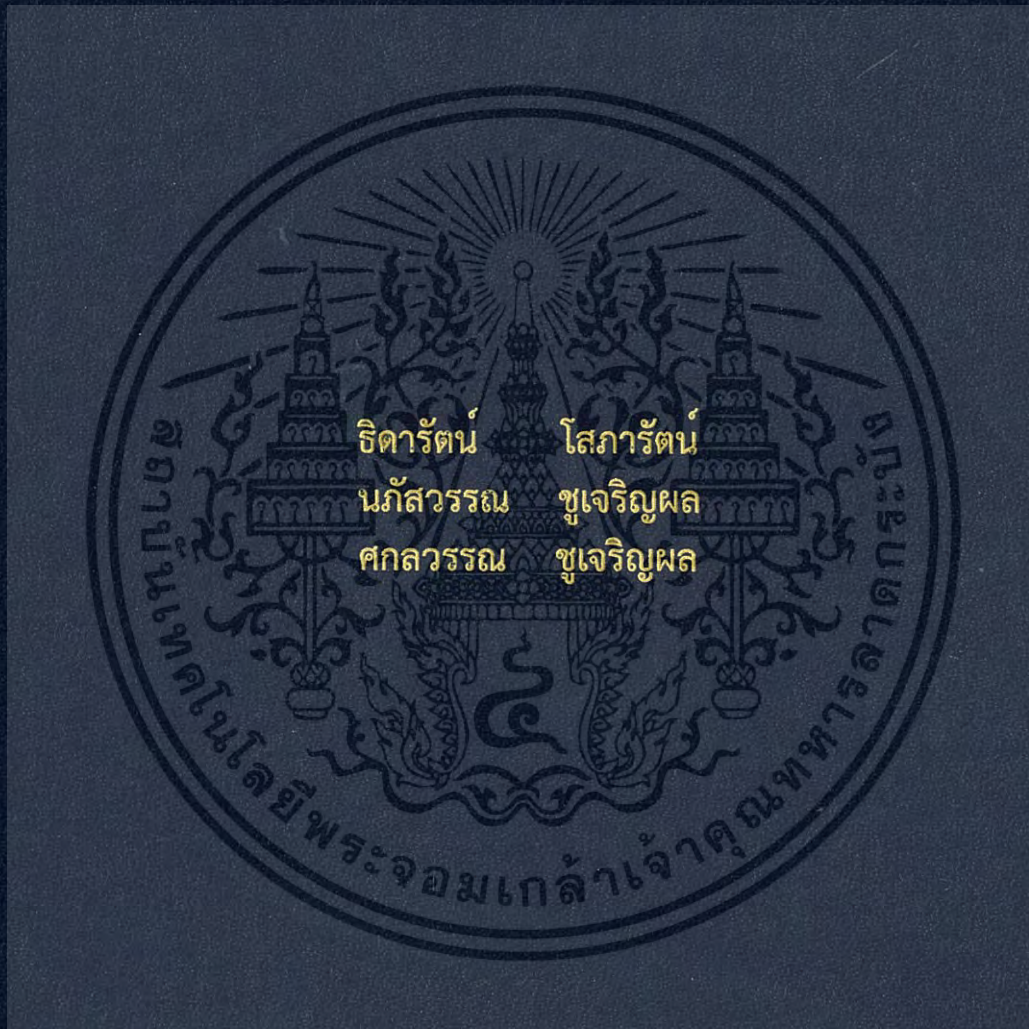


การศึกษาผงหนังชนิดฟอกผาดเป็นสารตัวเติม  
ในยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน

STUDY OF LEATHER FLOUR AS FILLER FOR  
ACRYLONITRILE BUTADIENE RUBBER



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาผงหนังชนิดฟอกฟาดเป็นสารตัวเติม  
ในยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน

STUDY OF LEATHER FLOUR AS FILLER FOR  
ACRYLONITRILE BUTADIENE RUBBER



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ปีการศึกษา 2558** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF LEATHER FLOUR AS FILLER FOR  
ACRYLONITRILE BUTADIENE RUBBER



THIDARAT SOPHARAT  
NAPATSAWAN CHOOJARURNPHON  
SAKONWAN CHOOJARURNPHON

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาผงหนังชนิดฟอกฟาดเป็นสารตัวเติม  
ในยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน

Study of Leather Flour as Filler for  
Acrylonitrile Butadiene Rubber

ชื่อนักศึกษา

นางสาว ธิดารัตน์ โสภารัตน์ รหัสนักศึกษา 55050685

นางสาว นกัสวรรค์ ชูเจริญผล รหัสนักศึกษา 55050698

นางสาว ศกวรรณ ชูเจริญผล รหัสนักศึกษา 55050808

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. อธิพิศ แจ้งชัด

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์ กรรมการ	
รศ.ดร. อธิพิศ แจ้งชัด กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาผงหนึ่งชนิดพอกผาดเป็นสารตัวเติม ในยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอิน		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธิดารัตน์	โสภารัตน์	รหัสนักศึกษา 55050685
	นางสาวนภัสวรรณ	ชูเจริญผล	รหัสนักศึกษา 55050698
	นางสาวศกวรรณ	ชูเจริญผล	รหัสนักศึกษา 55050808
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. อธิพิล แจ่มชัด		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์เศษผงหนึ่งพอกผาดที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้เป็นสารตัวเติมชีวภาพในยางไนไตรล์ (Acrylonitrile Butadiene Rubber; NBR) ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของยาง ได้แก่ ผลของการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG) และ Polyethylene wax (PE wax), ผลของปริมาณผงหนึ่ง (0-80 phr) และเปรียบเทียบการใช้ผงหนึ่งกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ ทำการเตรียมตัวอย่างโดยการผสมผงหนึ่งที่ร้อนขนาดเล็กกว่า 35 mesh สารเติมแต่งต่างๆ และยางไนไตรล์ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จากนั้นทำการศึกษาความหนืดมูนี (Mooney viscosity) และลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) ของยางผสมสูตร แล้วขึ้นรูปร่างผสมสูตรเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ทดสอบ Ageing การสึกหรอของพื้นผิววัสดุการดูดซึมน้ำ และศึกษาสัญญาณวิธาดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จากการศึกษาพบว่าเมื่อเติม PEG ทำให้ลดการดูดสารเชื่อมโยงยาง ทำให้เวลาเชื่อมโยงลดลงและสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรดีขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้แว็กซ์ส่งผลเชิงลบต่อการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกล เมื่อทำการเพิ่มปริมาณผงหนึ่งจาก 0 ถึง 80 phr พบว่าเกิดการเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพดีขึ้น และสมบัติเชิงกลดีขึ้นมีค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งกด และค่าความแข็งแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาดลดลง ผลจากการทดสอบ Ageing ที่ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมงพบว่าผงหนึ่งทำหน้าที่เป็น Antioxidant ได้เนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพช้าลง ในการศึกษาแนวเปรียบเทียบการใช้ผงหนึ่งกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ พบว่ายางผสมผงหนึ่งมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต แต่ไม่สามารถเทียบเท่าซิลิกาและเขม่าดำ จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าผงหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าผูกพันทางวิชาการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงชีวภาพสำหรับยางไนไตรล์ได้โดยเฉพาะกับการใช้งานที่ต้องการมอดูลัสของยางสูง ทนต่อการฉีกขาด แต่มีการยึดตัวต่ำ

คำสำคัญ : พอลิเอทิลีนไกลคอล, ผงหนังฟอกฝาด, ยางไนไตรล์, สารตัวเติมชีวภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Study of Leather Flour as Filler for Acrylonitrile Butadiene Rubber		
<b>Students</b>	Ms.Thidarat Sopharat	Student ID	55050685
	Ms.Napatsawan Choojarurnphon	Student ID	55050698
	Ms.Sakonwan Choojarurnphon	Student ID	55050808
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang(KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2015		
<b>Advisor</b>	Associate Professor Dr. IttipolJangchud		

### Abstract

This work was focused on utilization of vegetable tanned leather flour waste from leather industries as “bio-filler” for Acrylonitrile Butadiene Rubber (NBR). Factors affecting rubber properties were studied, such as, treatments of polyethylene glycol (PEG) and polyethylene wax (PE wax), and leather flour loading (0-80 phr). Comparative study between leather flour and other commercial fillers was also carried out. Samples were prepared by mixing leather flour (less than 35 mesh) and other additives with NBR using a two-roll mill. Rubber compounds were studied for Mooney viscosity and cure characteristics. Rubber samples were shaped into sheets by a compression molding machine. Vulcanizates were then tested for their properties, such as, mechanical properties, ageing properties, abrasion resistance, electric insulation, water absorption and morphology by SEM. It was found that the addition of PEG could prevent the leather flour to absorb curatives yielding a decrease in cure times and improved mechanical properties. However, addition of PE wax seemed to have negative effects on cure behaviors and mechanical properties. As the leather flour loading was increased from 0 to 80 phr, it was found that curing efficiency and mechanical properties were improved. Tensile strength, hardness and tear strength were increased whereas %elongation at break was decreased. In ageing test at 100 °C for 70 hrs, it was found that the leather flour seemed to show

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

antioxidant effects as the delay degradation was found. In comparative study between leather flour and other fillers, it was found that the leather flour was superior compared to  $\text{CaCO}_3$ , but it was outperformed by precipitate silica and carbon black. It can be concluded that the leather flour seems to be a promising candidate as bio-based reinforcing filler for NBR rubber whose applications require high rubber modulus, improved tear resistance, but low extension.

**Keywords :** Polyethylene glycol, Vegetable Tanned Leather Flour, Acrylonitrile Butadiene Rubber, Bio-filler



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากบุคลากรหลายฝ่ายซึ่งผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณรศ.ดร.อิทธิพลแจ้งชัดซึ่งเป็นอาจารย์ปรึกษาโครงการพิเศษผู้คอยให้ความช่วยเหลือด้านทฤษฎีและปฏิบัติการคอยแนะนำและให้คำปรึกษาในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณผศ.ดร.ชลลดาฤตวิรุฬห์และผศ.ดร.ปุณณมาศิริพันธ์โนนกรกรมการสอบโครงการพิเศษที่ให้ความกรุณาตรวจสอบโครงการพิเศษรวมถึงให้คำแนะนำเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอส.เค. โพลีเมอร์ จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์สารเคมีสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณสุนิธรศรีธาดาภูมิและห้างหุ้นส่วนจำกัดกรีชมณีโปรดักส์ที่ให้ความอนุเคราะห์ผนังและข้อมูลที่ใช้ประกอบการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคุณสุตาพรศักดิ์ศิธรและคุณเดชาธร ฉันทรักษ์ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะเกษประดิษฐ์ คุณสุตใจ สอนสะอาด และเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือสนับสนุนการทำโครงการพิเศษฉบับนี้มาตลอดจนสำเร็จสมบูรณ์

ธิดารัตน์ โสภารัตน์  
นภัสวรรณ ชูเจริญผล  
ศกลวรรณ ชูเจริญผล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป .....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>5</b>
2.1 ยางไนไตรล์ .....	5
2.1.1 ประวัติความเป็นมา .....	5
2.1.2 โครงสร้างทางเคมีและสมบัติ .....	5
2.1.3 การผสมเคมียางไนไตรล์ .....	6
2.1.4 การใช้งานยางไนไตรล์ .....	7
2.2 สารเคมีสำหรับยาง .....	8
2.2.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing or curing agent) .....	8
2.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators) .....	10
2.2.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activators) .....	12
2.2.4 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) .....	12
2.2.5 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) .....	14
2.2.6 พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol) .....	14
2.2 แร็กซ์ .....	15
2.3.1 พอลิเอทิลีนแร็กซ์ (Polyethylene wax) .....	16
2.3.2 การใช้งานแร็กซ์ .....	16
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของแร็กซ์ .....	17
2.4 หนังสัตว์ .....	17
2.4.1 องค์ประกอบและโครงสร้างของหนังสัตว์ .....	17
2.4.2 ประเภทของหนังสัตว์ .....	19
2.5 การฟอกหนังสัตว์ .....	21
2.5.1 การจัดเตรียมหนังก่อนฟอก (Beam house process) .....	21
2.5.2 การฟอก (Tanning process) .....	22

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 การพอกซ้ำย้อมสีให้น้ำมันและการตกแต่งหนัง (Finishing process)	24
2.6 แทนนิน(Tannin) .....	25
2.6.1 ไฮโดรไลเซเปิลแทนนิน .....	25
2.6.2 คอนเดนส์แทนนิน .....	27
2.6.3 ประโยชน์ของแทนนิน .....	28
2.6.4 พันธะระหว่างแทนนินและโปรตีน .....	29
2.7 คอมโพสิต (Composites) .....	30
2.7.1 ชนิดของคอมโพสิต .....	30
2.7.2 องค์ประกอบของคอมโพสิต .....	30
2.8 การศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง .....	33
2.9 เขม่าดำ (Carbon black) .....	34
2.9.1 ชนิดและวิธีการผลิตเขม่าดำ .....	34
2.9.2 รูปร่างและโครงสร้างของเขม่าดำ .....	35
2.10 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) .....	36
2.11 ซิลิกา (Silica) .....	37
2.11.1 ลักษณะโดยทั่วไปของซิลิกา .....	38
2.11.2 ลักษณะทางเคมีของพื้นผิว .....	39
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	40
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>42</b>
3.1 สารเคมี .....	42
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ .....	45
3.3 วิธีการทดลอง .....	46
3.3.1 การเตรียมผงหนัง .....	46
3.3.2 การเตรียมยางผสมสูตรและการขึ้นรูปยางผสมสูตร .....	46
3.3.3 การศึกษาผลของผงหนังที่มีผลต่อยางไนไตรล์ .....	49
3.3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล .....	50
3.3.5 การวิเคราะห์ผงหนังด้วยเทคนิค TGA .....	50
3.3.6 การทดสอบสัณฐานวิทยา .....	52
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย .....</b>	<b>53</b>
4.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา .....	54
4.2 ผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์ .....	55
4.2.1 การศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง .....	56
4.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล .....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลของปริมาณผงหนังฟอกฝาดที่ 0, 30, 60 และ 80 phr .....	63
4.3.1 การศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง .....	63
4.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล .....	66
4.3.4 การศึกษาสัณฐานวิทยา .....	70
4.3.5 การทดสอบอายุการใช้งาน (Ageing test) .....	71
4.4 ผลของการใช้ผงหนังฟอกฝาดในยางไนไตรล์เทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น .....	75
4.4.1 การศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง .....	75
4.4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล .....	77
4.4.3 การทดสอบอายุการใช้งาน (Ageing test) .....	80
4.4.4 การทดสอบการสึกหรอของพื้นผิววัสดุ .....	84
4.4.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำ .....	86
4.4.7 การวิเคราะห์ต้นทุน และสมบัติของยางผสมสูตร .....	87
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>88</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	88
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	89
<b>เอกสารอ้างอิง</b> .....	<b>90</b>
<b>ภาคผนวก</b> .....	<b>94</b>
ภาคผนวก ก. การตรวจวิเคราะห์ผงหนังและยางไนไตรล์ผสมผงหนังด้วยเทคนิคทาง ความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA).....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของพอลิเอทิลีนไกลคอล-4000 .....	15
2.2 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดต่างๆ .....	37
3.1 สมบัติบางประการของ PE Wax: WD2040P® .....	43
3.2 สมบัติบางประการของซิลิกา (Tokusil® UR-T) .....	43
3.3 สมบัติบางประการของเขม่าดำ (N 330) .....	44
3.4 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนต เกรด Calflex® -C .....	44
3.5 สูตรผสมยางในการทดลองศึกษาผลของผงหนังในยาง .....	48
3.6 สูตรผสมยางในการทดลองสำหรับศึกษาผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์ .....	49
3.7 สูตรผสมยางในการทดลองสำหรับศึกษาผลของปริมาณผงหนัง .....	49
3.8 สูตรผสมยางในการทดลองสำหรับศึกษาผลของชนิดของสารตัวเติม.....	50
4.1 อักษรย่อของสูตรที่ใช้ในงานวิจัย .....	53
4.2 ค่าความหนืดและพฤติกรรมการเชื่อมโยงผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์ .....	57
4.3 ค่าความหนืดและพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร ผลของการเติมปริมาณผงหนังที่ต่างกัน .....	64
4.4 Effluents from Tanning and Leather Finishing Processes .....	65
4.5 ค่าความหนืดและพฤติกรรมการเชื่อมโยงผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิด .....	76
4.6 ค่า%retention ของยางไนไตรล์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ .....	81
4.7 ค่าการสึกหรอของยางผสมสูตรผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน.....	85
4.8 ค่า Mohs hardness ของสารตัวเติม.....	85
4.9 ราคาวัตถุดิบรวมที่ใช้ในการผลิตยางผสมสูตร .....	87

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ผนังคิบบที่ไม่ผ่านการพอก .....	1
2.1 โครงสร้างของยางไนไตรล์ .....	5
2.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยางไนไตรล์ .....	8
2.3 โครงสร้างสารไดเบนโซโทอะซีลไดซัลไฟด์ .....	11
2.4 โครงสร้างสารเทตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์ .....	11
2.5 โครงสร้างของ (a) น้ำมันอะโรมาติก (b) น้ำมันแนฟทานิก และ (c) น้ำมันพาราฟิน .....	13
2.6 ชนิดและโครงสร้างของกรดอะมิโน .....	18
2.7 การยึดเกาะกันด้วยพันธะเปปไทด์ของโมเลกุลกรดอะมิโน .....	18
2.8 ขั้นตอนการเตรียมหนังก่อนพอก (Beamhouse process) .....	22
2.9 ขั้นตอนการพอกโครม .....	23
2.10 ขั้นตอนการพอกฝาด .....	24
2.11 โครงสร้างทางเคมี (A) Gallic acid และ (B) Ellagic acid .....	27
2.12 โครงสร้างทางเคมีของคอนเดนซ์แทนนิน .....	27
2.13 การยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนของคอลลาเจนในหนังกับแทนนิน .....	29
2.14 ตัวอย่าง Cure curve แสดงลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) .....	33
2.15 โครงสร้างของเขม่าดำ .....	35
2.16 การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลิกา .....	39
2.17 ลักษณะของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกา .....	39
4.1 สัณฐานวิทยาของเศษผงหนังพอกฝาด (ก1) L35 และ (ข1) L35W กำลังขยาย 100 เท่า (ก2) L35 และ (ข2) L35W กำลังขยาย 500เท่า .....	54
4.2 การยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนของคอลลาเจนในหนังกับแทนนิน .....	55
4.3 กราฟการเชื่อมโยงของยางไนไตรล์ผสมผงหนัง 30 phrแสดงผลของการใช้ PEG และแวกซ์สังเคราะห์ .....	57
4.4 การป้องกันการดูดซับสารกระตุ้นและสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของ PEG .....	58
4.5 การป้องกันการดูดน้ำของแวกซ์ .....	58
4.6 ค่าความแข็งแรงดึงของยางไนไตรล์ผสมสูตร: ผลของการใช้ PEG และแวกซ์สังเคราะห์ .....	60
4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดขาดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้ PEG และแวกซ์สังเคราะห์ .....	60

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้ PEG และแวกซ์สังเคราะห์ .....	61
4.9 ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% (M100) ของยางผสมสูตร: ผลของการใช้ PEG และแวกซ์สังเคราะห์ .....	61
4.10 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้ PEG และแวกซ์สังเคราะห์ .....	62
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางกับสมบัติเชิงกลบางประการของยาง .....	62
4.12 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร: ผลของการเติมปริมาณผงหนัฟกฝาดที่ต่างกัน .....	64
4.13 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนัฟกฝาดต่างกัน .....	67
4.14 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนัฟกฝาดต่างกัน .....	67
4.15 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนัฟกฝาดต่างกัน .....	68
4.16 ค่ามอดุลัสของยางที่ 50% (M50) และ 100% (M100) ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนัฟกฝาดต่างกัน .....	68
4.17 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนัฟกฝาดต่างกัน .....	69
4.18 สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตร (ก1) NBR-L30P และ (ข1) NBR-L80P กำลังขยาย 100 เท่า (ก2) NBR-L30P และ (ข2) NBR-L80P กำลังขยาย 2000 เท่า .....	70
4.19 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนัฟกฝาดต่างกัน ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C .....	72
4.20 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนัฟกฝาดต่างกัน ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C .....	72
4.21 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนัฟกฝาดต่างกัน ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C .....	73
4.22 ค่ามอดุลัสของยางที่ 50% (M50) ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนัฟกฝาดต่างกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C .....	73
4.23 ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% (M100) ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนัฟกฝาดต่างกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C .....	74
4.24 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนัฟกฝาดต่างกัน ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C .....	74
4.25 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน .....	76
4.26 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน .....	78
4.27 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน .....	78

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน .....	79
4.29 ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% (M100) ของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน .....	79
4.30 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน .....	80
4.31 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C .....	82
4.32 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C .....	82
4.33 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C .....	83
4.34 ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% (M100) ของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C .....	83
4.35 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C .....	84
4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวันที่แช่น้ำกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป .....	86

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

มนุษย์นั้นผูกพันกับเครื่องหนังมาตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์ จนมาถึงสมัยยุคปัจจุบัน สมัยก่อนเป็นการใช้งานหนังดิบ หรือหนังที่ยังไม่ผ่านการฟอก โดยกรรมวิธีในการฟอกหนังสมัยก่อนแต่เดิมอาจเกิดขึ้นโดยบังเอิญจากการริเริ่มการนำหนังสัตว์มาแปรรูปเปลี่ยนให้ได้สภาพหนังที่สวยงามขึ้น ซึ่งกรรมวิธีแรกๆ ตามบันทึกของประวัติศาสตร์นั้นมีทั้งกรรมวิธีในการใช้สีจากต้นไม้ในการย้อมซึ่งแผ่นหนังที่ได้ไม่สามารถกันน้ำได้ รวมถึงกรรมวิธีในการดูแลให้หนังสัตว์มีความอ่อนนุ่ม โดยการแช่ในไขมันสัตว์ต่อมาในช่วงยุคกลางเป็นยุคที่งานช่างหนัง และช่างฟอกหนังเจริญที่สุด ศิลปะการฟอกหนังตามประวัติศาสตร์ที่ค้นพบ มีหลักฐานว่าชนเผ่าฮิบรูซึ่งเป็นชนชาติแรกที่คิดค้นวิธีการฟอกหนังจากพืชได้ (เปลือกต้นโอ๊ค) หรือ “ฝาด” [1] และพบว่าเปลือกไม้จากต้นเฮมล็อกและเปลือกไม้ของต้นเชสนท์ก็สามารถใช้เป็นตัวฟอกในการฟอกได้อย่างดีเช่นกัน



รูปที่ 1.1 หนังดิบที่ไม่ผ่านการฟอก [1]

การฟอกฝาด (Vegetable Tanning) การฟอกประเภทนี้จะนำสารสกัดประเภทแทนนิน (Tannins) ซึ่งสกัดได้จากเปลือกไม้พวักยูคาลิปตัส ครีบราโค และอื่นๆ มาเป็นตัวฟอก ทำได้ในถังไม้ป็นหรือบ่อคอนกรีตที่ต่อแบบอนุกรม ทั้งนี้ น้ำที่ใช้ฟอกแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้ อีก เพราะสารที่ใช้ฟอกนั้นเป็นสารธรรมชาติจากนั้นได้มีการสืบทอดกรรมวิธีเช่นนี้ จากรุ่นสู่รุ่นและแผ่ขยายมายังทวีปยุโรป กรรมวิธีในการฟอกหนังจึงได้รับการพัฒนาขึ้นและได้กลายมาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการค้าในช่วงยุคกลาง โดยเฉพาะในช่วงศตวรรษที่ 19 ประเภทหนังฟอกฝาดได้ถือกำเนิดขึ้นอย่างเป็นทางการ ซึ่งเป็นการฟอกหนังแบบธรรมชาติที่ได้รับความนิยมมากในช่วงนั้นต่อมาจึงได้มีวิธีการคิดค้นโดยการใช้สารเคมีในการฟอกทดแทนการฟอกแบบธรรมชาติมากขึ้นเพราะวัตถุดิบจากธรรมชาติหาได้ยากขึ้น [2-3]

หนังสัตว์ (Leather) เป็นวัตถุดิบธรรมชาติชนิดหนึ่งที่มีความคงทน และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายหนังสัตว์มีส่วนประกอบหลัก คือเส้นใยคอลลาเจน (Collagen) ที่เกิดการเชื่อมโยงอยู่ในรูปโครงสร้างร่างแห 3 มิติ โดยหนังสัตว์ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปก่อนด้วยการฟอกหนัง โดยการฟอกหนังเป็นการเปลี่ยนสภาพหนังดิบ ซึ่งเน่าเปื่อยได้ให้เป็นหนังสำเร็จที่คงตัวกว่า ไม่เน่าเปื่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความทนทานต่อสภาพอากาศและน้ำร้อน เพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หนังต่างๆและการแปรรูปจากหนังฟอกสำเร็จรูปไปเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องหนัง จะพบว่ามีเศษผงหนังที่เกิดจากการขัดผิวและการตัดแต่งริมแผ่นหนังจำนวนมาก ซึ่งเศษผงหนังที่ได้ส่วนมากมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 500 ไมครอน

อุตสาหกรรมหนังและเครื่องหนัง เป็นอุตสาหกรรมการเกษตร (Agro industry) ที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมากประเภทหนึ่ง โดยเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับหนังสัตว์ จากการนำหนังดิบอันเป็นผลพลอยได้จากการแปรรูปสัตว์ มาผลิตเป็นหนังฟอกชนิดต่างๆ และยังก่อให้เกิดอุตสาหกรรมต่อเนื่องที่สร้างมูลค่าเพิ่มได้อีกมากในอุตสาหกรรมเครื่องหนังหลากหลายประเภท เช่น รองเท้าหนัง กระเป๋าหนัง เสื้อหนัง ถุงมือหนัง สายนาฬิกาหนัง เฟอร์นิเจอร์หนัง เป็นต้น โดยผลผลิตมีทั้งจำหน่ายในประเทศและส่งออก เป็นแหล่งรายได้และสามารถนำเงินตราต่างประเทศเข้ามาปีละประมาณ 20,000 ล้านบาท [6] การผลิตเครื่องหนังของไทยในปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาทั้งด้านคุณภาพและรูปแบบ โดยมีการนำเครื่องจักรและเทคโนโลยีใหม่ๆมาใช้ในการผลิตมากขึ้น รวมทั้งการคัดเลือกวัตถุดิบ หนังดิบและหนังฟอกที่มีคุณภาพสูงโดยนำเข้าจากต่างประเทศมาผลิตจึงทำให้เกิดเศษผงหนังจากอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมากซึ่งเศษผงหนังเหล่านี้มีการนำไปใช้ประโยชน์เพียงเล็กน้อย ส่วนใหญ่จะกลายเป็นขยะที่ต้องใช้เงินจำนวนมากในการกำจัด [4] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเศษผงหนังฟอกผัดจากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยใช้เป็นสารตัวเติมชีวภาพ (Bio-filler) ในยางไนไตรล์ (Nitrile rubber) เพื่อลดปริมาณขยะที่เกิดจากกระบวนการผลิต เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษผงหนังหนังสัตว์มีส่วนประกอบหลัก คือเส้นใยคอลลาเจน (Collagen) ซึ่งเป็นโปรตีนในกลุ่มโปรตีนเส้นใยประกอบด้วยกรดอะมิโนที่เรียงต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ (Peptide bond) เป็นสายพอลิเพปไทด์และเมื่อทำการฟอกหนังสัตว์ด้วยแทนนินที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ (Free hydroxyl groups) จึงเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่เอไมด์ในโปรตีนกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแทนนิน ซึ่งหมู่เอไมด์และหมู่ไฮดรอกซิลมีขั้วสูงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ง่าย ดังนั้นเศษผงหนังฟอกผัดจึงสามารถดูดน้ำได้ง่ายและทำให้เศษผงหนังฟอกผัดกับยางไนไตรล์ที่มีขั้วสามารถเข้ากันได้ดี

การเลือกชนิดและปริมาณของสารตัวเติมขึ้นอยู่กับนำไปใช้ในงานของผลิตภัณฑ์เป็นปัจจัยหลัก [5] โดยสารตัวเติมที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบัน คือ เขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica) และ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) เป็นต้น เขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่มีการใช้งานในทางอุตสาหกรรมมากที่สุด เนื่องจากมีสมบัติการเสริมแรงที่ดีแต่เขม่าดำได้มาจากการเผาของน้ำมันปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หมดไป (Non-renewable source) และใช้พลังงานในการผลิตสูง มีราคาขึ้นลงตามราคาน้ำมัน ในขณะที่ซิลิกาจัดเป็นสารเสริมแรงอีกตัวหนึ่งที่มีการใช้งานมาก เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลที่ตรงจากเขม่าดำ และสามารถปรับแต่งสีขึ้นงานได้ง่าย แต่ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีขั้วสูงก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องการเกาะกลุ่มกัน และการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง อีกทั้งยังมีราคาต่อหน่วยที่ค่อนข้างสูง

จากงานวิจัยของสุตภาพ ศักดิ์ศิธร [6] ศึกษาการใช้ผงหนังชนิดฟอกผัดเป็นสารตัวเติมสำหรับยางธรรมชาติ (NR) โดยทำการศึกษาผลของการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และแว็กซ์สังเคราะห์ (PE wax และ OPE wax) ผลของปริมาณแว็กซ์สังเคราะห์ (OPE wax 1, 2 และ 3 phr) ผลของขนาดอนุภาคผงหนัง (เล็กกว่า 35, 51-100, 101-150 และ 151-200 mesh) ผลของปริมาณผงหนัง

(30 และ 100 phr) และผลของวิธีการปรับปรุงพื้นผิวผงหนัง พบว่าการเติม PEG และแว็กซ์สังเคราะห์ (PE wax และ OPE wax) ส่งผลให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงยาลดลงและสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรดีขึ้น โดย PE wax ใช้เวลาเชื่อมโยงน้อยกว่า เมื่อศึกษาปริมาณ OPE wax 1, 2, และ 3 phr พบว่าปริมาณ OPE wax ที่มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมโยงดีขึ้น ความหนาแน่นการเชื่อมโยงมากขึ้น การเติมผงหนังขนาดเล็กกว่า 35 mesh ทำให้เกิดการเชื่อมโยงอย่างรวดเร็วกว่าเล็กน้อยและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ในการศึกษาปริมาณผงหนังระหว่าง 30 และ 100 phr พบว่าปริมาณผงหนังที่มากขึ้นส่งผลทำให้การเชื่อมโยงยาลง และสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรลดลง และเมื่อศึกษาผลของวิธีการปรับปรุงพื้นผิวผงหนังพบว่าผงหนังที่ได้รับการเคลือบพื้นผิวด้วย OPE wax และเติมผง PEG ตอนผสมสูตรยาง มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และจากงานวิจัยพบว่าการใช้ผงหนังสามารถดูน้ำได้ง่าย เนื่องจากมีขี้วทำให้ไม่สามารถเข้ากันได้กับยางธรรมชาติที่ไม่มีขี้ว

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากสมมติฐานที่ว่าสารตัวเติมที่มีขี้วมีอันตรกิริยาและเสริมแรงได้ดีกว่ากับยางที่มีขี้วเทียบกับยางที่ไม่มีขี้ว [6] โดยผงหนังมีความเป็นขี้วที่สูงจากโครงสร้างเคมีของคอลลาเจนและสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน จึงเป็นที่น่าสนใจในการทดลองใช้ผงหนังกับยางที่มีขี้ว ในวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ ซึ่งเป็นยางที่มีขี้ว อาจส่งผลให้เกิดอันตรกิริยากับผงหนังที่ดีกว่ายางธรรมชาติโดยทำการศึกษาผลของการเติม PEG และแว็กซ์สังเคราะห์ (Polyethylene wax; PE wax) ผลของปริมาณผงหนัง และเปรียบเทียบการใช้ผงหนังพอกผาดกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ เพื่อนำยางผสมสูตรไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเป็นวัสดุทดแทนหรือเพื่อใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาการใช้ผงหนังชนิดฟอกผาดเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ (NBR) โดยศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวผงหนังด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และแว็กซ์สังเคราะห์ (PE wax) ผลของปริมาณผงหนังและการเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1). ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 2). เตรียมตัวอย่างโดยใช้เครื่องบดผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine)
- 3). ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยางผสมสูตร ดังนี้
  - ผลของการเติม PEG และแว็กซ์สังเคราะห์ (PE wax)
  - ผลของปริมาณผงหนังฟอกผาด (0, 30, 60 และ 80 phr)
  - ผลของการเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้าชนิดอื่นในยางไนไตรล์
- 4). ศึกษาสมบัติต่างๆ ของยางที่เตรียมได้โดยทำการทดสอบ ดังนี้
  - ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)
  - ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) ได้แก่ เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time;  $t_{s2}$ ), เวลาเชื่อมโยง (Cure time;  $t_{c90}$ ) และอัตราเร็วในการเชื่อมโยง (Cure rate Index; CRI)
  - สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) โมดูลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (Rubber modulus; M100) ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ความแข็งกด (Hardness) การต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) และ Ageing properties
    - การดูดซึมน้ำ (Water absorption)
    - ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1). สามารถนำผงหนังฟอกผาดมาใช้เป็นสารตัวเติมชีวภาพ (Biofiller) สำหรับยางสังเคราะห์ที่มีขี้ผึ้ง เช่น NBR เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยางเชิงพาณิชย์ได้
- 2). เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษผงหนังช่วยเหลืออุตสาหกรรมหนังฟอกผาดช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งเกิดจากการกำจัดเศษผงหนังฟอกผาดที่เหลือจากอุตสาหกรรม
- 3). มีทางเลือกสำหรับการใช้สารตัวเติมชีวภาพราคาถูก สามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิต

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

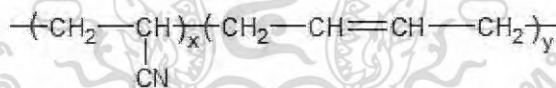
### 2.1 ยางไนไตรล์

#### 2.1.1 ประวัติความเป็นมา

ยางไนไตรล์นับเป็นยางใช้งานเฉพาะอย่างเพื่อวัตถุประสงค์หลัก โดยเฉพาะด้านการทนน้ำมัน ทนต่อตัวทำละลายเชื้อเพลิงและจาระบี ยางไนไตรล์เป็นยางที่สามารถใช้เทคโนโลยีตามแบบยางทั่วไป หลังจากการค้นพบวิธีการโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Co-polymerization) ของสไตรีน (Styrene) และ บิวทาไดอีน (Butadiene) ในปี พ.ศ. 2472 ทำให้สามารถเตรียมโคพอลิเมอร์ (Copolymer) ระหว่าง อะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) และบิวทาไดอีนได้สำเร็จในห้องปฏิบัติการในปี พ.ศ. 2473 หลังจากนั้น จึงได้ผลิตทางการค้าออกสู่ตลาดในชื่อของ Buna<sup>®</sup> N โดยบริษัทไบเออร์ จำกัด ในปี พ.ศ. 2483 และใช้ชื่อนี้มาจนถึงปัจจุบัน [7-8]

#### 2.1.2 โครงสร้างทางเคมีและสมบัติ [9]

ยางไนไตรล์เป็นโคพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile monomer) และ บิวทาไดอีน (Butadiene monomer) ซึ่งประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ตั้งแต่ 18-51% จากโครงสร้างโมเลกุล จะเห็นได้ว่าในส่วนของอะคริโลไนไตรล์มีหมู่ฟังก์ชัน -CN อยู่ทำให้โมเลกุลของยางชนิดนี้มีความเป็นขั้วสูง ยางชนิดนี้จึงมีสมบัติเด่นคือทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม และตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆได้ดี ในขณะที่ส่วนของบิวทาไดอีนเป็นส่วนที่ให้ความยืดหยุ่น และเป็นตำแหน่งที่โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงในปฏิกิริยาเชื่อมโยง โครงสร้างทางเคมีของยางไนไตรล์แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของยางไนไตรล์

สมบัติของยางไนไตรล์ แปรผันโดยตรงตามสัดส่วนของปริมาณอะคริโลไนไตรล์ที่มีอยู่ในโมเลกุล โดยทั่วไปเมื่อปริมาณของอะคริโลไนไตรล์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้สมบัติของยางไนไตรล์เปลี่ยนแปลงดังนี้

- ความทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียม และตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้น
- การกระด้างกระตอนต่ำลง
- การเปลี่ยนรูปถาวรน้อยลง
- การซึมผ่านของก๊าซลดลง
- ความทนทานต่อความร้อนสูงขึ้น
- ความทนทานต่อโอโซนสูงขึ้น
- ความแข็งและความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น
- ความต้านทานการขีดถูเพิ่มขึ้น
- ความหนาแน่นสูงขึ้น

นอกจากสมบัติต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ปริมาณอะคริโลไนไตรล์ยังส่งผลโดยตรงต่อค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) อีกด้วย กล่าวคือค่า  $T_g$  สูงขึ้นตามปริมาณอะคริโลไนไตรล์ที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปค่า  $T_g$  ของยางไนไตรล์อยู่ในช่วง  $-35$  ถึง  $0^\circ\text{C}$

### 2.1.3 การผสมเคมียางไนไตรล์ [9]

โดยภาพรวมแล้วการผสมเคมียางไนไตรล์จะคล้ายคลึงกับยางธรรมชาติและยางสไตรีน-บิวทาไดอีน อย่างไรก็ตามยาง NBR มีความเป็นขั้วสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ของสารเคมีที่ใช้กับยางไนไตรล์ด้วย สารเคมี 2 กลุ่มที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษ ได้แก่

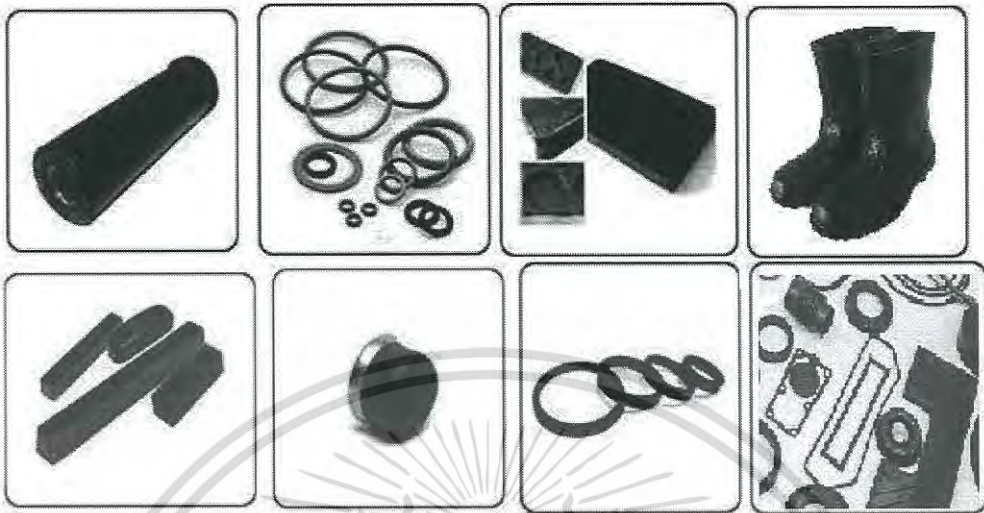
1. สารกลุ่มที่ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยง โดยเฉพาะกำมะถัน เพราะกำมะถันจะเข้ากันกับยางไนไตรล์ได้ยาก ดังนั้น ในการออกสูตรการผสมเคมีของยางไนไตรล์ จึงควรใช้กำมะถันในปริมาณที่ต่ำ (เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติหรือยางสไตรีนบิวทาไดอีน) หรืออาจใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่สามารถแตกตัวให้กำมะถันแทนการใช้กำมะถัน (ใช้ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) หรือแบบประสิทธิภาพ (EV)) ซึ่งระบบการคงรูปแบบหลังนี้จะช่วยทำให้ยางเชื่อมโยงที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนได้ดี และมีค่าการเสียรูปถาวรจากการกดอัดต่ำ นอกจากนี้เนื่องจากบิวทาไดอีนในยางไนไตรล์ มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาการคงรูปช้ากว่าไอโซพรีน ดังนั้นในการออกสูตรยางควรใช้สัดส่วนของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงต่อกำมะถันสูงกว่าสัดส่วนที่ใช้ในยางธรรมชาติ สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่นิยมใช้กับยางไนไตรล์ ได้แก่ MBTS ซัลฟีนามาไธยูแรมไดไฮโอคาร์บาเมตและกัวนิดีนสำหรับในกรณีที่ต้องการยางเชื่อมโยงที่มีความทนทานต่อความร้อนสูงมากๆ อาจใช้ TMTD อย่างเดียวได้โดยไม่ต้องใช้กำมะถันหรืออาจเติมกำมะถันลงไปเล็กน้อย (0.25 phr) หรือใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่สามารถแตกตัวแล้วให้กำมะถันประมาณ (0.5 phr) แทนได้ เนื่องจากกำมะถันสามารถละลายในยางไนไตรล์ได้ยาก ทำให้กำมะถันกระจายตัวเข้าไปในเนื้อยางได้ไม่ดีซึ่งอาจส่งผลให้ยางเกิดการเชื่อมโยงได้ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน ดังนั้นในระหว่างการผสมจึงต้องทำการเติมกำมะถันเข้าไปในช่วงต้นของการผสมเพื่อเพิ่มระยะเวลาการผสมให้กำมะถันเข้ากับยางได้มากขึ้นหรืออาจ

เลือกใช้กำมะถันเกรดพิเศษที่มีแมกนีเซียมคาร์บอเนตเคลือบอยู่ที่พื้นผิว (MC-sulfur) แทนการใช้กำมะถันเกรดทั่วไป

2. สารกลุ่มที่ทำให้ยางนิ่ม เช่น น้ำมัน สารกลุ่มนี้ใช้เติมลงไปใยยางไนไตรล์เพื่อช่วยในกระบวนการแปรรูป (ลดความหนืดของยาง) ปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ โดยเฉพาะสมบัติความเหนียวติด สมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ และความยืดหยุ่นของยาง เป็นต้น สำหรับสารทำให้ยางนิ่มที่นิยมใช้กันมากกับยางไนไตรล์ได้แก่ น้ำมันอะโรมาติก และสารเคมีในกลุ่มอีเทอร์หรือเอสเทอร์ เช่น DOP หรือ Tritolyl phosphate เป็นต้น ส่วน Xylene formaldehyde resin และ Coumarone resin เป็นสารที่ช่วยเพิ่มสมบัติความเหนียวติดกันให้แก่อยางไนไตรล์ได้เป็นอย่างดี ส่วนสารทำให้ยางนิ่มที่นิยมใช้กับยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ที่ไม่มีขั้วอื่นๆ เช่น น้ำมันพาราฟิน หรือแนพทาหนักนั้นสามารถเข้ากับยางไนไตรล์ได้น้อยมาก เนื่องจากยางไนไตรล์มีความเป็นขั้วสูง แม้ว่าการเติมสารกลุ่มที่ทำให้ยางนิ่มจะช่วยปรับปรุงสมบัติหลายๆ ด้านของยางไนไตรล์ แต่ในเวลาเดียวกันการเติมสารกลุ่มนี้ทำให้สมบัติเชิงกลรวมถึงความทนทานต่อน้ำมัน และสารเคมีของยางลดลง นอกจากนี้เมื่อถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูง สารกลุ่มนี้อาจระเหยออกไปทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ และขนาดของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ด้วยเหตุนี้การเลือกใช้สารกลุ่มเหล่านี้จึงควรทำด้วยความระมัดระวัง และต้องพิจารณาถึงสภาพการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ด้วย สำหรับในกรณีที่ต้องการใช้งานผลิตภัณฑ์ยางไนไตรล์ที่สภาวะอุณหภูมิสูง ควรเลือกใช้สารทำให้ยางนิ่มชนิดที่ระเหยได้ยากซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น พอลิเมอร์ เป็นต้น ตัวอย่างของสารระเหยยากได้แก่ Polypropylene sebacate และ Dibutyl carbitol formal เป็นต้น แต่สารทำให้ยางนิ่มที่ระเหยยากเหล่านี้มักมีราคาแพงกว่าสารทำให้ยางนิ่มทั่วไปมาก

#### 2.1.4 การใช้งานยางไนไตรล์ [9]

ยางชนิดนี้ส่วนใหญ่ถูกใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน ทนทานต่อความร้อน และต้านทานการขูดถูได้ดี ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางไนไตรล์ได้แก่ ปะเก็นน้ำมัน ยางโอริง ยางซีล ยางเชื่อมข้อต่อ สายพานลำเลียง ท่อดูดหรือส่งน้ำมัน ท่อยางเสริมแรง ยางบุ ยางเคลือบ ลูกกลิ้ง รองเท้าบูท พื้นและสันรองเท้า เป็นต้น ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยางไนไตรล์ [10]

## 2.2 สารเคมีสำหรับยาง

### 2.2.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing or curing agent)

สารเชื่อมโยงเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องผสมลงไปเป็นยางเพื่อทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันหรือปฏิกิริยาครอสลิงก์ [6] การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งจะทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากอ่อนเหนียวติดและไหลได้แบบเทอร์โมพลาสติกไปเป็นยางคงรูป (Thermoset) ที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความทนทานและมีสมบัติที่เสถียรเพิ่มมากขึ้น แม้ว่าการทำให้ยางเชื่อมโยงจะสามารถทำได้ด้วยการใช้รังสีที่มีพลังงานสูงโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเชื่อมโยง แต่วิธีการทำให้ยางเชื่อมโยงดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เครื่องมือราคาแพง และใช้ได้เฉพาะในกรณีที่ต้องการเชื่อมโยงยางที่บางๆ เท่านั้น ด้วยเหตุนี้การทำให้ยางเชื่อมโยงด้วยรังสีที่มีพลังงานสูงจึงไม่เป็นที่นิยมในโรงงานอุตสาหกรรม ปัจจุบันการเชื่อมโยงส่วนใหญ่เกิดจากการเติมสารกลุ่มที่ทำให้ยางเชื่อมโยง โดยทั่วไปการเชื่อมโยงยางที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulfur) ระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) และระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ เช่น โลหะออกไซด์ เป็นต้น

1. ระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน เป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะเป็นระบบที่ต้นทุนต่ำ การเชื่อมโยงเกิดได้เร็ว เมื่อใช้กำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสมและยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ดังนั้นระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันจึงนิยมใช้ในการเชื่อมโยงยางแทบทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ เช่น ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน (SBR) ยางพอลิไอโซพรีน (IR) ยางพอลิบิวทาไดอีน (BR) และยางไนไตรล์ (NBR) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันมีข้อจำกัดหลักๆ คือไม่สามารถใช้ในการเชื่อมโยงยางที่ไม่มี

พันธะคู่อยู่ในโมเลกุล เนื่องจากพันธะคู่เป็นตำแหน่งที่กำมะถันจะเข้าไปทำปฏิกิริยาและทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น [11]

การเชื่อมโยงด้วยกำมะถันนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อกำมะถันผสมกับยางและให้ความร้อน ยางจะเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลโดยมีกำมะถันเป็นตัวเชื่อมโยง ถ้าปริมาณของกำมะถันเพิ่มมากขึ้นยางจะมีการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และถ้าขนาดอนุภาคกำมะถันมีขนาดเล็กทำให้มีการกระจายตัวที่ดี ยางเกิดการเชื่อมโยงและคงรูปได้ดี สมบัติเชิงกลของยางสูงขึ้นไปด้วย แต่ถ้าปริมาณกำมะถันที่ใช้มากจนเกินไปเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานกำมะถันที่เป็นส่วนเกินจะเกิดการตกผลึกออกมาที่ผิวหน้าของยาง เกิดเป็นรอยคราบสีเหลืองอ่อนอยู่ที่พื้นผิวของยางคอมพาวด์เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า กำมะถันบลูม (Sulfur bloom) การบลูมทำให้สมบัติความเหนียวืดของยางคอมพาวด์เสียไป โดยการผสมกำมะถันนั้นจะผสมกำมะถันเป็นลำดับสุดท้าย เพื่อป้องกันไม่ให้อายุเกิดการเชื่อมโยงก่อน

2. ระบบการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ แม้ว่าสามารถใช้ได้กับยางส่วนใหญ่ทั้งที่มีพันธะคู่และไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล แต่เนื่องจากระบบการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีต้นทุนสูงกว่าระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันและยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตที่ต่ำกว่ายางที่ได้จากการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน นอกจากนี้เปอร์ออกไซด์ยังจัดเป็นสารเคมีที่ค่อนข้างอันตราย ทำให้การขนย้ายและการเก็บรักษาต้องทำด้วยความระมัดระวัง ด้วยเหตุนี้ระบบการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์จึงนิยมใช้ในการเชื่อมโยงยางที่ไม่มีพันธะคู่หรือยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำมากเท่านั้น สำหรับยางไดอีนอื่นๆ ที่มีพันธะคู่อยู่มากนิยมใช้ระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันมากกว่า ยกเว้นในกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อความร้อนได้ดีหรือมีค่าการเสีรูปหลังการกดอัดต่ำเท่านั้น [11]

3. ระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ เช่นการใช้โลหะออกไซด์นิยมใช้ในยางคลอโรพรีน (CR) แม้ว่ายางคลอโรพรีนเป็นยางที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลแต่อะตอมของคลอรีนในยางทำให้พันธะคู่ที่มีอยู่ไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ด้วยเหตุนี้ยางคลอโรพรีนจึงไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันสารทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงที่นิยมใช้กันมากสำหรับยางคลอโรพรีนได้แก่โลหะออกไซด์เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และออกไซด์ของตะกั่ว (Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) เป็นต้นโดยทั่วไปนิยมใช้แมกนีเซียมออกไซด์ร่วมกับซิงค์ออกไซด์ (MgO/ZnO) โดยแมกนีเซียมออกไซด์ช่วยทำหน้าที่เป็นตัวจับกรดไฮโดรคลอริกที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมโยงในขณะที่ซิงค์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นสารทำให้ยางเชื่อมโยง [11]

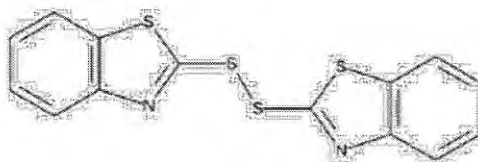
## 2.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators)

การใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับระบบการคงรูปยางด้วยกำมะถัน เพราะปฏิกิริยาการคงรูประหว่างยางและกำมะถัน จะเกิดขึ้นได้ช้ามากแม้ว่าที่อุณหภูมิสูงๆ โดยทั่วไปจึงต้องใช้ระยะเวลาในการคงรูปยางนานเป็นชั่วโมงและต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงมากอีกทั้งยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลต่ำ การเติมสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงลงไปปริมาณเพียงเล็กน้อยช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างยางและกำมะถันเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น จึงช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปยาง ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงเกินไปและยางคงรูปที่ได้มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น [11]

สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) อัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate) เวลาเชื่อมโยงสมบูรณ์ (Cure time) ความสามารถในการละลายในยาง (Solubility) ความเป็นพิษ (Toxicity) เป็นต้น ดังนั้นการเลือกชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญมาก โดยในอุตสาหกรรมยางอาจใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณมากกว่า เรียกว่า สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงปฐมภูมิ (Primary accelerators) ส่วนสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณน้อยกว่าจะเรียกว่า สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงทุติยภูมิ (Secondary accelerators) สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาเสริมกันที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ซินเนยีจิสติก (Synergistic effects) ทำให้ได้สมบัติของยางที่ดีกว่าการใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงตัวใดตัวหนึ่งเพียงอย่างเดียว

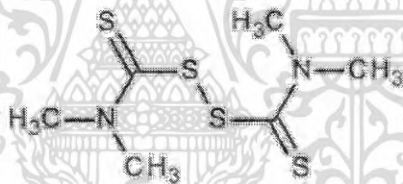
การทำให้ยางคงรูปต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่ใช้ถ้าต้องการเวลาที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์นานควรใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่มีเวลาเริ่มเชื่อมโยงนานแต่ถ้าใช้เวลาในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สั้นควรใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกลุ่มตัวเร่งเร็วยิ่งยวด [12]

ไดเบนโซไทอะซิลไดซัลไฟด์ (2,2-dibenzothiazyl disulfide; MBTS) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่อยู่ในกลุ่มไทเอโซล (Thiazoles) มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.3 เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่นิยมใช้มากที่สุดสามารถใช้ได้ดีกับยางแทบทุกประเภทมีอัตราเร็วในการคงรูปยางปานกลางยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพสูงมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงมีความอดุลีสูง ไม่ติดสีใช้กับผลิตภัณฑ์ที่โปร่งแสงเป็นตัวที่ช่วยให้ยางนิ่มในการบดผสมยางจึงช่วยในการแปรรูปของยางได้ดีมักใส่ลงในยางขณะที่เริ่มต้นการบดผสมยาง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างสารไดเบนโซไทอะซอลไดซัลไฟด์ [12]

เทตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide; TMTD) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่อยู่ในกลุ่มไทยแรม (Thiurams) มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่ทำให้ยางมีอัตราในการเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว นิยมใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงทุติยภูมิ และเป็นสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่มีประโยชน์มากในกรณีทำการเชื่อมโยง โดยไม่ใช้กำมะถันหรือใช้กำมะถันในปริมาณเล็กน้อย เนื่องจากสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงชนิดนี้เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วจะให้อะตอมของกำมะถันเกิดพันธะเชื่อมโยงกำมะถันอะตอมเดี่ยวหรือโมโนซัลไฟดิก (Monosulfidic linkage) ได้ยังคงรูปที่มีสมบัติที่ดี สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงชนิดนี้ไม่เลอะสีจึงสามารถใช้กับยางสีอ่อนหรือสีขาวได้โดยไม่เป็นสี



รูปที่ 2.4 โครงสร้างสารเทตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเป็นสารเคมีที่เติมลงไปในการเชื่อมโยงเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง เนื่องจากสารเคมีในกลุ่มนี้จะเข้าไปกระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน คือ ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับกรดสเตียริก (ZnO/Stearic acid) เนื่องจากราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง สามารถใช้ได้กับยางทั่วไป ซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็น ซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) ซึ่งสามารถละลายในยางได้ และช่วยเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเนื่องจากอยู่ในรูปซิงค์ไอออน ( $Zn^{2+}$ ) ที่ละลายได้ในยาง [12] ซิงค์ออกไซด์เป็นสารอนินทรีย์ที่จำเป็นในการทำให้ยางคงรูปได้สมบูรณ์ มีความถ่วงจำเพาะสูง นิยมใช้ในปริมาณ 3-5 phr แต่ถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็ก สามารถลดปริมาณการใช้ลงเหลือเพียง 1 phr ได้ ซึ่งจะทำให้ยางมีมอดูลัสสูงและโปร่งใส กรดสเตียริกเป็นสารอินทรีย์ที่จำเป็นในการใช้เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสำหรับสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงบางชนิด ปริมาณที่ใช้ในยางขึ้นกับชนิดของยาง ถ้ายางมีกรดไขมันอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องใส่หรือใส่ในปริมาณน้อย โดยทั่วไปในการผสมสารเคมีกับยางธรรมชาติจะใส่กรดสเตียริกประมาณ 1-3 phr เพื่อลดอัตราการเชื่อมโยงที่แตกต่างกันลงและเป็นการป้องกันการขาดกรดไขมันในยาง เพราะการขาดกรดไขมันอาจทำให้สมบัติทางกายภาพแตกต่างกันไป [13]

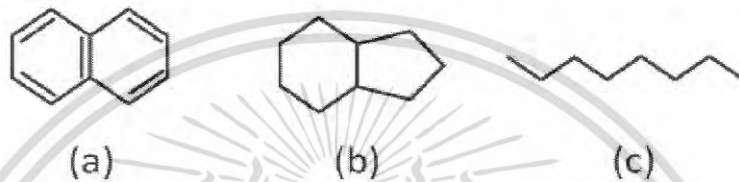
### 2.2.4 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารช่วยกระบวนการผลิตเป็นสารเคมีที่ผสมในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้ใช้เวลาและพลังงานในการผลิตน้อยลง นอกจากนี้ยังช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่งต่างๆ ในยาง เพิ่มความสม่ำเสมอหรือเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ทำให้มีอัตราเร็วในการผลิตสูงขึ้น สารช่วยกระบวนการผลิตมีหลายชนิด เช่น

1. เปปไทเซอร์ (Peptizers) เป็นสารที่ทำให้ยางนิ่มเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำหน้าที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่ยางทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง เป็นผลให้ความหนืดของยางลดลงเกิดการผสมได้ง่ายขึ้น นิยมใส่เพื่อลดเวลาการบดย่อย (Mastication) โดยเฉพาะในยางธรรมชาติ ตัวอย่างของเปปไทเซอร์ เช่น กรดซัลโฟนิค (Sulfonic acid) เพนตะคลอโรโทไฟโนล (Pentachlorothio-phenol) เป็นต้น

2. พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นสารเติมแต่งที่ใส่เพื่อเพิ่มความนิ่มให้กับยางและช่วยลดความหนืด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่าย พลาสติไซเซอร์เป็นสารโมเลกุลเล็กที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ช่วยเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free volume) ทำให้อายุการใช้งานยางสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง ทำให้วัสดุมีสมบัติยืดหยุ่นเป็นยางที่ดีขึ้น นิ่มตัวขึ้นและเพิ่มสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ ตัวอย่างพลาสติไซเซอร์ เช่น กรดไขมัน (Fatty acid) น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum oils) สารประกอบเอสเทอร์ (Ester compounds) น้ำมันสน (Pine oil) เป็นต้น โดยน้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันที่เข้ากันได้ดีกับยาง ให้ความหนืดลดลง เป็นน้ำมันที่ไม่ระเหย ไม่ติดสีและสีไม่ตก น้ำมันชนิดนี้เมื่อใช้จะทำให้สมบัติของยางตรงกันข้ามกับการใช้สารตัวเติม คือมีผลทำให้ความแข็งลดลง ค่ามอดูลัสลดลง น้ำมันปิโตรเลียมประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ มีกำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจนปนอยู่บ้างเล็กน้อย น้ำมันปิโตรเลียมแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ดังรูปที่ 2.5

1. น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oils) เป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติกไม่อิ่มตัว มีสีคล้ำ ความหนืดสูง
2. น้ำมันแนฟทาติก (Naphthenic oils) เป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนแนฟทาติกอิ่มตัว มีความหนืดปานกลาง
3. น้ำมันพาราฟิน (Paraffinic oils) เป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว อาจมีกิ่งบ้าง มีความหนืดต่ำ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ (a) น้ำมันอะโรมาติก (b) น้ำมันแนฟทาติก และ (c) น้ำมันพาราฟิน [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants)

ยางส่วนใหญ่ที่มีโครงสร้างโมเลกุลไม่อิ่มตัวจะเสื่อมสภาพได้ง่ายโดยเฉพาะในภาวะการใช้งานที่ต้องสัมผัสกับแสงแดด ออกซิเจน โอโซน ความร้อน หรือโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน รวมทั้งการใช้งานที่ต้องมีการหักงอเชิงกลตลอดเวลา ดังนั้นการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อที่จะให้ยางมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น เมื่อยางเกิดการเสื่อมสภาพสมบัติต่างๆของยางจะด้อยลงการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นอาจสังเกตเห็นได้จากการแข็งตัว (Embrittlement) การอ่อนตัว (Softening) รวมถึงการล้าตัวหรือการขยายตัวของรอยแตก (Fatigue process) โดยทั่วไปการเสื่อมสภาพเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นที่อุณหภูมิสูงหรือในภาวะที่มีการปนเปื้อนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น โลหะทองแดง (Cu) และแมงกานีส (Mn) เป็นต้น [11] สารป้องกันการเสื่อมสภาพแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. สารแอนต้ออกซิแดนท์ (Antioxidant) เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับยางหรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือสารแอนต้ออกซิแดนท์ชนิดไม่เปื้อนสี (Non-straining antioxidant) และสารแอนต้ออกซิแดนท์ชนิดเปื้อนสี (Straining antioxidant)
2. สารแอนต้ออโซนแนนท์ (Antiozonant) เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับโอโซนหรือปฏิกิริยาโอโซนชัน ปกติปริมาณโอโซนมีน้อยประมาณ 3-4 ppm แต่มีผลต่อยางโดยทำให้ยางเกิดรอยแตก สารแอนต้ออโซนแนนท์ที่นิยมใช้มาก คือสารประกอบพาราฟีนิล-ลีนไดเอมีน (Para-phenylenediamines; PPDs) [12]

### 2.2.6 พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol)

พอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) ต่อกันเป็นสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ เอทิลีนไกลคอลเกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอทิลีนโดยใช้ออกซิเจน พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) มีสมบัติดังตารางที่ 2.1 PEG มีลักษณะใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีจุดเดือดสูง สามารถละลายในตัวทำละลาย เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ อีเทอร์ และอะซิโตน นิยมนำมาผสมเพื่อเพิ่มความหนืดในสารต่างๆ เช่น ยาสระผม ครีมทาผิว โลชั่น ยาสีฟันหรือแม้แต่ในอาหาร เป็นต้น ในอุตสาหกรรมยางจะใช้ PEG เคลือบบริเวณพื้นผิวของสารตัวเติมเพื่อป้องกันสารตัวเติมดูดสารเคมีที่มีขี้ เช่น ซิงค์ออกไซด์ สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง นอกจากนี้ PEG ยังใช้เป็นสารป้องกันการแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพอลิเอทิลีนไกลคอล-4000 [15-16]

สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	
โครงสร้างทางเคมี	$(C_2H_4O)_nH_2O$
น้ำหนักมวลโมเลกุล	3,600-4,000
ค่าไฮดรอกซิล, mg KOH/g	25-32
ความหนาแน่น, g/cm <sup>3</sup> @60°C	1.0926
ช่วงการแข็งตัว, °C	53-59
การละลายน้ำที่ 20°C, % by wt	66
ความหนืดที่ 100°C, cSt	140.4
หน่วยซ้ำของออกซีเอทิลีน	90.5
ความชื้น, %w/w	0.5
ความร้อนที่ในการหลอมเหลว, Cal/g	45
pH ที่ 25°C, 5% Aqueous Solution	4.5-7.5
จุดวาบไฟ, Pensky Martens Closed Cup, °C	229
จุดวาบไฟ, Cleveland Open Cup, °C	291
การละลาย	ละลายน้ำ
ผล	ขาว

### 2.3 แวกซ์

แวกซ์โดยทั่วไปมีโครงสร้างเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ความยาวของสายโซ่ปานกลาง มีน้ำหนักโมเลกุลไม่มาก (จำนวนคาร์บอนประมาณ 20-60) ที่อุณหภูมิ 20°C มีลักษณะคล้ายพลาสติกแข็งและเปราะ แวกซ์จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 40°C จนถึง 140°C โดยที่ไม่มีการสลายตัวและสามารถกลับมาอยู่ในรูปของแข็งได้เมื่ออุณหภูมิลดลง แวกซ์มีทั้งชนิดที่มาจากธรรมชาติ (Natural wax) และจากการสังเคราะห์ (Synthetic wax) โดยแวกซ์จากธรรมชาติจะแบ่งออกเป็นแวกซ์จากพืชและสัตว์ (Plant and animal wax) แวกซ์จากฟอสซิล (Fossil wax) และแวกซ์สังเคราะห์แบ่งเป็น แวกซ์โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer wax) และแวกซ์โคพอลิเมอร์ (Copolymer wax) [17]

### 2.3.1 พอลิเอทิลีนแว็กซ์ (Polyethylene wax)

พอลิเอทิลีนแว็กซ์ (Polyethylene wax) เป็นแว็กซ์สังเคราะห์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ (500-4,000 g/mol) ที่สังเคราะห์ได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผ่านกระบวนการแตกตัวทางความร้อน (Thermal cracking) หรือเรียกว่าไพโรไลซิส (Pyrolysis) ลักษณะเฉพาะของพอลิเอทิลีนแว็กซ์ คือการมีจุดหลอมเหลวสูง มีความแข็งที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ต่ำไปสูง และมีค่าความหนืดที่กว้าง จึงถูกนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลาย ซึ่งในอุตสาหกรรมยางพอลิเอทิลีนแว็กซ์ถูกใช้เป็นสารช่วยกระบวนการผลิตและสารแอนตี้ไอโซแนนท์ ในอุตสาหกรรมพลาสติกทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิตและสารหล่อลื่น (Lubricant) ในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนแว็กซ์ยังถูกนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นและสารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) โดยพอลิเอทิลีนแว็กซ์ช่วยให้สารตัวเติมหรือเม็ดสีต่างๆ กระจายตัวได้ดีขึ้น นอกจากนี้พอลิเอทิลีนแว็กซ์ยังถูกใช้เป็นสารตัดแปรสำหรับกระบวนการผลิตเทียน พลาสติกและอีลาสโตเมอร์ และการเคลือบผิวกระดาษ [18-19]

### 2.3.2 การใช้งานแว็กซ์

แว็กซ์ถูกใช้ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ต่างๆ หลายหลายอุตสาหกรรม โดยมีการใช้งานแว็กซ์ ดังนี้

1. สารช่วยกระบวนการผลิต ทำหน้าที่ช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น โดยช่วยให้พอลิเมอร์ขึ้นรูปง่าย (Ease of processability) ไหลดีขึ้น อัตราเร็วการผลิตสูงขึ้น พื้นผิวผลิตภัณฑ์ดีขึ้น ลดปัญหาบิดเบี้ยว (Melt fracture) และผิวขรุขระ (Shark skin) ของผลิตภัณฑ์
2. สารหล่อลื่น สามารถลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุกับเครื่อง และวัสดุภายในตัวเอง แบ่งเป็นสารหล่อลื่นภายใน (Internal lubricants) และสารหล่อลื่นภายนอก (External lubricants) โดยสารหล่อลื่นภายในสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์สูง อยู่ภายในเนื้อพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่ไหลผ่านกันง่าย ความหนืดขณะไหลลดลง ปกติเป็นสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำทำให้ไหลง่ายขณะขึ้นรูป เช่น Amine waxes, Wax ester derivatives และ Long-chain esters แต่สารหล่อลื่นภายนอกเข้าไม่ได้กับพอลิเมอร์ จึงแพร่ออกมาที่ผิว ช่วยหล่อลื่นระหว่างเครื่องขึ้นรูปกับพอลิเมอร์ เช่น กรดสเตียริก และน้ำมันพาราฟิน เป็นต้น
3. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ จำเป็นมากสำหรับยางที่มีโครงสร้างไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางเอสปีอาร์ (SBR) ยางไออาร์ (IR) ยางบีอาร์ (BR) ฯลฯ ซึ่งว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และโอโซน (O<sub>3</sub>) ในบรรยากาศ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และโอโซนชัน (Ozonation) ตามลำดับ เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยาง แว็กซ์สามารถป้องกันการเสื่อมสภาพได้โดยเกิดการแพร่ (Migration) ออกมาที่ผิวด้านนอก เกิดเป็นชั้นฟิล์มบางๆ ของแว็กซ์เคลือบผลิตภัณฑ์ยาง เป็นกำแพงป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยาของออกซิเจนและโอโซนในอากาศ
4. สารช่วยกระจายตัว สามารถช่วยให้สารตัวเติมและผงสีกระจายตัวเข้ากับเนื้อพอลิเมอร์ดีขึ้น และช่วยให้ผงสีกระจายตัวในหมึกพิมพ์ได้ดีขึ้น โดยป้องกันไม่ให้อนุภาคของผงสีจับกันเป็นก้อน และช่วยปรับความหนืดให้เหมาะสม ทำให้ผงสีในหมึกพิมพ์ถ่ายโอนลงบนกระดาษดีขึ้น จึงสามารถพิมพ์ได้ดี [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของแวกซ์

1. น้ำหนักโมเลกุล ส่งผลต่อความแข็งแรงและจุดหลอมเหลวของแวกซ์ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น สายโซ่โมเลกุลยาวเกิดการเกี่ยวพันกันมาก ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จุดหลอมเหลวสูงขึ้น
2. โครงสร้างกิ่งและความกะกัะ ส่งผลต่อความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวของแวกซ์ เมื่อโครงสร้างมีกิ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลแพกกัน得不แน่น เนื่องจากความกะกัะของกิ่งทำให้ความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวลดลง
3. หมู่ฟังก์ชันและความมีขั้ว ส่งผลต่อความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ เมื่อความมีขั้วของแวกซ์เพิ่มมากขึ้นสามารถเข้ากับพอลิเมอร์ที่มีขั้วได้ดีขึ้น โดยสามารถเกิดแรงระหว่างขั้วได้

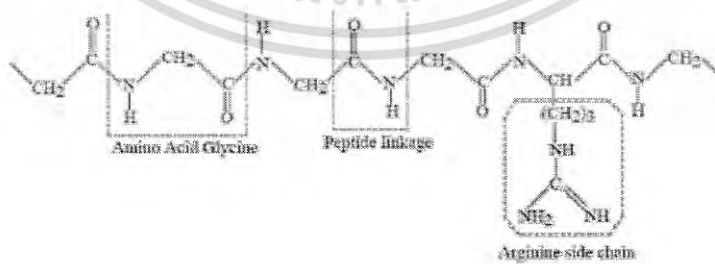
## 2.4 หนังสัตรี

### 2.4.1 องค์ประกอบและโครงสร้างของหนังสัตรี

หนังสัตรีมีองค์ประกอบหลัก คือโปรตีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอไมด์ (Polyamide) ประกอบด้วยกรดอะมิโนประมาณ 20 ชนิด ดังรูปที่ 2.6 ยึดเกาะกันด้วยพันธะเปปไทด์ (Peptide bond) ดังรูปที่ 2.7 เมื่อสายพอลิเปปไทด์ยาวหลายสายมารวมกันพันเป็นเกลียวหรือเรียงเป็นแผ่นซ้อนๆ กันโดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายพอลิเปปไทด์ จึงได้โปรตีนแบบเส้นใยหรือแบบแท่งเกิดขึ้น สำหรับโปรตีนที่พบมากในหนังสัตรีมีลักษณะเป็นเส้นและไม่ละลายน้ำ คือ คอลลาเจน (Collagen) ซึ่งเกิดจากสายโซ่โปรตีนจำนวน 3 สายโซ่ อยู่ร่วมกันลักษณะเป็นเกลียว

กรดอะมิโน	สูตรโครงสร้าง		กรดอะมิโน	สูตรโครงสร้าง	
	โซ่ข้าง (side chain)			โซ่ข้าง (side chain)	
Alanine (Ala, A)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_3$	Tyrosine (Tyr, Y)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{OH}$
Valine (Val, V)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}(\text{CH}_3)_2$	Cysteine (Cys, C)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2-\text{SH}$
Leucine (Leu, L)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)_2$	Asparagine (Asn, N)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2-\text{C}(=\text{O})\text{NH}_2$
Isoleucine (Ile, I)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2\text{CH}_3$	Glutamine (Gln, Q)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{C}(=\text{O})\text{NH}_2$
Methionine (Met, M)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{S}-\text{CH}_3$	Serine (Ser, S)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2\text{OH}$
Phenyl alanine (Phe, F)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_5$	Threonine (Thr, T)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$
Tryptophan (Trp, W)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2-\text{C}_8\text{H}_6\text{N}_2$	Glycine (Gly, G)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{H}$
Proline (Pro, P)			Lysine (Lys, K)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$
Aspartic acid (Asp, D)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2-\text{C}(=\text{O})\text{OH}$	Arginine (Arg, R)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NHCH}_2\text{NH}_2$
Glutamic acid (Glu, E)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C}(=\text{O})\text{OH}$	Histidine (His, H)	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(\text{H})-\text{COOH}$	$-\text{CH}_2-\text{C}(\text{NH})=\text{N}$

รูปที่ 2.6 ชนิดและโครงสร้างของกรดอะมิโน [20]



รูปที่ 2.7 การยึดเกาะกันด้วยพันธะเปปไทด์ของโมเลกุลกรดอะมิโน [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 ประเภทของหนังสัตว์

หนังสัตว์ที่นำมาผลิตเครื่องหนัง มาจากสัตว์หลายชนิด เช่น โค กระบือ แพะ แกะ งู จระเข้ ม้า และสุกร เป็นต้น โดยทั่วไปนิยมใช้หนังโคและกระบือ ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 90 ของหนังสัตว์ที่ใช้ผลิตทั้งหมด ทั้งนี้เพราะหาได้ง่าย และมีปริมาณมาก สามารถแบ่งลักษณะของหนังได้ ดังนี้ [6]

1. หนังสด (Green hides) หมายถึงหนังที่ชำแหละจากตัวสัตว์ด้วยวิธีธรรมดาหรือใช้เครื่องจักร และยังไม่ผ่านกรรมวิธีการเก็บรักษา ซึ่งจะประกอบด้วยน้ำประมาณร้อยละ 65 และไขมันร้อยละ 30 ที่เหลือเป็นคาร์โบไฮเดรต และเกลือแร่ สามารถแยกหนังออกเป็นส่วนของชั้นต่างๆ ได้ 3 ชั้น ดังนี้

- หนังชั้นนอกเป็นหนังกำพร้าซึ่งจะมีขนติดอยู่ เรียกว่าเอพิเดอร์มิส (Epidermis) ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญเป็นโปรตีนชนิดเคราติน (Keratin) โดยทั่วไปมีความหนาประมาณร้อยละ 0.5-2.0 ของความหนาของหนังสด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของหนังสัตว์นั้นๆ

- หนังชั้นกลางหรือหนังแท้ เรียกว่า เดอร์มา (Derma) หรือคอร์ียม (Corium) มีความหนาประมาณร้อยละ 95-98 ของความหนาของหนังสด เป็นชั้นที่มีเส้นใยโปรตีนสานกันอยู่อย่างหนาแน่น ซึ่งเป็นชั้นที่นำไปฟอกเพื่อทำเครื่องหนังต่างๆ

- หนังชั้นใน หมายถึงหนังชั้นล่างที่ติดกับเนื้อ (Hypodermis) หนังส่วนนี้ประกอบด้วยไขมันต่างๆ ซึ่งอยู่ระหว่างเนื้อกับหนังสด มีความหนาประมาณร้อยละ 1-5 ของความหนาของหนังสด เป็นชั้นที่ต้องกำจัดออก [21]

2. หนังดิบ (Raw hides) หมายถึงหนังสัตว์ที่ยังไม่ผ่านกรรมวิธีการฟอก แต่จะผ่านกรรมวิธีการเก็บรักษา คือ

- หนังหมักเกลือ (Wet salted hide) หนังที่เก็บรักษาโดยใช้เกลือเป็นสารกันเสียซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมที่สุด

- หนังแช่น้ำเกลือ (Bine cure) หนังสดที่เก็บรักษาโดยการแช่น้ำเกลือเข้มข้น

- หนังตากแห้ง (Dried hide) หนังสดที่เก็บรักษาโดยการตากให้แห้ง

- หนังอาบน้ำยา (Arsenicated hide) หนังสดที่เก็บรักษาโดยวิธีชุบน้ำยาแก้นแมลงแล้วนำไปตากให้แห้ง

- หนังหมักเกลือดากแห้ง (Dry salted hide) หนังหมักเกลือประเภทที่ใส่เกลือจนซึมเข้าไปในเนื้อของหนังดีแล้วนำไปผึ่งแดดให้แห้ง

3. หนังฟอก (Tanning leather) หมายถึงหนังดิบที่ได้ผ่านกระบวนการฟอกด้วยสารเคมีและกระบวนการย้อมสีแล้ว เพื่อให้มีสีสนสวยงามและเพิ่มความทนทาน ซึ่งทำให้เหมาะแก่การนำไปผลิตเป็นเครื่องหนังที่เหมาะสมกับการใช้งานต่างๆ การนำหนังดิบมาผลิตเป็นหนังฟอกทำให้สูญเสียน้ำหนักไปจำนวนหนึ่ง เพราะหนังแห้งหลังจากทำการฟอก แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

- หนังทรงหรือหนังชั้นนอก เป็นหนังที่นำมาใช้ในการผลิตรองเท้า กระเป๋าและเฟอร์นิเจอร์ เป็นส่วนใหญ่

- หนังท้องหรือหนังชั้นใน เป็นหนังที่นำมาใช้ในการผลิตถุงมือหนังและหนังซับในเป็นส่วนใหญ่

- หนังชั้นล่าง เป็นหนังที่นำไปผลิตเป็นของเล่นของสุนัข

4. หนังฟอกกึ่งสำเร็จรูป (Wet blue) หมายถึงการนำหนังดิบนำไปแช่ในน้ำเปือกไม้หรือน้ำยาเคมี เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติภายในของหนังสัตว์ไม่ให้เกิดการเนาเปื่อย ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นการฟอกหนังในขั้นแรก เป็นหนังฟอกที่ยังฟอกไม่เสร็จสมบูรณ์ และยังไม่สามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องหนังได้ หนังฟอกประเภทนี้จะผลิตเพื่อจำหน่ายให้แก่โรงงานฟอกหนังเพื่อนำไปทำการฟอกในขั้นตอนต่อไป ตามกรรมวิธีที่แต่ละโรงงานชำนาญ จึงได้เป็นหนังฟอกสำเร็จรูปออกจำหน่ายแก่โรงงานผลิตเครื่องหนัง เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องหนังต่อไป [13]

5. หนังอัด (Emboss leather) หมายถึงหนังที่ผ่านกระบวนการฟอกมาแล้ว นำมาอัดด้วยลูกกลิ้งความร้อน เนื่องจากพื้นผิวหนังมีรอยตำหนิหรือมีเศษหนังเป็นจำนวนมาก ซึ่งหนังที่ได้ขาดความเป็นธรรมชาติของลายหนังแต่ยังคงมีผิวสัมผัสของหนังที่มีความเป็นธรรมชาติเอาไว้ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

- หนังอัดลาย หมายถึงหนังที่มีรอยแผลหรือตำหนิ จึงนำมาอัดลายเพื่ออำพรางรอยดังกล่าว

- หนังอัดแผ่น หมายถึงหนังที่ผลิตด้วยการนำเศษหนังมาอัดเป็นแผ่น



## 2.5 การฟอกหนังสัตว์

การฟอกหนัง คือกระบวนการเปลี่ยนหนังสัตว์ดิบหรือหนังสด เพื่อการเก็บรักษาหนังไว้ไม่ให้เน่าเปื่อยโดยทำให้เป็นหนังฟอกสำเร็จ ซึ่งหนังดิบหรือหนังสด มีสมบัติในการดูดซับกรดแทนนิน (Tannic acid) และสารประกอบทางเคมีอื่น สารเหล่านี้ช่วยป้องกันหนังไม่ให้เน่าเปื่อยทนทานต่อน้ำและความเปียกชื้น รวมถึงรักษาให้หนังมีความยืดหยุ่น อ่อนนุ่ม ทนทานต่อสภาพอากาศและป้องกันการทำงานของแบคทีเรีย โดยการผลิตหนังฟอก แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือการจัดเตรียมหนังก่อนฟอก (Beamhouse process) การฟอก (Tanning process) และการตกแต่ง (Finishing process)

### 2.5.1 การจัดเตรียมหนังก่อนฟอก (Beam house Process)

การจัดเตรียมหนังก่อนฟอก เป็นการกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการ เช่น ขน เศษหนัง กีบเท้า ฯลฯ ออกจากหนังดิบและเตรียมหนังให้พร้อมที่จะฟอกมีการแช่น้ำปูนกักขุ่นออกด้วยซิลไฟด์ชุดฟัด ผัดแล้วล้างน้ำปูน และบ่มหนัง น้ำเสียที่เกิดจากกรรมวิธีขั้นตอนนี้มีฤทธิ์เป็นด่างอย่างแรง และมีสิ่งเจือปนคั้นเศษหนังขนซึ่งเป็นสารจำพวกโปรตีนและไขมัน ตลอดจนสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ ปูนขาว สารพวกสบู่ เกลือแอมโมเนีย อัลคาไลน์ ซิลไฟด์ และยาฆ่าเชื้อ ทั้งนี้เมื่อผ่าแยกชิ้นแล้ว ส่วนบนเรียกหนัง Upper หรือ Grain เอาไปผลิตหนังฟอก ส่วนล่างเรียกว่าหนังส่วนล่าง หรือ Splits [22] ซึ่งขั้นตอนการเตรียมหนังก่อนฟอกแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการเตรียมหนังก่อนฟอก (Beamhouse process) [23]

### 2.5.2 การฟอก (Tanning process)

ภายหลังจากที่ได้ทำความสะอาดผ่านหนังดิบให้มีขนาดตามต้องการแล้ว จะนำหนังไปผ่านการฟอกซึ่งการฟอกหนังก็คือการเปลี่ยนสภาพหนังสัตว์ดิบซึ่งเน่าเปื่อยได้ไปเป็นหนังสำเร็จซึ่งคงตัวกว่า ไม่เน่าเปื่อย มีความทนทานต่อสภาพอากาศและน้ำร้อน ทั้งนี้ การรักษาสภาพหนังไม่ให้เน่าเปื่อยจะอาศัยสารเคมีบางชนิด ได้แก่ ฝาด โครเมียม หรือสารเคมีอื่น เข้าไปทำปฏิกิริยากับคอลลาเจน (โปรตีน) ในหนังการฟอกหนังที่นิยมใช้ มีสองวิธี คือ การฟอกโครมซึ่งอาศัยโครเมียม และการฟอกฝาดซึ่งอาศัยแทนนิน หรือสารสังเคราะห์มาเป็นตัวฟอก ทั้งนี้การฟอกโครมเป็นที่นิยมกว่า เนื่องจากใช้เวลาสั้น สารเคมี

ราคาถูก หน้าที่ฟอกแล้วทนต่อความร้อนและความชื้นดีกว่า อนึ่ง การดองกรด เป็นขั้นตอนที่จำเป็นต้องมีการฟอกทั้งสองวิธี สารเคมีที่ใช้คือ เกลือแกง กรดกำมะถัน และกรดฟอร์มิค วัตถุประสงค์ของการดองกรดก็เพื่อปรับ pH ให้เหมาะสมกับปฏิกิริยาการฟอกหนังระหว่างการฟอกอาจมีการเติมสารเคมีพิเศษ (สารช่วยฟอกหรือสารช่วยตรึงโครเมียม) ลงไประหว่างการดองกรดเพื่อให้หนังจับโครเมียมได้ดีขึ้นและเพื่อลดปริมาณโครเมียมในน้ำเสีย [22]

1.) การฟอกโครม เป็นการฟอกที่ทำในถังหมุน ซึ่งใช้สารเคมี โครเมียม ( $Cr^{3+}$ ) เป็นตัวฟอก โดยทั่วไปแล้วประมาณร้อยละ 70 ของโครเมียมที่เติมลงไปทำปฏิกิริยากับหนัง ที่เหลืออีกร้อยละ 30 ถูกปล่อยทิ้งไปกับน้ำเสีย การตรึงโครมให้อยู่กับหนังสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการปรับ pH ดังนั้น ระหว่างการฟอกโครมจึงต้องมีการเติมโซเดียมคาร์บอเนตลงไปทีละน้อยๆ เพื่อปรับ pH ให้ได้ประมาณ 4.5 หนังที่ผ่านการฟอกโครมแล้ว เรียกว่า หนัง Wet-Blue [22]



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการฟอกโครม [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) การฟอกฝาด การฟอกฝาดสามารถกระทำได้ในถังไม้บับหรือบ่อคอนกรีต ที่ต่อแบบอนุกรม (เรียงต่อกัน) โดยจะใช้แทนนินซึ่งสกัดจากเปลือกไม้พวยกาคาลิปต์สตันควิบราโคและอื่นๆ มาเป็นสารฟอก ทั้งนี้ น้ำฟอกที่ใช้แล้วสามารถนำมาใช้ซ้ำได้อีก ขั้นตอนที่สำคัญคือการล้างฝาดส่วนเกินโดยใช้กรดออกซาลิก ล้างฝาดออกจากหนังซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพหนังอย่างมากหนังสำเร็จรูปที่เกิดจากการฟอกฝาดจะมีน้ำหนักมากกว่าการฟอกโครม มักใช้เป็นพื้นรองเท้าเข็มขัดและมีต้นทุนการผลิตสูงกว่าการฟอกโครม หลังจากการฟอกแล้วหนังจะถูกรีดน้ำทำให้แห้ง เจียรผิวด้วยเครื่องตัดแต่งและคัดเลือกเพื่อเก็บไว้รอจำหน่ายหรือแปรรูปต่อไป [22]



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการฟอกฝาด [24]

### 2.5.3 การฟอกซั่มย้อมสีให้น้ำมันและการตกแต่งหนัง (Finishing process)

การฟอกซั่มมักกระทำกับหนังที่ได้มาจากฟอกโครม โดยทำขึ้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพหนังให้เหมาะสมกับความต้องการของตลาด ในกรณีนี้สารเคมีที่ใช้อาจเป็นโครเมียมแทนนิน การย้อมสีจะกระทำตามที่ตลาดต้องการหรืออาจไม่ย้อมสีก็ได้ ขั้นตอนของการย้อมสีแตกต่างกันไปตามแต่นชนิดของสีที่

ใช้ย้อม ปกติจะใช้กรดฟอร์มิกปรับสภาพก่อนการย้อมด้วยสี และการตรึงให้สีติดหนังซึ่งต้องอาศัยอุณหภูมิสูง มักใช้น้ำมาทำให้หนังย้อมร้อนขึ้น หนังที่จะนำไปใช้งานจำเป็น ต้องมีความอ่อนนุ่มอยู่ตัว ดังนั้นจำเป็นต้องมีการทาน้ำมันให้แก่หนังที่ฟอกแล้ว การทาน้ำมันอาจทำพร้อมการฟอกซ้ำหรือการย้อมสีหรืออาศัยการทำต่างหากก็ได้ หนังที่ผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะนำไปผ่านการฟีนีล ฟิมพ์ลายและอื่นๆ เพื่อให้ตรงกับความต้องการของตลาดต่อไป [22]

## 2.6 แทนนิน (Tannin)

ประวัติของแทนนินอาจจะย้อนกลับไปถึงยุคก่อนประวัติศาสตร์ ซึ่งมีการค้นพบหลักฐานทางโบราณคดี มีการใช้แทนนินในการฟอกหนังสัตว์ขึ้นในยุคโบราณทางตอนเหนือของเยอรมันและคำว่าแทนนิน ถูกบัญญัติขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1976 โดย Sequil ทั้งนี้เพื่อใช้ในการอธิบายถึงสารประกอบเคมีชนิดหนึ่งที่พบอยู่ในน้ำยาสกัดจากต้นพีช สารประกอบเคมีดังกล่าวนี้มีสมบัติที่สามารถรวมตัวได้กับโปรตีนของหนังสัตว์ ทั้งยังป้องกันไม่ให้เกิดการเน่าเปื่อย ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงสภาพของหนังดิบสดๆ ให้กลายเป็นหนังฟอกหรือหนังสำเร็จได้ แต่ยังไม่พบว่ามีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติเริ่มต้นของการฟอกหนัง แต่ได้มีการพัฒนาการผลิตหนังจนมีคุณภาพดีจนถึงปัจจุบัน ต่อมาคำว่าแทนนินได้ถูกนำไปใช้เรียกพอลิฟีนอล (Polyphenol) ซึ่งมีสมบัติในการตกตะกอนของโปรตีน [25]

สารแทนนิน เป็นสารประกอบจำพวกฟีนอล (Phenol) ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) เป็นจำนวนมากขนาดของโมเลกุลมีขนาดใหญ่และเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 500–3,000 g/mol นอกจากนี้ยังสามารถแสดงสมบัติของการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นสมบัติเฉพาะเจาะจงของฟีนอลได้ เช่น สามารถตกตะกอนกับโปรตีนประเภทต่างๆ เช่น โมเลกุลของเจลาติน (Gelatin) อัลคาลอยด์ (Alkaloid) โกลโคไซด์ และโปรตีนจากหนังสัตว์ รวมทั้งโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น เซลลูโลส และเพคติน เป็นต้น แทนนินสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ กลุ่มไฮโดรไลเซเบิลแทนนิน (Hydrolyzable tannins) ซึ่งเป็นสารแทนนินที่สามารถแตกตัวได้เป็นโมเลกุลขนาดเล็ก พบมากในส่วนต่างๆ ของพืช ได้แก่ ใบ ฝัก เปลือก ผล และส่วนที่ปูดออกมาจากลำต้น ปกติเมื่อพืชได้รับอันตรายหรือทำให้เกิดรอยแผล (Gall) เป็นต้น และกลุ่มคอนเดนซ์แทนนิน (Condensed tannins) หรือเรียกอีกอย่างว่า โปรแอนโทไซยานิน (Proanthocyanin) พบในส่วนเปลือกต้นไม้ เนื้อไม้ และแก่นไม้เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากแทนนิน มีสมบัติช่วยในการตกตะกอนโปรตีน ทำให้หนังสัตว์ไม่เน่าเปื่อย จึงมีการใช้สารแทนนินในอุตสาหกรรมฟอกหนัง นอกจากนี้สารละลายแทนนิน ยังมีความสามารถในการตกตะกอนโลหะหนักบางชนิด เช่น เหล็ก ตะกั่ว และสังกะสีได้ การเกิดปฏิกิริยาพบว่าเมื่อไฮโดรไลเซเบิลแทนนิน (Hydrolyzable tannins) ทำปฏิกิริยากับเกลือของเฟอร์ริก (Ferric) เช่น เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride) ให้ตะกอนสีน้ำเงิน-ดำ ส่วนคอนเดนซ์แทนนินตกตะกอนสีน้ำตาล-เขียว [25]

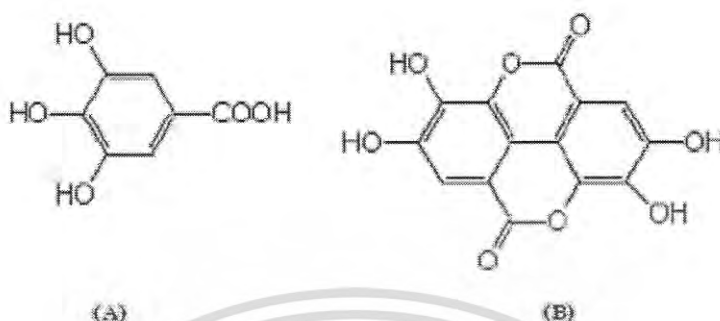
### 2.6.1 ไฮโดรไลเซเบิลแทนนิน

ไฮโดรไลเซเบิลแทนนิน เป็นสารประกอบที่ประกอบไปด้วยส่วนโครงสร้าง 2 ส่วนใหญ่ๆ คือส่วนแรกเป็นส่วนของน้ำตาล โดยส่วนมาก พบว่าเป็นน้ำตาลกลูโคสหรืออาจเป็นสารประกอบโพลีออล

(Polyols) อื่นๆ และส่วนที่สองเป็นกรดฟีนอลิก (Phenolic acid) เช่น กรดแกลลิก (Gallic acid) หรือ กรดเฮกซะไฮดรอกซีไดฟีนิก (Hexahydroxydiphenic acid; HHDP) หรือสารอนุพันธ์ของกรดเฮกซะไฮดรอกซีไดฟีนิก มักอยู่ในรูปออกไซด์ พบส่วนที่กรดฟีนอลิกมากกว่าส่วนของน้ำตาลหรือพอลิออล เชื่อมโยงกันด้วยพันธะเอสเทอร์ที่เรียกว่า Depside linkage ซึ่งพันธะเอสเทอร์นี้สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสภาวะที่มีน้ำและถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดเบสหรือเอนไซม์แทนเนส (Tannase) ให้กรดฟีนอลิกและน้ำตาลหรือพอลิออล เมื่อนำไปกลั่นแบบแห้งสารประกอบกรดฟีนอลิก จะเปลี่ยนเป็นไพโร-แกลลอน ดังนั้นไฮโดรไลเซชันแทนนิน จึงเรียกอีกอย่างว่าไพโรแกลลอนแทนนิน มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ (Free hydroxy group) 3 หมู่ สารประกอบกลุ่มไฮโดรไลเซชันแทนนินแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อยดังนี้ [26]

1. แกลโลแทนนิน (Gallotannins) เป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยกรดแกลลิกเชื่อมต่อกับน้ำตาลกลูโคส ด้วยพันธะเอสเทอร์ เมื่อไฮโดรไลซ์ด้วยกรด (Acid hydrolysis) เกิดการสลายตัวให้สาร 2 ชนิด คือกรดแกลลิกและน้ำตาลกลูโคส ตัวอย่างของแกลโลแทนนินได้แก่ กรดแทนนิก (Tannic acid) และทาราแกลโลแทนนิน (Tara gallotannin) พืชที่เป็นแหล่งของแกลโลแทนนินได้แก่ Turkish galls, Hamamelis, Chinese galls, Bearberry leaves, Chesnut, Maple, โกศน้ำเต้า กานพลู และกลีบกุหลาบแดง เป็นต้น

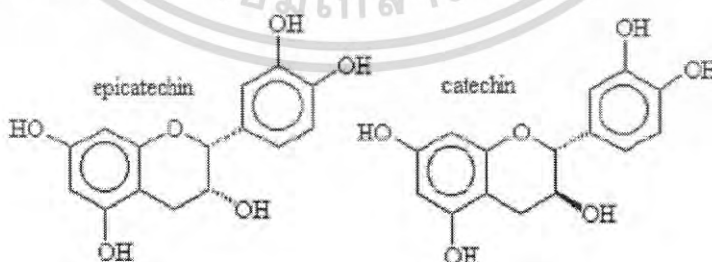
2. เอลลาจิกแทนนิน (Ellagitannins) เป็นกลุ่มของสารประกอบพอลิฟีนอลที่ประกอบไปด้วยกรดเฮกซะไฮดรอกซีไดฟีนิกส์หรือ Modified form เช่น กรดดีไฮโดรเฮกซะไฮดรอกซีไดฟีนิกส์ (Dehydrohexahydroxydiphenic acid) และกรดชิบูลิก (Chebulic acid) เป็นต้น โดยอยู่ร่วมกับน้ำตาลเอลลาจิกแทนนิน เมื่อเกิดการสลายตัวแบบไฮโดรไลซ์ด้วยกรด ส่วนของกรดเฮกซะไฮดรอกซีไดฟีนิกส์จะแยกตัวออกและเกิดปฏิกิริยา Lactonization ให้กรดเอลลาจิก (Ellagic acid) ตัวอย่างของเอลลาจิกแทนนิน ได้แก่ พุนิคาลาจิน (Punicalagin) และกรดชิบูลาจิก (Chebulagic acid) พืชที่ใช้เป็นยาที่เป็นแหล่งของเอลลาจิกแทนนิน ได้แก่ เปลือกผลทับทิม ผลสมอไทย เปลือกต้นโอ๊ค และใบยูคาลิปตัส



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมี (A) Gallic acid และ (B) Ellagic acid [25]

### 2.6.2 คอนเดนส์แทนนิน

คอนเดนส์แทนนิน (Condensed tannins) หรือที่เรียกอีกอย่างว่าโปรแอนโทไซยานิน (Proanthocyanin) เป็นกลุ่มของสารประกอบพอลิฟีนอลที่มีความซับซ้อนและสลายตัวด้วยน้ำยากกว่ากลุ่มไฮโดรไลเซเบิลแทนนิน โครงสร้างพอลิฟีนอลในกลุ่มนี้เป็นอนุพันธ์ของสารประกอบในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) พืชที่เป็นแหล่งของคอนเดนส์แทนนิน ได้แก่ เปลือกอบเชย เปลือกชินโคนา เปลือกหลิว เปลือกโอ๊ค เปลือกโกโก้ เปลือกและใบของ Hamamelis ราก Krameria และใบ โดยสารประกอบกลุ่มนี้เมื่อนำมาต้มกับกรดหรือทำปฏิกิริยากับเอนไซม์จะได้สารประกอบพอลิเมอร์ในรูปอสัณฐานสีแดงไม่สามารถละลายน้ำเรียกว่า Phobaphenes หรือ Tannin red จึงเรียกลักษณะนี้ว่า Phobatannins เมื่อนำสารประกอบกลุ่มนี้มาทำการกลั่นแบบแห้งจะได้สารประกอบที่เป็น Catechol tannins สารประกอบกลุ่มนี้จึงถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Catechol tannins สารในกลุ่มคอนเดนส์แทนนินประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลอิสระอยู่ 2 หมู่ [26]



รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของคอนเดนส์แทนนิน [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 ประโยชน์ของแทนนิน

1. ใช้ในการฟอกหนัง โดยสารแทนนินทำปฏิกิริยากับโปรตีนทำให้หนังที่ผ่านการฟอกแล้วมีสี และไม่เกิดการเน่าเสียหลังการฟอก นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องตีบางชนิด เช่น การทำให้เบียร์ใสมีรสขมและฝาด รวมทั้งกลิ่นในเครื่องตีบางประเภท เช่น เบียร์ ไวน์ ชา และกาแฟ เป็นต้น
2. ใช้ในการย้อม โดยใช้ย้อมแห อวน เชือก และเรือใบ ทำให้มีความทนทานต่อการใช้งานที่ต้องสัมผัสกับน้ำเค็ม ซึ่งอาศัยสมบัติการตกตะกอนกับโมเลกุลขนาดใหญ่ของแทนนิน
3. ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษและสีย้อม โดยมีผลให้สีที่ใช้ในการย้อมติดแน่นทนทาน นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการผลิตไม้อัดทดแทนการใช้สารฟีนอลสังเคราะห์ที่ผลิตจากปิโตรเคมีได้
4. ใช้รับประทานแก้อาการท้องเสียหรือท้องเดิน โดยสารแทนนินมีกลไกไปจับกับ Fungal protein, Bacteria protein, Viral protein หรือโมเลกุลขนาดใหญ่อื่นๆ ของเชื้อที่ก่อให้เกิดโรค ทำให้เชื้ออ่อนแอและไม่สามารถทำอันตรายกับร่างกายได้ นอกจากนี้ยังพบว่าอาหารสัตว์ที่มีสารแทนนินอยู่ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถลดอัตราการเกิดพยาธิในสัตว์ได้เช่นกัน
5. ใช้เป็นยารักษาแผลภายนอก โดยสารแทนนินจะทำปฏิกิริยากับผิวหนังชั้นนอกและเนื้อเยื่อ โดยผลิตเมือกคลุมผิวที่สามารถป้องกันน้ำได้ และมีฤทธิ์ต่อเส้นเลือดบริเวณผิวหนังทำให้เส้นเลือดหดตัว (Vasoconstrictor) ลดการสูญเสียน้ำจากบาดแผล ทำให้เนื้อเยื่อที่เป็นแผลหรือแผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ดีขึ้น บาดแผลจึงแห้งและหายได้เร็วขึ้น
6. ช่วยลดการเกิดอนุมูลอิสระในร่างกาย โดยสารแทนนินบางชนิดมีความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระ และยับยั้งการเกิด Superoxide anion ซึ่งมีผลช่วยลดการเกิดมะเร็งต่างๆ ได้ นอกจากนี้สารแทนนินยังมีสมบัติที่เป็นประโยชน์อีกมาก เช่น ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิด เช่น Lipoxigenase และ Angiotensin converting enzyme เป็นต้น อีกทั้งสารแทนนินบางประเภทมีโครงสร้างของสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ จึงมีสมบัติทำให้หลอดเลือดมีความยืดหยุ่นได้ดีไม่เกิดการเปราะหรือแตกได้ง่ายเมื่อได้รับการกระทบกระเทือน [26]

#### 2.6.4 พันธะระหว่างแทนนินและโปรตีน

พันธะระหว่างแทนนินและโปรตีนเป็นพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของฟีนอลและพันธะเอไมด์ไนโปรตีน [13] ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนของคอลลาเจนในหนังกับแทนนิน [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 คอมโพสิต (Composites) [41]

คอมโพสิต (Composites) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อยสองชนิดขึ้นไปที่มีสมบัติต่างกัน เมื่อผสมเป็นคอมโพสิตแล้วจะมีสมบัติที่ดีกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย

คอมโพสิตจัดเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน และมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคอมโพสิตมีข้อดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา แข็งแรง ค่ามอดุลัสต่อน้ำหนักสูง กรรมวิธีการขึ้นรูปง่าย และต้นทุนการผลิตต่ำ มีสมบัติที่ใกล้เคียงวัสดุเดิม และสามารถประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะ เซรามิก และไม้

### 2.7.1 ชนิดของคอมโพสิต [42]

1. คอมโพสิตแบบอนุภาค (Particulate composites) เกิดจากการกระจายอนุภาคในเมทริกซ์ ซึ่งอนุภาคจะมีรูปร่างการจัดเรียงตัว และขนาดต่างๆกัน อาจเป็นผง หรือเม็ด ตัวอย่างคอมโพสิตชนิดนี้ ได้แก่ คอนกรีต หรือพาร์ทิเคิลบอร์ด เป็นต้น

2. คอมโพสิตแบบลามินาร์ (Laminar composites) เกิดจากการยึดติดระหว่างแผ่นวัสดุกับเมทริกซ์โดยอัดเป็นชั้นๆด้วยความดันสูงมีลักษณะคล้ายแซนวิช ตัวอย่างคอมโพสิตชนิดนี้ ได้แก่ กระดาษ หรือฟิล์ม เป็นต้น

3. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) เกิดจากเส้นใยเสริมแรงในเมทริกซ์ โดยเส้นใยที่นำมาใช้นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยอินทรีย์ (Organic fibers) เส้นใยอารามิด (Aramid fibers) เส้นใยแก้ว (Glass fibers) หรือเส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) เป็นต้น

### 2.7.2 องค์ประกอบของคอมโพสิต

#### 1. ส่วนเมทริกซ์ (Matrix phase)

เมทริกซ์ คือ วัสดุที่เป็นโครงสร้างหลัก เป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ของวัสดุผสม โดยทั่วไปจะมีความเหนียวสูง แต่มีความแข็งแรง และมอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์เป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) และปกคลุมส่วนเสริมแรงช่วยยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน เมื่อเมทริกซ์ได้รับการกระทบจากภายนอกกระทำ ภาระที่กระทำจะถูกส่งผ่านจากเมทริกซ์ไปสู่ส่วนเสริมแรงซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่า เป็นผลให้เกิดการรับภาระได้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ไม่มีการเสริมแรง เมทริกซ์ที่นิยมใช้ ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ เป็นต้น

### หน้าที่หลักของเมตริกซ์ในคอมโพสิต มีดังนี้

1. คงความเสถียรในรูปร่างและขนาดของวัสดุคอมโพสิต
2. รักษาการกระจายตัว และการยึดเกาะของเส้นใย
3. ทำให้สามารถทนต่อการเสียดสีภายใต้อุณหภูมิ หรือแรงกระทำที่ระดับหนึ่งๆ
4. สามารถกระจาย หรือ ส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังเส้นใยได้
5. ช่วยให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อม และมีความเสถียรในตัวกลางต่างๆ

### พอลิเมอร์เมตริกซ์ โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. เทอร์โมเซต (Thermoset) พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตจะมีรูปทรงถาวรผลิตผลที่ได้ไม่สามารถนำไปหลอมขึ้นรูปซ้ำ และไม่ละลายในตัวทำละลายไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าก่อนผ่านกระบวนการเตรียมโครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการโดยให้ความร้อน หรือความดันเข้าไปจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้ผลิตผลที่ได้มีความคงทนไม่หลอมละลาย ถ้าให้ความร้อนมากๆจะไหม้ และสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม [43]

2. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) จะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อถูกความร้อนสามารถหลอมตัวได้และเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัว สามารถทำให้หลอมและแข็งตัวหลายๆครั้ง โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป อาจแยกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (Amorphous thermoplastic) และเทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (Semi-crystalline thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติกจะไม่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นความแข็งแรงเป็นผลโดยตรงจากสมบัติของหน่วยซ้ำ หรือมอนอเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุลที่สูง เทอร์โมพลาสติกอสัณฐานจะมีการพันกันของสายโซ่โมเลกุลซึ่งจะส่งผลคล้ายกับการเกิดการเชื่อมโยง และในพอลิเมอร์ที่สามารถตกผลึกได้จะมีการจัดเรียงตัวที่ดีทำให้เมตริกซ์มีความแข็งแรง สมบัติของเทอร์โมพลาสติกจะขึ้นกับองค์ประกอบเป็นผลึก สัณฐานวิทยา และการจัดเรียงตัวของผลึก ซึ่งจะขึ้นกับสภาวะในการผลิตตัวอย่างเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอไมด์ พอลิสไตรีน พอลิพอฟิลีน และพอลิเอทิลีน เป็นต้น [44]

### 2. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase)

ส่วนเสริมแรง คือ ส่วนประกอบที่ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงสูงขึ้น มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) มีความแข็งแรงกว่าเมตริกซ์ เป็นส่วนรับแรงที่ถูกส่งผ่านมาจากเมตริกซ์ ขนาดและรูปร่างของสารเสริมแรงเป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพในการเสริมแรง ซึ่งอาจมีลักษณะเป็นแผ่น อนุภาคเล็กๆ หรือเส้นใยก็ได้วัสดุเสริมแรงที่นิยมใช้ ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น

#### หน้าที่ของส่วนเสริมแรง

1. เพิ่มความแข็งแรงทนทาน ความเหนียว การคืบ ความมีเสถียรภาพให้กับวัสดุผสม
2. รับแรงกระทำจากภายนอก โดยแรงกระทำนั้นจะถูกถ่ายทอดไปตามเส้นใย

### สมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรง

1. มีมอดุลัสยืดหยุ่นสูงเพื่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง
2. เส้นใยควรจะมีค่าความแข็งแรงสูง
3. ความแข็งแรงของเส้นใยแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมาก
4. เส้นใยควรจะมีเสถียร และรับความแข็งแรงขณะจัดเก็บ และขึ้นรูปได้
5. ส่วนศูนย์กลาง และพื้นผิวของเส้นใยควรมีลักษณะเหมือนกัน

### ปัจจัยสำคัญของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

#### 1. การกระจายของเส้นใย (Fiber dispersion)

วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีนั้น ต้องมีการกระจายของเส้นใยในเมทริกซ์ที่ดี มีความสม่ำเสมอ โดยปัจจัยที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการกระจายของเส้นใยในเมทริกซ์ คือ การเกิดอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยกับเส้นใยด้วยตัวเอง และความยาวของเส้นใยที่ใช้ จากปัจจัยดังกล่าวนี้จะส่งผลกระทบต่อ การเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) ในระหว่างการผสมของเส้นใย กล่าวคือโดยธรรมชาติแล้ว เส้นใยธรรมชาติจะเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนในระหว่างการผสมได้ง่าย เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลสจากเส้นใยจับกับเส้นใยด้วยตัวเอง ดังนั้น วิธีที่จะทำการลดการเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใย สามารถทำได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใย

#### 2. การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ (Fiber-matrix adhesion)

การยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของเส้นใยกับเมทริกซ์มีความสำคัญต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกลศาสตร์เชิงพลศาสตร์ และลักษณะการไหล (Rheology) ของคอมโพสิต เนื่องจากการเกิดการส่งผ่านความเค้น (Stress) จะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของเมทริกซ์และเส้นใย แก๊ซโดยการเติมตัวเชื่อมประสาน ทำให้สามารถปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ให้เพิ่มขึ้นได้

#### 3. การจัดเรียงตัวของเส้นใย (Fiber orientation)

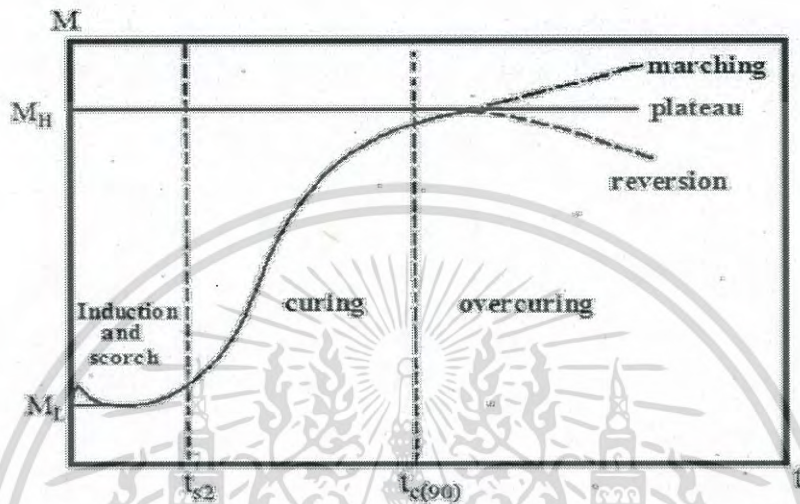
การจัดเรียงตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ ถือว่ามีบทบาทที่สำคัญเกี่ยวกับแอนไอโซทรอปี (Anisotropy) ในเมทริกซ์ เส้นใยที่นำมาเสริมแรงจะมีทิศทางของการจัดเรียงตัวขึ้นอยู่กับธรรมชาติของการไหล เช่น การไหลแบบคอนเวจเนนต์ (Convergent flow) เส้นใยจะมีการจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรงในทิศทางตามแนวยาว แบบไดเวจเนนต์ (Divergent flow) เส้นใยจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวขวาง ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบหัวตายของเครื่องอัดรีด (Extruder) เพื่อควบคุมการจัดเรียงตัวของเส้นใย

#### 4. ปริมาณของเส้นใย (Fiber concentration)

ปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงในยาง NBR ถ้าใช้ปริมาณเส้นใยที่น้อย ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยาง NBR ที่ได้มีค่าต่อยลง ซึ่งการเติมปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงสมบัติความทนต่อแรงดึง โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าพอลิเมอร์เริ่มต้น อย่างไรก็ตามการเติมปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปอาจทำให้สมบัติเชิงกลลดลงได้

## 2.8 การศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง

การศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงของยางด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยง MDR แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดและเวลาตัวอย่างของกราฟแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ตัวอย่าง Cure curve แสดงลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) [13]

จากกราฟอธิบายบริเวณส่วนต่างๆและความหมายของคำศัพท์ได้ดังนี้

Induction and scorch	ช่วงเวลาก่อนเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของยาง
Curing	ช่วงเวลาที่สารเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของยาง
Over curing	ช่วงเวลาลังการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของยาง
Reversion	ยางเกิดการเสียดสภาพทางความร้อนทำให้ค่าแรงบิดลดลง
Plateau	ยางไม่เกิดการเสียดสภาพทางความร้อน
Marching	ยางเกิดการเชื่อมโยงมากกว่าปกติทำให้ยางแข็งขึ้น ค่าแรงบิดจึงเพิ่มขึ้น

จากกราฟแสดงลักษณะการคงรูปของยางสามารถอธิบายค่าต่างๆได้ดังนี้

$M_L$ (Minimum torque)	ความแข็งของยางที่ยังไม่คงรูปค่าแรงบิดต่ำสุด
$M_H$ (Maximum torque)	ความแข็งของยางหลังจากคงรูปแล้วค่าแรงบิดสูงสุด
$t_{s2}$ (Scorch time)	เวลาเริ่มเชื่อมโยงเป็นเวลาทีค่าแรงบิดเพิ่มสูงขึ้น 2 นิวตัน-เมตร (N.m) เป็นเวลาที่กำมะถันเริ่มทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Curing) กำหนดเป็นช่วงเวลาที่สามารถขึ้นรูปอย่างผสมสูตรเป็นรูปร่างผลิตภัณฑ์ยางตามที่ต้องการโดยยางยังไม่เกิดการเชื่อมโยง

$t_{c(90)}$ (Cure time)	เวลาเชื่อมโยงเป็นเวลาที่ย่างคงรูปเกิดการเชื่อมโยงที่ตีที่สุด กำหนดเป็นเวลาที่ย่างเชื่อมโยง 90% หรือค่าแรงบิดเพิ่ม 90% จากค่าบิดต่ำสุด( $M_{t90}$ ) สามารถหาค่าได้จาก $M_{t90} = 0.9 (MH - ML) + ML$
CRI (Cure rate index)	ดัชนีอัตราเร็วในการคงรูปหาได้จาก $CRI = 100 / (t_{c90} - t_{c2})$

## 2.9 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำได้จากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์หรือการแตกตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ เขม่าดำจัดเป็นสารตัวเติมที่สำคัญที่สุดและมีปริมาณการใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากเขม่าดำมีราคาถูกสามารถใส่เขม่าดำในยางได้ในปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) และที่สำคัญที่สุดคือเขม่าดำสามารถช่วยเสริมแรงให้กับยางอย่างมากอาจทำให้ความแข็งแรง (Strength) ของยางเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ของยาง เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น การใช้เขม่าดำมีข้อเสียคือผลิตภัณฑ์ยางที่ใส่สารตัวเติมเขม่าดำจะมีสีดำ เช่น ยางรถยนต์ และสายพาน เป็นต้น [39]

### 2.9.1 ชนิดและวิธีการผลิตเขม่าดำ

#### 1. เขม่าดำชนิดเฟอร์เนส (Furnace blacks)

เขม่าดำชนิดเฟอร์เนสเป็นชนิดที่นิยมใช้แพร่หลายทั่วไป และมีปริมาณการใช้งานมากที่สุด เขม่าดำชนิดนี้ผลิตได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเชื้อเพลิงคือ ก๊าซธรรมชาติ หรือน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel oil) เผาไหม้ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนที่มากเกินไปเกิดเป็นอากาศร้อนหมุนวนภายในเตาเผาบริเวณเผาไหม้ (Combustion zone) น้ำมันวัตถุดิบนิยมใช้เป็นน้ำมันหนักที่เหลือจากกระบวนการกลั่นน้ำมัน (Refinery heavy oil) ที่มีสารอะโรมาติกปริมาณมากถูกฉีดเข้าไป ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กลายเป็นกาบคาร์บอนลักษณะเป็นก้อนเขม่าดำปริมาณมาก ซึ่งถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว (Quench) ด้วยน้ำ เขม่าดำชนิดเฟอร์เนสมีโครงสร้างเป็นก้อนกลมติดกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า “แอกกรีเกต” มีโครงสร้างขนาดเล็ก (ประมาณ 10-100 nm) มีปริมาณออกซิเจนต่ำ (มีน้อยกว่า 1 %) เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวเกิดเป็นสารไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ที่มีหมู่ฟังก์ชันอะตอมออกซิเจนบางประเภทหรือออกซีไฮโดรคาร์บอน (Oxyhydrocarbons) ปริมาณเล็กน้อย พื้นผิวของเขม่าดำเป็นกลางหรือเป็นเบสเล็กน้อย (pH ประมาณ 8)

#### 2. เขม่าดำชนิดเทอร์มอล (Thermal blacks)

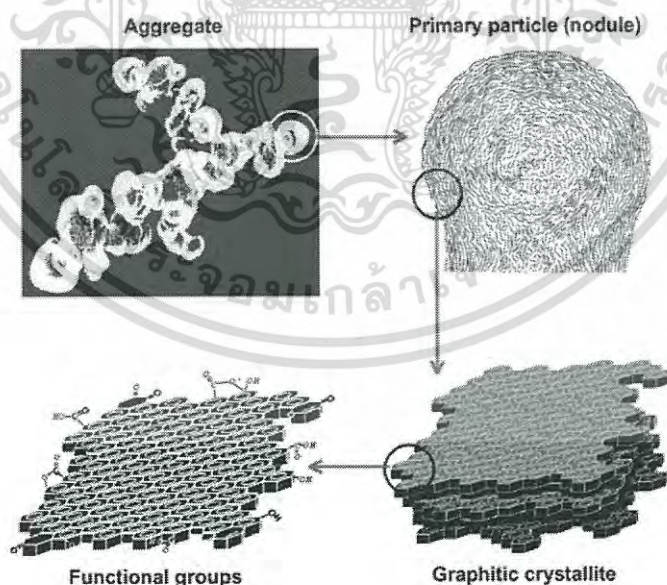
เขม่าดำชนิดเทอร์มอลเกิดจากการแตกตัว (Cracking) ของน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนที่บริเวณผิวร้อนภายในเตาเผาอุณหภูมิสูงได้เป็นเขม่าดำที่ไม่ถูกออกซิไดซ์ (Unoxydized blacks) เขม่าดำชนิดนี้มีขนาดใหญ่ (ประมาณ 100-150 nm) ลักษณะเป็นก้อนกลม โครงสร้างน้อยและมีพื้นที่ผิวน้อย

### 3. เขม่าดำชนิดซัลแนล (Channel blacks)

เขม่าดำชนิดซัลแนลมีกระบวนการผลิตเขม่าดำชนิดนี้ค่อนข้างเก่าล้าสมัยจึงไม่เป็นที่นิยมใช้ เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติที่ตะเกียงเผาทำให้เกิดเขม่าเกาะสะสมที่ผิวภายในท่อเหล็ก (Channel iron) เย็นที่ต่อยาวไปมาเป็นอนุกรม ทำให้ได้เขม่าดำชนิดซัลแนลมีพื้นผิวที่ถูกออกซิไดซ์มีความเป็นกรดขนาดเล็กมาก (ประมาณ 1-3 nm) การใช้เขม่าดำชนิดนี้มีผลห่วงปฏิบัติการเชื่อมโยงของยางเนื่องจากมีความเป็นกรด

#### 2.9.2 รูปร่าง และโครงสร้างของเขม่าดำ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเขม่าดำที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM) เห็นว่าเขม่าดำมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนกลมติดกันอย่างไม่เป็นระเบียบมีรูปร่างคล้ายพวงองุ่น (Grape-like structure) กลุ่มก้อนของอนุภาคที่ติดกันนี้คือ “แอกกรีเกต” เกิดจากการหลอมติดของอนุภาคขนาดเล็กๆ ที่เรียกว่า “โนดูล” (Nudules) ซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของเขม่าดำแต่ละโนดูลเกิดจากการเรียงตัวหลายๆ ชั้นของแผ่นแกรไฟต์ (Graphitic layer planes) เป็นผลึกเรียงเป็นวงขยายออกตามแนวรัศมีโครงสร้างผลึกของเขม่าดำไม่เป็นระเบียบเหมือนแกรไฟต์ เช่น มีระยะห่างระหว่างชั้นมากกว่า (ประมาณ 3.5 Å) มีอะตอมที่หายไป (Missing atoms) และอาจมีหมู่ฟังก์ชันหรืออะตอมของธาตุอื่นด้วย เช่น ออกซิเจน โครงสร้างของเขม่าดำแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของเขม่าดำ [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) [12,39]

แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมสีขาวที่ได้จากธรรมชาติเกิดจากการสะสมตะกอนเป็นเวลานาน เช่น ซากเปลือกหอยต่างๆ เป็นองค์ประกอบสำคัญของเปลือกโลกที่มีมากชนิดหนึ่ง แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเพิ่มเนื้อที่นิยมใส่ผสมพอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนการผลิต เช่น พลาสติก ยาง สี สิ่งทอ กาว พรม ฯลฯ เนื่องจากมีความขาว (Whiteness) สมบัติความเสียดทานต่ำ มีหลายขนาดให้เลือกใช้ และมีราคาถูก แต่มีข้อจำกัดคือมีความหนาแน่นสูง (ประมาณ  $2.72 \text{ g/cm}^3$ ) ไม่ทนกรด ไม่สามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์อย่างที่สัมผัสกับกรด เนื่องจากจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทำปฏิกิริยากับกรด แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมอนินทรีย์ มักจับตัวเป็นก้อนจึงนิยมใช้สารช่วยกระจายตัว เช่น กรดสเตียริกเคลือบสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัว นอกจากนี้ยังไม่มีประสิทธิภาพการเสริมแรง (Non-reinforcing filler) หรือสามารถเสริมแรงเพียงเล็กน้อย จึงนิยมใช้ผสมเพื่อเพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว

แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถเตรียมได้จากการบดแห้ง (Dry grinding) บดเปียก (Wet grinding) และการตกตะกอน (Precipitation) การบดแห้งมีกระบวนการผลิตที่ง่าย โดยการให้แรงบดให้แตก (Crushing) ทำให้เป็นผง (Pulverizing) และแยกขนาดโดยการใช้ลมเป่า แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดแห้งมีความบริสุทธิ์ต่ำ และมีขนาดใหญ่ (ขนาดมากกว่า  $12 \mu\text{m}$ ) กระบวนการบดเปียกจะทำการชะล้างสิ่งเจือปนที่มีสี และแยกขนาดโดยการหมุนปั่นความเร็วสูง จะได้แคลเซียมคาร์บอเนตขนาดเล็กกว่า และมีความบริสุทธิ์สูงกว่า

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนสามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น กระบวนการโซลเวย์ (Solvay) รีคาร์บอนชัน (Recarbonation) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ตัวอย่างการผลิตโดยกระบวนการรีคาร์บอนชันเป็นวิธีที่สำคัญ และง่ายที่สุด สามารถแสดงได้ดังสมการ



กระบวนการผลิตเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (Calcination) ของหินปูน (Limestone) ที่ประมาณ  $900^\circ\text{C}$  เพื่อให้ได้แคลเซียมออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นเป็นขั้นตอนการทำปฏิกิริยากับน้ำ ให้ได้สารละลายสีขาวคล้ายน้ำนมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในขั้นตอนที่สามเป็นปฏิกิริยาคาร์บอนชันโดยการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในถังปฏิกรณ์ที่เรียกว่าคาร์บอนเตออร์ (Carbonator) การละลายแล้วตกตะกอนใหม่ทำให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความบริสุทธิ์สูง อนุภาคขนาดเล็ก ช่วยเสริมแรงเมื่อใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ แต่มีราคาแพง

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด (ธรรมชาติ) มีปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ประมาณ 94% ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนมีปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  มากกว่า 98% แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารอนินทรีย์มีขี้สามารถเข้ากับยางที่มีขี้มากกว่ายางที่ไม่มีขี้ และอาจจับตัวเป็นก้อนไม่กระจายตัวในยางเช่นเดียวกับสารตัวเติมอนินทรีย์อื่นๆ ดังนั้นการเคลือบสารบางประเภท เช่น กรดสเตียริก หรือซันสน เพื่อช่วยเพิ่มกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดต่างๆ [12]

สมบัติ	Ground CaCO <sub>3</sub>		Precipitated CaCO <sub>3</sub>
	Fine	Coarse	
Average particle size (µm)	3-14	17	0.07
Desity (g/cm <sup>3</sup> )	2.71	2.71	2.55-2.65
Surface area, BET (m <sup>2</sup> /g)	0.9-2.2	-	11-26
Oil absorption, ASTM D-281	5-21	5-6	28-58
Mohs hardness	2.5-3	3	2.5-3

### 2.11 ซิลิกา (Silica) [12, 39, 40]

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำอื่นๆ โดยเฉพาะซิลิกาที่ขนาดอนุภาคเล็ก ข้อดีของซิลิกา คือช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่น เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด ลดความร้อนสะสม เพิ่มความต้านทานการสึกหรอ และเพิ่มการยึดเกาะกับองค์ประกอบอื่นๆ ในยางเป็นต้น เมื่อเทียบกับเขม่าดำที่มีพื้นที่ผิวเท่ากันแล้วซิลิกาทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเขม่าดำเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ โดยเฉพาะค่ามอดูลัส และค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ เนื่องจากซิลิกามีอันตรกิริยากับยางธรรมชาติต่ำกว่าเขม่าดำ การใช้งานซิลิกาจึงนิยมใช้สารคู่ควบเติมลงไปด้วย เช่น สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ทำหน้าที่เคลือบผิวอนุภาคซิลิกาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคทำให้สมบัติของยางดีขึ้น

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ได้จากทั้งธรรมชาติ และการสังเคราะห์ สมบัติของซิลิกาขึ้นกับหลายปัจจัย ได้แก่

- ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิว
- ปริมาณน้ำในโครงสร้าง (Extent of hydration)
- สมบัติทางกายภาพ เช่น พีเอช องค์ประกอบทางเคมี การดูดซับน้ำมัน ฯลฯ

เนื่องจากซิลิกาประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน และออกซิเจนจึงมีหมู่ไฮดรอกซิลชนิดต่างๆ บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำที่สามารถเกาะติดบนพื้นผิว และยังมีผลต่อความเป็นกรดบนพื้นผิวของซิลิกาอีกด้วย จากความมีขั้วหรือความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของซิลิกาทำให้สารตัวเติมชนิดนี้สามารถเสริมแรงได้ดีในยางที่มีขั้ว เช่น ยางไนไตรล์หรือยางคลอโรพรีนมากกว่ายางที่ไม่มีขั้ว เช่น ยางธรรมชาติ และยางเอสปีอาร์

ซิลิกาสามารถแบ่งได้หลายชนิดดังนี้

#### 1. ซิลิกาจากธรรมชาติ หรือซิลิกาชนิดบด (Ground silica)

ซิลิกาจากธรรมชาติ หรือซิลิกาชนิดบดเป็นซิลิกาที่ได้จากธรรมชาติโดยการขุดจากเหมืองแล้วทำการบดให้มีขนาดเล็กเป็นผลึกโดยธรรมชาติ ซิลิกาชนิดบดนิยมใช้เติมเพื่อลดต้นทุนเนื่องจากมีราคาถูก

และช่วยเพิ่มสมบัติการทนความร้อน สามารถแบ่งย่อยได้ 3 ชนิดคือ ซิลิกาผลึก (Crystalline silica) ซิลิกาผลึกเล็ก (Microcrystalline silica) และซิลิกาไดอะตอมเมเชียส (Diatomaceous silica)

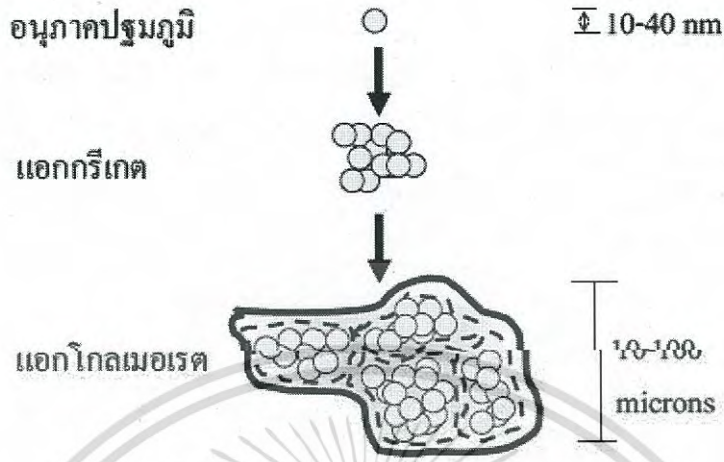
## 2. ซิลิกาชนิดสังเคราะห์ (Synthetic silica)

ซิลิกาชนิดสังเคราะห์มีลักษณะเป็นผงสีขาวขนาดเล็กสามารถแบ่งย่อยได้ 2 ชนิดคือ ซิลิกาชนิดไอ (Fumed silica) และซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica)

### 2.11.1 ลักษณะโดยทั่วไปของซิลิกา

โครงสร้างซิลิกาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-40 nm ซิลิกาไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ ในรูปของอนุภาคปฐมภูมิ แต่จับกลุ่มรวมกันเป็นก้อนเรียกว่า แอกรีเกต เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิซึ่งโครงสร้างนี้ไม่ถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสม นอกจากนี้แอกรีเกตของซิลิกายังชอบจับกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่มากขึ้น เรียกว่า แอ็กโกเมอเรต เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.16

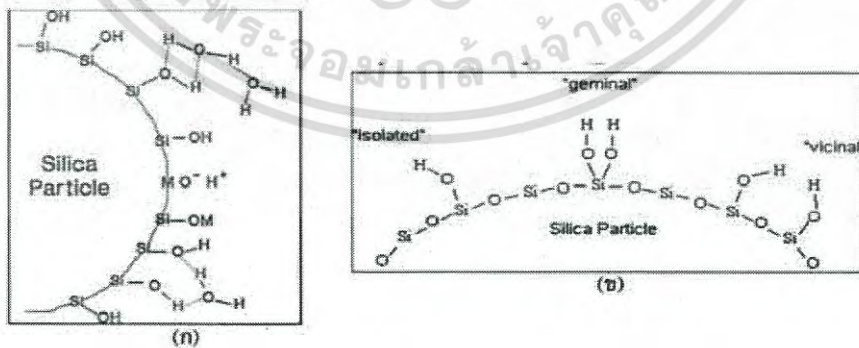




รูปที่ 2.16 การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลิกา [45]

2.11.2 ลักษณะทางเคมีของพื้นผิว

ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวซิลิกาเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ควบคุมระดับการเสริมแรงของซิลิกา เพราะลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเป็นตัวบ่งชี้ระดับของอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา โดยทั่วไปบนพื้นผิวซิลิกาประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่ปกคลุมอยู่อย่างหนาแน่น (4-5 หมู่ต่อ 100 Å) ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกานี้เกาะอยู่ในหลายลักษณะ ดังรูปที่ 2.17 หมู่ไฮดรอกซิลทำให้พื้นผิวซิลิกา มีความเป็นกรดและมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หมู่ไฮดรอกซิลสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ ที่มีอยู่ในยางคอมพาวด์ได้ เช่น สารคู่ควบไซเลน น้ำ หรือไกลคอล เป็นต้น



รูปที่ 2.17 ลักษณะของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกา [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. H. El-Sabbagh และ O.A. Mohamed [27] ศึกษาการใช้ผงหนังฟอกโครมขนาด 20 mesh เป็นสารตัวเติมในยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอิน โดยใช้ผงหนังที่ไม่ได้รับการปรับสภาพและที่ได้รับการปรับสภาพด้วยสารละลายแอมโมเนีย และโซเดียมฟอเมต จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปรับสภาพด้วยสารละลายแอมโมเนีย และโซเดียมฟอเมต ผงหนังจะมีขนาดอนุภาคเล็กลง ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลได้ ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าช่วยเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและค่ามอดุลัส สมบัติเหล่านี้เกิดจากการเพิ่มความหนาแน่นในการเชื่อมโยงระหว่างผงหนังกับยาง ค่าความต้านทานแรงดึงหรือค่าความเครียดลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของผงหนัง และยังลดการบวมตัวของยางได้อีกด้วย เพิ่มอายุการใช้งานและทนต่ออุณหภูมิดีกว่ายางที่ไม่ได้เติมผงหนัง

สุดาพร ศักดิ์ศีลธร [6] ศึกษาการใช้ผงหนังชนิดฟอกผาดเป็นสารตัวเติมสำหรับยางธรรมชาติโดยได้ทำการศึกษาผลของการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และแว็กซ์สังเคราะห์ (PE wax และ OPE wax) ผลของปริมาณแว็กซ์สังเคราะห์ (OPE wax 1, 2 และ 3 phr) ผลของขนาดอนุภาคผงหนัง (เล็กกว่า 35, 51-100, 101-150 และ 151-200 mesh) ผลของปริมาณผงหนัง (30 และ 100phr) และผลของวิธีการปรับปรุงพื้นผิวผงหนังพบว่าการเติม PEG และแว็กซ์สังเคราะห์ (PE wax และ OPE wax) ส่งผลให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงอย่างลดลงและสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรดีขึ้นโดย PE wax ใช้เวลาเชื่อมโยงน้อยกว่าเมื่อศึกษาปริมาณ OPE wax 1, 2, และ 3 phr พบว่าปริมาณ OPE wax ที่มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมโยงดีขึ้น ความหนาแน่นการเชื่อมโยงมากขึ้นการเติมผงหนังขนาดเล็กลงกว่า 35 mesh ทำให้เกิดการเชื่อมโยงอย่างรวดเร็วเล็กน้อยและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ในการศึกษาปริมาณผงหนังระหว่าง 30 และ 100 phr พบว่าปริมาณผงหนังที่มากขึ้นส่งผลทำให้การเชื่อมโยงอย่างช้าลงและสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรลดลง และเมื่อศึกษาผลของวิธีการปรับปรุงพื้นผิวผงหนังพบว่าผงหนังที่ได้รับการเคลือบพื้นผิวด้วย OPE wax และเติมผง PEG ตอนผสมสูตรยาง มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด

เดชาธร ฉันทักษ์ [28] ศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำ (Black Rice Husk Ash; BRHA) เป็นสารตัวเติมชีวภาพในยางไนไตรล์ (Acrylonitrile Butadiene Rubber; NBR) โดยทำการศึกษาผลการปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำโดยใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และสารควบคู่ไซเลน Si-69 (ปริมาณ 5% และ 3% โดยน้ำหนักเถ้าแกลบดำตามลำดับ) ผลของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบดำ (100-150, 150-200, 200-250, เล็กกว่า 250 mesh และเถ้าแกลบดำบดละเอียด) ผลของปริมาณเถ้าแกลบดำ (0-120 phr) และเปรียบเทียบการใช้เถ้าแกลบดำกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆเตรียมตัวอย่างโดยการผสมยางกับเถ้าแกลบดำและสารเติมแต่งต่างๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) แล้วทำการทดสอบสมบัติเชิงกลสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตและศึกษาสัณฐานวิทยาจากการวิเคราะห์เถ้าแกลบดำด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่าเถ้าแกลบดำที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 6.1–128.9  $\mu\text{m}$  และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 6.1–17.3  $\text{m}^2/\text{g}$  องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบประมาณ 74% การปรับปรุงผิวเถ้าแกลบดำด้วย PEG และสารควบคู่ไซเลน Si-69 พบว่าทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงของ NBR ลดลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรดีขึ้น การเติมเถ้าแกลบดำบดละเอียดส่งผลให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงกับเวลาเชื่อมโยงลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับยางผสมสูตรที่ใช้เถ้าแกลบดำขนาดอื่นๆทำให้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงฉีกขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดอัดมีแนวโน้มลดลง ในการศึกษาปริมาณเก้าแกลบดำระหว่าง 0-120 phr พบว่าปริมาณเก้าแกลบดำเพิ่มมากขึ้นไม่ส่งผลต่อเวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยง แต่ส่งผลให้มีค่าความหนืดมูนิ ค่าทอร์กสูงสุด และเกิดการเสียหายแบบเกิดการเชื่อมโยง (Marching) มีแนวโน้มสูงขึ้นในด้านสมบัติเชิงกล พบว่าการใช้เก้าแกลบดำปริมาณ 100 phr ให้ค่าที่ดีที่สุดและเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้าพบว่าเก้าแกลบดำจัดเป็นสารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง โดยสามารถลดต้นทุนและปรับปรุงสมบัติบางประการของยางไนไตรล์ได้

A. Przepiorkowska และคณะ [29] ศึกษาการใช้ผงหนังฟอกโครมเป็นสารตัวเติมในยางคาร์บอกซิเลตบิวทาไดอินอะคริโลไนไตรล์ (XNBR) หรือยางบิวทาไดอินอะคริโลไนไตรล์ (NBR) โดยใช้ผงหนังขนาด 20 mesh ผสมซิงค์ออกไซด์ และใช้ลิมานอล พีอีวี (Limanol PEV) เป็นสารช่วยในการกระจาย พบว่าเมื่อใช้ผงหนังผสมซิงค์ออกไซด์เป็นสารตัวเติมในยางจะสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล ความต้านทานแรงดึง ความยืดที่จุดขาด และเพิ่มความหนาแน่นในการเชื่อมโยงยางได้อย่างดีเยี่ยม นอกจากนี้ผงหนังยังช่วยลดเวลาในการเชื่อมโยงได้

K. Ravichandran และ N. Natchimuthu [30] ศึกษาการใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยใช้ผงหนังที่ผ่านการปรับสภาพให้เป็นกลางด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต, ยูเรีย และแอมโมเนีย และเศษยางธรรมชาติขนาด 40 mesh ผสมลงในยางธรรมชาติ นำมาทดสอบการบวมตัวในตัวทำละลายคือโทลูอีนและน้ำ พบว่ายางที่เติมผงหนังที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพให้เป็นกลาง เกิดการบวมตัวในโทลูอีนน้อยกว่า แต่จะบวมตัวในน้ำได้มากกว่า และเมื่อเพิ่มปริมาณผงหนังมากขึ้นการบวมตัวในตัวทำละลายทั้งสองเพิ่มขึ้น ดังนั้นการปรับสภาพผงหนังให้เป็นกลาง และปริมาณการเติมผงหนังมีผลต่อการบวมตัวของยาง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผงหนังได้ถูกนำมาใช้เป็นสารตัวเติมชีวภาพสำหรับอุตสาหกรรมยางทั้งแบบฟอกผาดและฟอกโครม พบว่าการใช้ PEG ทำให้ยางผสมสูตรมีการเชื่อมโยงดีขึ้น โดยเวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงของยางลดลง สมบัติเชิงกลมีค่าดีขึ้น แต่การใช้แวกซ์สังเคราะห์ร่วมด้วย ทำให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด และยังพบอีกว่าสารตัวเติมที่มีขี้ เช่น เก้าแกลบดำ และผงหนัง สามารถเข้ากับยางที่มีขี้ เช่น NBR ได้ดีกว่ายางที่ไม่มีขี้ เช่น NR

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

- ยางไนไตรล์ (NBR): Kumho KNB 35L (Acrylonitrile Butadiene rubber) บริษัท Korea Kumho Petrochemical co.,Ltd
- สารตัวเติม (Filler): เศษผงหนังฟอกผัดตัดเจียร (Leather powder) ห้างหุ้นส่วนจำกัด กริชมณีโปรดักส์
- สารตัวเติม (Filler): ซิลิกา (Silica) เกรด Tokusil<sup>®</sup> UR-T บริษัท Tokuyama Siam Silica จำกัด
- สารตัวเติม (Filler): เขม่าดำ (Carbon black) เกรด N330 บริษัท Thai Carbon Black public จำกัด
- สารตัวเติม (Filler): แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) เกรด Calflex<sup>®</sup> C บริษัท โปลีเคม จำกัด
- สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent): กำมะถัน (Sulfur) เกรดการค้าบริษัท สหไพศาล อินดัสทรี จำกัด
- สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerator): MBTS (Mercaptobenzothiazole disulfide) เกรดการค้า บริษัท มอนเพล็กซ์ จำกัด
- สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง: TMTD (Tetramethlythiuram disulfide) เกรดการค้า บริษัท อาร์คิมา จำกัด
- สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activator): กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า บริษัท พีที ซิสเตน รายา เคมีคัล จำกัด
- สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง: ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เกรดการค้า บริษัท จักรवालเคมี จำกัด
- สารหล่อลื่น (Lubricant): น้ำมัน Parlenox W บริษัท Chemical Solution จำกัด
- สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradant): วิงสเตย์แอล (Wingstay L) เกรดการค้า บริษัท ออมโนว่า โคลูชั่นส์ จำกัด

13. แวกซ์สังเคราะห์: Polyethylene homopolymer wax เกรด WD2040P<sup>®</sup> บริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด
14. พอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 (Polyethylene glycol; PEG 4000) เกรดการค้า บริษัท คอลติค จำกัด
15. ไซลีน (Xylene) เกรดการค้า บริษัท แลป ซิสเต็ม จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ PE Wax: WD2040P<sup>®</sup>

สมบัติ	ค่าที่ได้
ความหนืด (Viscosity) ที่ 140°C	400 ± 50 cPs
ความหนาแน่น (Density)	0.92 ± 0.01 g/cm <sup>3</sup>
Penetration Hardness	Max. 5 d.mm
ค่าอุณหภูมิอ่อนตัว (Softening point)	107 ± 3 °C
ลักษณะของผลิตภัณฑ์ (Product form)	ผงสีขาว

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของซิลิกา (Tokusil<sup>®</sup> UR-T)

สมบัติ	ค่าที่ได้
พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area)	170 m <sup>2</sup> /g
pH (5% suspension)	7
ความหนาแน่น (Density)	0.24 g/cm <sup>3</sup>
SiO <sub>2</sub> (Hydrated base)	93%
Ignition loss	14%

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของเขม่าดำ (N 330)

สมบัติ	ค่าที่ได้
ปริมาณคาร์บอน (Carbon content)	94.8%
ปริมาณเถ้า (Ash content)	0.7%
สารระเหย (Volatile matter)	2.0%
พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area)	71-85 m <sup>2</sup> /g
ความชื้น (Moisture)	2.5%
ความหนาแน่น (Density)	1.8 g/cm <sup>3</sup>
ขนาดอนุภาค (Particle size)	0.02-0.03 μm

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนต เกรด Calflex<sup>®</sup> C

สมบัติ	ค่าที่ได้
Whiteness	95.0%
พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area)	30 m <sup>2</sup> /g
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	2.56
ความหนาแน่น (Density)	1.4 cc/g
ขนาดอนุภาค (Particle size)	0.04 μm

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องผสมแบบชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น LRM150 บริษัท แล็บเทคเอ็นจิเนียร์ จำกัด
2. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น FOR LP-2020 บริษัท แล็บเทคเอ็นจิเนียร์ จำกัด
3. แม่แบบ (Mold) ขนาด 152.4 x 152.4 ตารางมิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร
4. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM) รุ่น LR5K บริษัท ลอยด์อินสทรูเมนต์ จำกัด
5. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Durometer hardness tester) ชนิด Shore A รุ่น TECLOCK GS-719N บริษัท เอทีเอส ฟาร์เอส พี เอ จำกัด
6. เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่น SMV-201 บริษัท ซิมดซู จำกัด
7. เครื่องวัดการเชื่อมโยงเอ็มดีอาร์ (Moving Die Rheometer; MDR) รุ่น II F 150 บริษัท นิซิโกโซจิ จำกัด
8. เครื่องวัดความต้านทานต่อการสึกกร่อน (DIN abrasion tester) รุ่น YC-2130 DIN-53516 บริษัท ซายน์ลูชั่น จำกัด
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น S-3400N บริษัท อิทาชิ ไฮเทคโนโลยี ยุโรป จีเอ็มบีเอช จำกัด
10. เครื่องร่อนแยกขนาด (Vibrating screen) บริษัท นัมเฮง จำกัด
11. ตู้อบความร้อน (Drying oven) บริษัท โพรโทเทค อินเตอร์เทรด จำกัด
12. เครื่องชั่งแบบละเอียด (Balance scales) บริษัท ฟริชิสา จำกัด
13. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) บริษัท ฟิชเซอร์ไซแอนทิฟิก จำกัด
14. เครื่องปั๊มลม (Air compressor)
15. ปืนพ่นสี (Paint gun)
16. ปริภัณฑ์เครื่องแก้ว

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมผงหนัง

1. นำเศษผงหนังขนาดเล็กมาร่อนเพื่อแยกขนาด โดยร่อนผ่านตะแกรงให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 35 mesh (เล็กกว่า 500 ไมครอน)
2. เมื่อได้ผงหนังขนาดที่ต้องการจึงนำไปอบในตู้อบ โดยใช้ความร้อนอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรืออบให้น้ำหนักผงหนังคงที่ เพื่อกำจัดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน
3. การปรับปรุงผงหนังโดยการเคลือบพื้นผิวผงหนัง
  - 3.1. การเคลือบพื้นผิวผงหนังด้วยแว็กซ์ (PE wax) ละลายแว็กซ์ในตัวทำละลายไซลีน ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 80°C จากนั้นนำสารละลายไปฉีดพรมให้ทั่วพื้นผิวผงหนัง นำผงหนังไปทิ้งไว้ในตู้ดูดควันให้ไซลีนระเหยแล้วจึงนำไปอบในตู้อบ โดยใช้ความร้อนอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรืออบจนไซลีนระเหยออกไปจนหมด ก่อนนำไปใช้งาน

#### 3.3.2 การเตรียมยางผสมสูตรและการขึ้นรูปยางผสมสูตร

1. ชั่งน้ำหนักยางไนไตรล์ที่ตัดเป็นชิ้น รวมทั้งซังสารเคมีต่างๆ ตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.5 สามารถเพิ่มน้ำหนักยางผสมสูตร โดยคำนวณตามอัตราส่วนที่กำหนด
2. ใส่ยางไนไตรล์ที่เตรียมไว้ลงในเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง เพื่อให้แรงเฉือนระหว่างลูกกลิ้งทำการบดย่อย (Mastication) ทำการกรีดพับยาง (Cut-and-fold) จนกระทั่งยางนิ่มใช้เวลาประมาณ 3-5 นาที ให้ยางไนไตรล์พันลูกกลิ้งและมีความหนาพอประมาณ
3. ใส่สารตัวเติมและสารเติมแต่งต่างๆ ยกเว้นสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงและสารเชื่อมโยงกำมะถัน ทำการกรีดพับยางเพื่อให้สารตัวเติมและสารเติมแต่งต่างๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในยาง โดยใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 10-15 นาที
4. เมื่อยางผสมเข้ากันดี แล้วจึงปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 5 มิลลิเมตร จากนั้นกรีดแผ่นยางออกจากลูกกลิ้ง ระวังอย่าให้แผ่นยางพับติดกัน
5. นำแผ่นยางที่ได้ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 50.8 x 20.8 ตารางมิลลิเมตร 2 แผ่นเพื่อใช้วัดหาค่าความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscosity) โดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscometer machine) กำหนดอุณหภูมิการวัดที่ 100°C โดยหาค่าความหนืด ML1+4(100°C) ของยางผสมสูตรก่อนการเชื่อมโยง  
หมายเหตุ ML 1+4(100°C) หมายถึงความหนืดมูนนี่ (M =Mooney) โดยใช้แกนหมุนขนาดใหญ่ (L =Large rotor) ทำการให้ความร้อนก่อน 1 นาที (1 =Preheat time 1 min) และทำการวัดค่าความหนืดมูนนี่เมื่อเวลาผ่านไป 4 นาที โดยวัดค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 100 °C ค่าความหนืดมูนนี่ไม่มีหน่วย (Dimensionless)
6. หลังจากตัดยางบางส่วนมาทำการทดสอบหาค่าความหนืดมูนนี่แล้วนำยางที่เหลือมากรีดพับในเครื่องบดผสมต่อ นำสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ได้แก่ MBTS, TMTD และสารเชื่อมโยงกำมะถันใส่ลงไปในยาง ทำการผสมจนสารที่เติมลงไปกระจายตัวสม่ำเสมอในยาง ขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เมื่อยางผสมเข้ากันดี แล้วจึงปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 5 มิลลิเมตร จากนั้นกรี๊ดแผ่นยางออกจากลูกกลิ้ง ระวังอย่าให้แผ่นยางพับติดกัน ได้ยางผสมสูตรออกมา

8. นำยางผสมสูตรที่ได้ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด  $50.8 \times 50.8$  ตารางมิลลิเมตร นำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยง MDR Curelastomer เพื่อหาเวลาเชื่อมโยงยาง ( $t_{c90}$ ) และเวลาเริ่มเชื่อมโยงยางหรือเวลาสกอร์ช ( $t_{s2}$ ) ที่อุณหภูมิ  $155^{\circ}\text{C}$

9. เมื่อหาเวลาเชื่อมโยงยางและเวลาเริ่มเชื่อมโยงยางได้แล้วนำยางผสมสูตรตัดใส่แม่พิมพ์สี่เหลี่ยมขนาด  $152.4 \times 152.4$  ตารางมิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร นำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) ที่อุณหภูมิ  $155^{\circ}\text{C}$  กำหนดเวลาเท่ากับเวลาเชื่อมโยงยางที่ได้จากเส้นกราฟ โดยใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น  $(t_{c90}) \times 1.2$  เพื่อเป็นเวลาในการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่พิมพ์และภายในชิ้นงาน นำยางที่อัดขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วมาใช้ทดสอบสมบัติต่างๆต่อไป



ตารางที่ 3.5 สูตรผสมยางในการทดลองศึกษาผลของผงหนังในยาง [6]

สาร	สูตรที่ (phr*)
ยางสังเคราะห์ (NBR)	100
ผงหนังฟอกผาด***	30,60 และ 80
ซิลิกา (Silica)***	60
เขม่าดำ (Carbon black)***	60
แคลเซียมคาร์บอเนต(Calcium Carbonate)***	60
Polyethylene glycol (PEG)***	0 และ 3%**
แว็กซ์สังเคราะห์	3
สารหล่อลื่น – Parlenox W oil	7
สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง – Stearic acid	2
สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง – ZnO	5
สารเชื่อมโยง – Sulfur	1.5
สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง – MBTS	1
สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง – TMTD	0.3
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ – Wingstay L	1

หมายเหตุ

\* phr คือส่วนโดย 100 ส่วนของยาง (โดยน้ำหนัก)

\*\* 3% โดยน้ำหนักของปริมาณผงหนัง

\*\*\* ปัจจัยศึกษา

- ตอนที่ 1 ศึกษาผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์ (PE wax)
- ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณผงหนังที่ 0, 30, 60 และ 80 phr
- ตอนที่ 3 ศึกษาผลของชนิดของสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การศึกษาผลของผงหนังที่มีผลต่อยางไนไตรล์

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์ (PE wax)

- ทำตามขั้นตอนในข้อ 3.3.2 โดยเปลี่ยนปริมาณสารตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สูตรผสมยางในการทดลองสำหรับศึกษาผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์

สูตร	ขนาด ผงหนัง (mesh)	ปริมาณ PEG (phr)	ปริมาณ PE wax (phr)	ปริมาณ ผงหนัง (phr)	ปริมาณ NBR (phr)
NBR-L30U	เล็กกว่า 35	-	-	30	100
NBR-L30WP	เล็กกว่า 35	0.9	3	30	100
NBR-L30W	เล็กกว่า 35	-	3	30	100
NBR-L30P	เล็กกว่า 35	0.9	-	30	100

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณผงหนังที่ 0, 30, 60 และ 80 phr

- ทำตามขั้นตอนในข้อ 3.3.2 โดยเปลี่ยนปริมาณผงหนังตามตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 สูตรผสมยางในการทดลองสำหรับศึกษาผลของปริมาณผงหนัง

สูตร	ขนาด ผงหนัง (mesh)	ปริมาณ PEG (phr)	ปริมาณ PE wax (phr)	ปริมาณ ผงหนัง (phr)	ปริมาณ NBR (phr)
Unfilled	-	-	-	0	100
NBR-L30P	เล็กกว่า 35	0.9	-	30	100
NBR-L60P	เล็กกว่า 35	1.8	-	60	100
NBR-L80P	เล็กกว่า 35	2.4	-	80	100

### ตอนที่ 3 ศึกษาผลของชนิดสารตัวเติม

- ทำตามขั้นตอนในข้อ 3.3.2 โดยเปลี่ยนชนิดของสารตัวเติมตามตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 สูตรผสมยางในการทดลองสำหรับศึกษาผลของชนิดของสารตัวเติม

สูตร	ขนาด ผงหนึ่ง (mesh)	ปริมาณ PEG (phr)	ปริมาณ PE wax (phr)	ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	ปริมาณ NBR (phr)	ชนิดของ สารตัวเติม
NBR-L60P	เล็กกว่า 35	1.8	-	60	100	ผงหนึ่ง พอกผาด
NBR-CB60P	เล็กกว่า 35	1.8	-	60	100	เขม่าดำ
NBR-Si60P	เล็กกว่า 35	1.8	-	60	100	ซิลิกา
NBR-Ca60P	เล็กกว่า 35	1.8	-	60	100	แคลเซียม- คาร์บอเนต

#### 3.3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

##### 1. การทดสอบแรงดึง (Tensile tests)

ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างรูปร่างดัมเบลล์ (Dumbbell shape) โดยชิ้นงานมีความหนา  $2 \pm 0.15$  มิลลิเมตร [31] ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed: 500 mm/min

Gauge length: 25 mm

Load cell: 5 kN

ค่าการทดสอบที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ได้แก่

- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

ความแข็งแรงดึง เท่ากับความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุที่รับได้ เมื่อให้แรงดึง (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาได้จากสมการที่ 3.1

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

เมื่อ  $F$  = แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดสูงสุด (N)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ( $\text{mm}^2$ )

- เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) หาได้จากสมการที่ 3.2

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

เมื่อ  $l$  = ความยาวสุดท้าย ณ จุดขาดของชิ้นงาน (mm)

$l_0$  = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานหรือความยาวเกจ (mm)

- มอดุลัสของยาง (Rubber modulus)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบที่ 100 เปอร์เซนต์ (M100) คือค่าความเค้นดึง (Tensile stress) ที่ค่าความเครียด 100 เปอร์เซนต์ (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่)

## 2. การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)

ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM D624 แบบ Die C ทดสอบโดยการตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนก (Right angle) ชิ้นงานมีความหนา  $2 \pm 0.15$  มิลลิเมตร และสภาวะการทดสอบเหมือนกับการทดสอบแรงดึงโดยความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) หาได้จากสมการที่ 3.3 [32]

$$\text{ความแข็งแรงฉีกขาด} = F/T \quad (3.3)$$

เมื่อ  $F$  = แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดสูงสุด (N)

$T$  = ความหนาของชิ้นงาน (mm)

## 3. การทดสอบความแข็งกด (Hardness)

วัดความแข็งกดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D2240 Durometer hardness ชนิด Shore A โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบต้องมีความหนาน้อยกว่า  $1/4$  นิ้ว ทำการทดสอบค่าความแข็งกดตัวอย่างละ 10 จุด โดยอ่านค่าหลังให้แรงกด 5 วินาที [33]

## 4. การทดสอบการสึกหรอของพื้นผิววัสดุ (Abrasion test)

การทดสอบการสึกหรอของพื้นผิววัสดุตามมาตรฐาน DIN 53516:1987-06 ด้วยเครื่องวัดปริมาณการสึกหรอของพื้นผิววัสดุ (DIN Abrasion tester) โดยชิ้นงานมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกหนา  $6.0 \pm 0.2$  มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $16.0 \pm 0.2$  มิลลิเมตร โดยกดชิ้นงานให้สัมผัสกับพื้นผิวขัดที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ แล้วหาน้ำหนักที่สูญหายไปของชิ้นทดสอบและคำนวณเป็นปริมาตรสูญเสียน้ำหนัก [34]

หมายเหตุ ค่าการสึกหรอไม่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เนื่องจากการส่งตัวอย่างทดสอบ ค่าที่ได้จากการส่งทดสอบมีเพียงค่าเดียว

### 5. การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

การทดสอบการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM D570 โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีขนาด  $60 \times 60$  ตารางมิลลิเมตร หนาประมาณ 2 มิลลิเมตร นำไปอบให้แห้งในเตาอบแล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ทำการชั่งน้ำหนักวัสดุอบแห้ง ( $W_1$ ) แล้วจึงนำไปแช่น้ำในภาชนะที่เตรียมไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำวัสดุขึ้นจากน้ำ วางบนผ้าซับน้ำแล้วจึงเช็ดวัสดุด้วยผ้าซับน้ำจนน้ำที่เคลือบอยู่บนผิวออกจนหมด ทำการชั่งน้ำหนักวัสดุทันที เป็นน้ำหนักวัสดุในสภาพอิ่มตัวแห้ง ( $W_2$ ) หาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำได้จากสมการที่ 3.5 [36]

$$\text{ร้อยละของการดูดซึมน้ำ} = [(W_2 - W_1) / W_1] \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ  $W_1$  = น้ำหนักวัสดุอบแห้งในอากาศ (g)

$W_2$  = น้ำหนักวัสดุในสภาพอิ่มตัวแห้ง (g)

### 6. การทดสอบ Ageing properties

ทำการทดสอบ Ageing properties ตามมาตรฐาน ASTM D573 โดยการนำชิ้นงานยางไปอบที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 70 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานยางมาทดสอบสมบัติเชิงกล

#### 3.3.5 การวิเคราะห์ผงแห้งด้วยเทคนิค TGA

การวิเคราะห์ผงแห้งด้วย TGA ทำโดยการใช้สารประมาณ 10 มิลลิกรัม นำไปให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อน  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศของ  $\text{N}_2$  gas

#### 3.3.6 การทดสอบสัณฐานวิทยา

ทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) เพื่อดูการกระจายของผงแห้งในยางธรรมชาติ เตรียมตัวอย่างขนาด  $1 \times 5 \times 0.2 \text{ cm}^3$  โดยการแช่ตัวอย่างในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 30 นาที แล้วหักตัวอย่างอย่างรวดเร็ว ทำการเคลือบทองที่ส่วนพื้นที่ภาคตัดขวาง แล้วนำไปส่องที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคาร์บอเนตที่ใช้ผงหนังชนิดฟอกผาด (Vegetable tanned leather flour) เป็นสารตัวเติม (Filler) ในยางไนไตรล์ (NBR) โดยนำผงหนังมาทำการร่อนเพื่อแยกขนาด จากนั้นนำไปผสมกับยางไนไตรล์ และสารเคมีด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง จะได้ยางผสมสูตร แล้วทำการอัดขึ้นรูป จากนั้นทำการศึกษา โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 หัวข้อดังนี้

- 1). ศึกษาผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์
- 2). ศึกษาผลของปริมาณผงหนังฟอกผาดที่ 0, 30, 60 และ 80 phr
- 3). ศึกษาผลของการใช้ผงหนังฟอกผาดในยางไนไตรล์เทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต เขม่าดำและซิลิกา

ซึ่งได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง สมบัติเชิงกล สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต และสัณฐานวิทยา สำหรับอักขระย่อของสูตรที่ใช้ในงานวิจัย แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

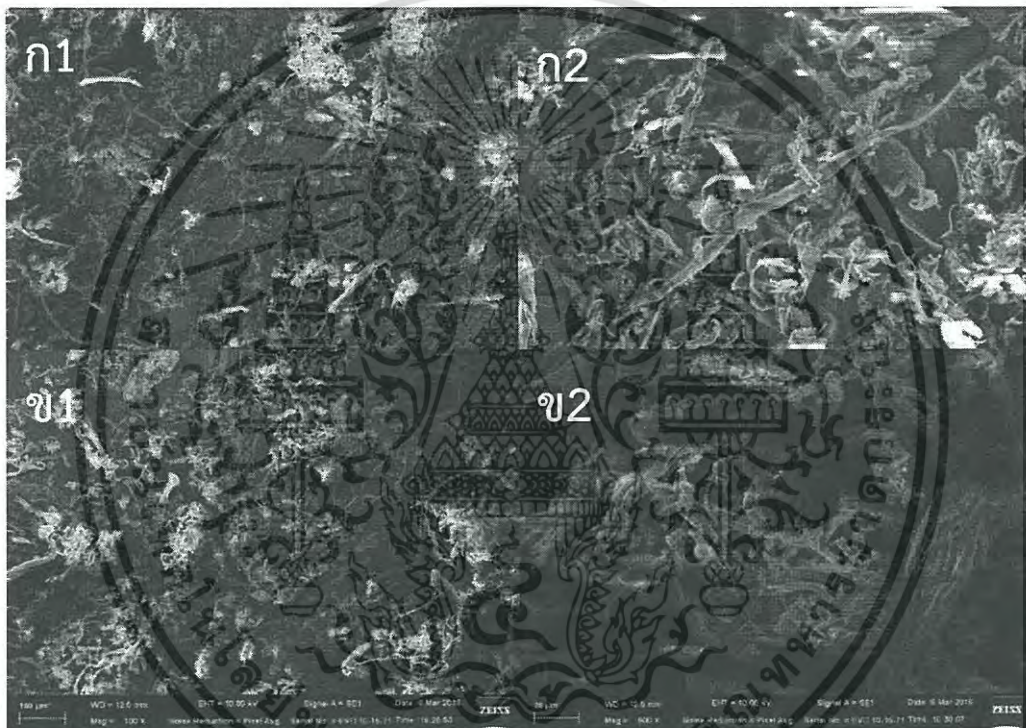
ตารางที่ 4.1 อักขระย่อของสูตรที่ใช้ในงานวิจัย

สูตร	คำอธิบายอักขระย่อในสูตร
Unfilled	NBR: ยางไนไตรล์
NBR-L30U	L: ผงหนังฟอกผาด
NBR-L30WP	U: ไม่เติม PEG และ Wax
NBR-L30W	W: Polyethylene homopolymer wax
NBR-L30P	P: Polyethylene glycol (PEG) 4000
NBR-L60P	30,60 และ 80: ปริมาณผงหนังฟอกผาด (phr)
NBR-L80P	
NBR-CB60P	CB: Carbon black
NBR-Si60P	Si: Silica
NBR-Ca60P	Ca: Calcium carbonate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของเศษผงหนังฟอกผาดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 100 และ 500 เท่า พบว่าผงหนังที่ไม่เคลือบแว็กซ์และผงหนังที่เคลือบแว็กซ์มีลักษณะไม่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.1 (ก1) และ (ข1) ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าผงหนังฟอกผาดมีลักษณะเป็นเส้นใยขนาดไม่สม่ำเสมอ มีการขดตัวและรวมตัวเป็นกระจุกบางส่วน จากรูป 4.1 (ก2) และ (ข2) ที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าผงหนังฟอกผาดที่มีลักษณะเป็นเส้นใยนั้นประกอบไปด้วยเส้นใยเล็กๆ (Microfibrils) หลากๆเส้นอยู่ด้วย

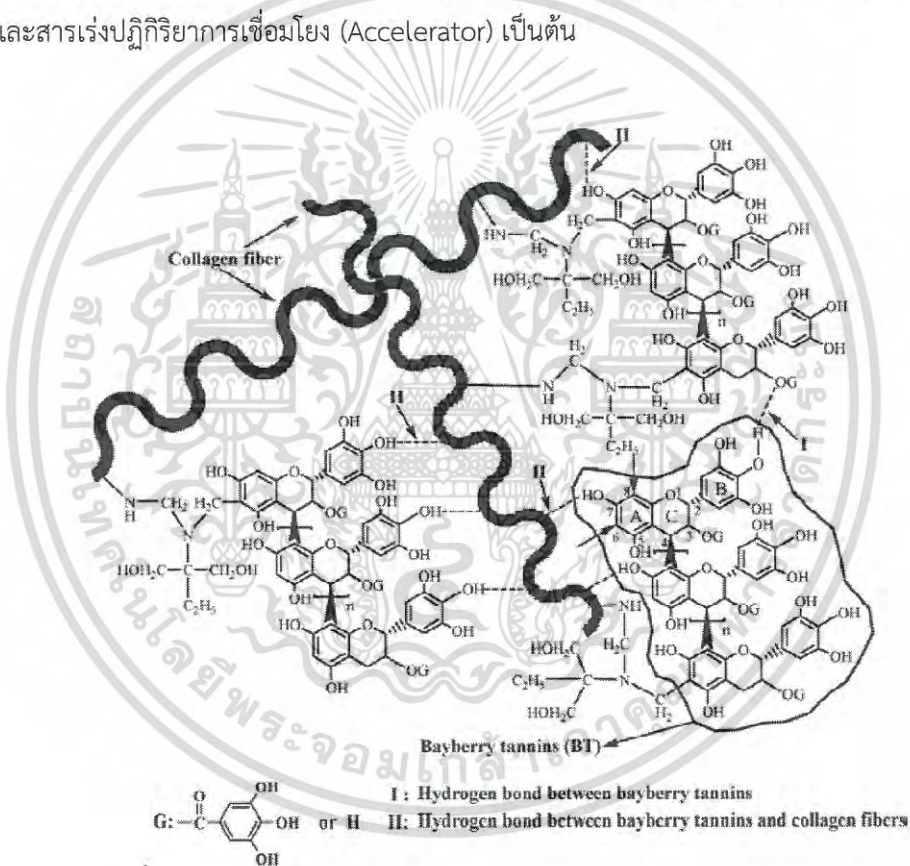


รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของเศษผงหนังฟอกผาด (ก1) L35 และ (ข1) L35W กำลังขยาย 100 เท่า (ก2) L35 และ (ข2) L35W กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลของการใช้ PEG และแวกซ์สังเคราะห์

กระบวนการพอกผัดเป็นการนำหนังสัตว์มาผ่านการพอกด้วยแทนนินทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่เอไมด์ของหนังสัตว์กับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแทนนิน ดังรูปที่ 4.2 โดยหมู่เอไมด์และหมู่ไฮดรอกซิลมีขั้วสูงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ง่าย จึงทำให้ผงหนังดูดความชื้นง่ายเป็นอุปสรรคในการใช้งานผงหนังเป็นสารตัวเติมในยาง งานวิจัยนี้จึงตั้งสมมุติฐานที่ใช้แวกซ์สังเคราะห์ในการปรับปรุงพื้นผิวผงหนัง เพื่อช่วยป้องกันการดูดซับความชื้นของผงหนัง ดังงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [6,37] พบว่า PEG ประมาณ 3-5% ของสารตัวเติมสามารถช่วยลดการดูดสารเติมแต่งที่มีขั้วของสารตัวเติมเช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerator) เป็นต้น



รูปที่ 4.2 การยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนของคอลลาเจนในหนังกับแทนนิน [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 การศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง

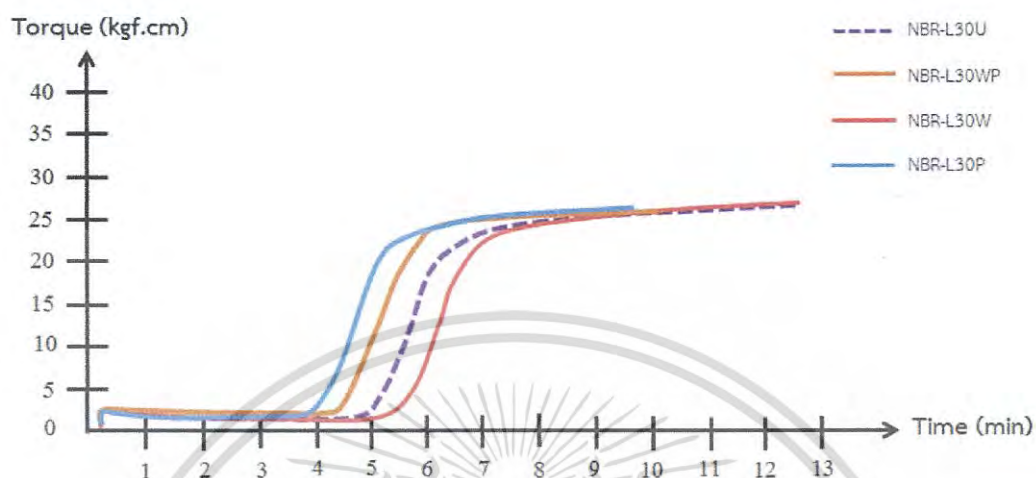
กระบวนการผสมยางมีการศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางด้วยเครื่องเอ็มดีอาร์ (MDR) ที่อุณหภูมิ 155°C เพื่อหาเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง (Scorch time;  $t_{s2}$ ) เวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time;  $t_{c90}$ ) และดัชนีอัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index; CRI) ดังรูปที่ 4.3

จากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.2 พบว่ายางสูตรที่มีการเติมผงหน้งอย่างเดี่ยว (NBR-L30U) มีเวลาในการเชื่อมโยงยาง ( $t_{s2}$  และ  $t_{c90}$ ) สูงขึ้นเมื่อเทียบกับยางสูตรที่มีการเติม PEG (NBR-L30P) และสูตรที่มีการเติม PEG ร่วมกับแว็กซ์ (NBR-L30WP) เนื่องจากผงหน้งฟอกผาดมีหมู่เอไมด์และหมู่ไฮดรอกซิลที่มีขั้วสูงที่สามารถดูดซับสารเคมีตัวอื่นๆ เช่น ซิงค์ออกไซด์ สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง เป็นต้น จึงทำให้การเชื่อมโยงยางช้าลง และเมื่อเปรียบเทียบกับยางสูตรที่มีการเติม PEG (NBR-L30P) กับสูตรที่มีการเติมแว็กซ์ (NBR-L30W) พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

สูตรที่มีการเติม PEG (NBR-L30P) มีเวลาเชื่อมโยงยาง ( $t_{s2}$  และ  $t_{c90}$ ) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ได้มีการเติม PEG เนื่องจาก PEG ช่วยลดความมีขั้วของผงหน้ง จึงทำให้ผงหน้งสามารถดูดซับสารเร่งและสารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยงลดลง แสดงกลไกการป้องกันการดูดซับของ PEG ได้ดังรูปที่ 4.4 โดยในอุตสาหกรรมยางสารตัวเติมที่มีขั้ว เช่น ซิลิกา ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจน จึงมีหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol groups, -Si-OH) ชนิดต่างๆ ที่มีหมู่ OH เป็นประจุลบ ดังนั้นจึงสามารถจับกับสารเติมแต่งที่มีประจุบวก เช่น  $Zn^{2+}$  ที่เกิดจากการแตกออกของซิงค์ออกไซด์กลายเป็นเกลือของซิงค์ (Zinc stearate) และสารเร่งปฏิกิริยาที่มีประจุบวก เช่น TMTD ดังนั้น PEG จึงไปช่วยลดการมีขั้วของสารตัวเติมทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงได้เร็วขึ้นและเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของผงหน้งเป็นเส้นใยโพรตีนที่มีหมู่เอไมด์และหมู่ไฮดรอกซิลของแทนนิน ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว สามารถเกิดการดูดซับสารเคมีเชื่อมโยงที่มีขั้วได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [6]

สูตรที่มีการเติมแว็กซ์ (NBR-L30W) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ได้ทำการเติมแว็กซ์ (NBR-L30U) พบว่ามีเวลาเชื่อมโยง ( $t_{s2}$  และ  $t_{c90}$ ) เพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงดีขึ้นเนื่องจากแว็กซ์เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งอาจไปเคลือบที่พื้นผิวของผงหน้ง ทำให้ผงหน้งดูดน้ำน้อยลง ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งทำให้น้ำที่ไปเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free radicals) เข้าไปจับกับกำมะถันมีปริมาณลดลง ยางจึงเชื่อมโยงดีขึ้น

อย่างไรก็ดีสูตรที่มีการเติม PEG (NBR-L30P) มีการเชื่อมโยงที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับสูตรที่มีการใช้แว็กซ์ (NBR-L30W) และสูตรที่มีการใช้ PEG ร่วมกับแว็กซ์ (NBR-L30WP) โดยสาเหตุที่การใช้แว็กซ์เพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำงานได้ดี และการใช้ PEG ร่วมกับแว็กซ์ไม่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดคาดว่าเนื่องจากแว็กซ์ที่ใช้เป็น PE wax สามารถไปเคลือบพื้นผิวของผงหน้ง ซึ่งทำให้ความมีขั้วของเส้นใย ผงหน้งลดลง เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของผงหน้งมีจำนวนมากและมีโครงสร้างเป็นไมโครไฟบริล (Microfibril) แว็กซ์ไม่สามารถเคลือบได้ทั่วทั้งหมดจึงทำให้ไม่สามารถไปดูดซับสารเคมีได้เหมือนกับ PEG ดังนั้นการใช้ PEG ร่วมกับแว็กซ์ นั้นอาจส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของ PEG ลดลง



รูปที่ 4.3 กราฟการเชื่อมโยงของยางไนไตรล์ผสมผงหน้ 30 phr ผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนืดมูนีและค่าพฤติกรรมการเชื่อมโยงผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์

Samples	Mooney (ML(1+4 100°C))	$M_L$ (kgf.cm)	$M_H$ (kgf.cm)	$\Delta M$ (kgf.cm)	$t_{s2}$ (s)	$t_{c90}$ (s)	CRI (s <sup>-1</sup> )
NBR-L30U	53.5	1.1	26.0	24.9	304	450	0.68
NBR-L30WP	44.3	0.9	22.5	21.6	245	330	1.18
NBR-L30W	50.3	1.1	25.0	23.9	325	450	0.80
NBR-L30P	54.4	0.9	25.5	24.6	210	285	1.33

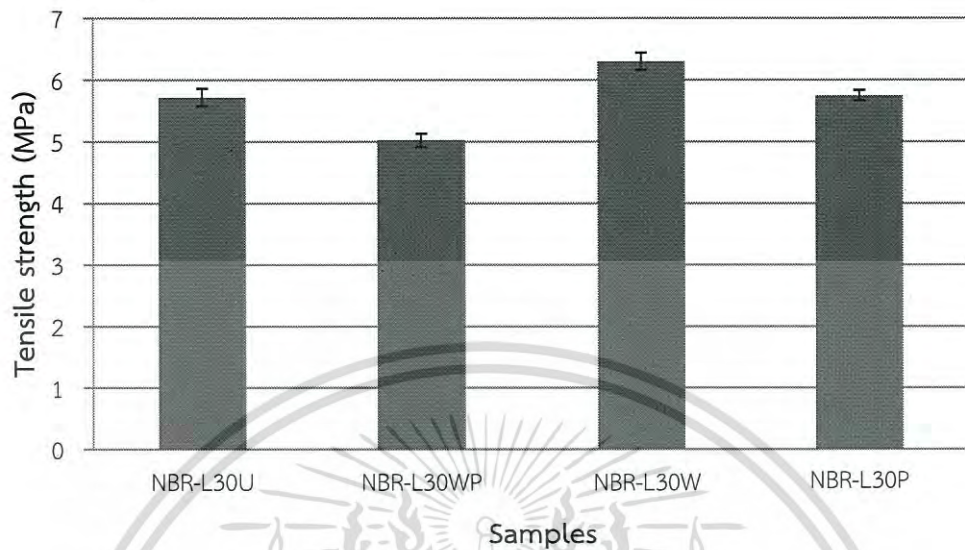
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล

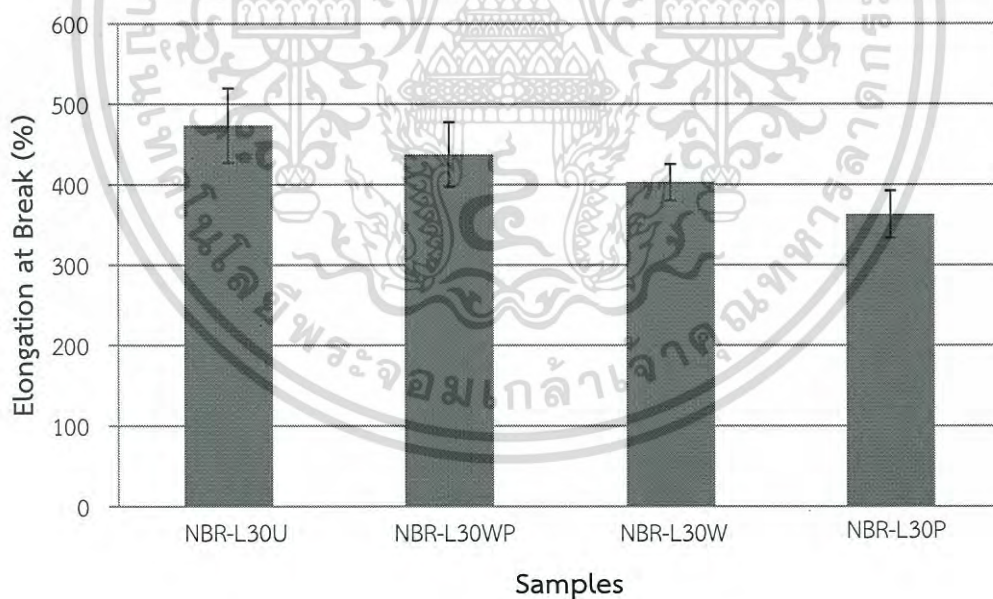
จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางไนโตรลัมผสมกับผงหนังที่มีการเติมและที่ไม่ได้เติม PEG และแวกซ์ แสดงผลดังรูป 4.6-4.10 พบว่าทั้งPEGและแวกซ์ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการเชื่อมโยง กล่าวคือ สูตรที่มีการเติม PEG และแวกซ์ (NBR-L30WP) มีสมบัติเชิงกลต่ำสุดทั้งค่าความแข็งกด (Hardness) ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% (Rubber Modulus, M100) ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) คาดว่าเนื่องจากการใช้ทั้งสองตัวทำให้ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงไม่ดีเทียบเท่ากับการใช้ PEG อย่างเดียว นอกจากนี้การใช้แวกซ์ต้องผ่านกระบวนการฉีดฟ่นไปที่ผงหนังและอบ อาจทำให้เกิดการรวมกลุ่มก้อนของแวกซ์เกิดปัญหาการกระจายตัวและรอยตำหนิ (Defects) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำที่สุด

สูตรที่มีการเติม PEG (NBR-L30P) พบว่ามีค่าความแข็งกด (Hardness) และค่ามอดุลัสของยางที่ 100% (Rubber Modulus, M100) ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพการเชื่อมโยงดีสุด เนื่องจาก PEG สามารถช่วยลดความมีขี้ข่วนของผงหนัง ทำให้ผงหนังลดการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงและสารเชื่อมโยงกำมะถัน ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงได้สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามสมบัติที่ทดสอบวัสดุแตกหัก เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ไม่ได้มีค่าสูงสุด คาดว่าอาจเนื่องจากวัสดุได้รับการเชื่อมโยงมากเกินไปทำให้วัสดุแข็งเปราะทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ต่ำลง ดังรูปที่ 4.11

อย่างไรก็ดีสูตรที่มีการเติมแวกซ์ (NBR-L30W) เปรียบเทียบกับการไม่ได้เติมแวกซ์ พบว่าไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในการศึกษาผลของการใช้ PEG และแวกซ์ สิ่งเคราะห์จึงเลือกการเติม PEG เพียงอย่างเดียว เนื่องจากการใช้แวกซ์ มีต้นทุนเพิ่มมากขึ้นและเป็นการเพิ่มกระบวนการในการผลิต

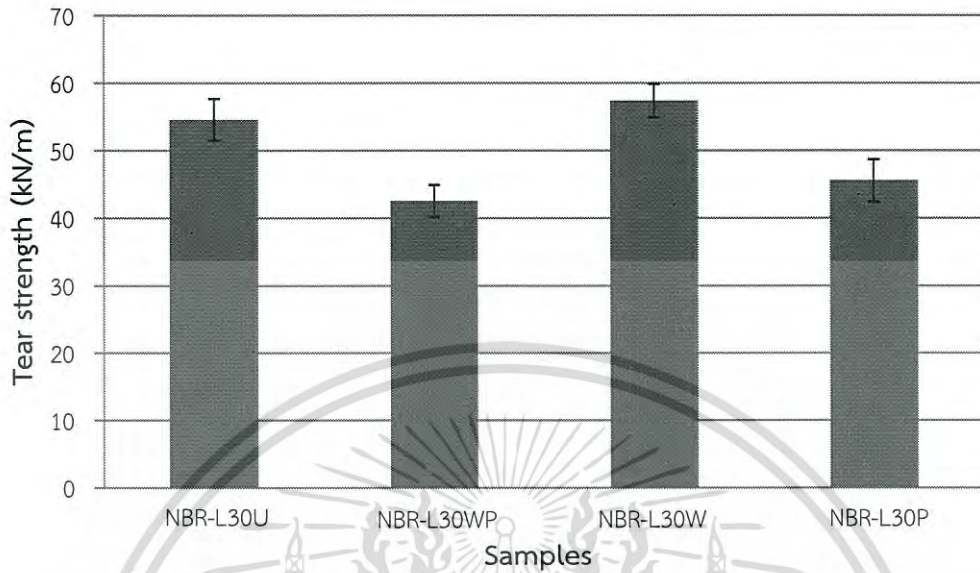


รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร: ผลของการใช้ PEG และแก้วสังเคราะห์

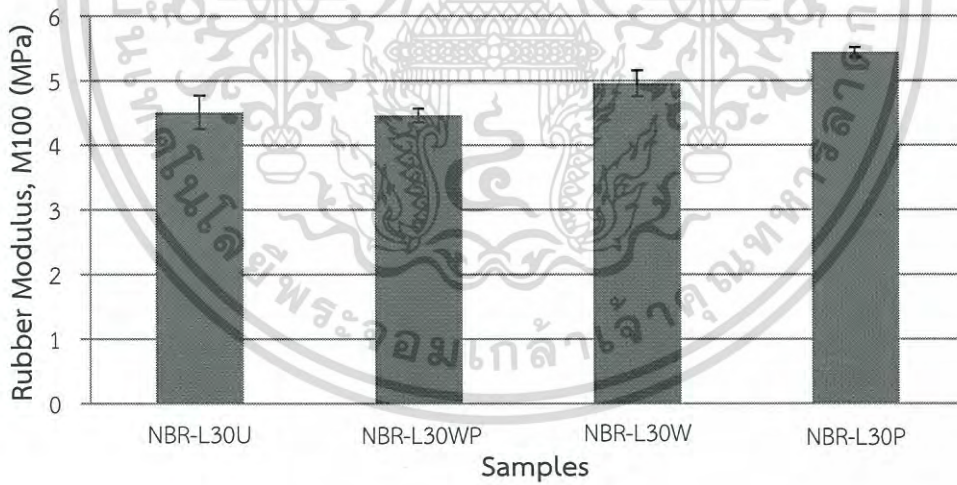


รูปที่ 4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้ PEG และแก้วสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

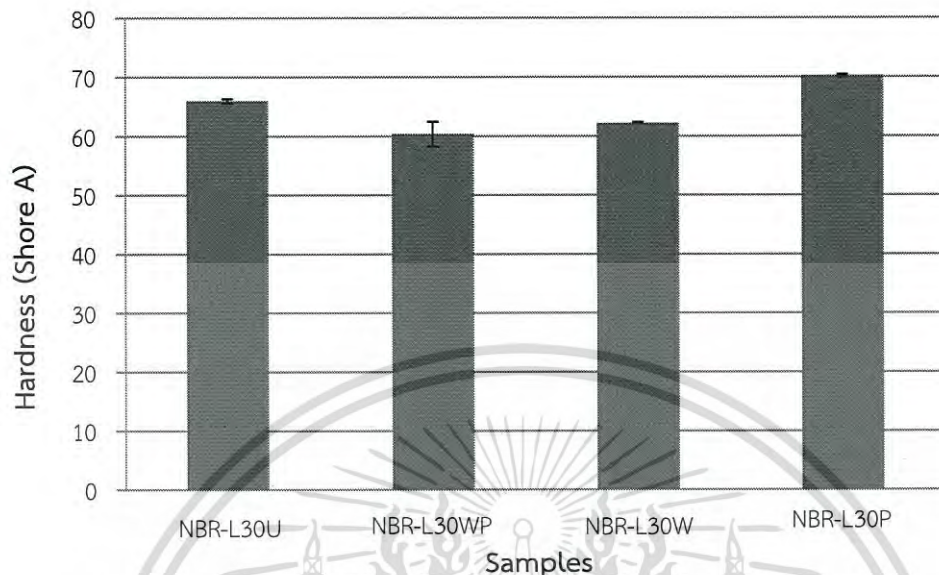


รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์

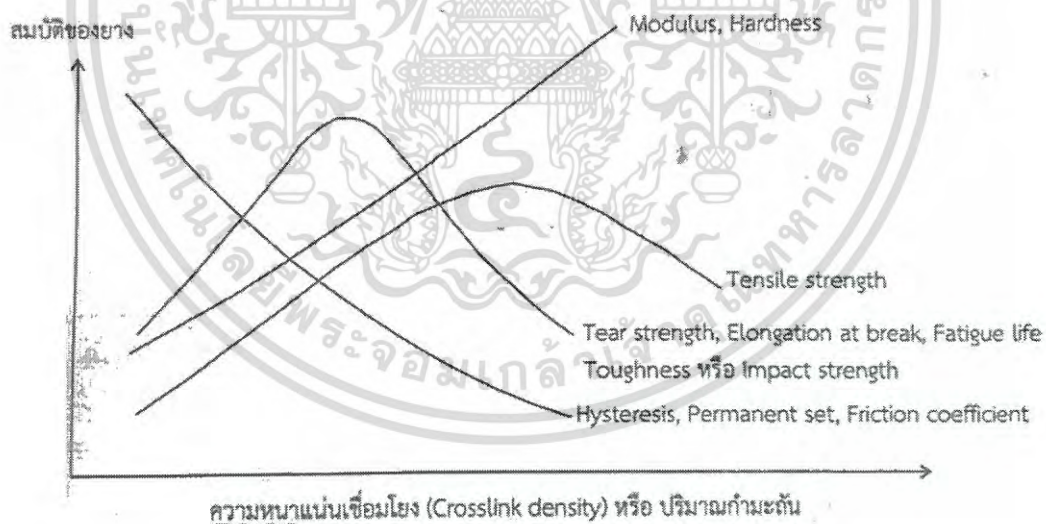


รูปที่ 4.9 ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% (M100) ของยางผสมสูตร: ผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยาง กับสมบัติเชิงกลบางประการของยาง [12]

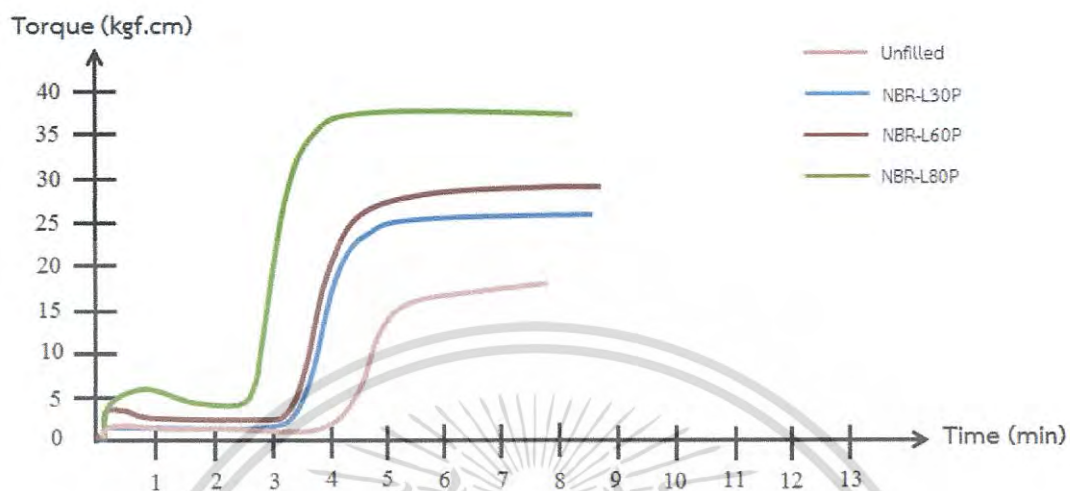
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลของปริมาณผงหนังฟอกฝาดที่ 0, 30, 60 และ 80 phr

จากการทดลองตอนที่ 4.2 ผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์พบว่า PEG สามารถช่วยทำให้ผงหนังไม่เกิดการหน่วงการเชื่อมโยง ในขณะที่แว็กซ์สังเคราะห์ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในการทดลองตอนนี้ จึงทำการควบคุมการใช้ PEG ที่ปริมาณ 3% ของปริมาณของผงหนังและเนื่องจากปริมาณของผงหนังที่เป็นสารตัวเติมมีผลโดยตรงกับสมบัติของยาง ในตอนนี้ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณผงหนังที่ 0, 30, 60 และ 80 phr โดยจากการทดลองเบื้องต้นได้ทำการทดลองโดยใช้ผงหนังที่ปริมาณ 90 phr พบว่าปริมาณผงหนังที่มากขึ้นทำให้เกิดการผสมได้ยาก เนื่องจากมีความหนืดสูงขึ้น ผงหนังเกิดการกระจายตัวได้ไม่ดี ดังนั้นจึงทำการทดลองปริมาณผงหนังสูงสุดที่ 80 phr โดยการศึกษาพฤติกรรมของการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของยางผสมสูตรและ Ageing properties

#### 4.3.1 การศึกษาพฤติกรรมของการเชื่อมโยงของยาง

จากรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.3 พบว่ากราฟการเชื่อมโยงมีการเปลี่ยนแปลง คือเมื่อเพิ่มปริมาณผงหนังจาก 0 เป็น 80 phr เห็นได้ว่าค่าแรงบิดสูงสุดและค่าความหนืดมูนนี้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัย เนื่องจากผงหนังเป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเส้นใยขนาดเล็กๆจำนวนมาก และผงหนังเป็นสารตัวเติมที่มีขั้วเช่นเดียวกับยาง NBR ดังนั้นผงหนังจึงสามารถยึดติดกับยางได้ดี ทำให้วัสดุเกิดการไหลยาก มีความหนืดสูงขึ้น ความแข็งของยางจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และพบว่าเวลาเชื่อมโยงยาง ( $t_{s2}$  และ  $t_{c90}$ ) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงดีขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงหนัง ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากผงหนังประกอบไปด้วยฝาดที่มีความเป็นต่างซึ่งค่าความเป็นต่าง [46] ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งต่างเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ดังนั้นปริมาณผงหนังที่เพิ่มขึ้นทำให้ฝาดมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงดีขึ้น



รูปที่ 4.12 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนังต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนืดมูนนี่และค่าพฤติกรรมกรเชื่อมโยงที่มีปริมาณผงหนังต่างกัน

Samples	Mooney (ML (1+4 100°C))	$M_L$ (kgf.cm)	$M_H$ (kgf.cm)	$\Delta M$ (kgf.cm)	$t_{s2}$ (s)	$t_{c90}$ (s)	CRI (s <sup>-1</sup> )
Unfilled	47.9	1.0	18.5	17.5	275	355	1.25
NBR-L30P	54.4	0.9	25.5	24.6	210	285	1.33
NBR-L60P	73.9	2.0	29.0	27.0	195	285	1.11
NBR-L80P	109.8	4.0	37.0	33.0	150	210	1.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 Effluents from tanning and leather finishing processes [46]

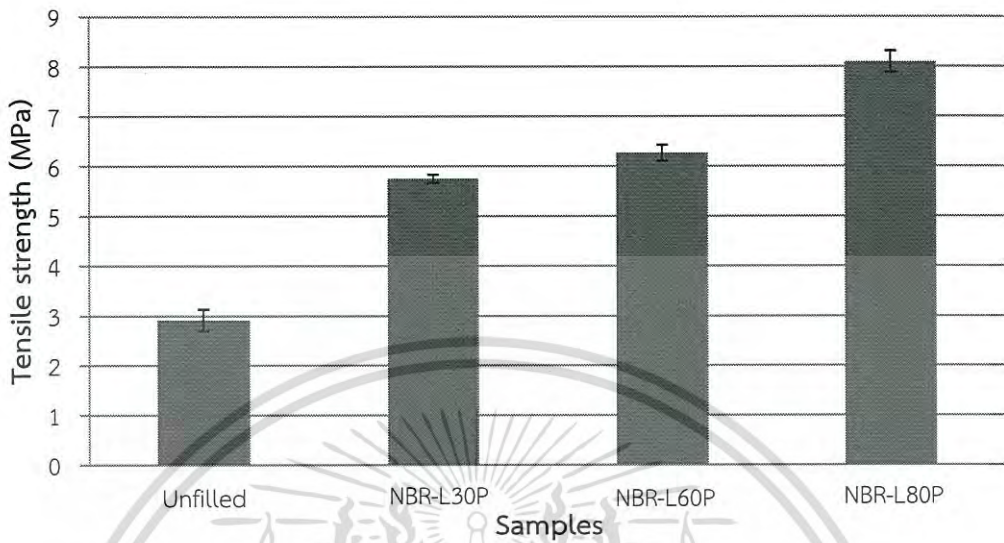
Parameter	Maximum value milligrams per liter (mg/L)
pH	6-9
BOD <sub>5</sub>	50
COD	250
Total suspended solids	50
Oil and grease	10
Sulfide	1.0
Chromium (hexavalent)	0.1
Chromium (total)	0.5
Nitrogen (NH <sub>4</sub> -N)	10
Phosphorus (total)	2
Coliform	400 Most Probable Number/100 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

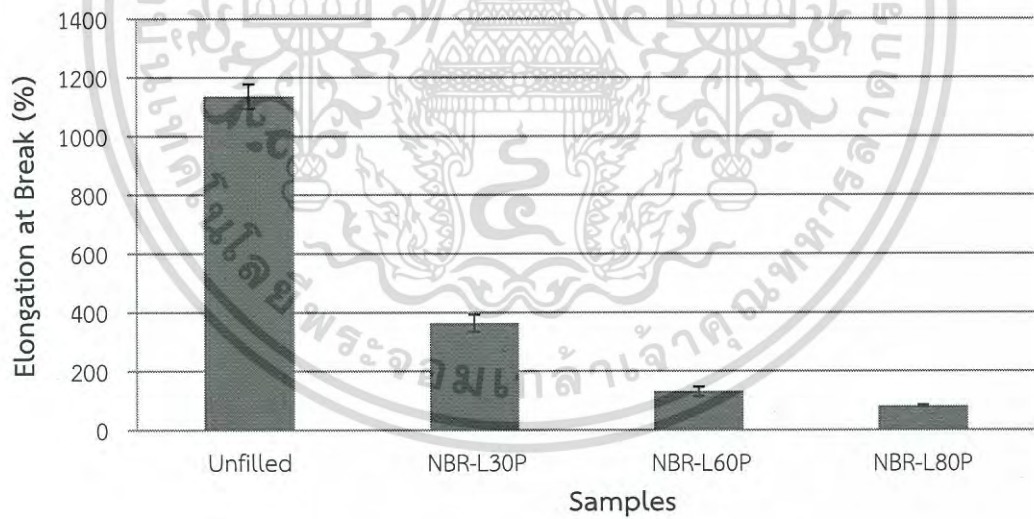
#### 4.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางไนไตรล์ผสมผงหนังที่มีการใช้ปริมาณผงหนัง 0, 30, 60 และ 80 phr แสดงผลดังรูปที่ 4.13-4.17 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงหนังจาก 0 เป็น 80 phr มีประสิทธิภาพการเสริมแรงดีเยี่ยม กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งกดและค่ามอดุลัสของยางที่ 50 และ 100% มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น 3 เท่า (จาก 2.8 มาเป็น 8.1 MPa) ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดที่มีค่าลดลงสอดคล้องกับผลของสารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยาง คาดว่าเนื่องจากผงหนังมีลักษณะเป็นเส้นใยสั้น หรือเยื่อขนาดสั้นที่มีเส้นใยขนาดเล็ก (Micro fibers) เป็นองค์ประกอบ เมื่อใส่เยื่อผงหนังลงในยางจึงเสริมแรง (Reinforcement) ได้ดี ผงหนังเป็นสารตัวเติมที่มีขั้วสามารถเข้ากับยางไนไตรล์ได้และเมื่อเพิ่มปริมาณผงหนังจึงทำให้ผงหนังยังสามารถเกิดการกระจายตัวได้ในยางไนไตรล์

อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงฉีกขาดมีค่าสูงสุดที่ปริมาณผงหนัง 60 phr ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากผงหนังที่ปริมาณมากขึ้นการผสมทำได้ยาก อาจทำให้ยางเกิดการเสียดสีระหว่างขั้นตอนของการผสม กล่าวคือเส้นใยเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาสัณฐานวิทยาจากผล SEM สูตรที่เติม 30 และ 80 phr แสดงในตอนต่อไป ดังนั้นเมื่อทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาดยางจึงเกิดการขาดง่ายขึ้น

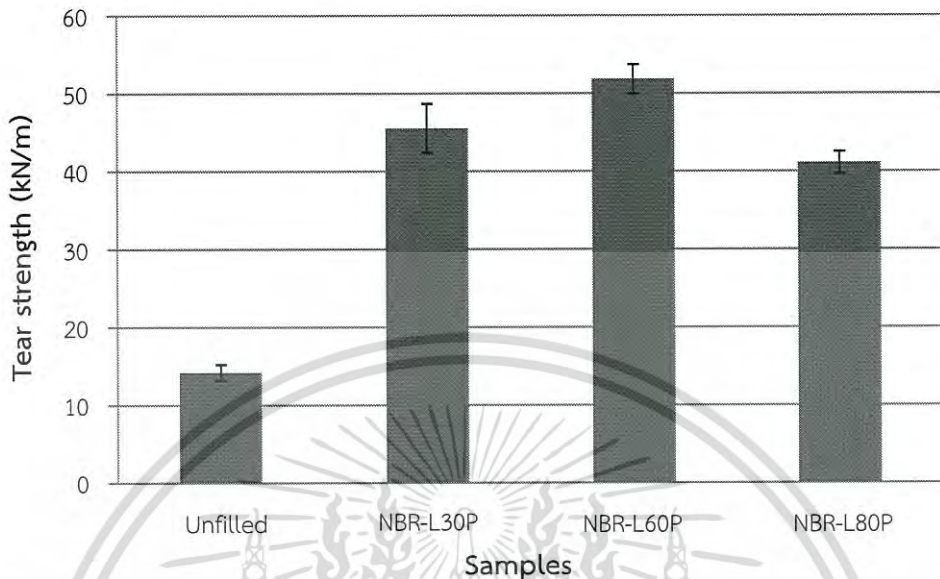


รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนังต่างกัน

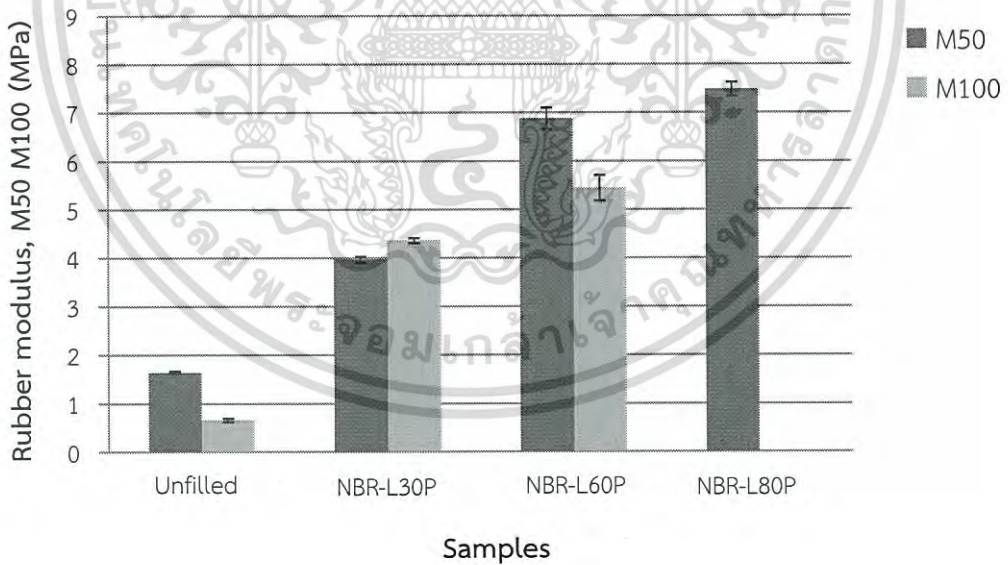


รูปที่ 4.14 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนังต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

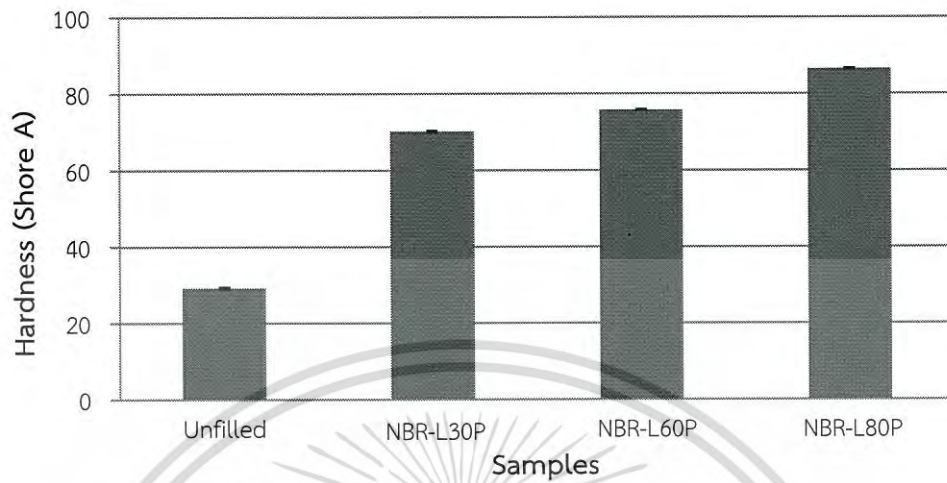


รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนังต่างกัน



รูปที่ 4.16 ค่ามอดุลัสของยางที่ 50% (M50)และ 100% (M100) ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนังต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนังต่างกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 การศึกษาสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางไนไตรล์ผสมผงหนังฟอกผาดที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) จากรูปที่ 4.18 (ก1) (ข1) ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่ายางไนไตรล์ที่มีการเติมผงหนัง 30 และ 80 phr ผงหนังมีการกระจายตัวภายในเนื้ออย่างค่อนข้างดี แต่พบว่าที่ 80 phr ผงหนังมีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนบางส่วน และพบว่าพื้นผิวของยางไนไตรล์มีความเรียบลดลง เนื่องจากผงหนังมีเพิ่มมากขึ้นในขณะที่เนื้อยางไนไตรล์มีปริมาณคงที่ และจากรูปที่ 4.18 (ก2) (ข2) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า พบว่ายางกับเยื่อผงหนังยึดติดกันค่อนข้างดี และพบว่าภายในยางมีช่องว่างเกิดขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการมีฟองอากาศเกิดขึ้น เนื่องจากเยื่อผงหนังยังคงมีความชื้นอยู่



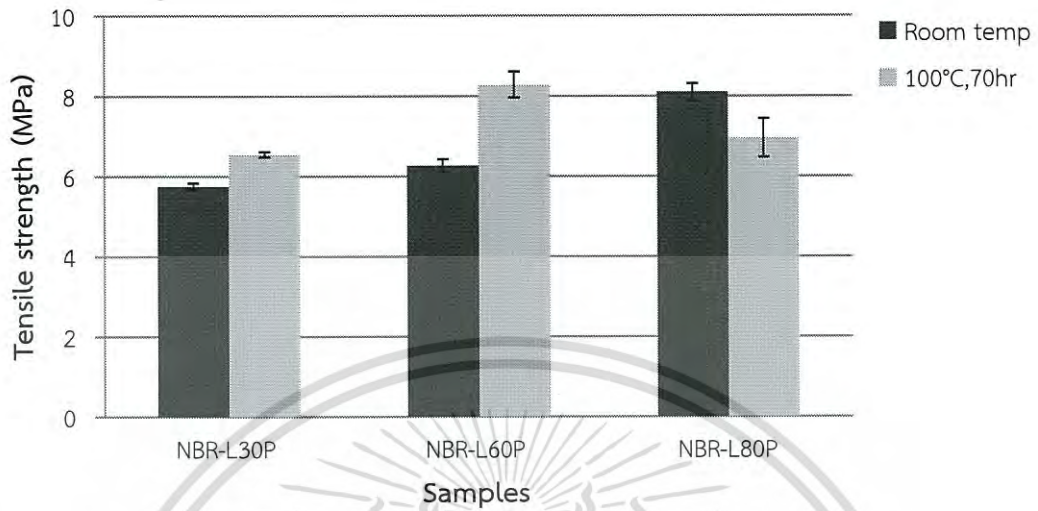
รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตร (ก1) NBR-L30P และ (ข1) NBR-L80P กำลังขยาย 100เท่า (ก2) NBR-L30P และ (ข2) NBR-L80P กำลังขยาย 2000 เท่า

#### 4.3.5 การทดสอบอายุการใช้งาน (Ageing test)

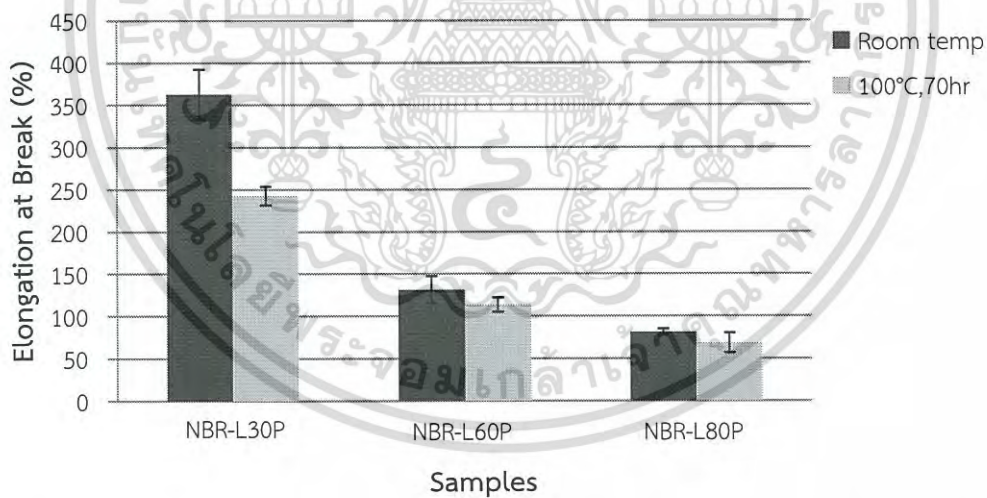
การทดสอบอายุการใช้งาน (Ageing) เป็นการทดสอบโดยนำชิ้นงานตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 70 ชั่วโมงตามมาตรฐาน ASTM D573 จากการทดสอบพบว่ายางไนไตรล์เกิดการเสถียรภาพด้วยกลไกการเสถียรภาพแบบ Crosslinking โดยในตอนนี้ได้ทำการศึกษาการใช้ผงหนังไนปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อดูการเสถียรภาพของยางไนไตรล์ว่ามีการเสถียรภาพน้อยลงหรือไม่ เนื่องจากคาดว่าผงหนังมีส่วนประกอบของแทนนินซึ่งมีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกที่สามารถทำหน้าที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidation) ได้

จากรูปที่ 4.19-4.24 เมื่อเพิ่มปริมาณผงหนังจาก 0, 30, 60 เป็น 80 phr พบว่ายางสูตรที่มีการนำชิ้นงานยางไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง มีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานยางที่อุณหภูมิห้อง แต่อย่างไรก็ตามที่มีปริมาณผงหนัง 80 phr ที่ 100°C มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่า เนื่องจากยางมีการเสถียรภาพแบบแข็งเปราะ ส่วนค่าความความแข็งแรงฉีกขาดค่ามอดูลัสของยางที่ 50 และ 100% และค่าความแข็งกดมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานยางที่อุณหภูมิห้อง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเมื่อปริมาณผงหนังเพิ่มมากขึ้น ที่อุณหภูมิ 100°C พบว่ามีค่าลดลงเนื่องจากยางมีการเสถียรภาพแบบ Crosslinking ยางจึงมีความแข็งแรงมากขึ้น

ดังนั้นจากการทดสอบพบว่า ผงหนังฟอกฝาดสามารถทำหน้าที่เป็น Antioxidant ได้ เนื่องจากเมื่อทำการทดสอบ ยางมีการเสถียรภาพที่น้อยลงซึ่งสังเกตได้จากสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

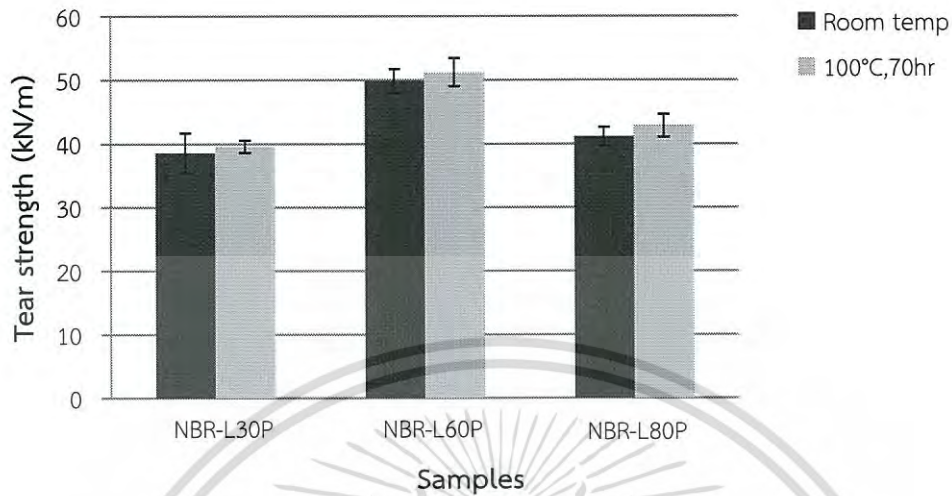


รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนังต่างกันที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 100°C

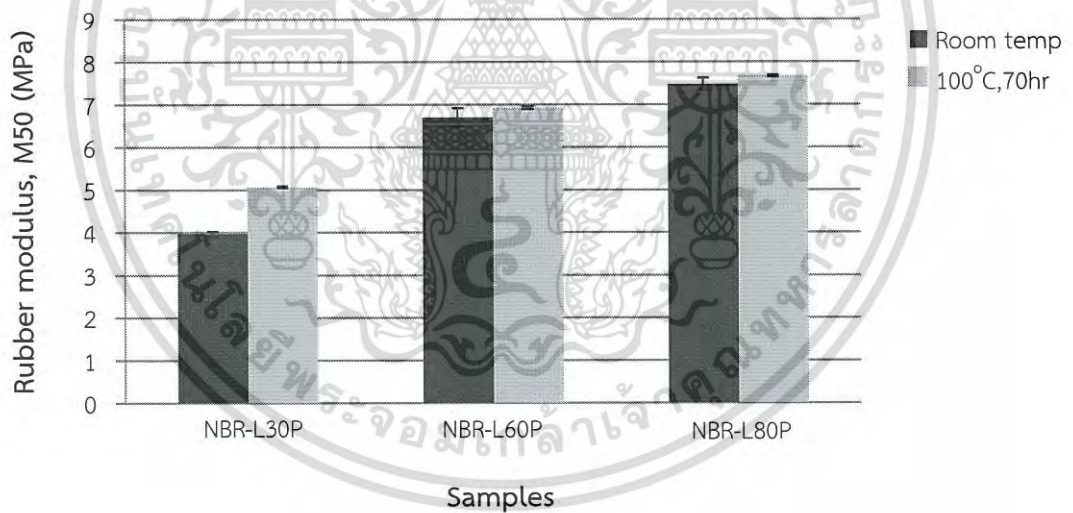


รูปที่ 4.20 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนังต่างกันที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 100°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

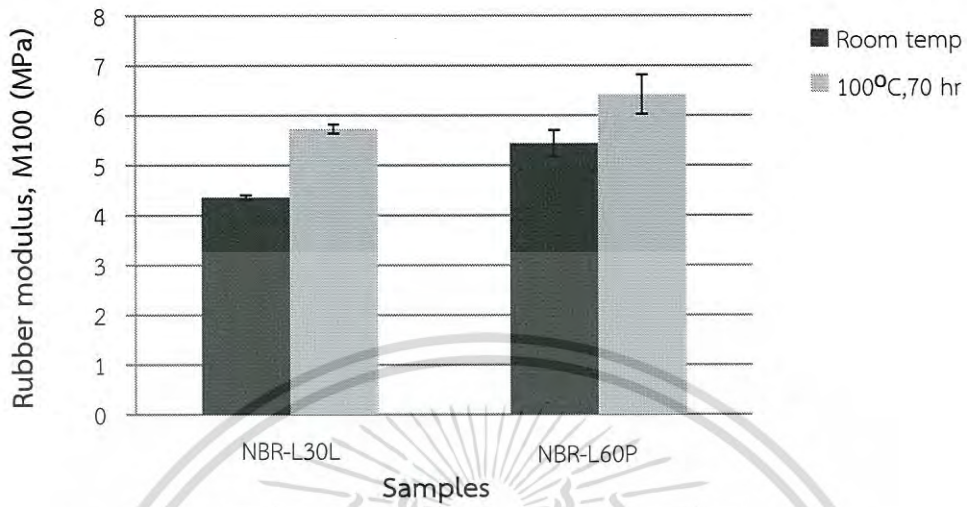


รูปที่ 4.21 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนังต่างกันที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 100°

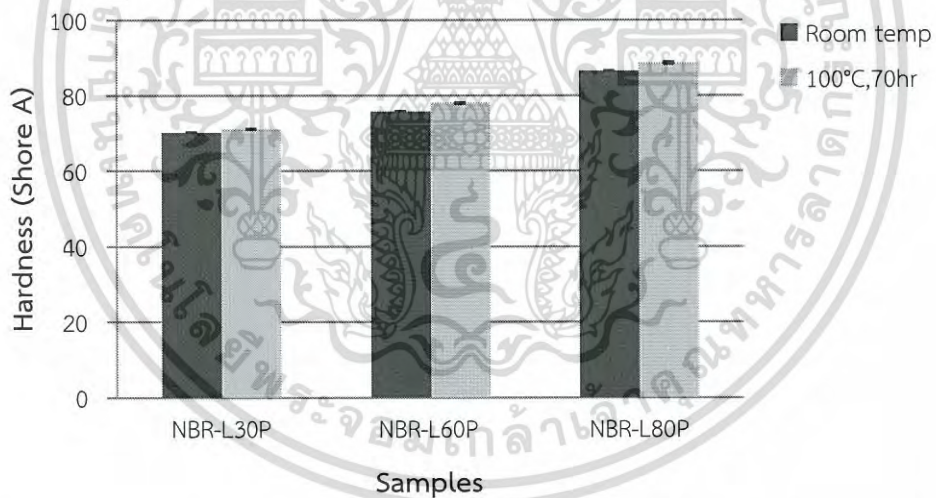


รูปที่ 4.22 ค่ามอดุลัสของยางที่ 50% (M50) ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนังต่างกันที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 100°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% (M100) ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนังต่างกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C



รูปที่ 4.24 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรที่มีปริมาณผงหนังต่างกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

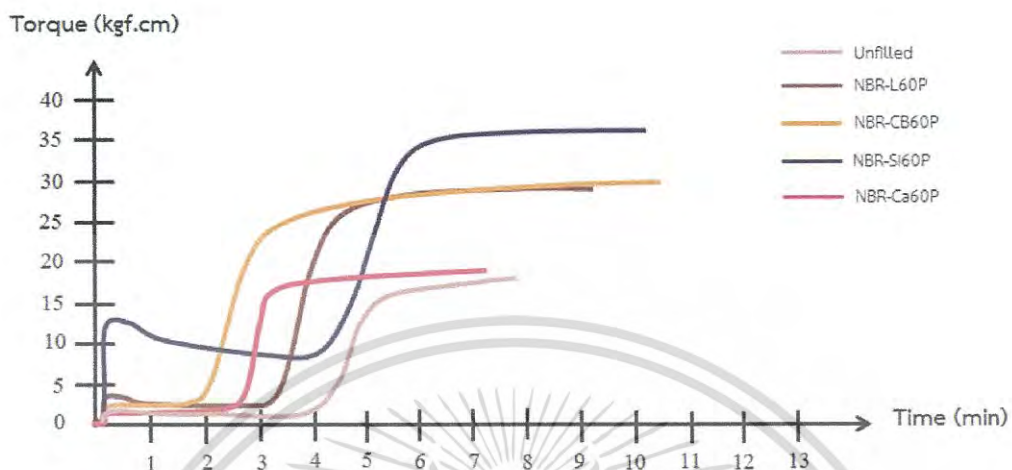
#### 4.4 ผลของการใช้ผงหนังฟอกฟาดในยางไนไตรล์เทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมยางมีการใช้สารตัวเติมกันอย่างแพร่หลาย โดยสารตัวเติมที่ใช้มีทั้งชนิดเสริมแรงและไม่เสริมแรง เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของยางผสมสูตรและลดต้นทุนในการผลิต ซึ่งปริมาณการใช้สารตัวเติมนั้นขึ้นกับความต้องการที่จะปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของยางผสมสูตร ในงานวิจัยนี้จึงได้นำสารตัวเติมทางการค้าที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางทั้งหมด 3 ชนิด คือ เขม่าดำ (N330) ซิลิกาเกรดตกตะกอน (Precipitation silica) (Tokusil<sup>®</sup> UR-T) และแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดเคลือบ (Calflex<sup>®</sup> C) มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์โดยการศึกษาพฤติกรรมและการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกลและ Ageing properties

##### 4.4.1 การศึกษาพฤติกรรมและการเชื่อมโยงของยาง

ในปัจจุบันนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมและการเชื่อมโยงของยางไนไตรล์ที่มีการผสมผงหนังเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใส่สารตัวเติมและใส่สารตัวเติมชนิดอื่น ได้แก่ ซิลิกา เขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนตว่ามีพฤติกรรมและการเชื่อมโยงที่เหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร จากผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.25 และตารางที่ 4.4 พบว่าสูตรที่มีการเติมผงหนัง (NBR-L60P) มีพฤติกรรมและการเชื่อมโยงยางแตกต่างจากสารตัวเติมชนิดอื่น กล่าวคือ ผงหนังมีเวลาในการเชื่อมโยง ( $t_{s2}$  และ  $t_{c90}$ ) เร็วกว่าสูตรที่เติมซิลิกา (NBR-Si60P) และสูตรที่ไม่ใส่สารตัวเติม (Unfilled) เนื่องจากคาดว่าผงหนังมีสารฟอกฟาดที่เป็นต่าง ซึ่งฟาดช่วยทำให้ผงหนังมีประสิทธิภาพการเชื่อมโยงที่ดี อย่างไรก็ตามการใช้ผงหนังยังมีเวลาในการเชื่อมโยง ( $t_{s2}$  และ  $t_{c90}$ ) ที่ช้ากว่าสูตรที่เติมเขม่าดำ (NBR-CB60P) และแคลเซียมคาร์บอเนต (NBR-Ca60P) เนื่องจากเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตมีความสามารถในการนำความร้อนที่ดี [47] จึงทำให้มีการเชื่อมโยงที่ดีกว่าผงหนัง นอกจากนี้คาดว่าเนื่องจากผงหนังฟอกฟาดเป็นสารตัวเติมที่ดูดความชื้นได้ง่าย เมื่อทำการขึ้นรูปทำให้ต้องกำจัดความชื้น ส่งผลให้ยางเกิดการเชื่อมโยงที่ช้า

นอกจากนี้การใส่สารตัวเติมที่เท่ากันในปริมาณ 60phr ส่งผลต่อค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุดในการเชื่อมโยงอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าการใช้ผงหนังทำให้ยางไนไตรล์มีความหนืดหรือค่าแรงบิดต่ำสุดและสูงสุดใกล้เคียงกับเขม่าดำ แต่มีค่ามากกว่าสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากผงหนังมีลักษณะเป็นเส้นใยจึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับเมตริกซ์ยางได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมในขณะที่ซิลิกามีความหนืดเพิ่มขึ้นหรือมีค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าซิลิกามีสัณฐานวิทยาเป็นผงขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol groups) อยู่มากซึ่งความมีขั้วของซิลิกาทำให้สามารถเสริมแรงได้ดีในยางที่มีขั้ว เช่น ยางไนไตรล์



รูปที่ 4.25 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน

ตารางที่ 4.5 ค่าความหนืดมูนีและค่าพฤติกรรมการเชื่อมโยงผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิด

Samples	Mooney (ML (1+4 100°C))	M <sub>L</sub> (kgf.cm)	M <sub>H</sub> (kgf.cm)	ΔM (kgf.cm)	t <sub>s2</sub> (s)	t <sub>c90</sub> (s)	CRI (s <sup>-1</sup> )
Unfilled	47.9	1.0	18.5	17.5	275	355	1.25
NBR-L60P	73.9	2.0	29.0	27.0	195	285	1.11
NBR-CB60P	51.1	1.8	27.9	26.1	110	250	0.71
NBR-Si60P	134.9	7.9	37.0	29.1	270	370	1.00
NBR-Ca60P	30.7	1.1	17.5	16.4	155	210	1.81

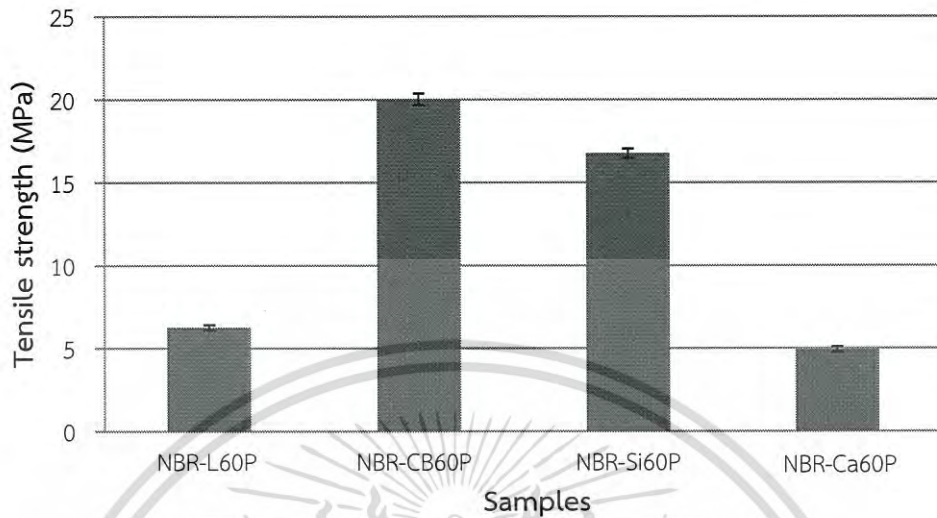
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางไนไตรล์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 4.26-4.30 พบว่าสารตัวเติมส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร กล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบยางผสมสูตรที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ พบว่าสูตรที่เติมผงหนัง (NBR-L60P) มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ที่สูงกว่าสูตรที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต (NBR-Ca60P) แต่ต่ำกว่าสูตรที่มีการเติมซิลิกา (NBR-Si60P) และเขม่าดำ (NBR-CB60P) เนื่องจากซิลิกาและเขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่เสริมแรง (Reinforcing filler) ที่ดีเยี่ยม ซึ่งผงหนังเป็นสารตัวเติมที่เสริมแรง (Reinforcing filler) เช่นกัน แต่เนื่องด้วยผงหนังมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าซิลิกาและเขม่าดำ ผงหนังจึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับเมตริกซ์ยางได้ไม่ดีเท่าซิลิกาและเขม่าดำ จึงทำให้มีค่าต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ดีผงหนังสามารถเสริมแรงได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคเป็นก้อนกลมขนาดใหญ่ จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับเมตริกซ์ยางได้ไม่ดีเท่าผงหนัง แคลเซียมคาร์บอเนตจึงเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง (Non-reinforcing filler)

ส่วนค่ามอดูลัสของยางที่100% (Rubber Modulus, M100) และค่าความแข็งกด (Hardness) พบว่าสูตรที่เติมผงหนัง (NBR-L60P) มีค่าสูงเมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ ได้แก่ NBR-Si60P, NBR-CB60P และ NBR-Ca60P เนื่องจากสัณฐานวิทยาของผงหนังมีลักษณะเป็นเส้นใยที่เกิดจากการรวมตัวกันของเส้นใยเล็กๆ (Microfibrils) หลายๆเส้น ทำให้เส้นใยผงหนังเป็นกลุ่มก้อนที่มีความแข็งแรงมากกว่าซิลิกาที่มีสัณฐานวิทยาเป็นผงขนาดเล็ก เขม่าดำที่มีสัณฐานวิทยาเป็นก้อนกลมอนุภาคขนาดเล็ก และแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีสัณฐานวิทยาเป็นก้อนกลมขนาดใหญ่

อย่างไรก็ดีพบว่าสูตรที่เติมผงหนัง (NBR-L60P) มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ต่ำกว่าสูตรที่เติมซิลิกา (NBR-Si60P) เขม่าดำ (NBR-CB60P) และแคลเซียมคาร์บอเนต (NBR-Ca60P) เนื่องจากซิลิกาและเขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่เสริมแรง (Reinforcing filler) ที่ดี ทำให้ยางไนไตรล์มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดที่สูงแม้ว่าผงหนังจัดว่าเป็นสารตัวเติมที่เสริมแรงเช่นเดียวกับซิลิกาและเขม่าดำ แต่ผงหนังมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดที่ค่อนข้างต่ำ คาดว่าเนื่องจากผงหนังมีสัณฐานเป็นเยื่อที่ประกอบด้วย Micro fiber หรือเส้นใยขนาดเล็กซึ่งในการผสมอาจทำให้เกิดการ Defect ที่ชิ้นงาน

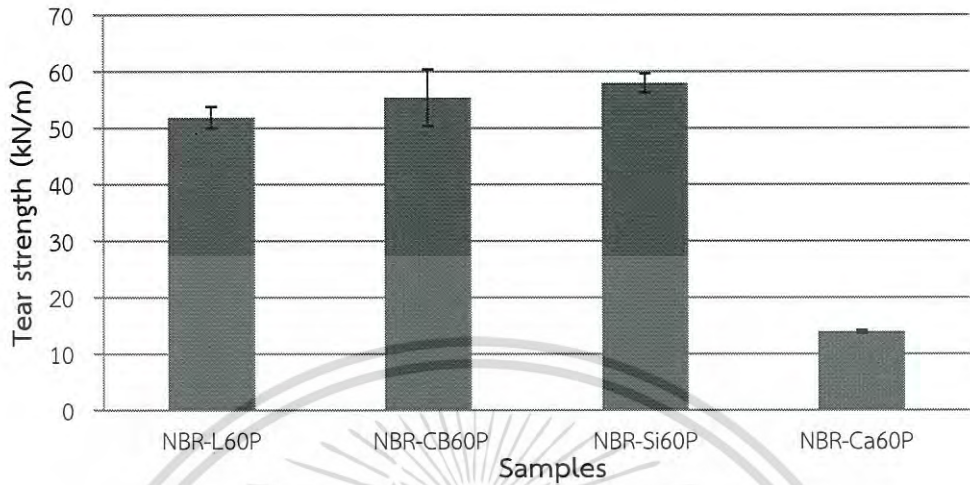


รูปที่ 4.26 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน

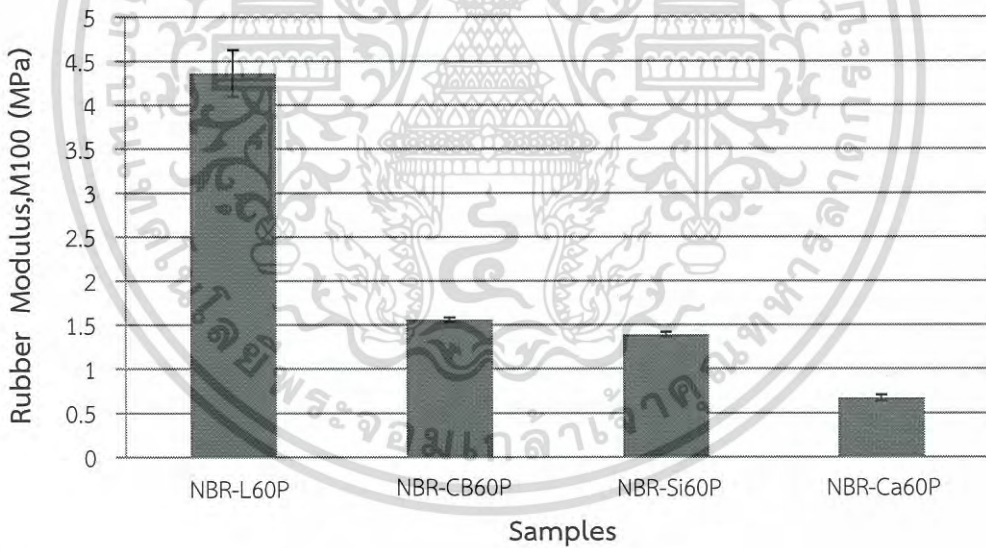


รูปที่ 4.27 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

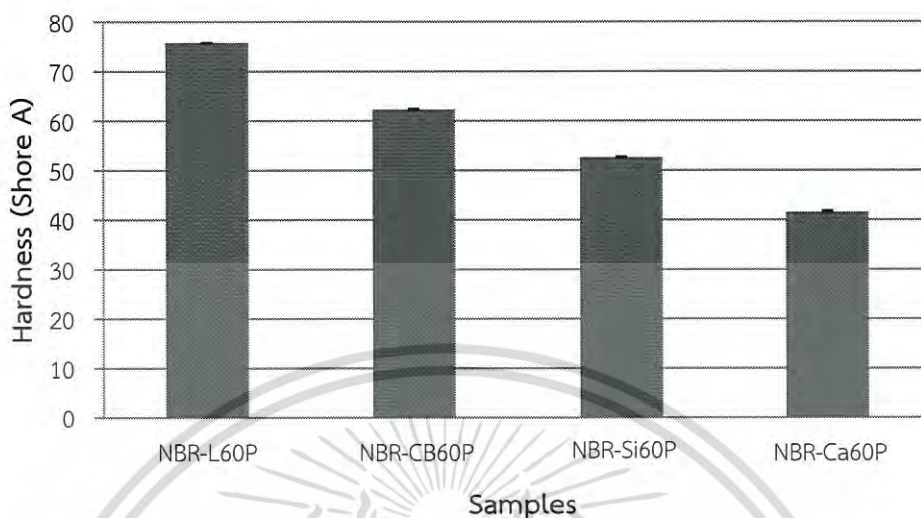


รูปที่ 4.28 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน



รูปที่ 4.29 ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% (M100) ของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน

#### 4.4.3 การทดสอบอายุการใช้งาน (Ageing test)

เนื่องจากคาดว่าผงหนึ่งฟอกผาดมีส่วนประกอบของแทนนินซึ่งมีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกโดยจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [6] พบว่าฟาดสามารถทำหน้าที่คล้าย Antioxidant ที่สามารถทำหน้าที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidation) ของพอลิเมอร์ได้และที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 70 ชั่วโมงยางไนไตรล์เกิดการเสถียรภาพ (Degrade) ด้วยกลไกการเสถียรภาพแบบ Crosslinking กล่าวคือยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นดังนั้นการทดลองตอนนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของผงหนึ่งฟอกผาดที่มีต่อสมบัติของยางไนไตรล์โดยเฉพาะสมบัติด้าน Ageing properties คือเป็นการทดสอบโดยนำชิ้นงานตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 70 ชั่วโมงตามมาตรฐาน ASTM D573

จากการทดลองพบว่าการใช้สารตัวเติมต่างชนิดๆ ได้แก่ ผงหนึ่งฟอกผาด เขม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลให้สมบัติเชิงกลหลังการทดสอบ Ageing ของยางมีค่าต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.31-4.35 เมื่อนำชิ้นงานยางไปอบที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่าค่าความแข็งแรงดิ่งกับค่าความแข็งแรงฉีกขาดมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับชิ้นงานยางที่อุณหภูมิห้อง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงและค่ามอดุลัสของยางที่ 100% กับค่าความแข็งกดมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานยางที่อุณหภูมิห้อง

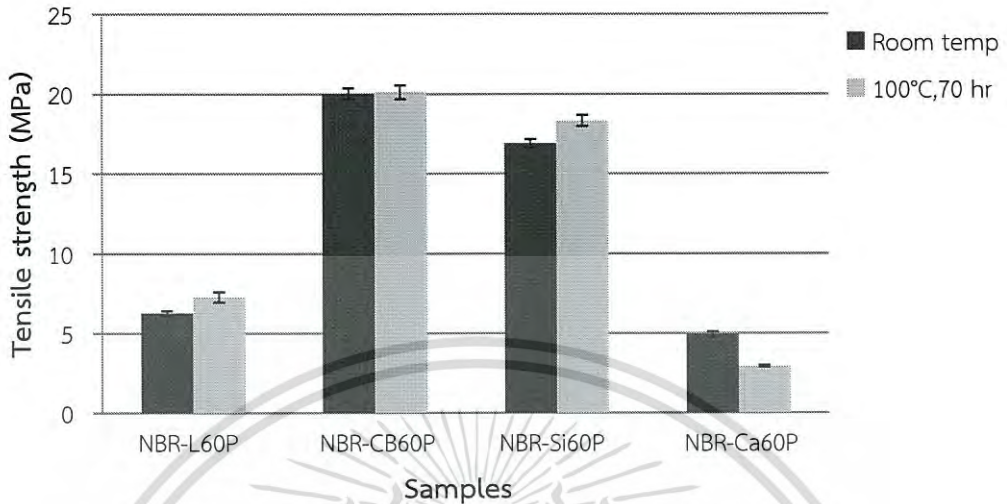
เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรหลังการทดสอบ Ageing โดยสังเกตได้จากค่ามอดุลัสของยางที่ 100% และค่าความแข็งกด เนื่องจากเป็นค่าความแข็งของยางที่บอกให้ทราบถึงความสามารถในการต้านการเสถียรภาพของยางไนไตรล์ พบว่ายางไนไตรล์ผสมผงหนึ่งฟอกผาด (NBR-L60P) มีการเสถียรภาพน้อยที่สุดซึ่งดูได้จากค่า %retention ที่แสดงดังตาราง 4.5 พบว่าผงหนึ่งฟอกผาดมีค่า %retention ของค่ามอดุลัสของยางที่ 100% และค่าความแข็งกดสูงกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น ๆ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าผงหนึ่งฟอกผาดช่วยทำให้เกิด Ageing ได้น้อยกว่า

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า %retention ของยางไนไตรล์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

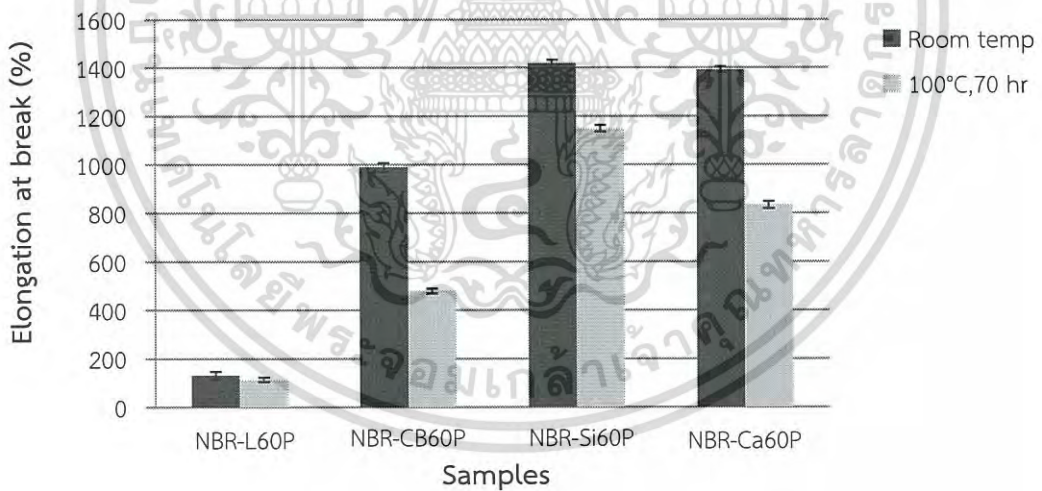
Mechanical properties	%retention			
	Leather flour	Carbon black	Silica	Calcium carbonate
Tensile strength	67.9	99.6	81.1	59.3
Elongation at break	86.6	48.4	81.5	57.9
Tear strength	93.7	75.9	99.8	96.7
Rubber Modulus,M100	68.6	10.9	25.9	25.9
Hardness (Shore A)	97	86.6	56.7	95.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

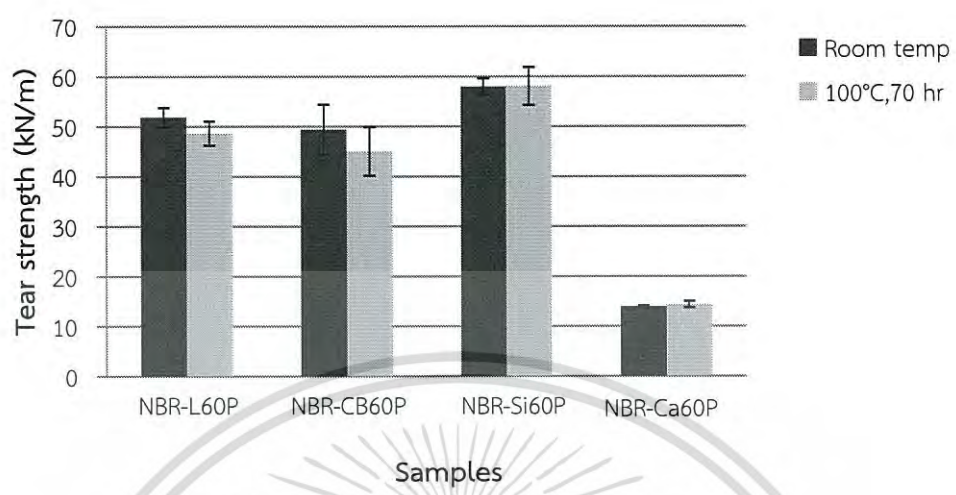


รูปที่ 4.31 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C

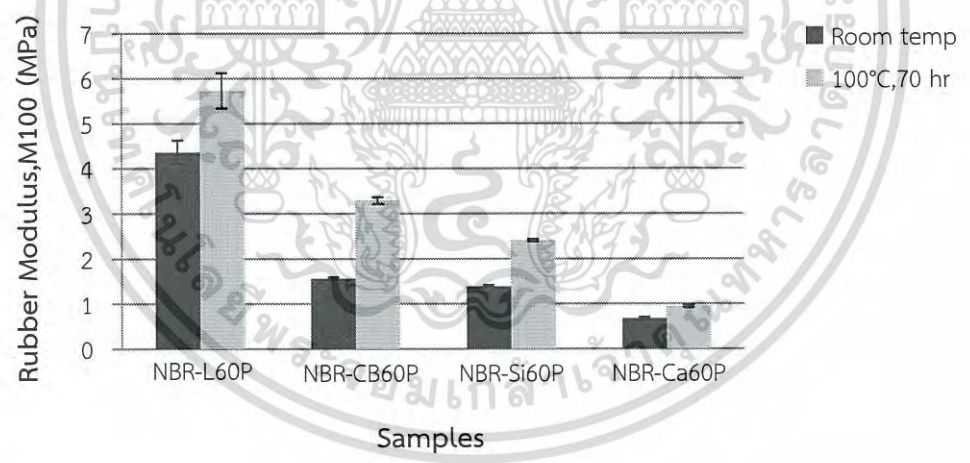


รูปที่ 4.32 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

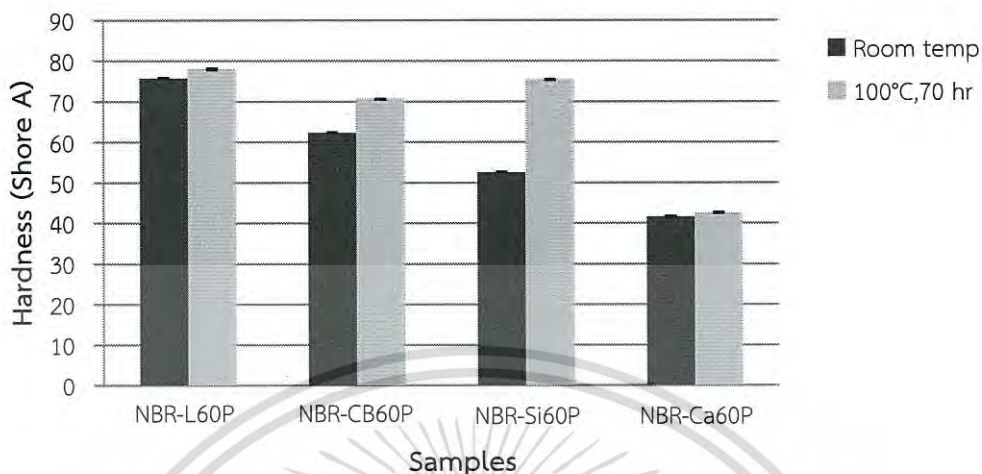


รูปที่ 4.33 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C



รูปที่ 4.34 ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% (M100) ของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร: ผลของการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกันที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100°C

#### 4.4.4 การทดสอบการสึกหรอของพื้นผิววัสดุ

การสึกหรอ คือ การสูญเสียเนื้อวัสดุที่ผิวหน้าเมื่อมีการเสียดสีของวัสดุ 2 ชั้น ซึ่งความแข็งของวัสดุเป็นตัวแปรที่สำคัญต่ออัตราการสึกหรอของผิวหน้าชิ้นงาน จากตารางที่ 4.6 เมื่อทดสอบการสึกหรอของยางผสมสูตร พบว่าการใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมมีค่า Weight Loss (g) และค่า Volume Loss ( $\text{mm}^3$ ) ต่ำกว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม เนื่องจากผงหนังเป็นสารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใยซึ่งสามารถยึดติดกับยางได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีลักษณะเป็นก้อนกลม แต่อย่างไรก็ดีสารตัวเติมซิลิกา มีค่า Weight Loss (g) และค่า Volume Loss ( $\text{mm}^3$ ) ต่ำที่สุด เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีเนื้อแข็ง ซึ่งดูได้จากค่า Mohs hardness ดังตารางที่ 4.6 ดังนั้นซิลิกาจึงสามารถทนการสึกหรอได้ดีที่สุด

ตารางที่ 4.7 ค่าการสึกหรอของยางผสมสูตรผลของการใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ

Abrasion Resistance : DIN Abrasion : Std. DIN 53516						
Formula	Density (g/cm <sup>3</sup> )	M1 (g)	M2 (g)	Weight Loss (g)		Volume Loss (mm <sup>3</sup> )
				Result	Avg.	A = (((M2-M1)/SG)*(So/S))
Leather Powder	1.1248	1.4631	1.1850	0.2781	0.2702	0.2539
		1.4442	1.1742	0.2700		
		1.4483	1.1859	0.2624		
CaCO <sub>3</sub>	1.2711	1.6203	1.3145	0.3058	0.3508	0.2918
		1.6357	1.2596	0.3761		
		1.6367	1.2661	0.3706		
Silica	1.2230	1.6276	1.4196	0.2080	0.2058	0.1779
		1.6301	1.4332	0.1969		
		1.6606	1.448	0.2126		
Weight loss of Std. Rubber ; S (g)				0.1892		DATE 6/3/2016
Nominal abrasive grade ; So (g)				0.2000		

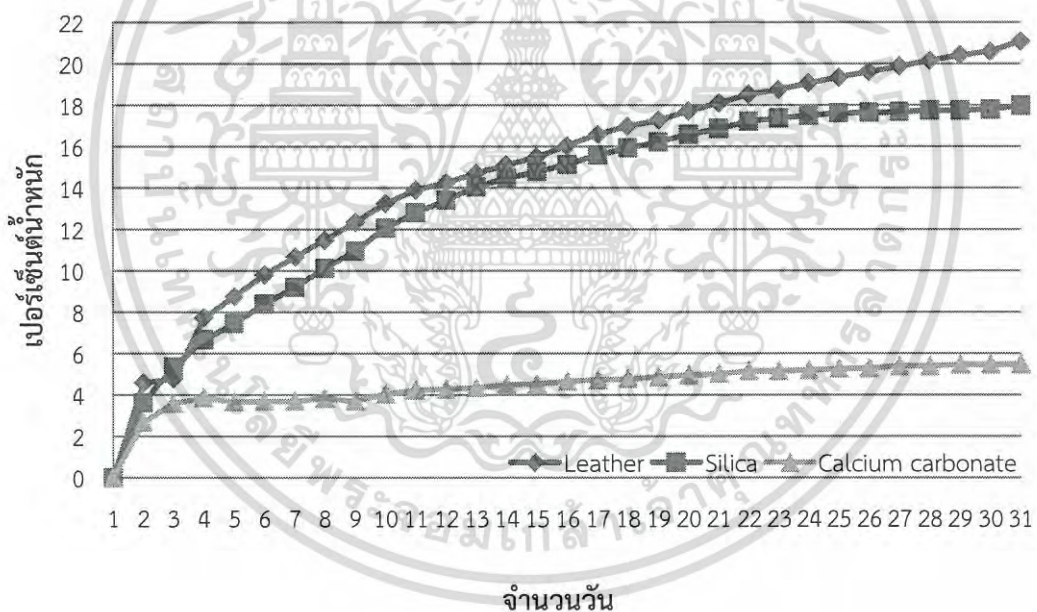
ตารางที่ 4.8 ค่า Mohs hardness ของสารตัวเติม [12]

Filler	Mohs hardness
Silica	6.5-7
Calcium carbonate	2.5-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

จากรูปที่ 4.36 เป็นการทดสอบการดูดซึมน้ำของสารตัวเติม โดยเปรียบเทียบอย่างผสมสูตรที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ ได้แก่ ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นเวลา 31 วัน พบว่าอย่างผสมสูตรที่ใช้ผงหนังมีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น 20% ส่วนซิลิกานั้นอย่างผสมสูตรมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 18% โดยทั้งผงหนังและซิลิกามีการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดที่ค่อนข้างคงที่ ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของอย่างผสมสูตรที่ค่อนข้างคงที่ โดยอย่างมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเพียง 6% ทั้งนี้เนื่องจากผงหนังมีโครงสร้างที่เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของแทนนินและพันธะเอไมด์ในโปรตีน ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เอไมด์มีขั้วสูงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ง่าย ส่วนซิลิกานั้นมี Silanol group (Si-OH) หรือเรียกได้ว่ามี OH เกาะอยู่ที่พื้นผิวเป็นจำนวนมาก ดังนั้นทั้งผงหนังและซิลิกาจึงสามารถดูดซึมน้ำได้ดี แต่ผงหนังสามารถดูดซึมน้ำได้มากกว่า เนื่องจากผงหนังมีโครงสร้างเป็นเส้นใยสั้น ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมที่มีความแข็งตัว จึงทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถดูดซึมน้ำได้น้อยกว่าผงหนังและซิลิกา



รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวันที่แช่น้ำกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป

#### 4.4.7 การวิเคราะห์ต้นทุน และสมบัติของยางผสมสูตร

ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต โดยการเปรียบเทียบราคาค่าต้นทุนของยางผสมสูตรที่ไม่ใช้สารตัวเติม และยางผสมสูตรที่ใช้สารตัวเติม คือ ผงหินชนิดฟอกฟาด แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ที่ปริมาณ 60 phr ซึ่งวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตยางผสมสูตรที่มีน้ำหนัก 1 kg และ 1 l แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ราคาวัตถุดิบรวมที่ใช้ในการผลิตยางผสมสูตร

ราคาวัตถุดิบ*	ผงหิน	แคลเซียมคาร์บอเนต	ซิลิกา	เขม่าดำ
ราคาสารตัวเติม (บาท/kg)	3	39	32.5	34
ราคาวัตถุดิบต่อน้ำหนัก (บาท/kg)	44.5	56.5	54.3	54.8
ราคาวัตถุดิบต่อปริมาตร (บาท/l)	41.5	71.3	47.6	76.2

หมายเหตุ: \* คำนวณจากราคา โดยประมาณ ณ เดือน พฤษภาคม 2559 และราคานี้ไม่รวมต้นทุนของเครื่องจักรการผลิต ค่าแรง ค่าไฟฟ้า และค่าเสื่อมของเครื่องจักร

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้ผงหนังชนิดพอกผาดเป็นสารตัวเติมชีวภาพในยางไนไตรล์ โดยทำการวิเคราะห์ผงหนังและศึกษาปัจจัยต่างๆเพื่อให้สามารถนำผงหนังมาใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับยางไนไตรล์แทนสารตัวเติมทางการค้าได้แก่ผลของการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG) และแว็กซ์สังเคราะห์ (Polyethylene wax; PE wax), ผลของปริมาณผงหนัง (0, 30, 60 และ 80 phr) และผลของการใช้ผงหนังเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ การทดสอบสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

การศึกษาผลของการใช้ PEG และแว็กซ์สังเคราะห์ พบว่าเมื่อเติม PEG ส่งผลทำให้ผงหนังไม่เกิดการหน่วงการเชื่อมโยง เวลาเชื่อมโยงลดลง สมบัติเชิงกลดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเติมแว็กซ์สังเคราะห์เพียงอย่างเดียวพบว่า ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์จำเป็นต้องปรับปรุงผิวผงหนังด้วย PEG อย่างเดียว เพื่อให้สมบัติโดยรวมดีขึ้น

การศึกษาผลของปริมาณผงหนัง ที่ 0, 30, 60 และ 80 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงหนังจาก 0 เป็น 80 phr ส่งผลทำให้เวลาเชื่อมโยงอย่างลดลงค่าแรงบิดสูงสุดและค่าความหนืดมูนนี้มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุเกิดการไหลยากจึงมีความหนืดสูงขึ้นนอกจากนี้ยังพบว่าผงหนังเป็นสารตัวเติมที่เสริมแรงส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เมื่อปริมาณผงหนังเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าผงหนังปริมาณ 80 phr ทำให้สมบัติโดยรวมดีขึ้นกล่าวคือ มีค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งกด และค่าความแข็งแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงและจากการทดสอบ Ageing properties พบว่าผงหนังสามารถทำหน้าที่เป็น Antioxidant ได้

การศึกษาผลการใช้ผงหนังเพื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆได้แก่ ซิลิกา เขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าการใช้ผงหนังที่ปรับปรุงด้วย PEG เป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์ส่งผลทำให้เวลาเชื่อมโยงอย่างเร็วกว่าซิลิกาแต่ช้ากว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำในด้านสมบัติเชิงกลต่างๆพบว่าผงหนังเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต แต่มีประสิทธิภาพที่ด้อยกว่าซิลิกาและเขม่าดำ ได้แก่ ค่าความแข็งกดและค่ามอดูลัสของยางที่ 100% ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมสามารถลดต้นทุนและสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลบางประการ เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงฉีกขาด ค่ามอดูลัสของยางที่ 100% และค่าความแข็งกดจึงสามารถสรุปได้ว่าผงหนังที่ปรับปรุงด้วย PEG มีศักยภาพเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงในยางไนไตรล์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการศึกษาการนำผงหนังไปใช้งานจริง และศึกษาสมบัติจากการใช้งานจริง เช่น การนำมาทำเป็นพื้นรองเท้า หรืองานที่ต้องการความชื้น
2. ปรับปรุงสูตรยางเพื่อเพิ่มการกระจายตัวของผงหนัง ทำให้สามารถใช้ผงหนังในปริมาณที่มากขึ้น
3. ศึกษาสมบัติอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น การทดสอบการทนน้ำมัน การทดสอบการทนต่อการพับงอของยาง (Ross flexing) เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] WasanPhusirit. 2014. นานาสาระเครื่องหนัง.[Online].Available :<http://hardyleather.blogspot.com/2014/01/blog-post.html>
- [2] นาย อาวุธ แต่สุวรรณ. 2013. At Leather.[Online].Available : <http://www.atleathermade.com/article/%E0%B8%AB%E0%B8%99%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%A7%E0%B8%9F%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%9D%E0%B8%B2%E0%B8%94%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B9%84%E0%B8%A3>
- [3] Vanchada Brand. 2015. History of Leather. [Online].Available : <http://www.bagindesign.com/%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%AB%E0%B8%99%E0%B8%B1%E0%B8%87-history-of-leather/>
- [4] นางนงนุช มณีรัตน์. 2007. ความสำคัญของอุตสาหกรรมเครื่องหนังไทย. [Online].Available :<https://www.gotoknow.org/posts/111666>
- [5] พงษ์ธร แซ่อูย. 2548. สารเคมียาง. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [6] สุดาพร คักดีศศิธร. 2558. การศึกษาผงหนังฟอกผาดเป็นสารตัวเติมชีวภาพในยางธรรมชาติ: ผลของการปรับปรุงด้วยแวกซ์. โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] พรพรรณ นิธิอุทัย. ยางและเทคนิคการออกสูตรยาง.: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตปัตตานี. 2540.
- [8] วราภรณ์ ขจรไชยกูล.เทคโนโลยียางสังเคราะห์.กรุงเทพฯ :เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรเทคโนโลยียาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2542.
- [9] พงษ์ธร แซ่อูย. ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2550.
- [10] HI-TECHPOLYMER.NBR Rubber Products.[Online].Available : <http://www.hi-techpolymer.com/nbr-rubber-products.htm>. 2014.
- [11] พงษ์ธร แซ่อูย. 2548. สารเคมียาง. กรุงเทพฯ. : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [12] อธิพิณ แจ้งชัด. 2557. เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีการยาง.ภาควิชาเคมีคณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [13] จูติภา สิริวณิชพงศ์, ธนิสรา ถนอมมิตร และวารุณีนิพนธ์กิจ. 2556. การศึกษาผงหนังชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พอกผาดเป็นสารตัวเติมสำหรับยางธรรมชาติ.โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี สาขา  
เคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [14] TanmayMahajan. 2014. Tetramethylthiuram disulfide. [Online].Available :  
<http://alphachemika.tradeindia.com/tetramethylthiuram-disulfide--611067.html>
- [15] BioWORLD. 2014. PEG 4000 (Polyethyleneglycol). [Online].Available :  
<http://www.bio-world.com/msds/41600044/PEGpolyethylene-glycol.html>.
- [16] The Dow Chemical Company. 2014. CARBOWAX™ Polyethylene Glycol (PEG)  
4000.[Online].Available  
:<http://www.dow.com/webapps/lit/litorder.asp?filepath=polyglycols/pdfs/noreg/11801804.pdf>.
- [17] อธิพิณ แจ่มชัด. 2557. Polymer Additives: Waxes.[สไลด์].กรุงเทพฯ :ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18] Endlein, E. and Peleikis, K.H. 2011. “Natural Waxes–Properties, Compositions  
and Applications.”SOFW Journal.137 : 1-8.
- [19] Vessel Chemical Co., Ltd. 2014. โพลีเอททิลีนแว็กซ์(POLYETHYLENE WAX).  
[Online].Available :<http://www.vessel-chemical.com/Default.aspx?pageid=16>.
- [20] สาขาวิชาเคมี โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์. 2557. สารชีวโมเลกุล.[Online].Available :  
[http://www.mwit.ac.th/~t2040113/data/Biochemistry/Biochem\\_5ed.pdf](http://www.mwit.ac.th/~t2040113/data/Biochemistry/Biochem_5ed.pdf).
- [21] ดวงใจ ลีสมกุล และพิสมัย เลิศวัฒนะพงษ์ชัย .2542. กว่าจะมาเป็นเครื่องหนังสวยสวย. กรม  
วิทยาศาสตร์.47(149) : 13-16.
- [22] TANNING INDUSTRY ASSOCIATION. 2013. TANNING PROCESS. [Online].Available  
:<http://www.thaitanning.org/tanning-industry/tanning-process/>
- [23] สายวิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2557.  
บทที่ 2 โครงสร้างของอุตสาหกรรมรองเท้าและเครื่องหนัง. [Online].Available  
:[sci.flas.kps.ku.ac.th/course/leather.doc](http://sci.flas.kps.ku.ac.th/course/leather.doc).
- [24] จรินทร์ เจริญศรีวัฒนกุล. เส้นทางและโอกาสการส่งออกและผลกระทบจากการมีเขตการค้าเสรี  
อาเซียน.(มาตรฐานการตรวจสอบโรงงานพอกหนัง) กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2539.
- [25] สุปรีณา ศรีใสคำ. 2552. ผลของการใช้ไบโและก้านสะเดาในอาหารแพะเนื้อต่อกระบวนการ  
หมักในกระเพาะหมักและสมรรถนะการผลิต.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชา  
เทคโนโลยีการผลิตสัตว์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] ฤทัยรัตน์น้อยคนดี. 2551. สกัดแทนนินจากไขมันสำปะหลังเพื่อการบำบัดคุณภาพน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [27] S. H. El-Sabbagh.and O. A. Mohamed.Recycling of Chrome-Tanned leather waste in Acrylonitrile butadiene rubber.Journal of applied polymer science, vol. 2011 (121) : 979-988.
- [28] เดชาธร ฉันทภักษ์. 2558. การศึกษาการใช้เถ้าแกลบดำเป็นสารตัวเติมฐานชีวภาพในยางไนไตรล์.โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [29] A. Przepiorkowska, K. Chronska and M. Zaborski.Chrome-tanned leather shavings as a filler of butadiene-acrylonitrile rubber.Journal of hazardous materials vol. 2007 (141) : 252-257.
- [30] K. Ravichandran.and N. Natchimuthu. Natural rubber – leather composites. Anna university, India polimeros: Ciência e Tecnologia, vol. 2005 (15) :102-108
- [31] American Standard for Testing and Materials. 2013. **Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers Tension**.ASTM D412.Annual Book of ASTM Standards.9 : 1-14.
- [32] American Standard for Testing and Materials. 2012.**Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers**.ASTM D624.Annual Book of ASTM Standards.9 : 1-9.
- [33] American Standard for Testing and Materials. 2010. **Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness**.ASTM D2240.Annual Book of ASTM Standards.9 : 1-13.
- [34] DeutschesInstitutfurNormung. 1977. **Testing of Rubber and Elastomers; Determination of Abrasion Resistance**. DIN 53516:1987-06. DIN Standards. 6 :2-6.
- [35] American Standard for Testing and Materials. 2014. **Standard Test Method for Rubber Property-Compression Set**.ASTM D395. Annual Book of ASTM Standards.9 :1-6.
- [36] American Standard for Testing and Materials. 2000. **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**.ASTM D570.Annual Book of ASTM Standards.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- :32-35.
- [37] ณัฐนันท์ โปชนา,ภัทรพร เอี่ยมสุขและอาทร ทับทิมทอง. 2555. การใช้ประโยชน์เศษผงหนังธรรมชาติเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ.โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [38] Nanopotal. Carbon black.[Online].Available  
:http://nanopotal.gc.ca/default.asp?lang=En&n=64893C1E-1. 2012.
- [39] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. สารเคมียาง.กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).2548.
- [40] พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตปัตตานี. 2528.
- [41] ปิ่นสุภา ปิติรักษสกุล. 2551. คอมโพสิตไม้-พลาสติกวัสดุใหม่สำหรับงานก่อสร้าง.วารสารรามคำแหง ฉบับวิศวกรรมศาสตร์.
- [42] ปิยะวรรณ เจียวก๊ก และพงศ์ศักดิ์ แพ้น้อย. 2543. การศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตไม้เทียมจากพอลิพรอพิลีนและไม้ยูคาลิปตัส.โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยี- พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [43] Jang, B.Z. 1994. *Advanced Polymer Composite*. New York : ASTM International
- [44] Clyen, T.W. and Hull, D. 1996. *An Introduction to Decomposite Material*. [n.p.]
- [45] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมในยาง.[online].Available  
:http://www.rubbercenter.org/rubbtech/Silica.pdf. 2552.
- [46] Pollution Prevention and Abatement Handbook. *Environmental Guidelines for Tanning and Leather Finishing*. [Online].Available  
:https://www.miga.org/documents/TanningandLeatherFinishing.pdf. 2010.
- [47] Dr.Hans Zweifel. 1939, *Plastics Additive Handbook*. Cincinnati : Hanser Gardner Publications.

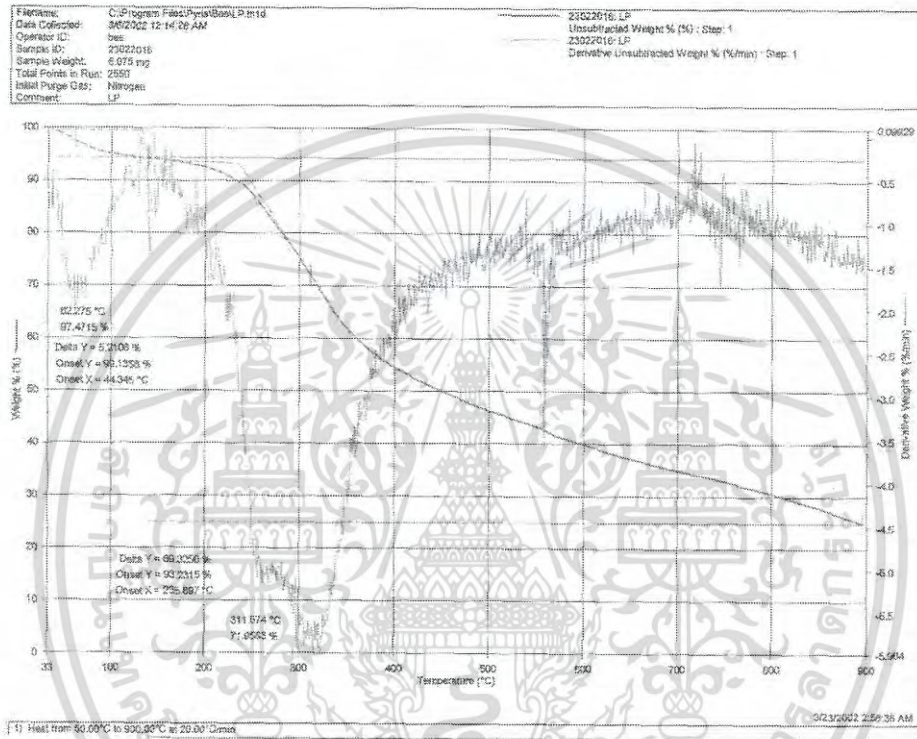


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

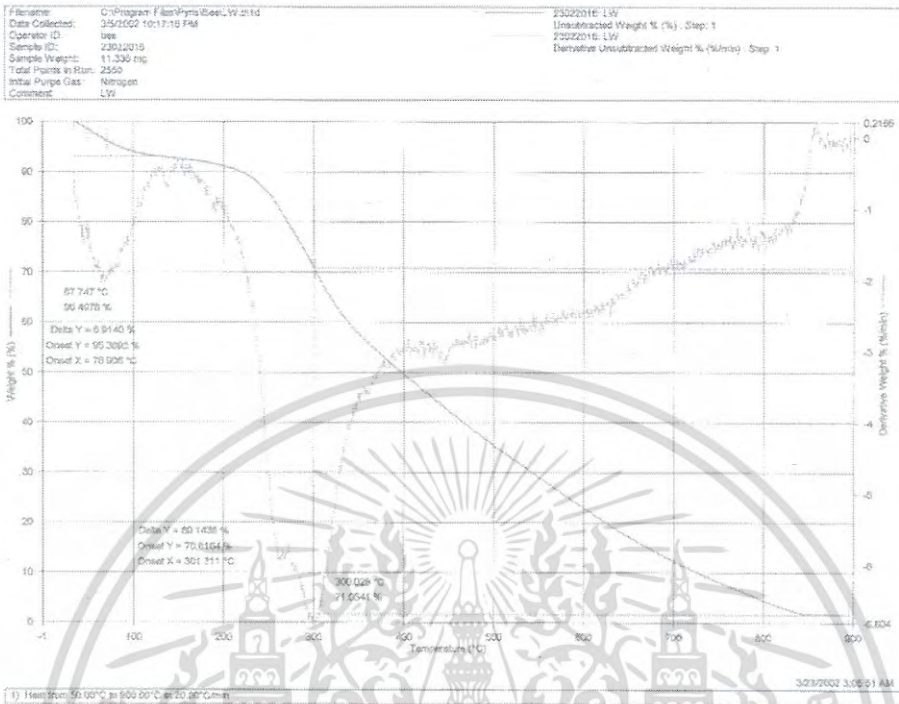
## ภาคผนวก ก

การตรวจวิเคราะห์ผงหนังและยางไนไตรล์ผสมผงหนังด้วยเทคนิคทางความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA)

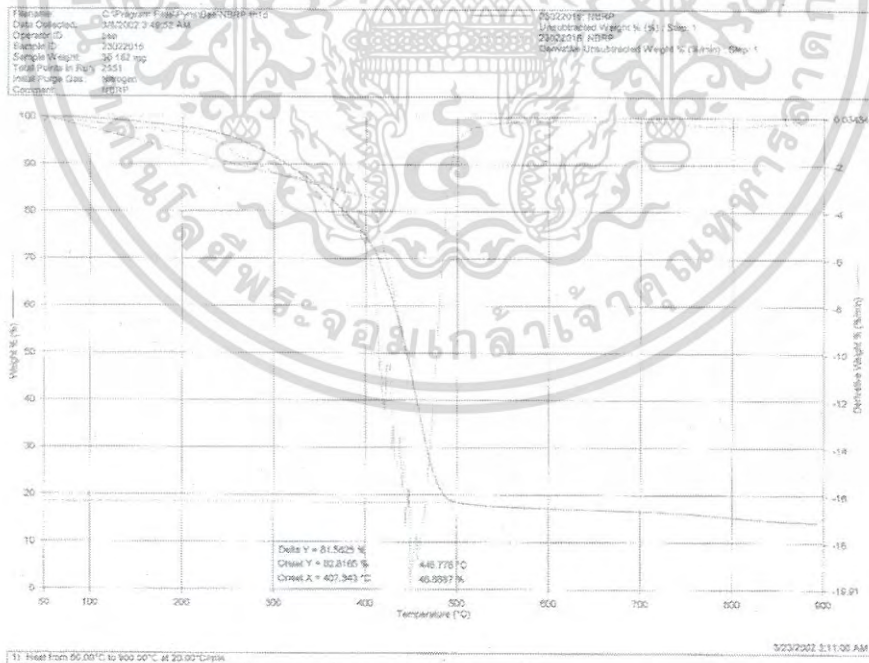


รูปที่ ก-1 เทอร์โมแกรมของผงหนังฟอกผาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

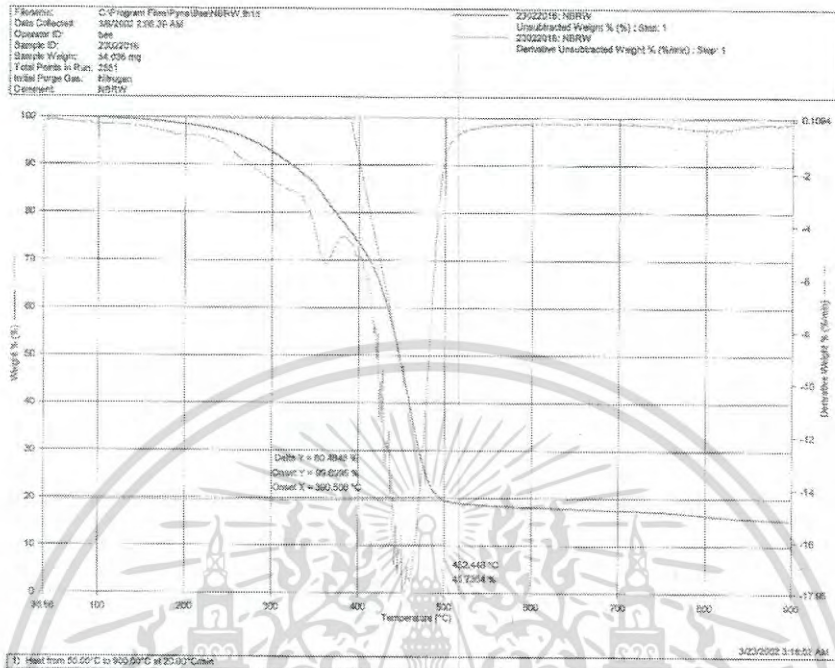


รูปที่ ก-2 เทอร์โมแกรมของผงหนังฟอกฝาดที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย PE wax



รูปที่ ก-3 เทอร์โมแกรมของยางไนไตรล์ผสมผงหนังฟอกฝาด (NBR-L30P)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-4 เทอร์โมแกรมของยางไนไตรล์ผสมผงหนังฟอกผาดที่ปรับปรุงพื้นผิวผงหนึ่งด้วย PE wax (NBR-30W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้