบ

แบ่งการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรที่การเติมเส้นใยลงไป เป็นดังนี้

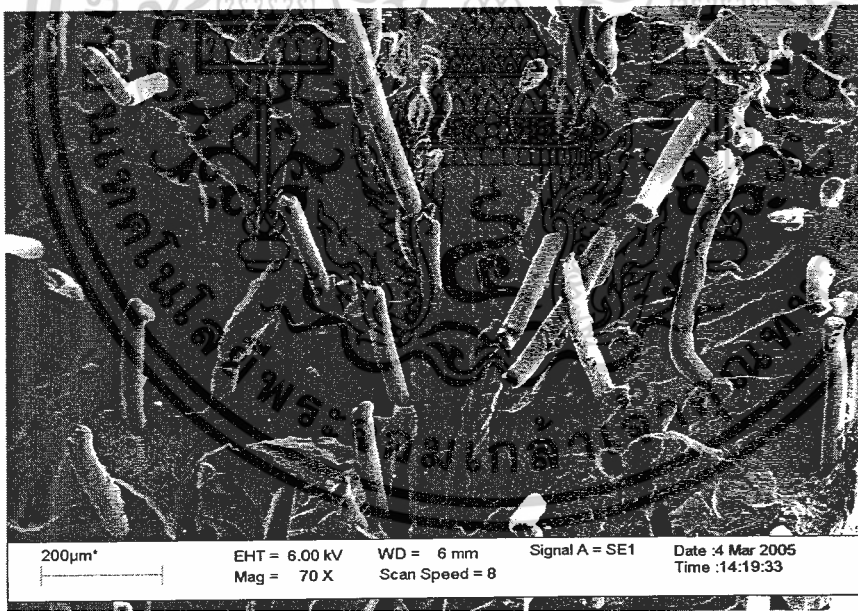
- เพื่อดูการกระจายตัวและเปรียบเทียบการกระจายตัวของเส้นใยพลาซระหว่างเส้นใยพลาซหยาบ เส้นใยพลาซละเอียด และเส้นใยพลาซละเอียดที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติดเรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลายที่ทำการเติมลงไปในยางผสมสูตร
- เพื่อศึกษาการผลการยึดติดระหว่างเส้นใยพลาซ กับเนื้อยางหลังจากการเติมสารเพิ่มการยึดติดลงไป



รูปที่ 4.36 ตัวอย่าง SEM Micrograph แสดงสัณฐานวิทยาการศึกษาการกระจายตัวของเส้นใยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าพลาซหยาบ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



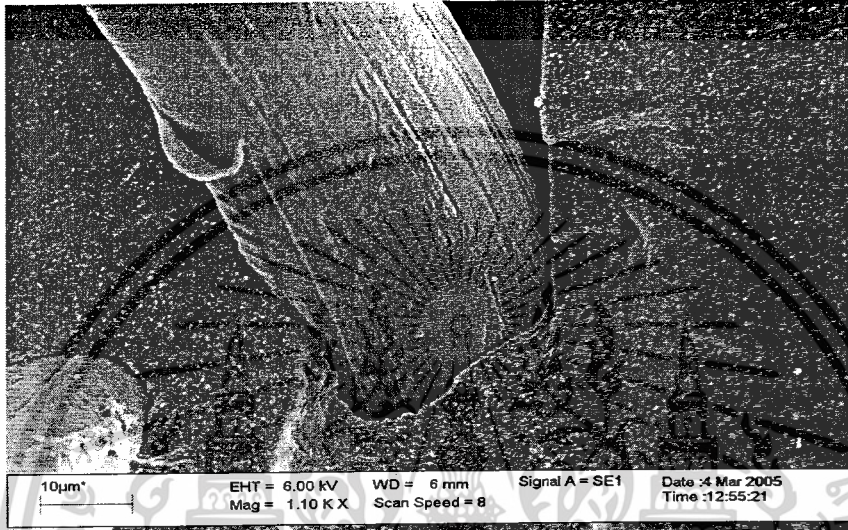
รูปที่ 4.37 ตัวอย่าง SEM Micrograph แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาการศึกษาการกระจายตัวของเส้นใย  
พลาวยละเอียดที่ไม่มีการไสรเชอร์ซินอล



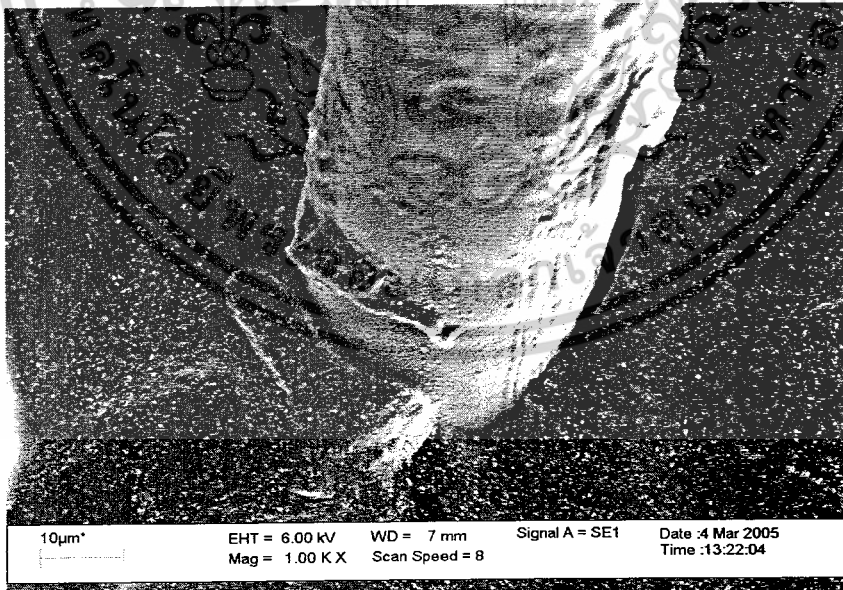
รูปที่ 4.38 ตัวอย่าง SEM Micrograph แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาการศึกษาการกระจายตัวของเส้นใย  
พลาวยละเอียดที่มีการไสรเชอร์ซินอลที่เป็นสารละลายปริมาณ 5 phr

จากรูปที่ 4.36 และ 4.37 พบว่าเส้นใยพลาวยละเอียดมีการกระจายตัวที่ดีกว่าเส้นใยพลาวยหยาบเนื่องจากเส้นใยพลาวยละเอียดเป็นเส้นใยพลาวยเส้นที่มีการพันกัน (Spun) ของเส้นใยน้อยกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สูงกว่าไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
เส้นใยพลาวยหยาบซึ่งเป็นเส้นใยาว  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.37 กับรูปที่ 4.38 พบว่ายางผสมสูตรที่ใส่เส้นใยพลาซเดอียดที่มีการใส่เรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลายที่ผิวของเส้นใยมีลักษณะขรุขระซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นเรซอร์ซินอลไปเคลือบที่ผิวเส้นใยพลาซเดอียด ซึ่งแตกต่างจากของเส้นใยพลาซเดอียดที่ไม่มีการเติมเรซอร์ซินอลลงไปทีบริเวณผิวของเส้นใยมีพื้นผิวที่เรียบกว่า



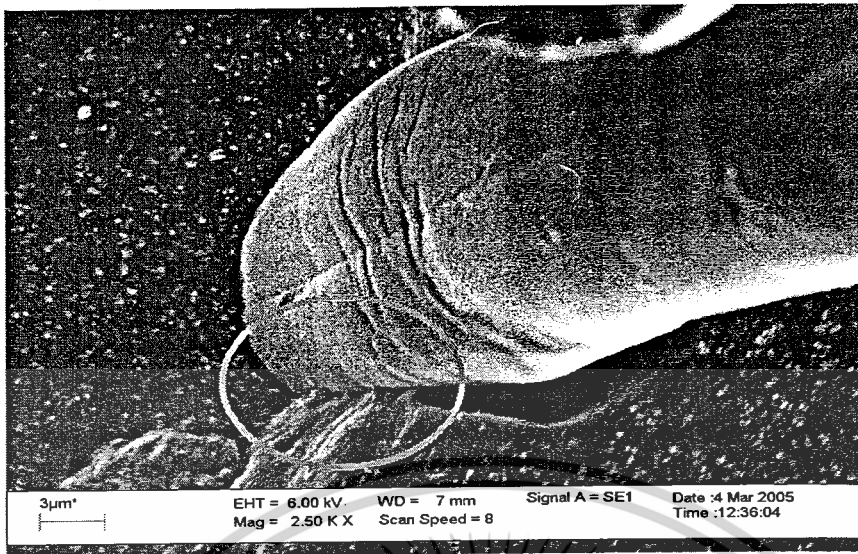
รูปที่ 4.39 ตัวอย่าง SEM Micrograph แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาแสดงเส้นใยพลาซเดอียด



รูปที่ 4.40 ตัวอย่าง SEM Micrograph แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาการเคลือบของสารเพิ่มการยึดติด

Resorcinol ที่เป็นสารละลาย ปริมาณ 5 phr บนเส้นใยพลาซเดอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 ตัวอย่าง SEM Micrograph แสดงลักษณะวิทยาแสดงการยึดติดระหว่างเส้นใยพลาซ ละเอียดกับเนื้อยาง โดยมีการใส่สารเพิ่มการยึดติด Resorcinol ที่เป็นสารละลาย ปริมาณ 5 phr ลงไป

จากรูปที่ 4.39 และ 4.40 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะวิทยาของเส้นใยพลาซละเอียดทั้ง ก่อนเติม และหลังเติมสารเพิ่มการยึดติด Resorcinol พบว่าเส้นใยพลาซที่มีการเติมสารเพิ่มการ ยึดติดที่บริเวณรอบๆเส้นใยพลาซละเอียด ดังรูปที่ 4.40 มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระกว่าเส้นใยพลาซ ละเอียดที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติดลงไป ดังรูปที่ 4.39 ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นสารเพิ่มการยึดติด Resorcinol เข้าไปเคลือบที่รอบๆ เส้นใย

เมื่อพิจารณาผลของเรซอร์ซินอลที่มีผลต่อการยึดติดระหว่างเส้นใยพลาซละเอียดกับเนื้อ ยาง ดังรูปที่ 4.41 ซึ่งเป็นสูตรยางที่ได้ทำการเติมเรซอร์ซินอลลงไป พบว่า ณ บริเวณขอบของ รอยต่อระหว่างเส้นใยพลาซละเอียด กับเนื้อยางนั้นมีการเชื่อมติดกับอยู่บางส่วน ซึ่งคาดว่าน่าจะ เกิดจากการเติมเรซอร์ซินอลลงไป

#### 4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกล (Dynamic Mechanical Thermal Analysis)

##### 4.5.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกลด้วย Dynamic Mechanical Thermal Analyzer

###### (DMTA)

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเชิงกล โดยเป็นการหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) จากจุดสูงสุดของ พีค  $\tan \delta$  และค่า  $\tan \delta$  ซึ่งบอกถึงสัดส่วนของการกระจายแรงต่อการรับแรงของวัสดุ ตัวอย่างเทอร์โมแกรม DMTA แสดงในภาคผนวก ง (รูปที่ ง-1 – ง-3 และ ตารางที่ ง-1 – ง-3)

จากผลการทดลองได้ข้อมูลของค่า  $T_g$  ของยางผสมสูตรทั้ง 3 ตัวอย่าง คือ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกลด้วยเครื่อง DMTA

ยางผสมสูตร	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ )
สูตรยางที่ไม่ใส่เส้นใย (E1)	-51 °C
สูตรยางที่ใส่เส้นใยบดละเอียด (E2)	-56 °C
สูตรยางที่ใส่เส้นใยบดละเอียด + เรซอร์ซินอล (E3)	-54 °C

จากข้อมูลข้างต้นมีค่า  $T_g$  ที่ใกล้เคียงกันมากตามหลักการถ้าเรซอร์ซินอลที่ใช้ในการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยพลาซกับเนื้อยางสามารถทำหน้าที่เพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยกับเนื้อยาง จะทำให้ค่า  $T_g$  ของสูตรยางผสมเส้นใยพลาซละเอียดปรับปรุงด้วยเรซอร์ซินอลควรมีค่า  $T_g$  สูงสุด เพราะการใช้เรซอร์ซินอลจะเป็นการเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยกับยางทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านกันของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลงเพราะมีเส้นใยเป็นตัวขัดขวาง แต่อย่างไรก็ดีผลจากการทดลองที่ได้เมื่อทำการทดสอบ DMTA พบว่าค่า  $T_g$  ไม่เปลี่ยนแปลง

#### 4.6 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตของยางผสมสูตร

รายการ	ปริมาณที่ใช้ของยางผสมสูตร (phr)	ราคาต่อหน่วย (บาท/กก)	ไม่มีเติมเส้นใยพลาซ	เติมเส้นใยพลาซ phr 20	เติมเส้นใยพลาซ phr 40	เติมเส้นใยพลาซ phr 40 + Resorcinol 5phr
1. ยางธรรมชาติ STR 5L	100	45	29.80	26.32	23.56	22.96
2. Carbon black N550	30	25	4.97	4.39	3.95	3.83
3. Antioxidant Winstay® L	1	150	0.99	0.88	0.79	0.77
4. Napthanic oil	10	14.50	0.96	0.85	0.76	0.74
5. Stearic acid	2	15	0.20	0.18	0.16	0.15
6. ZnO	5	15	0.50	0.44	0.39	0.38
7. Sulfur	1.5	4	0.04	0.04	0.03	0.03
8. MBTS	1	122	0.81	0.71	0.64	0.62
9. TMTM	0.5	100	0.33	0.29	0.26	0.26
10. เส้นใยพลาซ (Ply)	0,20,40	5	-	0.59	1.05	1.02
11. Resorcinol	0,5	270	-	-	-	6.89
ราคาต้นทุนการผลิตยางผสมสูตร มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม			38.6	34.69	31.57	37.65

หมายเหตุ: 1. เป็นราคาโดยประมาณ ณ พ.ศ. 2547

2. การวิเคราะห์ต้นทุนนี้ยังไม่ได้รวมต้นทุนค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น ค่าไฟฟ้า ค่าแรง ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 แสดงถึงการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตยางผสมสูตร ที่มีน้ำหนักรวม 1 กิโลกรัม พบว่าสูตรที่ไม่มีการเติมเส้นใยพลาวยลงไปในยางผสมสูตร มีต้นทุนการผลิตสูงกว่ายางผสมสูตรที่มีการเติมปริมาณเส้นใยพลาวยลงไป เนื่องจากการนำเส้นใยพลาวยมาเป็นสารตัวเติมในยางผสมสูตร ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง เพราะเส้นใยพลาวยมีราคาถูกมาก เมื่อเปรียบเทียบกับราคายางธรรมชาติ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใส่ปริมาณเส้นใยพลาวยลงไปเป็นการลดต้นทุนการผลิต ถ้าต้องการปรับปรุงสมบัติเชิงกลบางประการของยางผสมสูตรที่มีการเติมปริมาณเส้นใยพลาวยให้ดีขึ้น ทำได้โดยเติม Resorcinol ที่เป็นสารละลาย เพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยพลาวยกับยาง เมื่อเปรียบเทียบราคาต้นทุนการผลิต พบสูตรนี้ยังคงมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าราคาต้นทุนการผลิตของยางผสมสูตรที่ไม่มีการเติมเส้นใยพลาวย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติต่างๆของยางผสมสูตรที่มีการเติมเส้นใยพลาซที่ได้มาจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว ซึ่งยางผสมสูตรมีการเติมปริมาณเส้นใยพลาซเท่ากับ 0-40 phr และศึกษาผลของการใส่สารเพิ่มการยึดติด Resorcinol ลงไปซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 สมบัติเชิงกล

- ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยพลาซ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยที่เพิ่มทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของยาง
- ค่ามอดูลัสของยาง ณ เปอร์เซ็นต์การยืดที่ 100% 200% และ 300 % (M100 M200 และ M300) ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) และ ความแข็งกด (Hardness) มีค่าเพิ่มขึ้น
- เส้นใยพลาซที่มีการจัดเรียงตัวทิศทางตามแนวลูกกลิ้ง (Machine direction; MD) ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ได้มากกว่าเส้นใยพลาซที่มีการจัดเรียงตัวทิศทางตั้งฉากกับแนวลูกกลิ้ง (Transverse direction; TD)
- การเพิ่มปริมาณสารเพิ่มการยึดติดลงไปจะทำให้สมบัติเชิงกลบางประการของยางผสมสูตรมีค่ามากกว่ายางผสมสูตรที่ไม่มีการเติมสารช่วยการยึดติด

##### 5.1.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

- การกระจายตัวของเส้นใยพลาซแบบละเอียดดีกว่าเส้นใยพลาซหยาบ เนื่องจากในสูตรที่ใส่เส้นใยพลาซหยาบซึ่งเป็นเส้นใยยาวพบว่าการเกี่ยวพันกันอย่างมาก
- สูตรที่ใส่เส้นใยพลาซละเอียดที่ใส่สารเพิ่มการยึดติดเรซอร์ซินอลพบว่าช่องว่างระหว่างพื้นผิวที่ติดกันของเส้นใยและยางลดน้อยลง

##### 5.1.3 สมบัติทางความร้อน

- $T_g$  (Glass transition temperature) ของยางผสมสูตรที่ใส่และไม่ใส่เรซอร์ซินอลปรับปรุงการยึดติด มีค่าใกล้เคียงกัน
- เส้นใยพลาซที่นำมาทดสอบน่าจะประกอบด้วยเส้นใยในลอน 6 และในลอน 6,6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการใช้ประโยชน์เส้นใยพลาจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วเป็นสารตัวเติมในยาง สามารถสรุปข้อเสนอแนะต่างๆ ที่น่าสนใจที่อาจเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป ดังนี้

1. ศึกษาผลปริมาณเส้นใยพลา ขนาดเส้นใยพลาแบบบดหยาบและบดละเอียด ทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยพลา โดยทำการคอมปาวด์ยางด้วยเครื่อง Internal mixer ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิในการคอมปาวด์และช่วยในการกระจายตัวของเส้นใยพลาได้อย่างสมบูรณ์
2. ศึกษาถึงชนิดของสารเพิ่มการยึดติดชนิดอื่น เพื่อให้ได้สมบัติต่างๆ ของยางผสมสูตรที่มีการเติมเส้นใยพลา ให้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

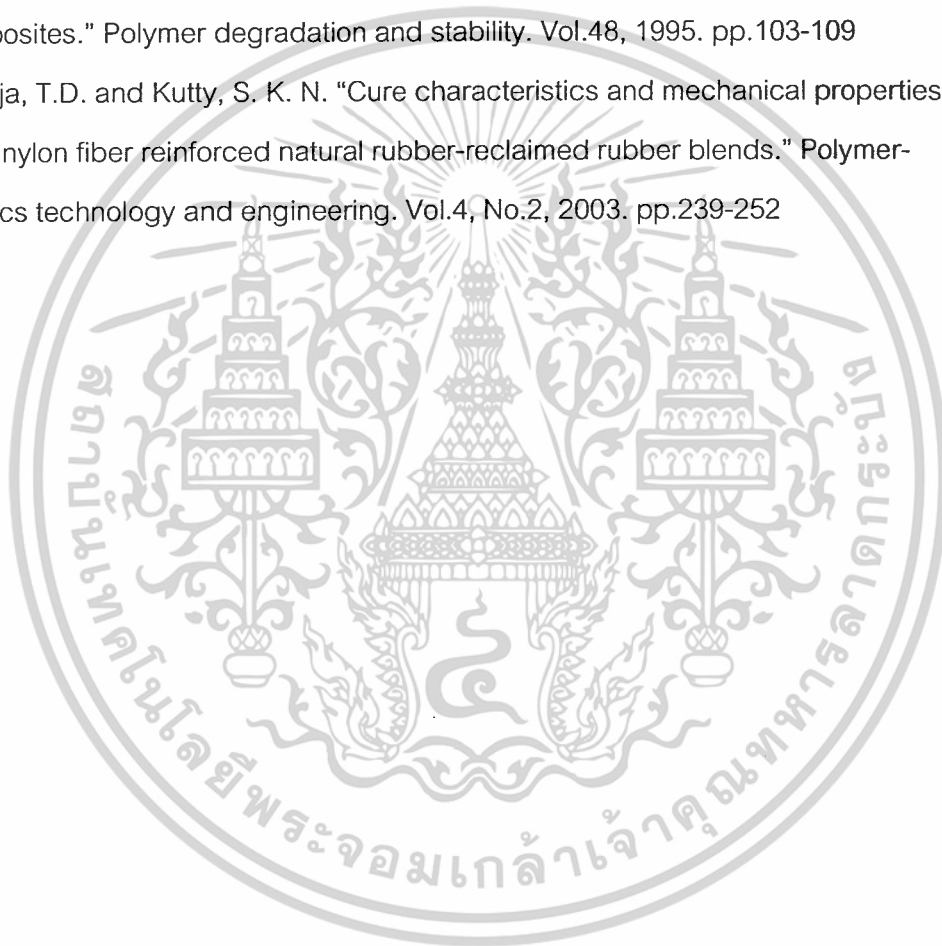
## เอกสารอ้างอิง

1. สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. “นวัตกรรมการใช้ประโยชน์จากการแปรรูปยางรถยนต์ใช้แล้วครั้งที่ 3 “. 2547
2. [http://www.oie.go.th/Benchmarking/rubber\\_detail.htm](http://www.oie.go.th/Benchmarking/rubber_detail.htm)
3. <http://www.dep.state.pa.us/.../na/newsletters/tire.htm>
4. [http://www.itdg.org/docs/technical\\_information\\_service/recycling\\_rubber.pdf](http://www.itdg.org/docs/technical_information_service/recycling_rubber.pdf)
5. อธิธิพล แจ่มชัด. เอกสารประกอบการสอน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการยาง. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545
6. วิสูตร เสือปาน. “รอบรู้เรื่องการผลิตยางรถยนต์ Industrail Technology Review 82”. [Online]. Available : [http://industril.se-ed.com/itr82/itr82\\_103.asp](http://industril.se-ed.com/itr82/itr82_103.asp). 2544
7. กู๊ดเยียร์ ประเทศไทย. “พื้นฐานเรื่องยาง”. [Online]. Available : [http://www.goodyear.co.th/tyre\\_school/specs.html](http://www.goodyear.co.th/tyre_school/specs.html). 2526
8. วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. วิทยาศาสตร์เส้นใย. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542
9. <http://www.tf.uni-kiel.de/matris/matv/pdf/poly15x.pdf>
10. Cosan (Thailand) Co.,Ltd.”Resorcinal”.2004
11. Tampere University of Technology. “Vulcanization (Curing, crosslinking).” [Online]. Available : [http://www.tut.fi/plastics/tyreschool/moduuli\\_6/hypertext/3/3\\_4.htm#3\\_4\\_1](http://www.tut.fi/plastics/tyreschool/moduuli_6/hypertext/3/3_4.htm#3_4_1). 2003
12. Tampere University of Technology. “Mechanism of vulcanization with sulfur, accelerators and activators.” [Online]. Available : [http://www.tut.fi/plastics/tyreschool/moduulit/moduuli\\_4/hypertext\\_2/2/2\\_4.htm#2\\_4\\_9](http://www.tut.fi/plastics/tyreschool/moduulit/moduuli_4/hypertext_2/2/2_4.htm#2_4_9). 2003
13. Saad, A.L.G. and Younan, A.F. “Rheological Mechanical and electrical properties of natural rubber-white filler mixtures reinforced with nylon 6 short fibers.” Polymer degradation and stability. Vol. 50, 1995. pp. 133-140.
14. Younan, A.F., et. al. “Reinforcement of natural rubber with nylon 6 short fibers.” Journal of applied polymer science. Vol.45, 1992. pp. 1967-1971

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

15. Sreeja, T.D. and Kutty, S.K.N. "Effect of urethane based bonding agent on the cure characteristics and mechanical properties of natural rubber/whole tyre reclaim-short nylon fiber composite." *Polymer-plastics technology and engineering*. Vol.41, No. 1, 2002. pp.77-89.
16. Younan, A.F., et. al. "Thermal stability of natural rubber-polyester short fiber composites." *Polymer degradation and stability*. Vol.48, 1995. pp.103-109
17. Sreeja, T.D. and Kutty, S. K. N. "Cure characteristics and mechanical properties of short nylon fiber reinforced natural rubber-reclaimed rubber blends." *Polymer-plastics technology and engineering*. Vol.4, No.2, 2003. pp.239-252



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางที่มี  
การเติมเส้นใยพลาซที่ปริมาณต่างๆ

ตารางที่ ก-1 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกล (เส้นใยพลาซหายาบ)

ชนิด ตย. Mech prop.	No ply	10 phr		20 phr		30 phr		40 phr	
		MD	TD	MD	TD	MD	TD	MD	TD
Tensile Strength (MPa)	10.63	7.65	8.44	8.05	7.33	8.84	7.17	8.16	7.21
% Elongation (%)	293.28	231	283.14	106	178	39.67	145.5	60.38	61.4
100 % (MPa)	1.57	6.27	3.91	6.70	6.06	-	4.81	-	-
200 % (MPa)	4.22	7.14	6.05	-	6.86	-	-	-	-
300 % (MPa)	8.17	-	8.67	-	-	-	-	-	-
Tear strength (kN/m)	32.78	46.04	53.51	54.41	58.36	57.35	57.25	69.58	53.34
Hardness (Shore A)	52.6	71.4		76.4		78		80.4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกล (เส้นใยพลาละลายเย็ด)

ชนิด ตย. Mech prop.	No ply	10 phr		20 phr		30 phr		40 phr	
		MD	TD	MD	TD	MD	TD	MD	TD
Tensile Strength (MPa)	10.63	11.23	10.44	9.77	8.38	7.29	6.68	6.82	6.37
% Elongation (%)	293.28	345.33	359.13	309.80	329.43	258.14	282.33	263.33	269.33
100 % (MPa)	1.573	3.08	2.23	4.59	2.65	4.72	3.35	4.63	3.55
200 % (MPa)	4.221	5.25	4.53	6.13	4.77	5.86	5.15	5.62	5.04
300 % (MPa)	8.17	9.13	8.01	9.41	7.55	-	-	-	-
Tear strength (kN/m)	32.78	34.51	34.47	35.21	37.38	37.94	40.28	34.66	35.46
Hardness (Shore A)	52.6	62		67		75.2		76.8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางที่มี

การเติมเรซอร์ซินอลปริมาณต่างๆ

ตารางที่ ข-1 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกล (เรซอร์ซินอลที่เป็นของแข็ง)

ชนิด ตย. Mech prop.	0 phr		3 phr		5 phr	
	MD	TD	MD	TD	MD	TD
Tensile Strength (MPa)	7.29	6.68	6.8	6.64	6.03	6.41
% Elongation (%)	258.14	282.33	278.33	305.2	243.5	292.25
100 % (MPa)	4.72	3.35	3.47	2.15	5.01	4.03
200 % (MPa)	5.86	5.15	3.30	2.28	4.49	4.07
Tear strength (kN/m)	37.94	40.28	36.13	31.58	32.54	32.5
Hardness (Shore A)	75.2		66		65.8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

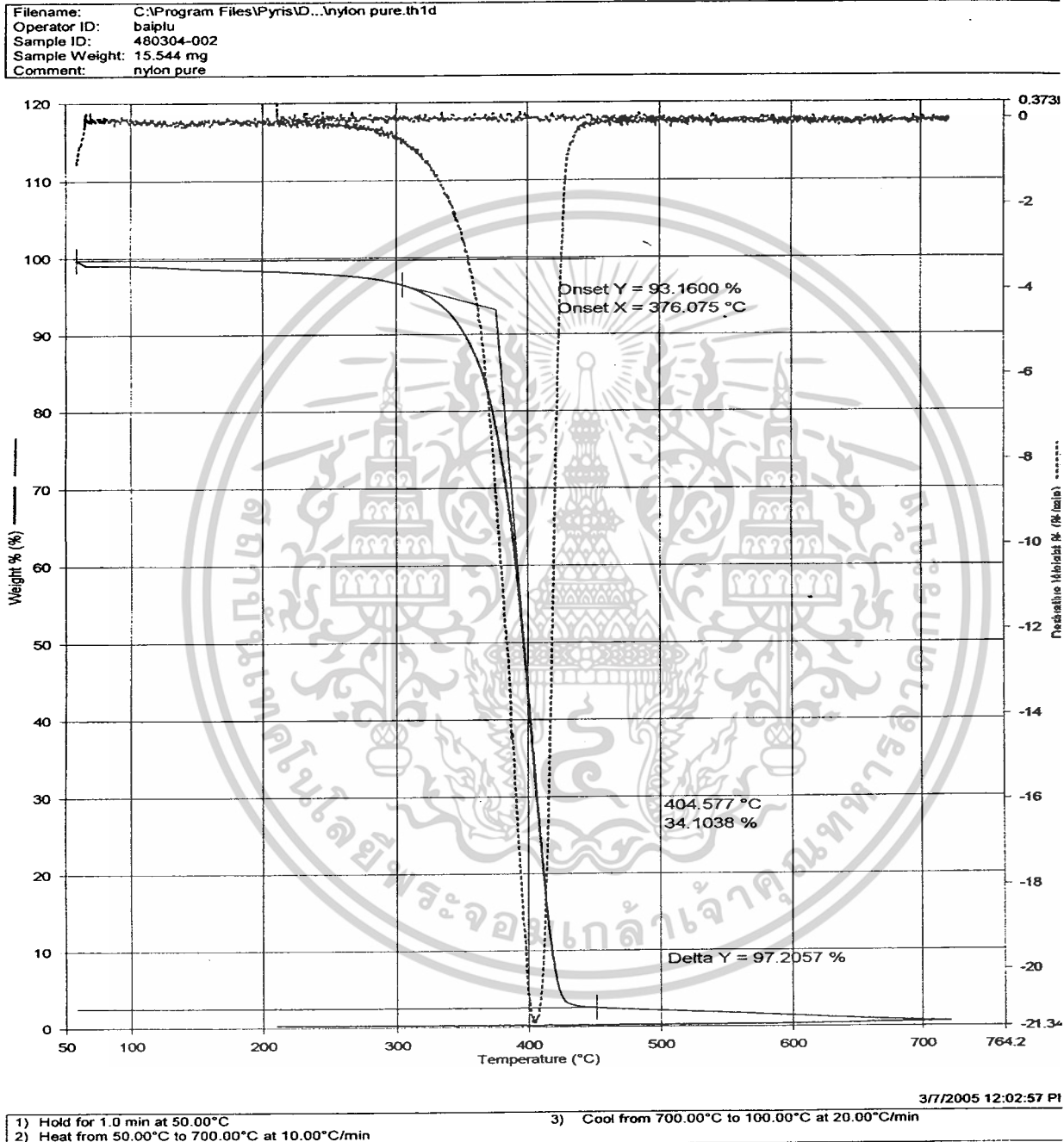
ตารางที่ ข-2 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกล (เรซอร์ซินอลที่เป็นสารละลาย)

ชนิด ตย. Mech prop.	0 phr		3 phr		5 phr	
	MD	TD	MD	TD	MD	TD
Tensile Strength (MPa)	7.29	6.68	7.46	6.59	8.48	7.48
% Elongation (%)	258.14	282.33	289	297.4	322	319
100 % (MPa)	4.72	3.35	4.30	2.76	4.21	2.46
200 % (MPa)	5.86	5.15	5.56	4.59	5.85	4.58
Tear strength (kN/m)	37.94	40.28	34.47	31.65	41.50	39.77
Hardness (Shore A)	75.2		67.2		63	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

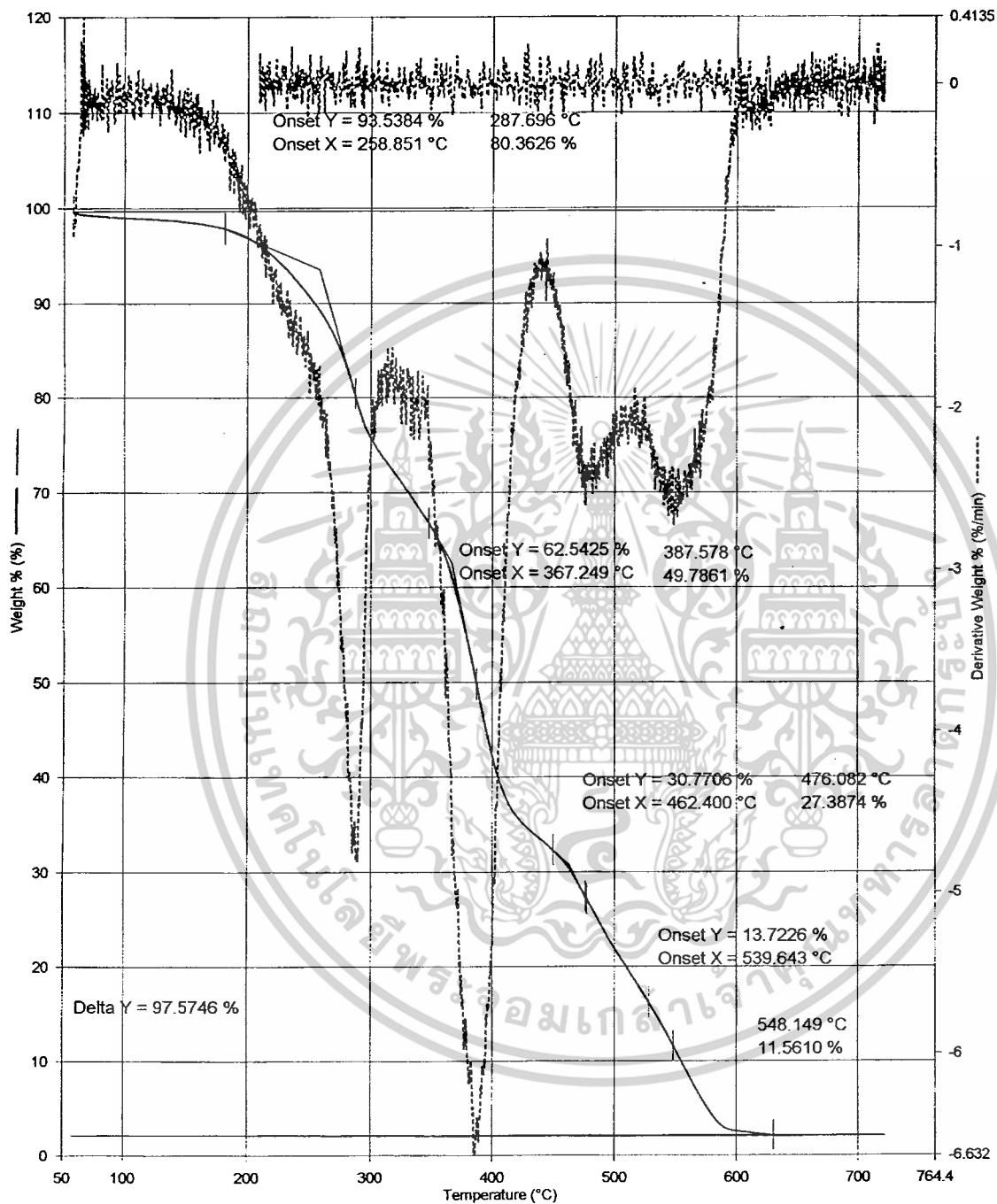
กราฟแสดงผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน



รูปที่ ค-1 เทอร์โมแกรม TGA ของ Nylon บริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Filename: C:\Program Files\Pyris...\nylon waste1.th1d  
 Operator ID: baipiu  
 Sample ID: 480304-001  
 Sample Weight: 9.897 mg  
 Comment: nylon



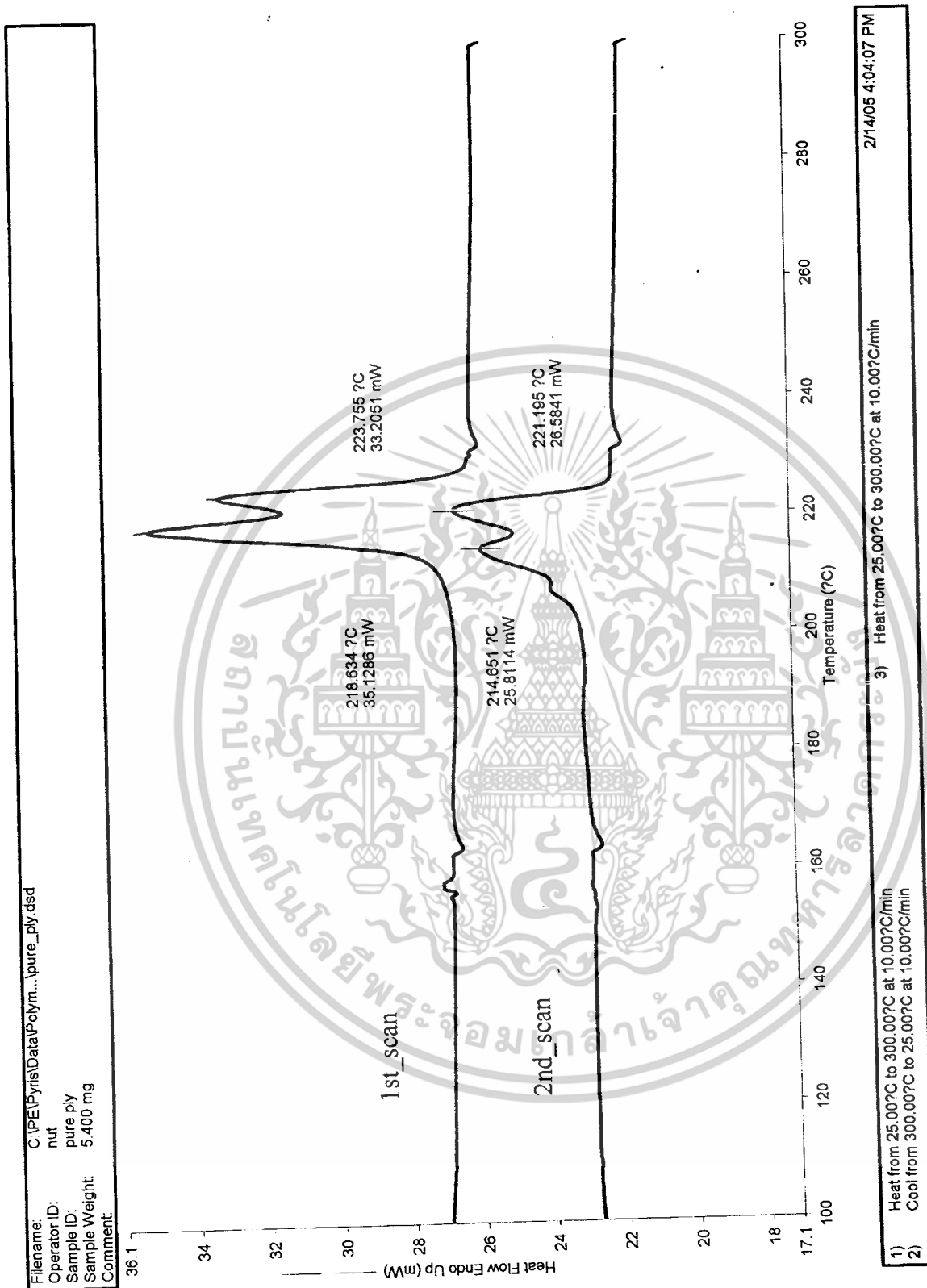
3/7/2005 12:19:23 PM

1) Hold for 1.0 min at 50.00°C  
 2) Heat from 50.00°C to 700.00°C at 10.00°C/min

3) Cool from 700.00°C to 100.00°C at 20.00°C/min

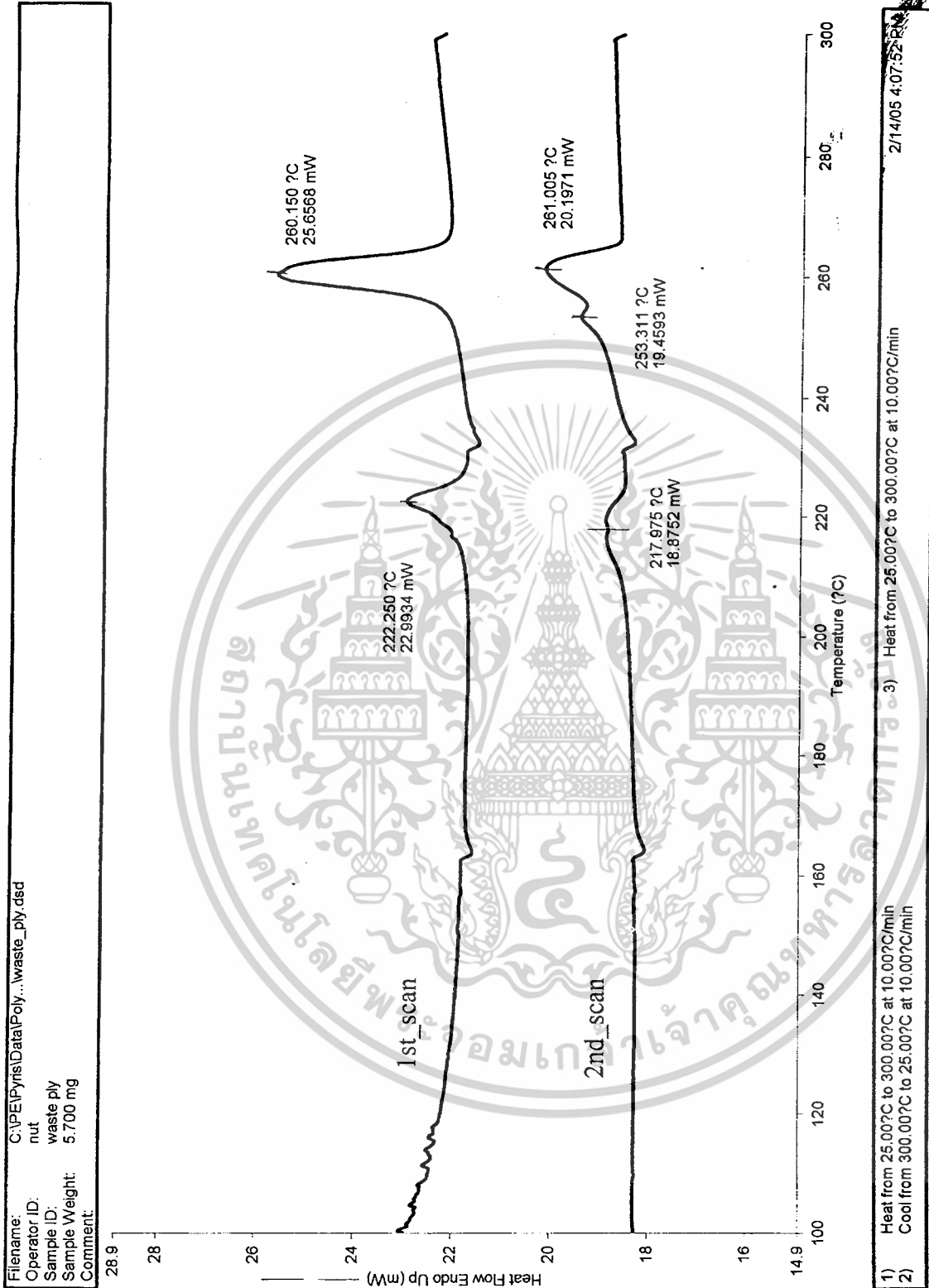
### รูปที่ ค-2 เทอร์โมแกรม TGA ของตัวอย่างเส้นใยพลาซที่ในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



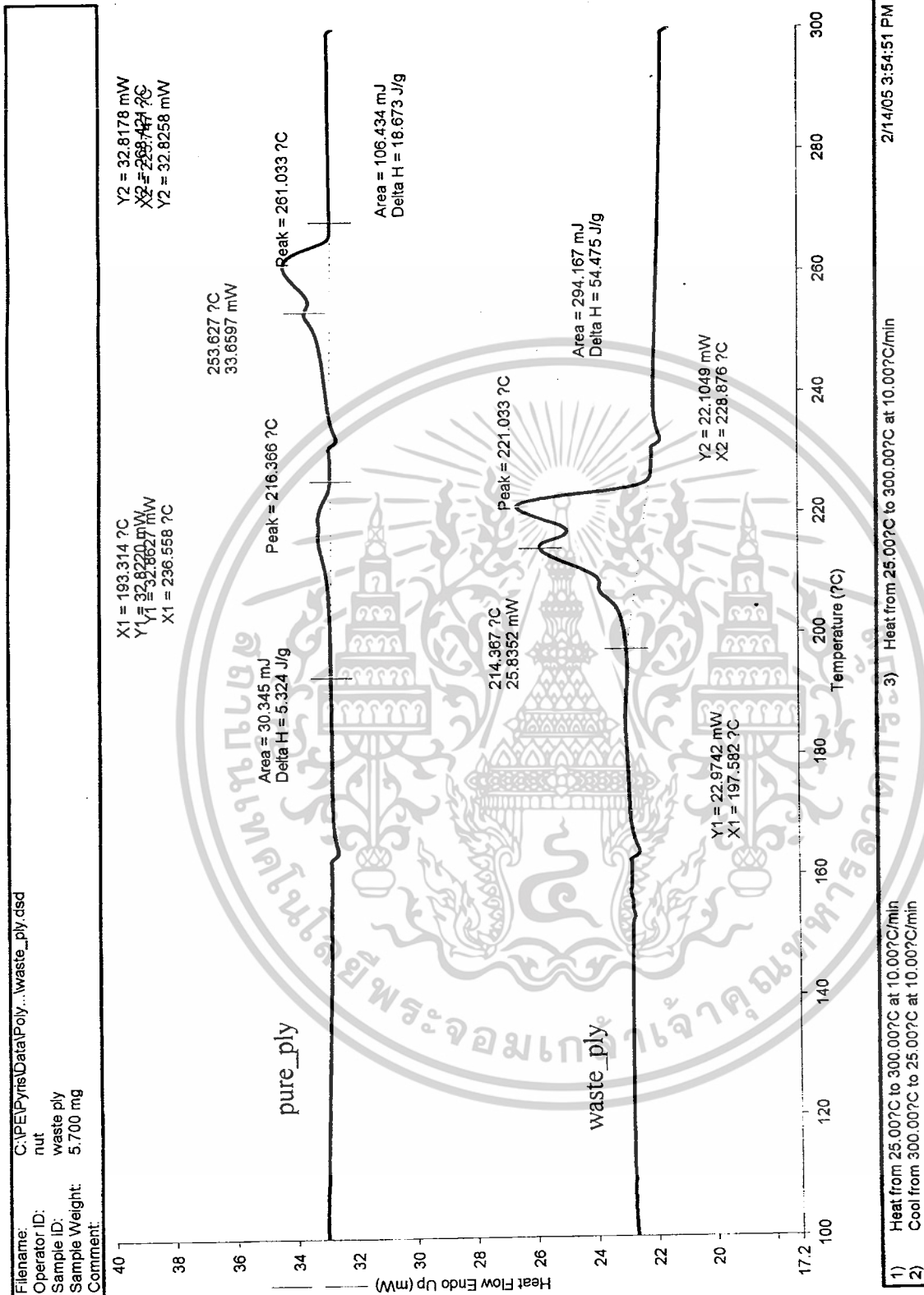
รูปที่ ค-3 เทอร์โมแกรม DSC ของ Nylon บริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-4 เทอร์โมแกรม DSC ของตัวอย่างเส้นใยพลาซที่ในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



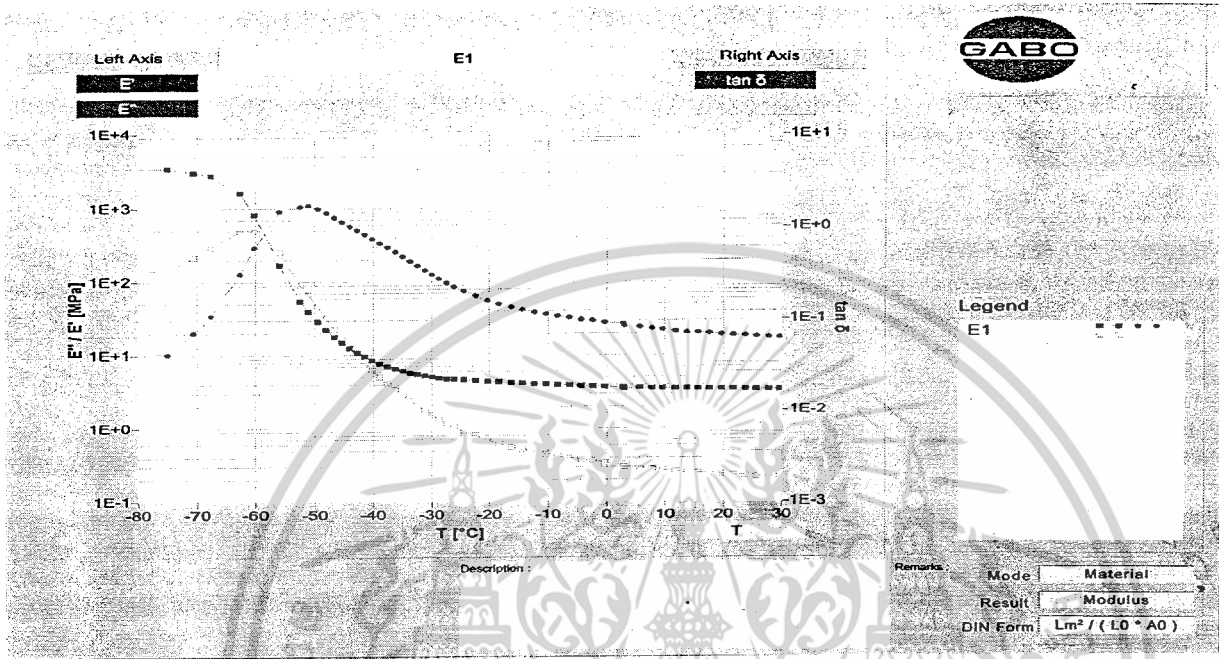
รูปที่ ค-5 เทอร์โมแกรม DSC ของตัวอย่างเส้นใยพลาที่ยในงานวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ Nylon

บริสุทธิ์

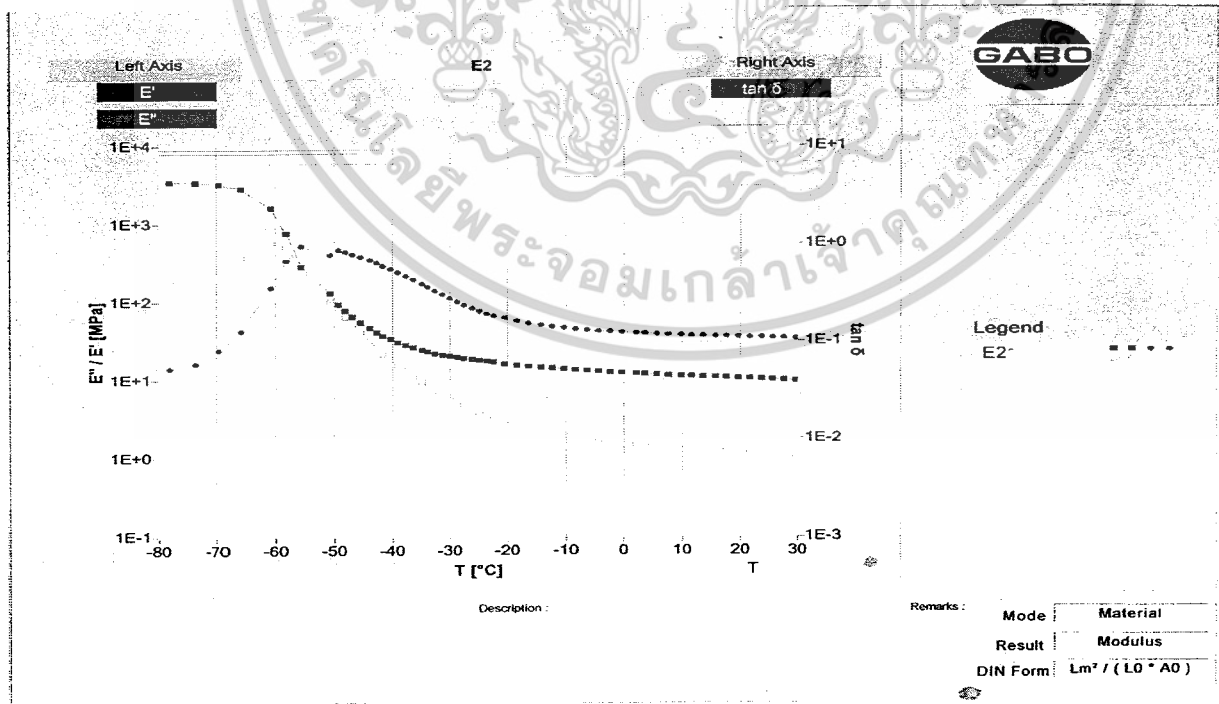
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

กราฟแสดงผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกล

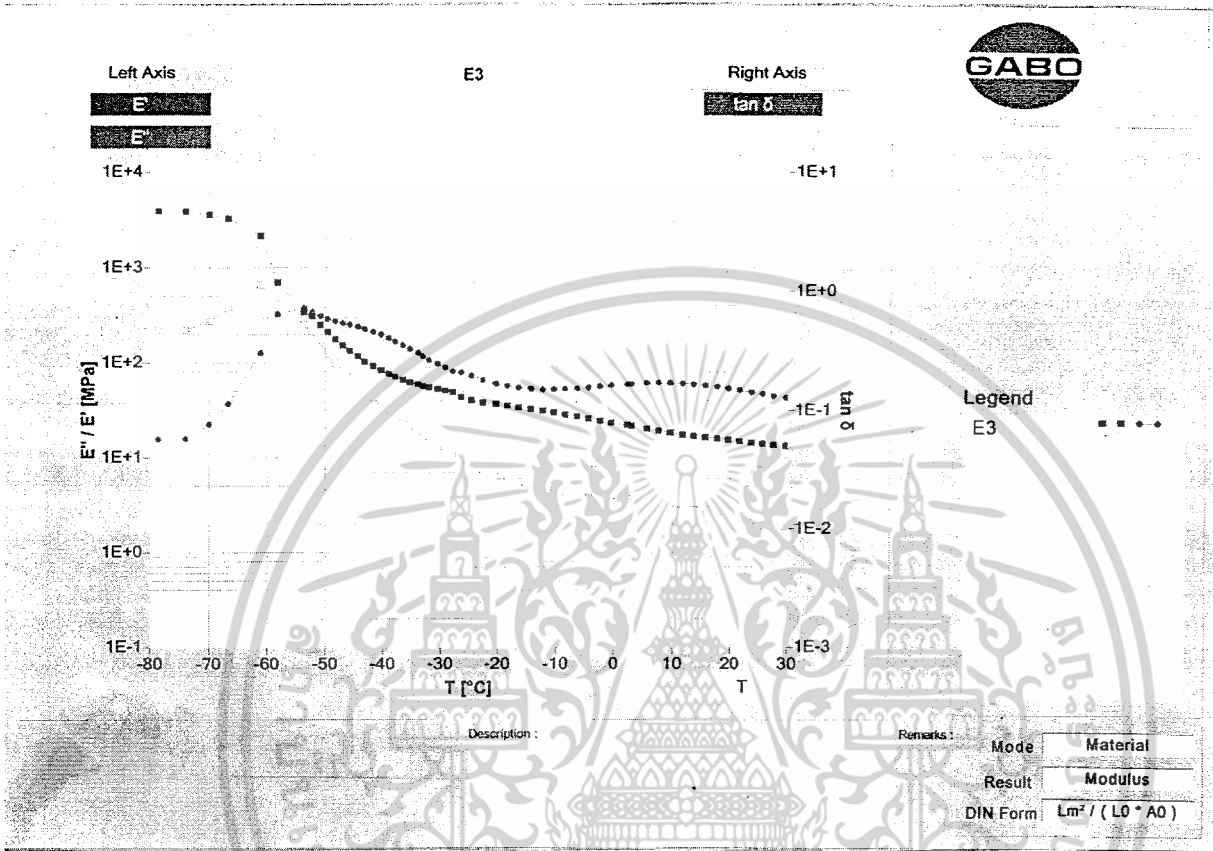


รูปที่ ง-1 เทอร์โมแกรม DMTA ของยางผสมสูตรที่ไม่ได้มีการใส่เส้นใยปลายลงไป



รูปที่ ง-2 เทอร์โมแกรม DMTA ของยางผสมสูตรที่มีการเติมเส้นใย 30 phr

แยกสารเป็นเอกสารถึงลงบนเวลาห้วงกึ่งในเพื่อกรรกรกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-3 เทอร์โมแกรม DMTA ของยางผสมสูตรที่มีการเติมเส้นใย 30 phr และเรซอร์ซินอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No:	F stat.	Strain stat	Stress stat	Lo	Lm	F dyn.	Strain dyn	Stress dyn	Time	f	T	E'	E''	E'	tan δ	F cont.	T2	T3	μj1
	N	%	MPa	mm	mm	N	%	MPa	sec	Hz	°C	MPa	MPa	MPa		N	°C	°C	1/MPa
1	80.92	0.2309	7.390	7.870	7.888	50.01	0.1316	4.567	1.020e+3	1.000	-61.40	3.489e+3	148.7	3.489e+3	0.04288	1.004	...	...	2.889e-4
2	80.43	0.1115	7.344	7.866	7.875	50.00	0.1320	4.568	1.411e+3	1.000	-75.00	3.464e+3	140.5	3.467e+3	0.04055	1.089	...	...	2.884e-4
3	80.51	0.07993	7.359	7.857	7.863	50.00	0.1498	4.568	1.653e+3	1.000	-70.80	3.045e+3	214.4	3.059e+3	0.07042	1.184	...	...	3.278e-4
4	80.40	0.05545	7.352	7.853	7.859	49.99	0.1642	4.565	1.915e+3	1.000	-67.70	2.761e+3	282.3	2.777e+3	0.1059	1.109	...	...	3.801e-4
5	80.40	0.1497	7.342	7.921	7.933	49.90	0.2714	4.557	2.169e+3	1.000	-62.70	1.610e+3	492.7	1.694e+3	0.3060	1.119	...	...	5.939e-4
6	79.98	0.9791	7.304	8.425	8.508	49.70	0.4853	4.538	2.309e+3	1.000	-60.20	8.220e+2	493.5	9.536e+2	0.5882	1.174	...	...	1.049e-3
7	60.54	5.281	5.528	9.309	9.800	19.68	0.6548	1.797	2.551e+3	1.000	-56.00	1.714	251.3	304.2	1.466	1.299	...	...	3.288e-3
8	16.04	5.028	1.465	9.838	10.33	6.118	0.5796	0.5586	2.891e+3	1.000	-52.60	54.86	91.06	106.3	1.660	1.434	...	...	9.409e-3
9	7.669	4.845	0.6820	9.279	9.728	4.232	0.5439	0.3865	2.891e+3	1.000	-51.10	39.33	67.48	78.11	1.716	1.419	...	...	0.01280
10	6.380	4.776	0.5926	9.009	9.439	2.889	0.5338	0.2639	2.971e+3	1.000	-49.50	29.03	45.85	54.27	1.579	1.449	...	...	0.01843
11	5.330	4.792	0.5050	8.821	9.244	2.028	0.5196	0.1852	3.051e+3	1.000	-48.10	22.55	32.00	39.15	1.419	1.469	...	...	0.02554
12	4.896	4.774	0.4553	8.689	9.104	1.480	0.5132	0.1361	3.132e+3	1.000	-46.70	18.07	22.83	29.11	1.284	1.434	...	...	0.03435
13	4.571	4.774	0.4174	8.591	9.002	1.147	0.5098	0.1047	3.211e+3	1.000	-45.40	14.95	16.88	22.55	1.129	1.424	...	...	0.04435
14	4.316	4.745	0.3942	8.535	8.940	0.9025	0.5058	0.08241	3.299e+3	1.000	-44.00	12.59	12.70	17.88	1.009	1.409	...	...	0.05584
15	4.052	4.780	0.3700	8.481	8.886	0.7406	0.5049	0.06763	3.367e+3	1.000	-42.80	10.89	9.883	14.71	0.9075	1.394	...	...	0.06800
16	3.897	4.759	0.3558	8.453	8.855	0.6195	0.5031	0.05657	3.443e+3	1.000	-41.50	9.555	7.809	12.34	0.8173	1.404	...	...	0.08103
17	3.737	4.778	0.3412	8.419	8.822	0.5287	0.5020	0.04211	3.520e+3	1.000	-40.20	8.508	6.251	10.56	0.7348	1.399	...	...	0.09472
18	3.657	4.752	0.3339	8.382	8.799	0.4612	0.5020	0.04211	3.598e+3	1.000	-38.90	7.986	5.086	9.205	0.6591	1.399	...	...	0.1086
19	3.577	4.750	0.3266	8.346	8.780	0.4082	0.5011	0.03727	3.676e+3	1.000	-37.60	7.024	4.156	8.162	0.5917	1.404	...	...	0.1225
20	3.497	4.734	0.3193	8.333	8.759	0.3678	0.5008	0.03358	3.754e+3	1.000	-36.30	6.502	3.440	7.356	0.5291	1.394	...	...	0.1359
21	3.477	4.763	0.3175	8.351	8.749	0.3365	0.5016	0.03073	3.831e+3	1.000	-35.00	6.080	2.871	6.724	0.4722	1.394	...	...	0.1487
22	3.427	4.732	0.3130	8.342	8.742	0.3102	0.5005	0.02833	3.909e+3	1.000	-33.70	5.722	2.410	6.209	0.4211	1.409	...	...	0.1611
23	3.357	4.784	0.3066	8.332	8.729	0.2917	0.5006	0.02684	3.987e+3	1.000	-32.50	5.465	2.062	5.841	0.3773	1.399	...	...	0.1712
24	3.367	4.759	0.3075	8.328	8.724	0.2758	0.5005	0.02519	4.061e+3	1.000	-31.20	5.233	1.764	5.522	0.3372	1.399	...	...	0.1811
25	3.307	4.746	0.3020	8.319	8.714	0.2637	0.5004	0.02408	4.137e+3	1.000	-29.90	5.053	1.527	5.279	0.3022	1.379	...	...	0.1884
26	3.287	4.770	0.3002	8.309	8.705	0.2531	0.4998	0.02312	4.213e+3	1.000	-28.70	4.900	1.359	5.077	0.2713	1.394	...	...	0.1970
27	3.262	4.771	0.2970	8.298	8.693	0.2455	0.5002	0.02242	4.290e+3	1.000	-27.40	4.777	1.174	4.919	0.2457	1.399	...	...	0.2033
28	3.288	4.760	0.2954	8.288	8.681	0.2389	0.4997	0.02182	4.368e+3	1.000	-26.10	4.677	1.040	4.791	0.2225	1.394	...	...	0.2087
29	2.808	4.780	0.2954	8.145	8.532	0.2360	0.4993	0.02155	4.461e+3	1.000	-24.40	4.644	0.9307	4.736	0.2004	1.064	...	...	0.2111
30	2.273	4.775	0.2932	8.117	8.504	0.2297	0.4998	0.02097	4.586e+3	1.000	-22.40	4.537	0.8018	4.607	0.1767	1.044	...	...	0.2111
31	2.773	4.786	0.2932	8.107	8.493	0.2236	0.4999	0.02041	4.712e+3	1.000	-20.30	4.428	0.6970	4.482	0.1514	1.044	...	...	0.2231
32	2.748	4.745	0.2939	8.101	8.485	0.2185	0.4993	0.01995	4.830e+3	1.000	-18.40	4.340	0.6234	4.384	0.1436	1.049	...	...	0.2281
33	2.733	4.743	0.2495	8.096	8.477	0.2137	0.4994	0.01952	4.952e+3	1.000	-18.30	4.250	0.5648	4.288	0.1329	1.039	...	...	0.2332
34	2.718	4.752	0.2482	8.093	8.472	0.2103	0.5004	0.01920	5.059e+3	1.000	-14.40	4.179	0.5209	4.211	0.1247	1.054	...	...	0.2375
35	2.683	4.737	0.2450	8.088	8.472	0.2061	0.4993	0.01882	5.190e+3	1.000	-12.40	4.108	0.4784	4.135	0.1165	1.029	...	...	0.2418
36	2.653	4.716	0.2422	8.086	8.467	0.2031	0.5001	0.01855	5.309e+3	1.000	-10.40	4.042	0.4487	4.066	0.1110	1.039	...	...	0.2459
37	2.653	4.713	0.2422	8.086	8.467	0.1996	0.4996	0.01823	5.430e+3	1.000	-8.400	3.978	0.4214	4.000	0.1059	1.039	...	...	0.2500
38	2.613	4.739	0.2386	8.082	8.465	0.1963	0.4998	0.01793	5.548e+3	1.000	-6.400	3.915	0.3965	3.936	0.1020	1.039	...	...	0.2541
39	2.578	4.750	0.2386	8.084	8.467	0.1932	0.4993	0.01764	5.670e+3	1.000	-4.400	3.859	0.3745	3.877	0.09705	1.044	...	...	0.2579
40	2.513	4.719	0.2354	8.085	8.467	0.1909	0.5001	0.01743	5.789e+3	1.000	-2.400	3.805	0.3526	3.822	0.09331	1.044	...	...	0.2616
41	2.548	4.723	0.2327	8.084	8.466	0.1876	0.4996	0.01713	5.912e+3	1.000	-0.4000	3.745	0.3305	3.760	0.09092	1.039	...	...	0.2659
42	2.583	4.736	0.2359	8.085	8.468	0.1842	0.5005	0.01682	6.030e+3	1.000	2.800	3.674	0.3231	3.688	0.08796	1.044	...	...	0.2712
43	2.913	4.734	0.2660	8.200	8.588	0.1779	0.4994	0.01624	6.101e+3	1.000	3.000	3.555	0.2994	3.568	0.08420	1.384	...	...	0.2803
44	2.528	4.753	0.2308	8.078	8.462	0.1809	0.4999	0.01652	6.277e+3	1.000	5.600	3.614	0.2845	3.626	0.08150	1.029	...	...	0.2758
45	2.523	4.773	0.2304	8.082	8.467	0.1795	0.5000	0.01639	6.392e+3	1.000	7.600	3.588	0.2808	3.599	0.07827	1.029	...	...	0.2778
46	2.528	4.745	0.2308	8.081	8.464	0.1787	0.4995	0.01632	6.514e+3	1.000	9.600	3.574	0.2732	3.584	0.07643	1.029	...	...	0.2790

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ตารางที่ 1 - แสดงค่าผลการทดสอบ DMTA ของยางผสมสูตรที่ไม่ได้มีการใส่เส้นใยพลาซาลงไป  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

61

No:	F stat. N	Strain stat. %	Stress stat. MPa	L0 mm	Lm mm	F dyn. N	Strain dyn. %	Stress dyn. MPa	Time sec	f Hz	T °C	E MPa	E' MPa	E'' MPa	E'  MPa	tan δ	F conl. N	T2 °C	T3 °C	μ'
47	2.523	4.748	0.2304	8.082	8.466	0.1777	0.4998	0.01622	6.630e+3	1.000	11.70	3.552	0.2892	3.552	0.07268	1.039	...	...	...	0.2808
48	2.523	4.746	0.2304	8.083	8.466	0.1771	0.4995	0.01617	6.749e+3	1.000	13.70	3.543	0.2821	3.552	0.07116	1.044	...	...	...	0.2815
49	2.518	4.741	0.2299	8.082	8.466	0.1765	0.5000	0.01612	6.868e+3	1.000	15.60	3.528	0.2493	3.537	0.07056	1.039	...	...	...	0.2827
50	2.528	4.730	0.2308	8.084	8.466	0.1763	0.5002	0.01610	6.984e+3	1.000	17.50	3.522	0.2453	3.531	0.06953	1.019	...	...	...	0.2832
51	2.518	4.727	0.2299	8.081	8.463	0.1756	0.4997	0.01604	7.112e+3	1.000	19.60	3.512	0.2377	3.520	0.06767	1.059	...	...	...	0.2841
52	2.513	4.723	0.2295	8.078	8.460	0.1753	0.4997	0.01600	7.231e+3	1.000	21.60	3.504	0.2332	3.512	0.06655	1.039	...	...	...	0.2847
53	2.498	4.713	0.2281	8.077	8.458	0.1749	0.5001	0.01597	7.351e+3	1.000	23.70	3.493	0.2298	3.501	0.06578	1.029	...	...	...	0.2856
54	2.523	4.728	0.2304	8.080	8.462	0.1739	0.4996	0.01588	7.467e+3	1.000	25.60	3.478	0.2215	3.485	0.06368	1.039	...	...	...	0.2869
55	2.513	4.755	0.2295	8.082	8.466	0.1733	0.4998	0.01583	7.590e+3	1.000	27.70	3.468	0.2187	3.475	0.06308	1.049	...	...	...	0.2878
56	2.523	4.724	0.2304	8.084	8.466	0.1729	0.4996	0.01579	7.709e+3	1.000	29.60	3.460	0.2170	3.466	0.06273	1.049	...	...	...	0.2885

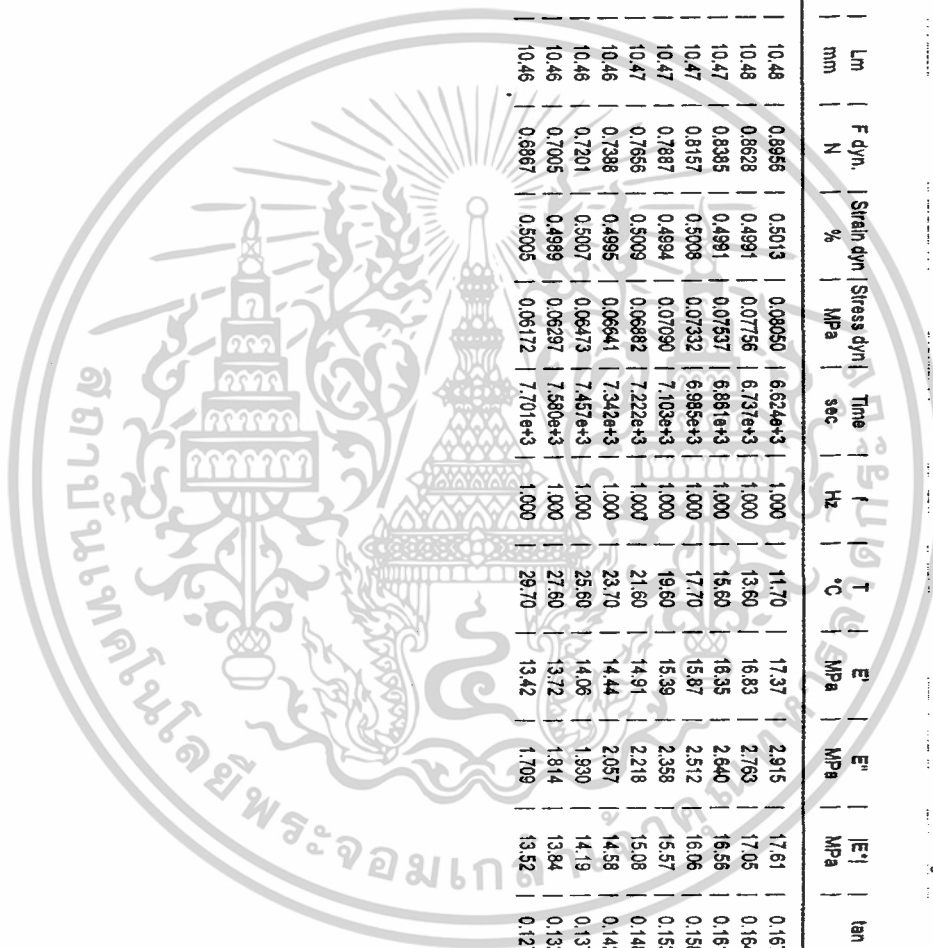
ตารางที่ ง - 1 แสดงค่าผลการทดสอบ DMTA ของยางผสมสูตรที่ไม่ได้มีการใส่เส้นใยพลาวยลงไป (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No:	F stat	Strain stat	Stress stat	Lo	Lm	F dyn	Strain dyn	Stress dyn	Time	f	T	E	E'	E''	tan δ	F cont.	T2	T3	μPa
	N	%	MPa	mm	mm	N	%	MPa	sec	Hz	°C	MPa	MPa	MPa		N	°C	°C	1/MPa
1	80.51	0.3594	7.237	9.778	9.813	50.00	0.1165	4.494	1.202e+3	1.000	-78.80	3.881e+3	219.8	3.887e+3	0.05663	1.039	...	...	2.879e-4
2	80.78	0.4262	7.281	9.772	9.814	50.00	0.1188	4.494	1.455e+3	1.000	-74.00	3.870e+3	221.6	3.877e+3	0.05723	1.089	...	...	2.880e-4
3	80.90	0.4205	7.218	9.752	9.793	50.00	0.1255	4.494	1.707e+3	1.000	-70.00	3.801e+3	272.8	3.811e+3	0.07575	1.109	...	...	2.789e-4
4	80.05	0.4445	7.196	9.757	9.801	49.99	0.1372	4.493	1.998e+3	1.000	-68.70	3.293e+3	370.4	3.304e+3	0.11128	1.089	...	...	3.027e-4
5	80.75	0.4945	7.258	9.800	9.848	49.91	0.2002	4.487	2.211e+3	1.000	-61.20	2.165e+3	6.592e+2	0.3045	0.3045	1.089	...	...	4.419e-4
6	80.02	0.7577	7.193	10.00	10.08	62.80	0.6920	5.445	2.484e+3	1.000	-58.20	6.961e+2	448.7	8.282e+2	0.6447	1.179	...	...	1.207e-3
7	80.03	2.112	7.194	10.50	10.72	26.86	0.5974	5.594	2.708e+3	1.000	-53.70	3.422	249.9	423.7	0.7303	1.384	...	...	2.360e-3
8	56.30	4.759	5.081	10.93	11.45	20.47	0.5439	1.840	2.786e+3	1.000	-52.30	308.1	207.4	371.4	0.6729	1.434	...	...	2.893e-3
9	43.26	4.759	3.889	11.02	11.54	15.79	0.5242	1.419	2.867e+3	1.000	-50.90	252.5	156.5	297.1	0.6199	1.449	...	...	3.366e-3
10	36.06	4.765	3.241	10.99	11.51	12.87	0.5196	1.157	2.948e+3	1.000	-48.60	210.6	123.7	244.3	0.5874	1.444	...	...	4.094e-3
11	30.81	4.730	2.278	10.94	11.45	10.73	0.5224	0.9647	3.028e+3	1.000	-48.30	176.6	99.19	202.6	0.5617	1.404	...	...	4.937e-3
12	27.25	4.772	2.450	10.88	11.40	8.984	0.5092	0.8078	3.105e+3	1.000	-47.00	153.1	82.94	174.1	0.5418	1.399	...	...	5.749e-3
13	24.49	4.766	2.201	10.83	11.35	7.805	0.5093	0.7016	3.184e+3	1.000	-45.80	133.8	70.44	151.2	0.5285	1.389	...	...	6.614e-3
14	22.49	4.741	2.022	10.79	11.30	6.796	0.5062	0.6055	3.262e+3	1.000	-44.40	117.2	59.07	134.2	0.5041	1.394	...	...	7.620e-3
15	20.69	4.729	1.860	10.75	11.26	5.898	0.5077	0.5301	3.340e+3	1.000	-43.20	103.1	49.82	114.5	0.4831	1.394	...	...	8.732e-3
16	19.47	4.712	1.750	10.72	11.23	5.181	0.5023	0.4657	3.419e+3	1.000	-41.70	92.43	42.36	101.7	0.4583	1.344	...	...	9.835e-3
17	18.21	4.731	1.637	10.69	11.20	4.656	0.5052	0.4185	3.496e+3	1.000	-40.30	83.33	36.23	90.86	0.4347	1.369	...	...	0.01101
18	17.61	4.737	1.583	10.68	11.18	4.219	0.5008	0.3792	3.574e+3	1.000	-39.00	76.99	31.18	83.07	0.4050	1.394	...	...	0.01204
19	17.10	4.724	1.537	10.66	11.17	3.908	0.5032	0.3513	3.650e+3	1.000	-37.90	71.80	27.14	76.57	0.3791	1.364	...	...	0.01306
20	16.49	4.684	1.482	10.64	11.14	3.591	0.5022	0.3228	3.728e+3	1.000	-36.50	66.41	23.51	70.45	0.3541	1.329	...	...	0.01419
21	16.06	4.700	1.443	10.63	11.13	3.349	0.5011	0.3010	3.809e+3	1.000	-35.30	62.57	20.53	65.85	0.3280	1.349	...	...	0.01519
22	15.66	4.721	1.408	10.62	11.12	3.152	0.5010	0.2834	3.879e+3	1.000	-34.00	59.32	18.11	62.02	0.3052	1.354	...	...	0.01612
23	15.43	4.689	1.387	10.61	11.11	2.995	0.4974	0.2692	3.954e+3	1.000	-33.00	57.06	16.21	59.32	0.2840	1.334	...	...	0.01666
24	15.24	4.705	1.370	10.60	11.10	2.895	0.5001	0.2602	4.030e+3	1.000	-32.00	55.14	14.62	57.04	0.2652	1.359	...	...	0.01753
25	14.96	4.720	1.345	10.59	11.09	2.762	0.4974	0.2463	4.105e+3	1.000	-30.50	53.14	13.14	54.74	0.2472	1.334	...	...	0.01827
26	14.70	4.728	1.322	10.58	11.08	2.654	0.4994	0.2385	4.182e+3	1.000	-29.20	51.06	11.68	52.38	0.2288	1.289	...	...	0.01909
27	14.52	4.710	1.305	10.57	11.07	2.543	0.4971	0.2286	4.251e+3	1.000	-27.90	49.31	10.47	50.41	0.2124	1.324	...	...	0.01984
28	12.79	4.705	1.150	10.47	10.96	2.264	0.4984	0.2056	4.341e+3	1.000	-26.40	43.80	9.167	44.75	0.2093	1.114	...	...	0.02235
29	12.01	4.731	1.080	10.38	10.87	2.072	0.4956	0.1863	4.447e+3	1.000	-24.60	40.45	7.924	41.22	0.1959	1.059	...	...	0.02426
30	11.71	4.704	1.053	10.32	10.81	1.971	0.5000	0.1772	4.581e+3	1.000	-22.80	38.23	6.879	38.84	0.1799	1.034	...	...	0.02574
31	11.41	4.737	1.026	10.29	10.78	1.877	0.4970	0.1687	4.708e+3	1.000	-20.30	36.72	6.181	37.23	0.1683	1.044	...	...	0.02866
32	11.17	4.735	1.004	10.27	10.76	1.817	0.5004	0.1634	4.824e+3	1.000	-18.40	35.36	5.665	35.81	0.1602	1.044	...	...	0.02793
33	10.90	4.723	0.9794	10.25	10.74	1.740	0.5001	0.1584	4.941e+3	1.000	-16.40	33.90	5.260	34.30	0.1552	1.044	...	...	0.02915
34	10.67	4.763	0.9588	10.23	10.72	1.671	0.5005	0.1502	5.061e+3	1.000	-14.40	32.57	4.946	32.94	0.1519	1.029	...	...	0.03036
35	10.34	4.735	0.9291	10.21	10.69	1.593	0.4978	0.1432	5.182e+3	1.000	-12.30	31.22	4.676	31.56	0.1498	1.029	...	...	0.03168
36	10.04	4.736	0.9026	10.19	10.67	1.525	0.4982	0.1370	5.300e+3	1.000	-10.40	29.84	4.487	30.18	0.1503	1.034	...	...	0.03314
37	9.677	4.731	0.8698	10.17	10.65	1.453	0.4979	0.1306	5.421e+3	1.000	-8.40	28.44	4.303	28.77	0.1513	1.029	...	...	0.03476
38	9.337	4.773	0.8393	10.14	10.63	1.387	0.4980	0.1246	5.543e+3	1.000	-6.400	27.16	4.135	27.47	0.1523	1.034	...	...	0.03640
39	9.008	4.762	0.8097	10.13	10.61	1.328	0.5008	0.1194	5.660e+3	1.000	-4.400	25.85	4.008	26.16	0.1550	1.034	...	...	0.03822
40	8.608	4.747	0.7737	10.10	10.58	1.256	0.4986	0.1129	5.780e+3	1.000	-2.400	24.54	3.905	24.85	0.1591	1.034	...	...	0.04025
41	8.223	4.741	0.7392	10.08	10.56	1.189	0.5017	0.1074	5.900e+3	1.000	-0.5000	23.27	3.778	23.57	0.1624	1.039	...	...	0.04242
42	7.908	4.719	0.7109	10.07	10.54	1.139	0.5008	0.1024	6.016e+3	1.000	2.300	22.10	3.652	22.40	0.1652	1.029	...	...	0.04464
43	7.744	4.751	0.6961	10.08	10.55	1.110	0.5008	0.09981	6.106e+3	1.000	3.000	21.57	3.590	21.87	0.1664	1.064	...	...	0.04573
44	7.269	4.760	0.6534	10.02	10.50	1.032	0.4990	0.09276	6.271e+3	1.000	5.600	20.11	3.414	20.40	0.1697	1.004	...	...	0.04992
45	7.039	4.724	0.6327	10.03	10.50	0.9890	0.5018	0.08990	6.383e+3	1.000	7.600	19.15	3.264	19.43	0.1704	1.034	...	...	0.05147
46	6.849	4.739	0.6157	10.01	10.49	0.9343	0.4993	0.08398	6.506e+3	1.000	9.600	18.19	3.081	18.45	0.1693	1.034	...	...	0.05420

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ตารางที่ 2 แสดงค่าผลการทดสอบ DMTA ของยางผสมคั่วที่มีการเติมเส้นใย 30 phr  
 เมื่อการเติม เส้นใย ออกทั้งที่มีเม็ดเคลือบและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No:	F stat.	Strain stat	Stress stat	Lo	Lm	F dyn.	Strain dyn	Stress dyn	Time	f	T	E'	E''	E'	tan δ	F cont.	T2	T3	μ'
	N	%	MPa	mm	mm	N	%	MPa	sec	Hz	°C	MPa	MPa	MPa		N	°C	°C	1/MPa
47	6.610	4.737	0.5941	10.01	10.48	0.8856	0.5013	0.08050	6.624e+3	1.000	11.70	17.37	2.915	17.61	0.1678	1.019	---	---	0.05677
48	6.440	4.749	0.5788	10.01	10.48	0.8628	0.4981	0.07756	6.737e+3	1.000	13.60	16.83	2.763	17.05	0.1642	1.019	---	---	0.05864
49	6.315	4.721	0.5676	10.00	10.47	0.8385	0.4981	0.07537	6.881e+3	1.000	15.60	16.35	2.640	16.56	0.1615	1.019	---	---	0.06038
50	6.240	4.749	0.5609	10.00	10.47	0.8157	0.5008	0.07332	6.985e+3	1.000	17.70	15.87	2.512	16.06	0.1583	1.039	---	---	0.06225
51	6.130	4.734	0.5510	9.99	10.47	0.7887	0.4994	0.07090	7.103e+3	1.000	19.60	15.39	2.358	15.57	0.1532	1.039	---	---	0.06421
52	6.035	4.755	0.5425	9.99	10.47	0.7656	0.5009	0.06882	7.222e+3	1.000	21.60	14.91	2.218	15.08	0.1488	1.029	---	---	0.06633
53	5.970	4.736	0.5366	9.990	10.46	0.7388	0.4995	0.06641	7.342e+3	1.000	23.70	14.44	2.057	14.58	0.1425	1.019	---	---	0.06857
54	5.880	4.761	0.5288	9.989	10.46	0.7201	0.5007	0.06473	7.457e+3	1.000	25.60	14.06	1.930	14.19	0.1373	1.029	---	---	0.07048
55	5.800	4.710	0.5214	9.987	10.46	0.7005	0.4989	0.06297	7.580e+3	1.000	27.60	13.72	1.814	13.84	0.1322	1.044	---	---	0.07226
56	5.725	4.720	0.5146	9.986	10.46	0.6867	0.5005	0.06172	7.701e+3	1.000	29.70	13.42	1.709	13.52	0.1274	1.024	---	---	0.07394



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ตารางที่ ง - 2 แสดงค่าผลการทดสอบ DMTA ของยางผสมสูตรที่มีการเติมเส้นใย 30 phr (ต่อ)  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.	F stat	Strain stat	Stress stat	Lo	Lm	F dyn	Strain dyn	Stress dyn	Time	f	T	E'	E''	E'	tan δ	F cont	T2	T3	μ'
	N	%	MPa	mm	mm	N	%	MPa	sec	Hz	°C	MPa	MPa	MPa		N	°C	°C	1/MPa
1	80.80	0.3715	7.252	9.304	9.339	50.00	0.1292	4.487	1.154e+3	1.000	-78.10	3.454e+3	182.4	3.459e+3	0.05220	1.099			2.858e-4
2	80.70	0.3946	7.242	9.291	9.327	50.00	0.1317	4.487	1.407e+3	1.000	-73.70	3.428e+3	201.1	3.434e+3	0.05867	1.034			2.912e-4
3	80.56	0.3832	7.230	9.271	9.308	50.00	0.1387	4.487	1.659e+3	1.000	-69.60	3.251e+3	282.5	3.251e+3	0.08076	1.094			3.066e-4
4	80.47	0.4238	7.222	9.283	9.322	49.98	0.1662	4.498	1.910e+3	1.000	-66.00	2.873e+3	365.1	2.896e+3	0.1271	1.104			3.453e-4
5	80.19	0.4623	7.197	9.352	9.395	49.87	0.2632	4.476	2.163e+3	1.000	-60.90	1.617e+3	5.766e+2	1.716e+3	0.3566	1.059			5.826e-4
6	80.35	1.001	7.211	9.779	9.877	49.53	0.4877	4.445	2.303e+3	1.000	-58.20	7.702e+2	5.209e+2	9.299e+2	0.6753	1.204			1.075e-3
7	74.32	5.034	6.570	10.36	10.88	23.08	0.5753	2.071	2.549e+3	1.000	-55.70	287.6	273.9	397.2	0.9524	1.374			2.518e-3
8	39.14	4.859	3.512	11.06	11.60	9.649	0.5717	0.8660	2.800e+3	1.000	-50.70	131.7	102.0	166.6	0.7746	1.464			6.004e-3
9	17.02	4.810	1.527	10.78	11.29	6.733	0.5306	0.6042	2.881e+3	1.000	-49.30	94.47	81.99	125.1	0.8679	1.484			7.994e-3
10	14.78	4.803	1.326	10.64	11.15	5.338	0.5210	0.4791	2.961e+3	1.000	-48.10	77.86	64.32	101.0	0.8260	1.414			9.902e-3
11	13.19	4.811	1.184	10.55	11.06	4.335	0.5167	0.3890	3.039e+3	1.000	-46.90	66.35	50.86	82.81	0.7783	1.439			0.01208
12	11.84	4.784	1.063	10.46	10.96	3.337	0.5103	0.3174	3.119e+3	1.000	-45.50	55.07	40.39	68.30	0.7334	1.404			0.01464
13	10.95	4.774	0.9823	10.41	10.90	2.937	0.5084	0.2636	3.198e+3	1.000	-43.90	47.06	32.03	56.93	0.6807	1.419			0.01757
14	10.09	4.745	0.9052	10.35	10.84	2.516	0.5066	0.2258	3.277e+3	1.000	-42.70	41.21	26.32	48.90	0.6388	1.389			0.02045
15	9.617	4.781	0.8631	10.31	10.81	2.214	0.5056	0.1987	3.355e+3	1.000	-41.70	37.06	22.05	43.12	0.5950	1.414			0.02319
16	9.332	4.750	0.8375	10.29	10.77	1.997	0.5054	0.1765	3.433e+3	1.000	-40.30	33.56	18.50	38.32	0.5514	1.379			0.02610
17	8.993	4.734	0.7990	10.26	10.75	1.754	0.5022	0.1574	3.510e+3	1.000	-39.10	30.51	15.53	34.37	0.5106	1.369			0.02910
18	8.653	4.737	0.7765	10.24	10.72	1.587	0.5031	0.1424	3.588e+3	1.000	-37.70	28.11	13.18	31.04	0.4690	1.374			0.03221
19	8.453	4.757	0.7566	10.22	10.70	1.453	0.5024	0.1304	3.665e+3	1.000	-36.40	26.18	11.25	28.49	0.4297	1.389			0.03510
20	8.208	4.774	0.7366	10.20	10.68	1.335	0.5005	0.1189	3.742e+3	1.000	-34.90	24.31	9.445	26.08	0.3885	1.349			0.03834
21	8.048	4.742	0.7223	10.18	10.66	1.244	0.4994	0.1116	3.818e+3	1.000	-33.60	23.09	8.266	24.53	0.3589	1.349			0.04077
22	7.923	4.722	0.7111	10.17	10.65	1.177	0.4992	0.1056	3.893e+3	1.000	-32.60	22.04	7.261	23.21	0.3289	1.369			0.04309
23	7.794	4.740	0.6994	10.15	10.63	1.118	0.4992	0.1003	3.968e+3	1.000	-31.30	21.11	6.358	22.04	0.3012	1.359			0.04536
24	7.644	4.721	0.6860	10.13	10.61	1.071	0.5004	0.09612	4.045e+3	1.000	-30.00	20.31	5.601	21.07	0.2758	1.349			0.04747
25	7.589	4.747	0.6810	10.12	10.60	1.029	0.4990	0.09233	4.121e+3	1.000	-28.70	19.68	4.992	20.30	0.2532	1.354			0.04926
26	7.484	4.721	0.6716	10.11	10.59	0.9934	0.4996	0.08916	4.198e+3	1.000	-27.50	19.05	4.467	19.57	0.2344	1.354			0.05110
27	7.359	4.719	0.6604	10.09	10.57	0.9598	0.4988	0.08614	4.274e+3	1.000	-26.10	18.51	4.024	18.94	0.2174	1.364			0.05280
28	7.284	4.755	0.6507	10.08	10.56	0.9314	0.4987	0.08359	4.351e+3	1.000	-24.90	18.03	3.656	18.39	0.2029	1.344			0.05436
29	7.214	4.732	0.6474	10.07	10.55	0.9088	0.4995	0.08156	4.428e+3	1.000	-23.60	17.59	3.356	17.91	0.1908	1.369			0.05584
30	7.094	4.738	0.6367	10.05	10.53	0.8820	0.4984	0.07916	4.503e+3	1.000	-22.40	17.14	3.117	17.42	0.1818	1.349			0.05740
31	6.200	4.753	0.5564	9.866	10.36	0.8193	0.4993	0.07353	4.617e+3	1.000	-20.50	15.92	2.789	16.16	0.1739	1.044			0.06188
32	6.160	4.719	0.5528	9.847	10.31	0.7940	0.5001	0.07125	4.680e+3	1.000	-19.40	15.48	2.596	15.68	0.1619	1.024			0.06370
33	6.090	4.746	0.5465	9.827	10.29	0.7742	0.4985	0.06876	4.748e+3	1.000	-18.30	14.65	2.388	14.80	0.1459	1.049			0.06560
34	5.965	4.741	0.5353	9.805	10.27	0.7495	0.4985	0.06572	4.814e+3	1.000	-17.40	14.55	2.198	14.52	0.1349	1.019			0.06755
35	5.875	4.746	0.5273	9.789	10.25	0.7311	0.5001	0.06361	4.880e+3	1.000	-12.40	14.25	2.009	14.39	0.1409	1.029			0.06947
36	5.815	4.736	0.5219	9.770	10.23	0.7094	0.4986	0.06366	4.945e+3	1.000	-10.40	13.88	1.898	14.01	0.1368	1.044			0.07140
37	5.740	4.723	0.5152	9.752	10.22	0.6936	0.5003	0.06225	5.034e+3	1.000	-8.400	13.53	1.796	13.65	0.1328	1.024			0.07328
38	5.650	4.754	0.5071	9.742	10.20	0.6746	0.4989	0.06055	5.119e+3	1.000	-6.400	13.21	1.714	13.32	0.1298	1.024			0.07510
39	5.605	4.749	0.5030	9.730	10.19	0.6599	0.5001	0.05923	5.194e+3	1.000	-4.400	12.89	1.635	12.99	0.1268	1.029			0.07696
40	5.505	4.751	0.4941	9.716	10.18	0.6437	0.4999	0.05777	5.270e+3	1.000	-2.400	12.61	1.576	12.70	0.1250	1.049			0.07871
41	5.421	4.764	0.4865	9.704	10.17	0.6300	0.4990	0.05654	5.342e+3	1.000	-0.4000	12.34	1.512	12.44	0.1225	1.019			0.08041
42	5.391	4.716	0.4838	9.704	10.16	0.6175	0.4999	0.05542	5.413e+3	1.000	2.100	12.09	1.460	12.18	0.1207	1.054			0.08210
43	5.321	4.729	0.4775	9.687	10.14	0.6089	0.4999	0.05465	5.486e+3	1.000	3.500	11.90	1.426	11.99	0.1196	1.019			0.08351
44	5.216	4.756	0.4681	9.677	10.14	0.5899	0.4991	0.05348	5.561e+3	1.000	5.600	11.68	1.370	11.76	0.1173	1.029			0.08505
45	5.171	4.751	0.4640	9.666	10.13	0.5858	0.5004	0.05257	5.632e+3	1.000	7.700	11.45	1.331	11.53	0.1163	1.019			0.08674
46	5.091	4.739	0.4569	9.666	10.12	0.5772	0.5000	0.05180	5.703e+3	1.000	9.800	11.29	1.294	11.36	0.1146	1.004			0.08800

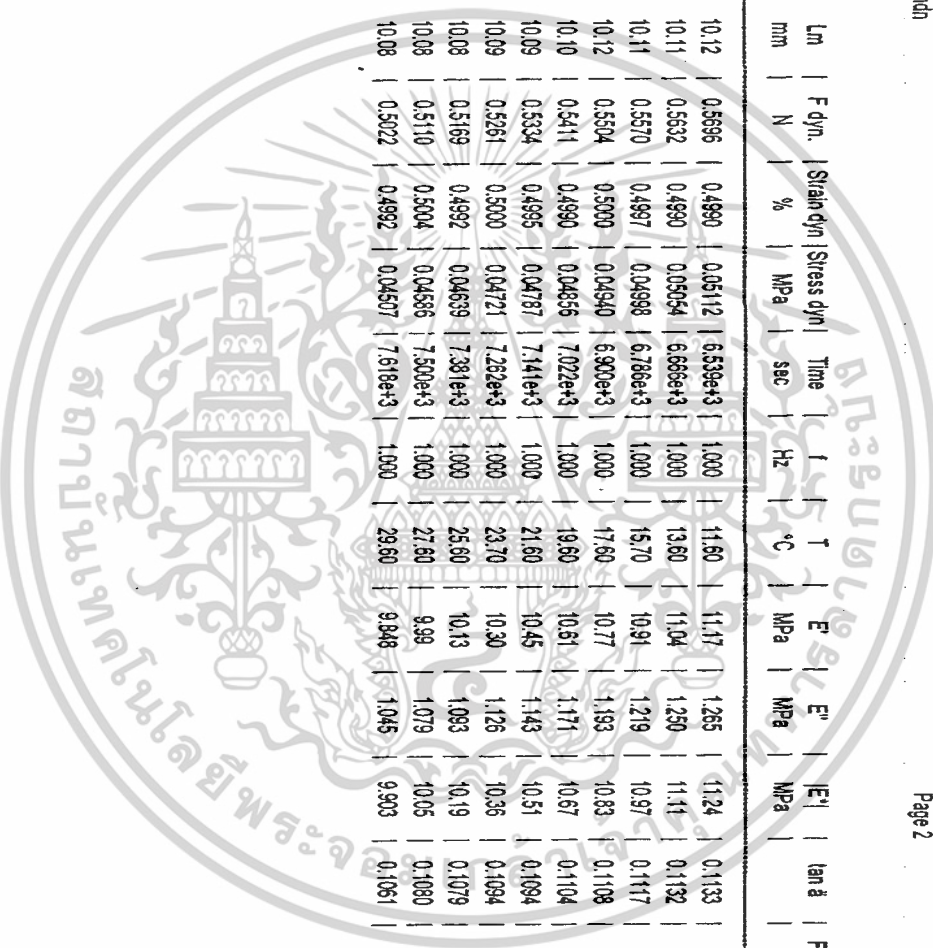
ตารางที่ 3 - แสดงค่าผลการทดสอบ DMTA ของยางผลมสุกที่ทำการเติมเส้นใย 30 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

และทรัพย์สิน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.	F stat.	Strain stat	Stress stat	Lo	Lm	F dyn.	Strain dyn	Stress dyn	Time	f	T	E'	E''	E'	tan δ	F cont.	T2	T3	μ'
	N	%	MPa	mm	mm	N	%	MPa	sec	Hz	°C	MPa	MPa	MPa		N	°C	°C	1/MPa
47	5076	4.739	0.4555	9.665	10.12	0.5696	0.4990	0.06112	6.539e+3	1.000	11.60	11.17	1.265	11.24	0.1133	1.034	---	---	0.08897
48	5031	4.728	0.4515	9.654	10.11	0.5632	0.4990	0.05054	6.666e+3	1.000	13.60	11.04	1.250	11.11	0.1132	1.054	---	---	0.09002
49	4991	4.735	0.4479	9.648	10.11	0.5570	0.4997	0.04998	6.786e+3	1.000	15.70	10.91	1.219	10.97	0.1117	1.034	---	---	0.09113
50	5071	4.722	0.4551	9.661	10.12	0.5504	0.5000	0.04640	6.900e+3	1.000	17.60	10.77	1.193	10.83	0.1108	1.064	---	---	0.09230
51	4911	4.713	0.4407	9.641	10.10	0.5411	0.4990	0.04656	7.022e+3	1.000	19.60	10.61	1.171	10.67	0.1104	1.054	---	---	0.09372
52	4881	4.739	0.4380	9.635	10.09	0.5334	0.4995	0.04787	7.141e+3	1.000	21.60	10.45	1.143	10.51	0.1094	1.019	---	---	0.09512
53	4776	4.722	0.4286	9.631	10.09	0.5261	0.5000	0.04721	7.262e+3	1.000	23.70	10.30	1.126	10.36	0.1094	1.024	---	---	0.09656
54	4766	4.735	0.4277	9.627	10.08	0.5169	0.4992	0.04639	7.381e+3	1.000	25.60	10.13	1.093	10.19	0.1079	1.034	---	---	0.09810
55	4696	4.713	0.4214	9.623	10.08	0.5110	0.5004	0.04686	7.500e+3	1.000	27.60	9.99	1.079	10.05	0.1060	1.044	---	---	0.09951
56	4666	4.737	0.4179	9.621	10.08	0.5022	0.4992	0.04607	7.618e+3	1.000	29.60	9.848	1.048	9.903	0.1061	1.034	---	---	0.1010

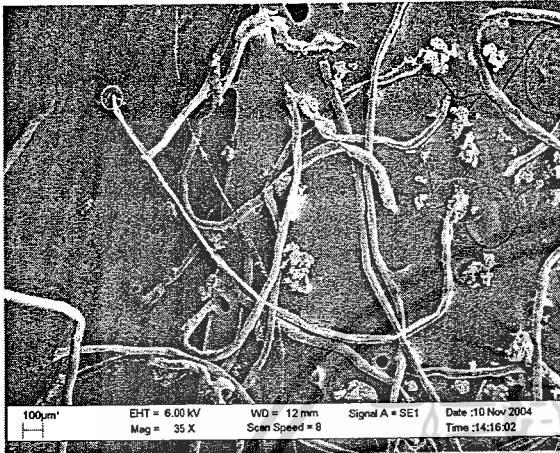


ตารางที่ 3 แสดงค่าผลการทดสอบ DMTA ของยางผสมสูตรที่มีการเติมเส้นใย 30 phr

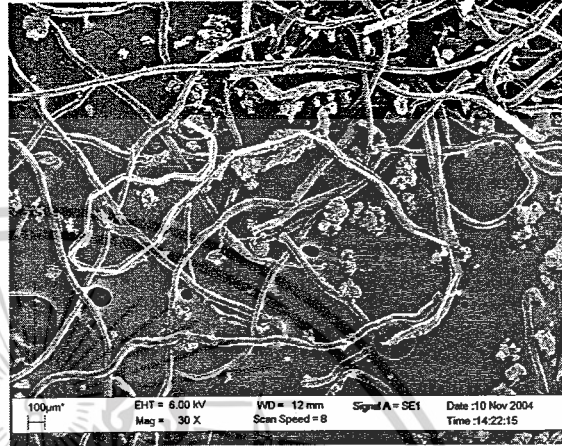
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

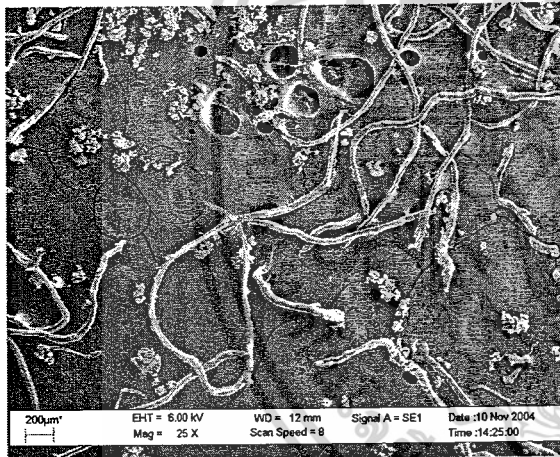
วิธีการหา Aspect ratio ( $l/d$  ratio) ของตัวอย่างเส้นใยพลาไค



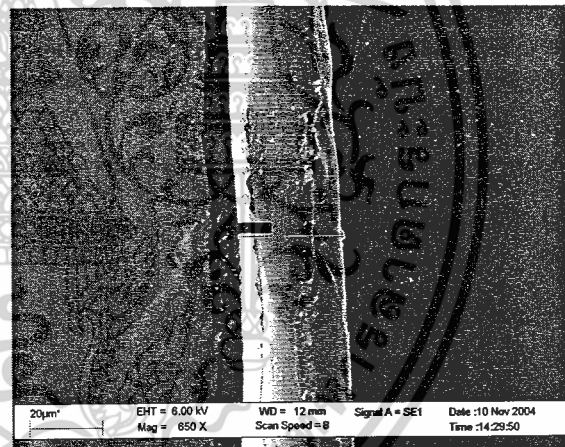
(a)



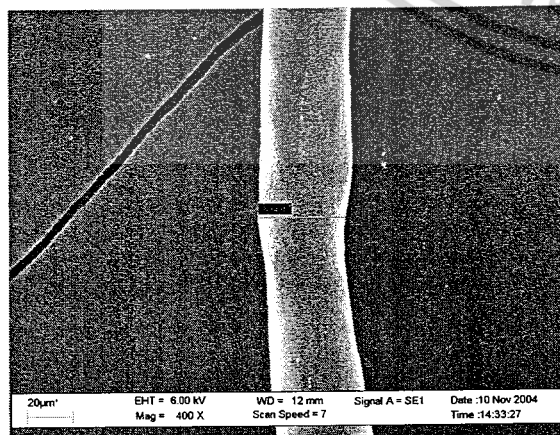
(b)



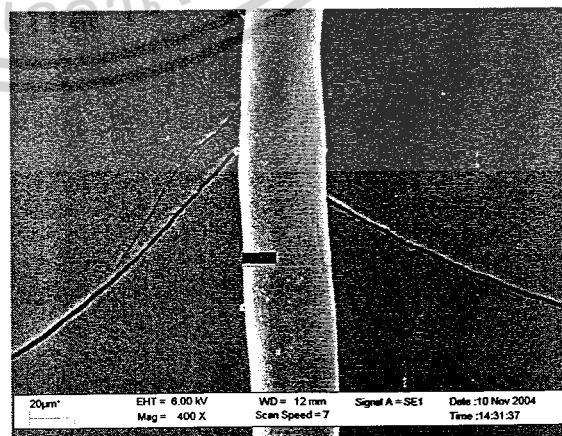
(c)



(d)

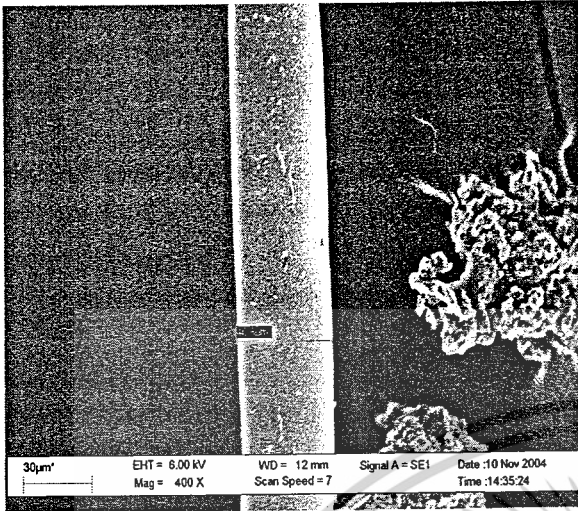


(e)



(f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(g)

- (a) เส้นใยพลาวยาว 2833.3 μm
- (b) เส้นใยพลาวยาว 4120.0 μm
- (c) เส้นใยพลาวยาว 4525.0 μm
- (d) เส้นใยพลาวยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 44.0 μm
- (e) เส้นใยพลาวยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.2 μm
- (f) เส้นใยพลาวยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 39.8 μm
- (g) เส้นใยพลาวยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40.8 μm

**รูปที่ ๑-1 SEM Micrographs** สัณฐานวิทยาของเส้นใยพลาวยละเอียด

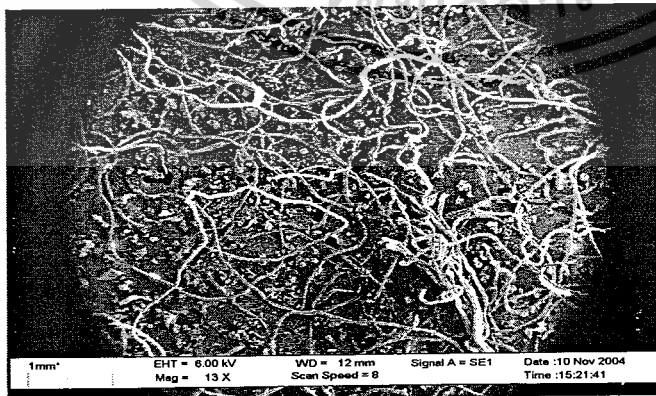
จากรูปสัณฐานวิทยาของเส้นใยพลาวยละเอียดสามารถหาค่าเฉลี่ยความยาวได้เท่ากับ 3826.1 μm และค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางได้เท่ากับ 38.45 μm

ค่า Aspect ratio หาได้

$$\text{Aspect ratio} = \text{length} / \text{diameter}$$

ดังนั้นเส้นใยพลาวยละเอียดจึงมีค่า Aspect ratio เท่ากับ  $(3826.1 \mu\text{m}) / (38.45 \mu\text{m}) = 99.5087$  ประมาณเท่ากับ 99.1

เส้นใยพลาวยหยาบมีค่า Aspect ratio ประมาณ 680



**รูปที่ ๑-2 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพลาวยหยาบ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้