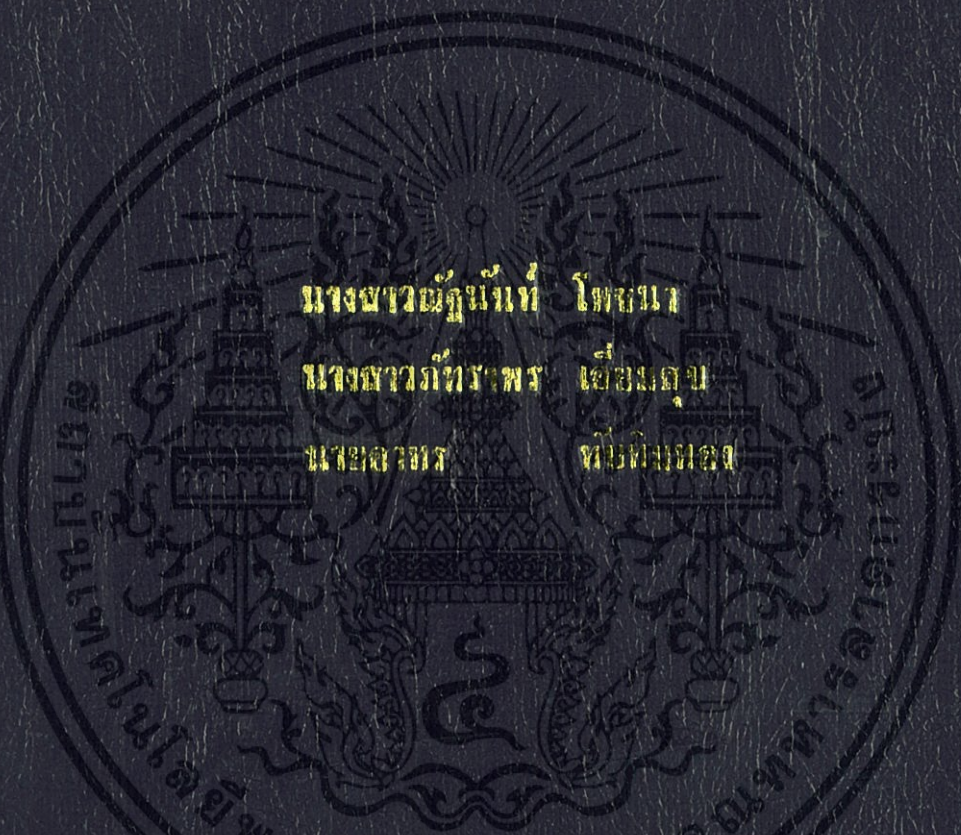


การใช้ประโยชน์เศษผงหนังธรรมชาติเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

Use of Leather Flour as Fillers for Natural Rubber



นางสาวฉัฐนันท์ ไทชนา

นางสาวกัทรพร เขื่อนสุข

นายฉัตร ทวีทิพย์ทอง

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อสนองการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

ณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

การใช้ประโยชน์เศษผงหนังธรรมชาติเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

Use of Leather Flour as Fillers for Natural Rubber



คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Use of Leather Flour as Fillers for Natural Rubber

Miss Nattanan

Phochana

Miss Patthraporn

Iamsuk

Mr. Artorn

Tubtintong

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN INDUSTRY CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การใช้ประโยชน์ผงหนังธรรมชาติเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ (Use of Leather Flour as Fillers for Natural Rubber)	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐนันท์	โพชนา
	นางสาวภัทรพร	เอี่ยมสุข
	นายอาทร	ทับทิมทอง
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2555	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล	แจ้งชัด

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหนังสัตว์มีความสำคัญกับชีวิตประจำวัน และสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องแต่งกาย เฟอร์นิเจอร์ ถุงมือ หมวก และรองเท้า ในขั้นตอนการผลิตหนังจะมีการทิ้งผงหนังเป็นของเสียจำนวนมากก่อให้เกิดปัญหาจากของเสีย งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้ประโยชน์เศษผงหนังธรรมชาติเป็นสารตัวเติม (Filler) ในยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) STR-5L โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของยาง ได้แก่ ผลการเติม PEG (Poly(ethylene glycol)) และสารคู่ควบไซเลน (Si-69, Coupling agents) ขนาดและปริมาณผงหนัง ทำการเตรียมตัวอย่างโดยการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นตัวอย่างด้วยการอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงทดสอบสมบัติเชิงกล ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM และทดสอบสมบัติการลามไฟ (Flame retarding properties) จากการทดลองพบว่าการใช้ PEG ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมผงหนัง นอกจากนี้ การใช้ PEG ร่วมกับสารคู่ควบไซเลน Si-69 ส่งผลให้ได้สมบัติเชิงกลของยางเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาผลของการใช้ผงหนังขนาดต่างกัน (น้อยกว่า 35 mesh และ 12-35 mesh) พบว่าผงหนังขนาดเล็กกว่าเกิดการเชื่อมโยงช้ากว่า และให้ค่าสมบัติเชิงกลต่ำกว่าเล็กน้อย จากการศึกษาเพิ่มการใส่ปริมาณผงหนัง 0-120 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงหนัง ทำให้เวลาเชื่อมโยง (Cure time, t_{c90}) เพิ่มขึ้นมาก โดยเฉพาะที่ปริมาณ 120 phr พบว่าสมบัติเชิงกลสูงชันอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณผงหนัง ทั้งค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด และค่ามอดูลัสของยางที่ 100% อย่างไรก็ตามสมบัติเหล่านี้มีค่าสูงสุดที่ 90 phr แล้วลดลงเมื่อใส่ปริมาณผงหนังสูงเกินไปที่ 120 phr จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าผงหนังสามารถกระจายได้ดีในวัฏภาคยาง NR และมีการยึดเกาะระหว่างผงหนังกับเมทริกซ์ยางได้ดี อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณผงหนังเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของหนังในยางจะลดลง และพบช่องว่างใน

ของผสม นอกจากนี้การใช้ผงหนังทำให้การลามไฟของวัสดุข้าง อากกล่าวได้ว่าการใช้ผงหนัง ร่วมกับ PEG และ Si-69 มีศักยภาพสูงที่จะใช้เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงในยาง เนื่องจากสามารถ ใส่ได้ในปริมาณมาก เพิ่มสมบัติเชิงกลได้ และลดต้นทุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ผงหนัง, ยางธรรมชาติ, สารตัวเติม, ไซเลน-69, PEG, ผงหนังขนาดต่างกัน (น้อยกว่า 35 mesh และ 12-35 mesh)



Special Project Title	Use of Leather Flour as Fillers for Natural Rubber		
Student names	Miss Nattanan	Phochana	ID 52050160
	Miss Patthraporn	Iamsuk	ID 52050213
	Mr. Artorn	Tubtimtong	ID 52050268
Degree	Bachelor of Science		
Program	Industrial Chemistry		
Academic Year	2012		
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud		

ABSTRACT

Nowadays, leather is one of the most important materials and used as human costumes, furnitures, gloves, hats, and shoe. In leather production, leather flour (LF) has been created and become waste problems. This work was focused on utilization of LF as fillers in natural rubbers (NR). Factors affecting rubber properties were studied including PEG and Si-69 silane coupling agent treatment, effects of LF sizes and % LF loading. Samples were compounded by a two-roll mill and shaped into sheets by compression molding technique. The samples were tested for cure characteristics, mechanical properties, morphology, and flame retarding properties. It was found that PEG treatment played an important role to prevent cure retarding effects by fillers. Moreover, by using PEG and Si-69 coupling agent, mechanical properties were improved significantly. In the study of different sizes of LF (< 35 mesh and 12-35 mesh), it was found that small size of LF yielded slower cure time and lower mechanical properties. By varying LF loading (0-120 phr), cure time was increased especially at 120 phr. It was revealed that some mechanical properties, i.e., tensile strength, tear strength, and rubber modulus (M100) were enhanced significantly up to 90 phr and then decreased at 120 phr. From SEM micrographs, they revealed good dispersion and good interfacial adhesion between LF and NR matrix. However, voids were found in the materials at high LF loadings. By adding the LF in NR, flame burning rate was decreased as LF loading was increased. By using LF with PEG and Si-69, it can be concluded that LF can be used as a reinforcing filler with high loading and high cost saving for rubbers.

Keywords : Leather flour, Natural rubbers, Fillers, Silane-69, Polyethylene glycol, Different sizes of leather flour (< 35 mesh and 12-35 mesh)



กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยการให้คำปรึกษา คำแนะนำและช่วยแก้ไข ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับการทำการศึกษาในครั้งนี้ จาก รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ผู้ ควบคุมโครงการพิเศษ คณะผู้จัดทำรู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์และความเอาใจใส่จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ และ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ประจำ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณา ตรวจสอบและแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ และตอบปัญหาข้อสงสัยต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณศิรินทร ศรีธาดาภูมิ ที่ให้ความอนุเคราะห์พวงหรีด และข้อมูลงานวิจัย เบื้องต้นเพื่อใช้ในการงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่คอยอำนวยความสะดวกในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณครอบครัวของคณะผู้ศึกษา เพื่อนๆ และพี่ๆ นักศึกษาปริญญาโทและเอก ที่เป็น กำลังใจและช่วยเหลือสนับสนุนการทำโครงการพิเศษฉบับนี้มาตลอดจนสำเร็จสมบูรณ์

อนึ่งยังมีบุคคลอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วซึ่งให้ความกรุณาช่วยเหลือ ทาง คณะผู้ศึกษาขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สุดท้ายนี้ขอให้ประ โยชน์และความรู้อันพึงมีจากโครงการพิเศษฉบับนี้ขอมอบแต่บิดา มารดา ครอบครัว ผู้มีพระคุณ และคณาจารย์ทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้ศึกษาขอ น้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวณัฐนันท์ โปชนา

นางสาวภัทราพร เอี่ยมสุข

นายอาทร ทับทิมทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์	XII
บทที่ 1 บทนำ	1-3
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4-32
2.1 ยางธรรมชาติ	4
2.2 สารเติมแต่ง (Additive)	6
2.3 หนังสัตว์	15
2.4 หนังฟอก (Leather)	15
2.5 ของเสียและวิธีการลดของเสียจากกระบวนการฟอกหนัง	21
2.6 กากของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต	22
2.7 สารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling Agent)	25
2.8 ทฤษฎีการยึดเกาะ (Theories of Adhesion)	28
2.9 กลไกของการหน่วงการติดไฟ	32
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	39-47
3.1 สารเคมี	40
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	41
3.3 วิธีการทดลอง	42
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย	47-70
4.1 การศึกษาผลของการใช้ PEG และสารคู่ควบไซเลน (Si-69)	49
4.2 การศึกษาขนาดของผงแห้งที่มีผลต่ออย่างธรรมชาติ	56
4.3 การศึกษาปริมาณผงแห้งที่มีผลต่ออย่างธรรมชาติ	61
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	71-72
5.1 สรุปผลการทดลอง	71
5.2 ความเป็นได้ในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยาง	72
เอกสารอ้างอิง	73
ภาคผนวก	76

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การลดกากของเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง	25
2.2 ประเภทของสารคู่ควบไซเลน	27
2.3 ลักษณะความสามารถในการติดไฟของวิธีการทดสอบแต่ละชนิด	36
3.1 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติชนิดยางแท่งเอสทีอาร์ 5L (STR 5L)	41
3.2 สูตรผสมยางในการทดลองศึกษาผลของผงหนังในยาง	43
4.1 อักษรย่อของสูตรที่ใช้ในงานวิจัย	48
4.2 แสดงค่าพฤติกรรมการเชื่อมโยง แสดงผลของการใช้ PEG และ Si-69	50
4.3 แสดงค่าพฤติกรรมการเชื่อมโยง แสดงผลของขนาดผงหนัง	58
4.4 แสดงปริมาณขนาดอนุภาคของผงหนังที่ร้อนได้ใน 1 กิโลกรัม	62
4.5 แสดงค่าพฤติกรรมการเชื่อมโยงแสดงผลของปริมาณการใส่ผงหนัง	64
4.6 แสดงอัตราเร็วในการลามไฟ	70
4.7 การเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบของยางผสมสูตรที่ใช้ซิลิกาและผงหนังเป็นสารตัวเติม	71
4.8 การเปรียบเทียบราคาสารตัวเติมชนิดซิลิกาและผงหนังที่ผสมในยาง	71

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เศษผงหนังที่มีขนาดเล็กและฝุ่นผงจากการขัดผิว	1
1.2 ตัวอย่างแผ่นยางผสมเศษผงหนังที่ได้จากเทคนิคการอัดขึ้นรูป (Compression molding)	3
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ (NR)	5
2.2 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยง แบบไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง และการเชื่อมโยงในอุดมคติ (Ideal crosslink) ที่ต้องการ	8
2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดอะมิโนแต่ละชนิด	16
2.4 ลักษณะเส้นใยคอลลาเจน	17
2.5 กระบวนการผลิตหนังสัตว์ฟอก	20
2.6 ปฏิกิริยาระหว่างโครเมียมกับโปรตีนในหนังดิบ	21
2.7 ขอบเสียจากการผลิตหนังฟอกสำเร็จ 1,000 kg	22
2.8 วัตถุดิบและผลพลอยได้ของหนังที่ผ่านกระบวนการต่างๆ	23
2.9 การสกัดโปรตีนและโครเมียมจากเศษหนังตัดเจียร	24
2.10 การผลิตหนังอัดแผ่นจากเศษหนังเจียร	24
2.11 (ก) สูตรทางเคมีของ Bis - (3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (ข) การเกิดปฏิกิริยาของ ethoxy group กับ OH group บนพื้นผิวของผงหนัง	28
2.12 กลไกการยึดเกาะชนิดต่างๆ (a) อินเทอร์ดิฟฟิวชัน (Interdiffusion) (b) แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ (c) แรงดึงดูดระหว่างประจุของ โมเลกุลที่มีประจุลบ พื้นผิวที่มีประจุบวก (d) พันธะทางเคมีเกิดระหว่างหมู่ A บนพื้นผิวหนึ่ง กับหมู่ B บนพื้นผิวหนึ่ง และ (e) การยึดเกาะเชิงกล (mechanical interlocking)	31
2.13 ลักษณะการเผาไหม้ชิ้นงานทดสอบของแต่ละประเภท	34
2.14 ลักษณะการจัดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการเผาไหม้แบบแนวนอน	34

สารบัญรูป (ต่อ)

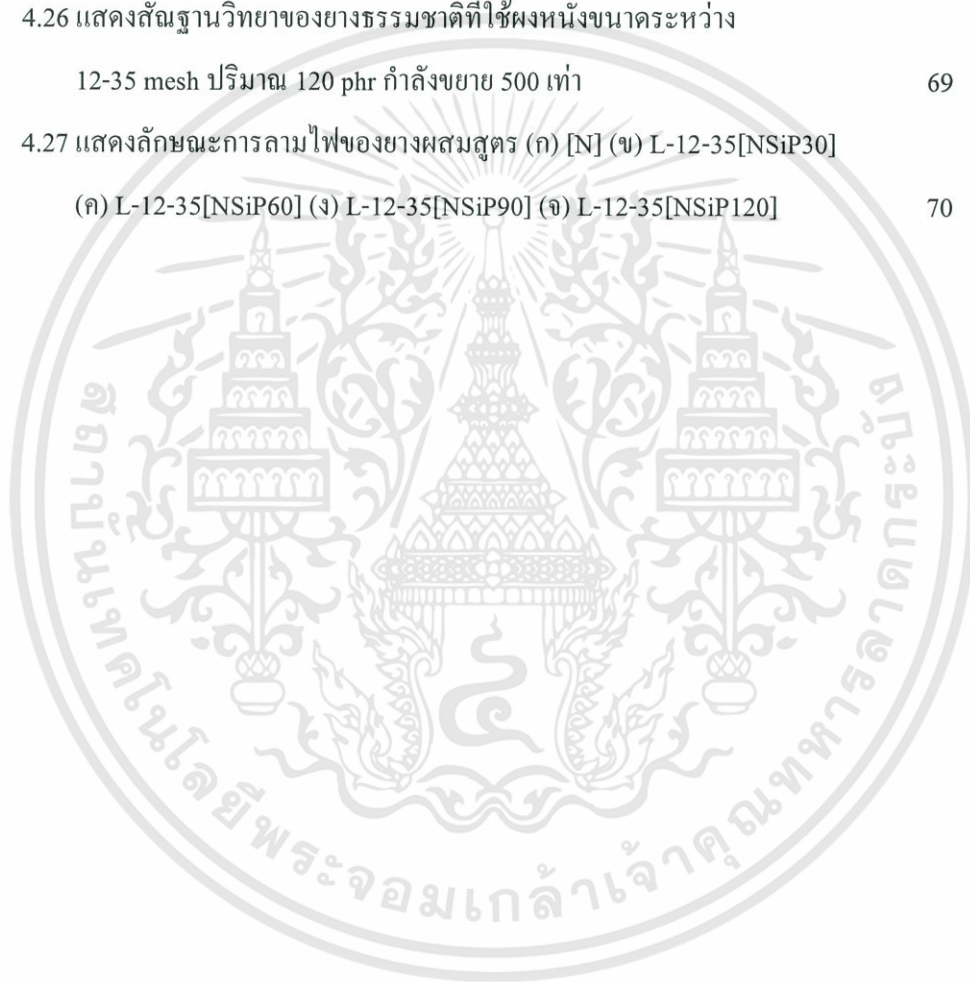
รูปที่	หน้า
2.15 ลักษณะการเปรียบเทียบข้อแตกต่างในการจัดอุปกรณ์สำหรับทดสอบ การเผาไหม้แบบ 94-V และ 94-VTM	35
2.16 การทดสอบการเผาไหม้ด้วยวิธีดัชนีออกซิเจน	37
3.1 ตัวอย่าง Cure curve แสดงลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)	44
4.1 โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนชนิด Bis - (3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (Si-69)	49
4.2 กราฟแสดงการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร แสดงผลของการใช้ PEG และ Si-69	50
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของยางธรรมชาติ ที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมแสดงผลของการใช้ PEG และ Si-69	51
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ ที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติม แสดงผลของการใช้ PEG และ Si-69	51
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยางที่ 100% ดึงยึดของยางธรรมชาติ ที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติม แสดงผลของการใช้ PEG และ Si-69	52
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกักขาดของยางธรรมชาติ ที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติม แสดงผลของการใช้ PEG และ Si-69	52
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกดของยางธรรมชาติ ที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติม แสดงผลของการใช้ PEG และ Si-69	52
4.8 การเกิดปฏิกิริยาของ Ethoxy group กับ OH group บนพื้นผิวของผงหนัง และอะตอมของกำมะถันในไซเลน-69 ที่ส่งผลต่อการเชื่อมโยงของยาง	54
4.9 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนัง เป็นสารตัวเติมที่มีผลจากการใช้ PEG และสารคู่ควบไซเลน กำลังขยาย 1000 เท่า (ก) L-35[N30] (ข) L-35[NP30] (ค) L-35[NSi30] (ง) L-35[NSiP30]	56
4.10 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร แสดงผลของขนาดผงหนัง	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของยางธรรมชาติ ที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมที่มีขนาด 12-35 mesh และ น้อยกว่า 35 mesh	58
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ ที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมที่มีขนาด 12-35 mesh และ น้อยกว่า 35 mesh	59
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยางที่ 100% ดึงยืดของยางธรรมชาติ ที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมที่มีขนาด 12-35 mesh และ น้อยกว่า 35 mesh	59
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ ที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมที่มีขนาด 12-35 mesh และ น้อยกว่า 35 mesh	59
4.16 SEM micrographs แสดงสัญญาณวิทยานาอนุภาคของผงหนัง (ก) น้อยกว่า 35 mesh (ข) 12-35 mesh กำลังขยาย 50 เท่า	61
4.17 พฤติกรรมการเชื่อมโยงยาง แสดงผลของปริมาณการใส่ผงหนัง	63
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของยางที่ใช้ผงหนัง เป็นสารตัวเติม โดยใส่ปริมาณผงหนังเท่ากับ 0, 30, 60, 90 และ 120 phr	65
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางที่ใช้ผงหนัง เป็นสารตัวเติม โดยใส่ปริมาณผงหนังเท่ากับ 0, 30, 60, 90 และ 120 phr	65
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยางที่ 100% ดึงยืดของยางที่ใช้ผงหนัง เป็นสารตัวเติม โดยใส่ปริมาณผงหนังเท่ากับ 0, 30, 60, 90 และ 120 phr	66
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางที่ใช้ผงหนัง เป็นสารตัวเติม โดยใส่ปริมาณผงหนังเท่ากับ 0, 30, 60, 90 และ 120 phr	66
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกดของยางที่ใช้ผงหนังเป็น สารตัวเติม โดยใส่ปริมาณผงหนังเท่ากับ 0, 30, 60, 90 และ 120 phr	67
4.23 แสดงสัญญาณวิทยานาอนุภาคของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังขนาดระหว่าง 12-35 mesh ปริมาณ 30 phr กำลังขยาย 500 เท่า	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังกษณาระหว่าง 12-35 mesh ปริมาณ 60 phr กำลังขยาย 500 เท่า	68
4.25 แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังกษณาระหว่าง 12-35 mesh ปริมาณ 90 phr กำลังขยาย 500 เท่า	69
4.26 แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังกษณา 12-35 mesh ปริมาณ 120 phr กำลังขยาย 500 เท่า	69
4.27 แสดงลักษณะการลามไฟของยางผสมสูตร (ก) [N] (ข) L-12-35[NSiP30] (ค) L-12-35[NSiP60] (ง) L-12-35[NSiP90] (จ) L-12-35[NSiP120]	70



คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
NR	ยางธรรมชาติ
Si-69	ไซเลน - 69
phr	ส่วนโดยน้ำหนักต่อยาง 100 ส่วน
M_L	แรงบิด (Torque) ต่ำสุด
M_{HF}	แรงบิด (Torque) สูงสุด
t_{S2}	เวลาเริ่มเชื่อมโยงยาง
$t_{c(90)}$	เวลาเชื่อมโยงยาง
CRI	ดัชนีอัตราเร็วการเชื่อมโยงยาง
mm	มิลลิเมตร
mm/min	มิลลิเมตรต่อนาที
kN	กิโลนิวตัน
mm ²	ตารางมิลลิเมตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

หนังสัตว์ (Leather) เป็นวัสดุธรรมชาติที่ได้จากสัตว์ชนิดต่างๆ โดยมีส่วนประกอบหลักเป็นเส้นใยคอลลาเจน (Collagen) ที่เกิดการเชื่อมโยงอยู่ในรูปโครงสร้างร่างแห ในอุตสาหกรรมการฟอกหนังจะนำหนังมาทำการฟอก ส่วนใหญ่ฟอกด้วยโครเมียม (Chrome leather tanning) เพื่อปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ความทนทานต่อสารเคมีและการย่อยสลายทางชีวภาพ จากนั้นนำหนังที่ได้มาทำการย้อมสี และทำการตกแต่ง เพื่อให้ได้หนังฟอกสำเร็จรูป และใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเครื่องหนังต่างๆ แต่ในขั้นตอนกระบวนการผลิตหนังจะมีการทิ้งของเสียออกมาเป็นจำนวนมาก เช่น ผงหนังและเศษหนังจากการขัดเจียนผิว และการตัดตกแต่งชิ้นงาน เป็นต้น

มีข้อมูลจากการประชุมของ UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) ปี ค.ศ.2000 ระบุว่าปริมาณหนังที่เป็น ของเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง โดยเศษหนังที่เป็นของเสีย โดยเฉพาะการผลิตหนังแบบ Chrome tanned leather ทั้งโลกรวมกันสูงถึง 805,657 ตัน/ปี โดยที่เศษหนังตัดเจียร (Chrome Shaving) เป็นกากของเสียที่มีปริมาณมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 35 ของกากของเสียทั้งหมด [1] โดยเฉพาะเศษหนังที่มีขนาดเล็กและฝุ่นผงจากการขัดผิวหนังซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 1.1 เป็นวัสดุที่ต้องทิ้งไป ในประเทศไทยได้ทำการกำจัดกากของเสียโดยการนำไปทิ้งร่วมกับขยะอื่น ผังกลบ หรือการเผาไหม้ ทำให้เกิดมลพิษส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 1.1 เศษหนังที่มีขนาดเล็กและฝุ่นผงจากการขัดผิว

การนำกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Reutilization) โดยผลิตเป็นวัสดุที่สามารถใช้ประโยชน์ได้เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งช่วยลดปริมาณของเสียและเป็นแนวคิดของการศึกษานี้ โดยการนำเอาเศษผงหนักจากการตัดเจียรมาใช้เป็นสารตัวเติม (Fillers) ในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มเนื้อ-ลดต้นทุน ในงานวิจัยนี้เสนอที่จะใช้ผลหนักเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ชนิดยางแท่งเกรด STR-5L เนื่องจากประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก มีการส่งเสริมให้แปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีมูลค่าสูงกว่า ในงานวิจัยนี้เสนอที่จะศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการใช้งานผงหนักเป็นสารตัวเติม ได้แก่ผลของ PEG และการใช้สารคู่ควบไซเลน (Si-69) ผลของขนาดอนุภาค (Particle size) และผลของปริมาณการเติม (filler loading)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์เศษผงหนักเป็นสารตัวเติม (Filler) ในยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางที่มีผงหนักเป็นสารตัวเติม (Filler) โดยทำการเติม PEG (Polyethylene glycol) และสารคู่ควบไซเลน (Si-69 Coupling agents) ขนาดอนุภาคผงหนัก และปริมาณที่แตกต่างกันศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติและการใช้งานวัสดุ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เศษผงหนักเป็นสารตัวเติม

1.3.2 ร่อนเพื่อแยกขนาด

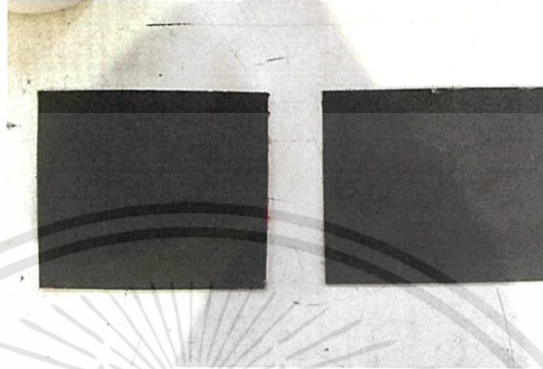
1.3.3 เตรียมตัวอย่างคอมปาวด์โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ได้แก่ เวลาการเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) เวลาก่อนการเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time, t_{s2}) ดัชนีอัตราเร็วในการคงรูป (Cure rate index, CRI) และค่าแรงบิด (Torque) สูงสุด (M_{HR})

1.3.4 ทำการขึ้นรูปตัวอย่างเป็นแผ่นด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูป (Compression molding) แล้วทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่

- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)
- เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)
- โมดูลัสของยางที่ 100 % (Rubber modulus, M100)
- ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)
- ความแข็งกด (Hardness)

1.3.5 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่

- ผลของการใช้ PEG และสารคู่ควบซิลเลน (Si-69)
- ผลของปริมาณการเติม (0-120 phr)
- ผลของขนาดอนุภาค (12-35 mesh, น้อยกว่า 35 mesh)



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างแผ่นยางผสมเศษหนังที่ได้จากเทคนิคการอัดขึ้นรูป (Compression molding)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถใช้เศษหนังเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่มีสมบัติที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้
- 1.4.2 ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการกำจัดเศษหนัง
- 1.4.3 สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับเศษหนังที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม
- 1.4.4 ทราบปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการใช้ประโยชน์เศษหนังในการเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ และสามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับวัสดุอื่นได้

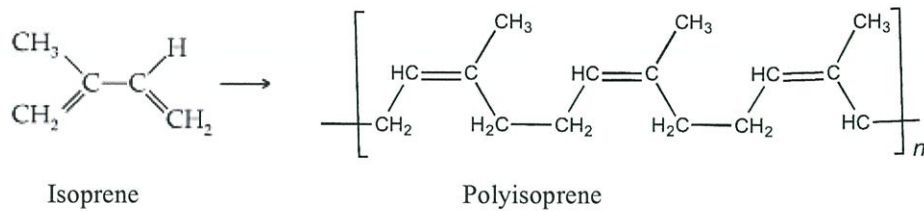
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เป็นยางที่ได้มาจากต้นไม้ธรรมชาติ เช่นต้นยางฮีเวีย (*Hevea Brasiliensis*) ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสด (NR Latex) ที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) ประมาณ 30-40 % แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 % เรียกว่า น้ำยางข้น (Concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมถุงมือยางและถุงยางอนามัย เป็นต้น แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นกรี๊ดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (Two roll mil) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 °C เป็นเวลา 3 วัน ก็จะได้ยางแผ่นรมควัน นอกจากยางแผ่นรมควันแล้ว อุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางที่มีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควัน ผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่นขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR5L ซึ่งมีสีจางมาก จำเป็นต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีถึงเกือบสูงและมีสีเข้ม ก็อาจใช้ยางแผ่นหรือขี้ยางเป็นวัตถุดิบ เป็นต้น ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยากต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมีชื่อทางเคมีคือ พอลิไอโซพรีน (cis-1,4 polyisoprene) เกิดจากมอนอเมอร์ไอโซพรีน (2-เมทิล -1,3-บิวตะ ไดอิน) เชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ด้วยพันธะ โคเวเลนต์ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ (NR) [2]

ยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืดจึงสามารถเกิดผลึกได้ การเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance) สูง

ลักษณะเด่นอีกอย่างของยางธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับมันหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติที่เกี่ยวกับการเหนียวติด (Tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามยางดิบบริสุทธิ์จะมีขีดจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าคือยางจะอ่อนแ่้มและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ฟอสเฟอรัส และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดันกระบวนการนี้เรียกว่า วัลคาไนเซชัน ยางที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปนี้เราเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะมีเสถียรภาพ ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มากทำให้ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา

กับออกซิเจนและโอโซน โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารป้องกันการเสื่อมสภาพ เพื่อยืดอายุการใช้งาน

2.2 สารเติมแต่ง (Additives)

สารเติมแต่ง (Additives) คือสารเคมีต่างๆที่เติมลงไปเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการยางที่ผสมสารเคมีแล้วไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เว้นแต่สารเคมีที่ใช้ทำปฏิกิริยากับยางก่อน โดยการให้ความร้อนยางที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางดิบหรือยางไม่คงรูป (Green compound หรือ Uncured compound) ส่วนยางที่ทำปฏิกิริยาเคมีแล้วเรียกว่า ยางคงรูปหรือยางเชื่อมโยง (Vulcanized rubber หรือ Cured rubber)

2.2.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent)

สารเชื่อมโยงมีความสามารถในการทำให้ยางคงรูป โดยนิยมใช้กำมะถันและสารประกอบเปอร์ออกไซด์เป็นสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติโดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้นโดยการทำให้ยางสุกหรือวัลคาไนเซชัน

วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) หรือการเชื่อมโยง (Crosslinking) เป็นสิ่งที่จำเป็นของการผลิตยางเนื่องจากผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปต่างๆของยางจะไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ถ้ายางไม่ผ่านการทำให้ยางสุก หรือวัลคาไนเซชันเพราะยางไม่แข็งตัว ไม่คงรูป ไหลได้เกิดการเสียสภาพและเหนียวติด ไม่สามารถรับแรงหรือเปลี่ยนรูปได้ง่าย

สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) นิยมใช้การเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activators) ร่วมด้วยในการผสมเข้ากับยาง แล้วให้อุณหภูมิสูงภายหลังการขึ้นรูปให้เป็นรูปร่างผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ การเชื่อมโยงยางทำให้มีสมบัติเปลี่ยนไปคือ

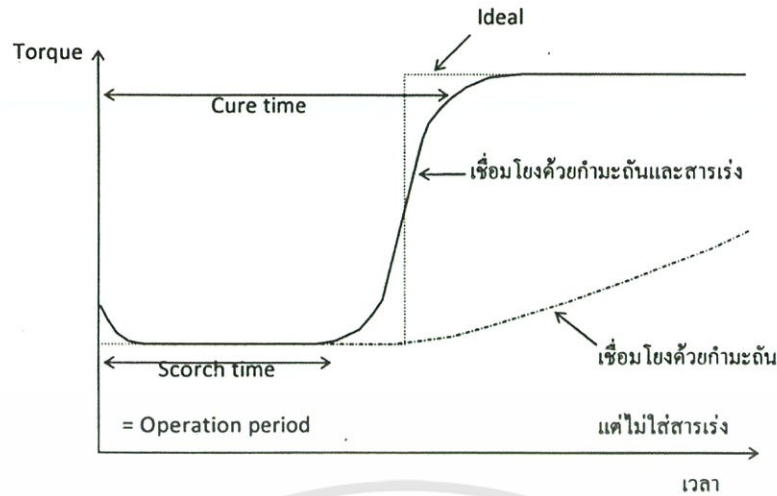
- ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น
- ความยืดหยุ่นดีขึ้น
- เหนียวติดน้อยลง
- มอดูลัสเพิ่มขึ้น
- ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ลดลง
- มีเซต (Set) หรือการเปลี่ยนแปลงขนาดถาวรเมื่อได้รับแรงลดลง หรือมีเสถียรภาพของรูปร่างเพิ่มขึ้น

-เปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซต ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ทนต่ออุณหภูมิ แสง และการใช้งานนานขึ้น

การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization) เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากกำมะถัน (Sulfur, S) มีราคาถูกละลายได้ดีในยางที่สำคัญที่สุด คือยางส่วนมากที่นิยมใช้เป็นอย่างดีที่ไม่อิมตัวมีพันธะคู่จำนวนมาก (High-diene) เช่น พวกรubberธรรมชาติ (NR) และยางบิวตะไดอีน (BR) ฯลฯ จึงว่องไวต่อการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้น (Activators) ได้แก่ กรดสเตียริกและซิงค์ออกไซด์ (Stearic acid/ZnO) กำมะถันสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงได้ดีกับยางที่ไม่อิมตัวมีพันธะและมีอะตอมของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งอะลิลิก (Allylic hydrogen) หรือตำแหน่งคาร์บอนที่ถัดจากพันธะคู่ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาที่มี Allylic hydrogen หรือตำแหน่งคาร์บอนที่ถัดจากพันธะคู่เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาที่มี Allylic hydrogen มากก็จะเชื่อมโยงด้วยกำมะถันได้ว่องไวกว่ายางที่มี Allylic hydrogen น้อย

2.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Crosslinking rate) เร็วขึ้น ทำให้เวลาเชื่อมโยง (Cure time) เร็วขึ้น การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้ปริมาณกำมะถันน้อยลง การใช้สารเชื่อมโยงเพียงอย่างเดียวสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์ เนื่องจากอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงต่ำ การใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงจะช่วยเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาและลดเวลาเชื่อมโยงอย่างมาก (ลดเวลาจากหลายชั่วโมงเหลือเพียงไม่กี่นาที) และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมโยง



รูปที่ 2.2 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยงแบบไม่ใช้สารเร่ง ปฏิกริยาเชื่อมโยง ใช้สารเร่งปฏิกริยาเชื่อมโยง และการเชื่อมโยงในอุดมคติ (Ideal crosslink) ที่ต้องการ [3]

จากรูปที่ 2.2 แสดงกราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Torque) กับเวลา ได้จากเครื่องวัดการเชื่อมโยง เช่น เครื่อง ODR (Oscillating disc rheometer) สามารถใช้ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปและเกิดการเชื่อมโยงสมบูรณ์ การใส่ยางผสมสูตร ประกอบจานหมุนแล้วให้อุณหภูมิสูงเท่ากับอุณหภูมิเชื่อมโยงเช่น 150 °C และศึกษาแรงบิดของ จานหมุนที่ใช้ทำให้เกิดการหมุนไปมาที่มุมคงที่ (1, 3 และ 5 องศา) เทียบกับเวลา จุดที่แรงบิดเริ่ม เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับจุดที่เริ่มเกิดปฏิกริยาเชื่อมโยงอย่างเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่ตรงเป็น โครงสร้างร่างแหสามมิติทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นจึงใช้แรงบิดจานหมุนเพิ่มขึ้นจะทำให้ สามารถทราบเวลาเริ่มเกิดการเชื่อมโยง หรือเวลาสกอร์ช (Scorch time) เวลาที่มีความสำคัญ เนื่องจากยางจะสามารถเคลื่อนที่ได้หรือไหลได้ก่อนถึงจุดนี้เมื่อ Scorch time ผ่านไปยางจะเริ่ม เชื่อมโยงไม่สามารถไหลได้สะดวก ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ต้องการการไหลของ ยางต้องทำให้เสร็จสิ้นก่อน Scorch time เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ฯลฯ เมื่อแรงบิด ขึ้นสูงสุดและคงที่ ทำให้ทราบเวลาที่เกิดปฏิกริยาเชื่อมโยงสมบูรณ์หรือเวลาการเชื่อมโยง (Cure time)

ชนิดของสารเร่งปฏิกริยาเชื่อมโยงสารเร่งปฏิกริยาเชื่อมโยงมีหลายชนิดแต่ละชนิดมีสมบัติ ที่แตกต่างกัน เช่น เวลาเริ่มเกิดการเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time) อัตราเร็วการเชื่อมโยง

(Cure rate) เวลาเชื่อมโยงสมบูร์น (Cure time) ความสามารถในการละลายในยาง (Solubility) ความเป็นพิษ (Toxicity) ฯลฯ ดังนั้นการเลือกชนิดสารเร่งที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญมากต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ยางในการใช้สารเร่งอาจใช้มากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าจะเป็นสารเร่งหลักหรือ “สารเร่งปฐมภูมิ” (Primary accelerators) ส่วนสารเร่งที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกเป็น “สารเร่งทุติยภูมิ” (Secondary accelerators) หรือ คิกเกอร์ (Kickers) สารเร่งทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาเสริมกันที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์ซินเนยจิสติก” (Synergistic effects) ทำให้ได้อัตราส่วนที่เชื่อมโยงมากกว่าสารเร่งแต่ละชนิดรวมกัน

ไทเอโซล (Thiazoles)

ทั้งไทเอโซลและซัลเฟนาไมด์ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของไทเอโซลเป็นสารเร่งที่นิยมใช้มากที่สุด (มากกว่า 70% ของสารเร่งในอุตสาหกรรมยาง) เนื่องจากให้ Scorch time และ Cure time ที่หลากหลายไทเอโซลที่นิยมได้แก่

- MBT (2-Mercaptobenzothiazole)
- MTBS (Mercaptobenzothiazole disulfide)

ทั้ง MBT และ MBTS เกิดปัญหา Scorch ก่อนเวลาขึ้นรูปสมบูร์นจึงนิยมใช้ร่วมกับสารเร่งชนิดอื่นหรือเป็นสารเร่งทุติยภูมิ (Secondary accelerators)

ไทแรมยู โมโนและไดซัลไฟด์ (Thiuram mono-and disulfides)

สารเร่งชนิดนี้จัดเป็นอัลตราแอคเซลิเรเตอร์ (Ultra - accelerators) เช่นเดียวกับไทโอคาร์บาเมตชนิดที่นิยมใช้ได้แก่

- TMTD (Tetramethylthiuram disulfide)
- TDTE (Tetraethylthiuram disulfide)
- TMTM (Tetramethylthiuram monosulfide)

สารเร่ง TMTD ว่องไวต่อปฏิกิริยาที่สุตรองลงมาคือ TETD และ TMTM ตามลำดับ สารเร่งชนิดนี้มีประโยชน์มากเวลาทำการเชื่อมโยงโดยไม่ใช้กำมะถันหรือใช้ปริมาณเล็กน้อย (Low or no sulfur curing) เนื่องจากสารเร่งไทูแรมซัลไฟด์จัดเป็นสารเร่งชนิดที่ให้กำมะถัน (Sulfur donor

accelerators) นั่นคือสามารถเกิดปฏิกิริยาแล้วให้อะตอมของกำมะถันเกิดพันธะเชื่อม โยงกำมะถัน อะตอมเดียวหรือ โมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic linkage) ได้ยางเชื่อมโยงที่มีสมบัติที่ดีโดยปกติแล้ว นิยมใช้สารเร่งไทยเรมซัลไฟด์เป็นสารเร่งทุติยภูมิ (Secondary accelerators) ใช้ร่วมกับสารเร่งไปเอโซลหรือซัลเฟนาไมด์ สารเร่งชนิดนี้ไม่เลอะสี (Stain) เช่นเดียวกับสารเร่งไอโทโอคาร์บอนเนต จึงสามารถใช้กับยางสีอ่อนหรือสีขาวโดยไม่เปรอะเปื้อน

2.2.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators)

เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) อีกทีหนึ่ง ดังนั้นอาจเรียกรวมกันว่าสารกระตุ้นสารเร่ง (Accelerator activators) สารกระตุ้นที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ร่วมกับกรดสเตียริก (ZnO/Stearic acid) เนื่องจากมีราคาแพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงานสามารถใช้ได้กับยางทั่วไป ซิงค์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็นซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) สามารถละลายได้ในยางและช่วยเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเนื่องจากเป็นซิงค์ไอออน (Zinc ions) ที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยางลักษณะที่สำคัญของตัวกระตุ้นคือมีความเป็นด่าง (Alkaline) นอกจากการใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกระตุ้นแล้วอาจใช้ซิงค์ออกไซด์ของลิเทียม (Li_2O) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และสารจำพวกเอมีน (Amine) นอกจากกรดสเตียริกจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในการเชื่อมโยงแล้วยังมีหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricants) ในการผสมยางทำให้ความหนืดของยางลดลง

2.2.4 สารหล่อลื่น (Lubricants)

สารหล่อลื่นช่วยหล่อลื่นหรือลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ หรือหล่อลื่นระหว่างเครื่องผสมกับวัสดุช่วยในกระบวนการผลิตทำให้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้ง่ายขึ้น

2.2.5 สารตัวเติม (Fillers) [4] [5]

สารตัวเติมคือ สารเติมแต่งซึ่งเป็นของแข็งที่ใช้ใส่ในพอลิเมอร์อาจเป็นพวกผงหรือเส้นใย เพื่อให้สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ดีขึ้นเหมาะสำหรับการใช้งานซึ่งเป็นที่ตั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์โดยการเติมสารตัวเติมลงในพอลิเมอร์มีจุดประสงค์หลัก ดังนี้

1. เพื่อลดต้นทุนการผลิต เพราะสารตัวเติมเป็นสารเพิ่มเนื้อชนิดหนึ่งที่มีราคาถูก
2. ปรับปรุงสมบัติทางกายภาพเช่น เพิ่มค่ามอดูลัส ความแข็ง ความแข็งแรงดึง การยึดตัว ความต้านทานต่อแรงกระแทก เป็นต้น

ประเภทของสารตัวเติม

สามารถแบ่งตามประเภทของสารได้ดังนี้

1. สารตัวเติมประเภทสารอินทรีย์ (Organic fillers) เป็นสารตัวเติมที่ใช้เพิ่มเนื้อและทำให้พอลิเมอร์สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น ผงไม้ที่ได้จากการป่นไม้ เส้นใยจำพวกเซลลูโลส ล่าสึและปอ เป็นต้น

2. สารตัวเติมประเภทสารอนินทรีย์ (Inorganic filler) สารตัวเติมประเภทนี้ส่วนมากใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ทนต่อการขีดข่วนและสารเคมี และสามารถเพิ่มสมบัติเฉพาะบางประการสารตัวเติมจำพวกนี้ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3), ไมก้า (Mica), ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Siliconcarbide) เป็นต้น

รูปแบบการทำงานของสารตัวเติม

เมื่อใส่สารตัวเติมลงไปผสมกับพอลิเมอร์สารตัวเติมมีรูปแบบการทำงานหลายรูปแบบ คือ

1. สารตัวเติมแบบเสริมแรง (Reinforcing fillers) สามารถเกิดพันธะเคมีกับวัสดุที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลหรือสมบัติอื่นๆและยังช่วยเพิ่มความแข็งแรง (โดยเฉพาะอย่างยิ่งความทนแรงดึง) เปรียบได้ว่าสารตัวเติมทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง (Reinforcing fillers) ในยาง

2. เอกซ์เทนเดอร์ (Extender) หรือ (Inert fillers) สารตัวเติมทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มเนื้ออยู่ในรูปของอนุภาคติดกับพื้นผิวของพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม การใส่สารตัวเติมประเภทนี้ก็ช่วยในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ด้วย ซึ่งทิศทางการจัดเรียงตัวและการกระจายอนุภาคจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลต่างๆ

สมบัติของสารตัวเติม

สารตัวเติมที่ดีควรมีสมบัติดังนี้

- สะอาดปราศจากสารเจือปนและความชื้น และไม่เป็นพิษ
- เลื้อย ไม่ละลาย และมีเสถียรภาพทางความร้อน
- ดูดซึมความชื้นและสารเติมแต่งชนิดอื่นๆต่ำ
- ทำให้กระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ง่าย
- ทั้งโครงสร้างและสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป
- มีการกระจายของขนาดของอนุภาคเฉลี่ยที่สม่ำเสมอ
- ไม่ขัดสีเครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป
- ไม่ทำสีและผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เสียไป

โดยปกติสารตัวเติมแต่ละชนิดจะมีด้วยกันหลายเกรดขึ้นกับสมบัติดังต่อไปนี้

- ขนาดของอนุภาค โดยเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาค (Average particle size and size distribution)
- รูปร่างของอนุภาคและความพรุน (Particle shape and porosity)
- ธรรมชาติทางเคมีที่พื้นผิว (Chemical nature of the surface)
- สารเจือปน (Impurities)

ขนาดของอนุภาค โดยเฉลี่ยและการกระจายขนาดของอนุภาค

สารตัวเติมแต่ละชนิด แต่ละเกรดจะมีขนาดอนุภาคที่ไม่เท่ากันขึ้นกับแหล่งที่ได้มา ซึ่งสารตัวเติมที่จะนำมาใช้งานได้ดีควรมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 40 ไมโครเมตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ต้องการปรับปรุงสมบัติเชิงกล สารตัวเติมจะต้องมีอนุภาคที่ละเอียดมาก คือ มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร โดยทั่วไปแล้วสารตัวเติมที่มีอนุภาคละเอียด ก็ยิ่งทำให้พลาสติกมีความแข็งแรงสูงขึ้นไปอย่างไรก็ตามการมีอนุภาคที่ละเอียดจะทำให้ความหนืดของระบบสูงขึ้นและการขึ้นรูปทำได้ยากขึ้น ส่วนสารตัวเติมที่มีอนุภาคหยาบมักทำให้ความแข็งแรงของพลาสติกลดลงกว่ากรณีที่ไม่ได้ใส่สารตัวเติม นอกจากนี้การกระจายของอนุภาคที่แคบจะทำให้พลาสติกมีสมบัติดีกว่าสารตัวเติมที่มีการกระจายขนาดอนุภาคกว้างซึ่งพบว่า สารตัวเติมที่ได้จากธรรมชาติแม้มีราคาถูกกว่าแต่จะมีการกระจายขนาดของอนุภาคกว้างกว่าสารตัวเติมที่ได้จากการสังเคราะห์

รูปร่างของอนุภาคและความพรุน

อนุภาคของสารตัวเติมมีรูปร่างต่าง ๆ กัน ได้แก่ กลม (Sphere or spherical) สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (Cube or cubic) บล็อก (Block or tabular) แผ่น หรือเกล็ด (Flake or platy) และเป็นแท่งหรือเส้นใย (Needle or acicular or fiber or fibrous)

รูปร่างของอนุภาคของสารตัวเติมมีผลอย่างมากต่อสมบัติต่างๆของพลาสติก ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติที่ผิว (เช่นความเงา) และสภาพให้ซึมได้ (Permeability)

โดยทั่วไปแล้วสารตัวเติมที่มีค่า Aspect ratio (อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างหรือความหนา) สูง เช่น สารตัวเติมที่มีรูปร่างของอนุภาคเป็นเส้นใยหรือเป็นแผ่น จะช่วยเสริมความแข็งแรงในพลาสติก และทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic) ในทางตรงกันข้าม สารตัวเติมที่มีรูปร่างกลม (Spherical) จะทำให้ผลิตภัณฑ์ของพลาสติกมีสมบัติไอโซโทรปิก (Isotropic) สำหรับสารตัวเติมที่อนุภาคมีรูพรุนอาจดูดซับสารเติมแต่งอื่นๆที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น พลาสติกไซเซออร์ สารหล่อลื่น เป็นต้น ทำให้สารเติมแต่งที่ถูกดูดไว้ไม่มีประสิทธิภาพและเป็นปัญหาสำคัญในการปรับสูตรคอมพาวด์

ธรรมชาติทางเคมีที่พื้นผิว

ธรรมชาติทางเคมีที่พื้นผิวของสารตัวเติม (Mineral fillers) มีผลต่อการนำไปใช้งานมาก สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธรรมชาติ (Mineral fillers) ส่วนใหญ่มันมีหมู่ที่มีขั้ว (เช่นหมู่ไฮดรอกซิล) บนพื้นผิวทำให้เปียกน้ำได้ง่ายแต่ไม่เปียกหรือเกาะกับพอลิเมอร์ ดังนั้น เพื่อให้สารตัวเติมเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี จึงมักปรับแต่ง (Treat) พื้นผิวของสารตัวเติม

นอกจากการมีหมู่ที่มีขั้วที่พื้นผิวจะมีผลต่อการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ริกซ์แล้วหมู่ที่มีขั้วเหล่านี้ อาจเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารเติมแต่งอื่นๆ เช่น สารกันออกซิแดนซ์ (Antioxidant) ทำให้สารเติมแต่งเหล่านี้ไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งการปรับแต่งพื้นผิวสารตัวเติมจะช่วยลดปัญหานี้

สารเจือปน

สารเจือปนในสารตัวเติมที่ได้จากธรรมชาติ (Mineral fillers) ทำให้เกิดผลเสียดต่อบรรยากาศของพอลิเมอร์อย่างยิ่ง ตัวอย่างเช่น กรวดทราย (Grit) ซึ่งมีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดจุดอ่อนในเนื้อพอลิเมอร์ที่นิ่ม (Soft polymer) ดังนั้นเมื่อได้รับความเค้นพอลิเมอร์จะแตกหักได้ง่าย หรือในกรณีที่มีทองแดง แมงกานีส และเหล็กเจือปนอยู่แม้จะมีปริมาณน้อยมากก็จะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สำหรับสารตะกั่วอาจทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ (Sulfur, S) ซึ่งมีอยู่ในสารเติมแต่งอื่นๆ หรือไอของซัลเฟอร์ในบรรยากาศทำให้สีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป

2.2.6 สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant)

เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเนื่องจากออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) สารแอนติออกซิแดนท์สามารถแบ่งได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆคือ สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดตกสี (Staining antioxidant)

2.2.6.1 สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดตกสีเป็นสารประกอบเอมีน หรืออนุพันธ์ หรืออนุพันธ์เอมีน เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูงแต่เมื่อใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางมีสีคล้ำหรือตกสีนัยกับยางที่มีสีดำ สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

- Ketone - amine condensate
- Aldehyde - amine condensate
- Secondary aromatic amine

2.2.6.2 สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดไม่ตกสี (Non-Staining antioxidant) สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดไม่ตกสีเป็นแอนติออกซิแดนท์ที่เป็นสารประกอบฟีนอล (Phenol) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล ใช้กับยางทั่วไปที่มีสีดำไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสีตก และไม่เปลี่ยนสียาง สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดนี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ดังนี้

- Substituted phenol สมบัติความเป็นแอนติออกซิแดนท์ไม่ดี
- Phenolic sulfide มีความทนทานต่อความร้อนปานกลาง

- Phenol-aldehyde condensate เป็นสารที่มีสมบัติเท่ากับชนิดเอมีน คือป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน ทนทานต่อความร้อน ทนต่อการหักงอ ไม่เปลี่ยนสียาง
- Hydroquinone derivatives เป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ที่อ่อนสำหรับยางที่คงรูปแล้วเหมาะสำหรับยางที่ไม่คงรูปขาว โดยการป้องกันไม่ให้ผิวยางที่คงรูปแข็งจนติดกันไม่ได้เมื่อนำไปประกอบด้วยกัน

2.3 หนังสั้ว

หนังสั้วเป็นโปรตีนแบบเส้นใย หรือแท่ง (Fibrous หรือ Rod protein) ซึ่งเกิดจากสายพอลิเปปไทด์ยาวหลายสายมารวมกันพันเป็นเกลียว หรือเรียงเป็นแผ่นซ้อนๆกัน โดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสาย เช่น ไคซัลไฟด์ (-S-S-) และพันธะไฮโดรเจนจำนวนมาก จะเห็นว่าโปรตีนพวกนี้ส่วนใหญ่จะทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้ความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่น [6]

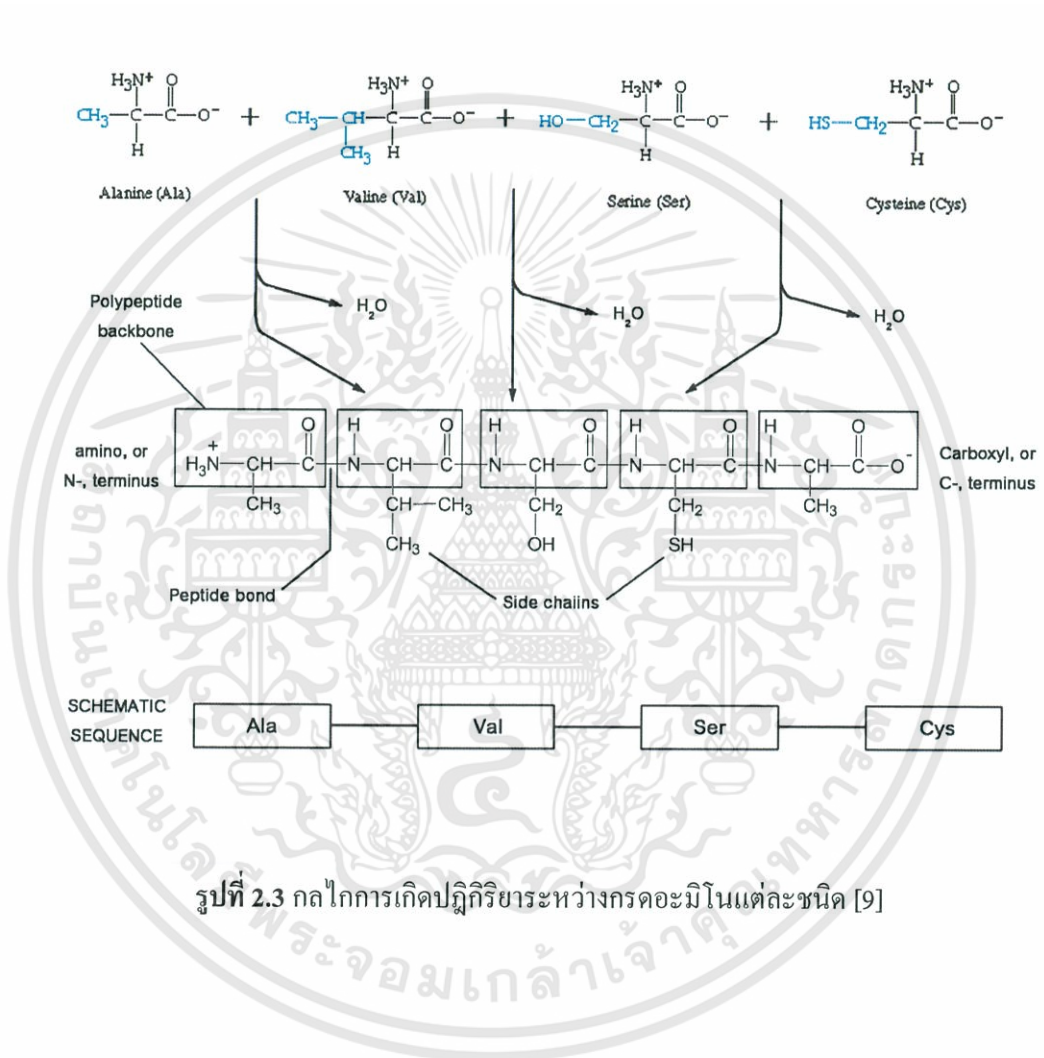
การนำหนังสั้วมาใช้ประโยชน์อย่างหนึ่งที่สำคัญ คือการนำหนังมาฟอกเพื่อนำไปใช้ประโยชน์โดยนำไปทำกระเป๋า เสื้อผ้า เครื่องเรือน การผลิตหนังฟอกแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ คือ การเตรียมหนังก่อนฟอก การฟอก การตกแต่ง [7]

หนังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากเศษหนังในขั้นตอนการตัดเจียร ซึ่งจัดเป็นกากของเสียที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เศษหนังเจียรเหล่านี้ไม่ควรนำไปฝังหรือใช้เป็นปุ๋ยโดยตรงเพราะหนังที่ฟอกแล้วย่อยสลายได้ช้า และมีโครเมียมสูงถึงร้อยละ 1-8 ของน้ำหนักแห้งอาจแพร่กระจายลงสู่ผิวดินได้

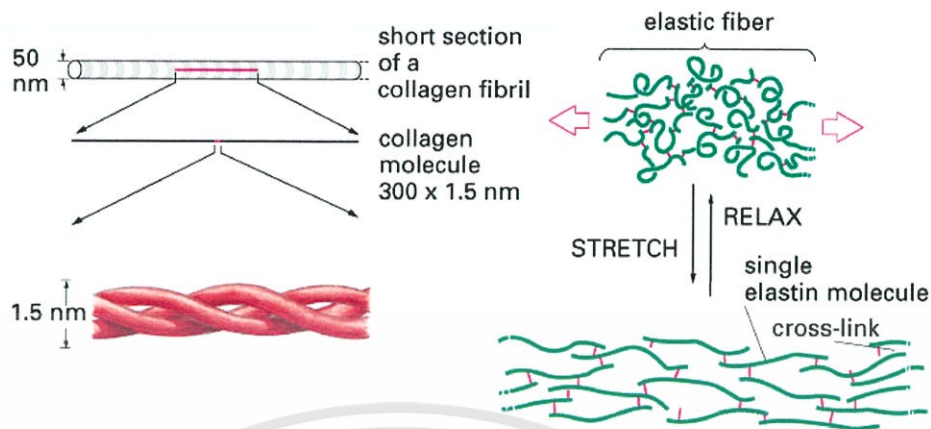
2.4 หนังฟอก (Leather) [8]

หนังฟอกเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องหนังต่างๆ เช่น กระเป๋า รองเท้า โซฟา เบาะรถยนต์ เป็นต้น ประมาณร้อยละ 90 ของหนังดิบที่นำมาฟอกจะเป็นหนังโคและกระบือที่เหลือเป็นหนัง งู จระเข้ แกะ ปลากระเบน หมู และอื่นๆ หนังสั้วมีองค์ประกอบหลัก คือโปรตีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอไมด์ (Polyamide) ประกอบด้วยกรดอะมิโนประมาณ 20 ชนิด ยึดเกาะกันด้วย

พันธะเปปไทด์ (Peptide bond) ยกตัวอย่างเช่น การเกิดพันธะเปปไทด์จากกรดอะมิโนอะลานีน (Alanine) วาลีน (Valine) เซรีน (Serine) และซิสเทอีน (Cysteine) ดังรูปที่ 2.3 สำหรับโปรตีนที่มีลักษณะเป็นเส้นมีสมบัติที่ไม่ละลายน้ำพบมากในหนังสัตว์ คือ คอลลาเจน (Collagen) ซึ่งเกิดจากสายโซ่โปรตีนจำนวน 3 เส้นอยู่รวมกันในลักษณะเกลียว ทำให้มีสมบัติคล้ายยาง คือ โมเลกุลจะยืดออกเมื่อเส้นใยถูกดึงและจะหดตัวกลับเมื่อไม่มีแรงกระทำ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดอะมิโนแต่ละชนิด [9]



รูปที่ 2.4 ลักษณะเส้นใยคอลลาเจน [9]

หนังสัตว์ที่ผ่านกระบวนการฟอกและตกแต่งแล้วจะเป็นแผ่นหนังที่มีความเสถียร หรือความคงทนซึ่งกระบวนการฟอกนี้จะทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างไอออนของโครเมียม (Cr^{2+}) กับหมู่คาร์บอกซิล (COO) ของคอลลาเจนในสายโซ่โปรตีน โดยจะมีผลต่อคุณภาพของหนังสัตว์ฟอก เช่น สี ความต้านทานต่อสารเคมี น้ำ และแบคทีเรีย

สำหรับกระบวนการฟอกหนัง มีขั้นตอนสำคัญ คือ การเตรียมหนังก่อนฟอก การฟอก และการตกแต่ง ดังรูปที่ 2.5

2.4.1 การเตรียมหนังก่อนฟอก (Beamhouse process)

เริ่มจากการเตรียมหนังดิบ (Raw hides and skin) ให้พร้อมก่อนที่จะทำการฟอก โดยเริ่มจากการล้าง (Washing) การคัดแยกและตัดแต่งหนังเค็ม (Sorting and Trimming) หรือเป็นการกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการ เช่น กีบเท้า ขน เศษหนัง จากขั้นตอนนี้จะได้เศษหนังซึ่งสามารถนำไปผลิตเป็นหนังพื้นรองเท้า จากนั้นจะนำหนังที่ได้มาล้างและแช่น้ำให้คืนตัว (Washing and Soaking) และทำการแช่น้ำปูน (Liming) กำจัดขนออกด้วยซัลไฟด์ ถากหนัง (Fleshing) ผ่าหนัง (Splitting) หนังเมื่อผ่าแยกชั้นแล้วจะมี 2 ส่วน คือส่วนบนเรียกว่า หนัง Upper หรือ Grain ส่วนนี้จะนำไปผลิตเป็นหนังฟอก และส่วนล่าง เรียกว่าหนังส่วนล่าง หรือ Splits ส่วนนี้จะนำไปผลิตเป็นสินค้าทะเล่นของสัตว์เลี้ยง (Dogchew) และหนังฟอกคุณภาพรองต่อจากนั้นจะนำหนังมาล้างน้ำปูน (Deliming) และบ่มหนัง (Bating) เพื่อให้หนังนุ่มและหดตัว

2.4.2 การฟอก (Tanning process)

การฟอกหนังเป็นการเปลี่ยนสภาพหนังดิบ (Raw hides and skin) ซึ่งเน่าเปื่อยได้ให้เป็นหนังสำเร็จที่คงตัวกว่า ไม่เน่าเปื่อย มีความทนทานต่อสภาพอากาศและน้ำร้อน การรักษาสภาพหนังดิบไม่ให้เน่าเปื่อยจะต้องใช้สารเคมีบางชนิด เช่น ฝาด โครเมียม หรือสารเคมีอื่นๆ ไปทำปฏิกิริยากับโปรตีน (คอลลาเจน) ในหนัง กรรมวิธีการฟอกหนังที่ใช้กันอยู่มี 2 วิธี คือ

2.4.2.1 การฟอกโครม (Chrome Tanning) การฟอกประเภทนี้เป็นที่นิยมกว่า เนื่องจากเป็นที่ต้องการของตลาดใช้เวลาสั้นสารเคมีราคาถูก หนังที่ฟอกแล้วทนต่อความร้อนและความชื้นได้ดีกว่าการฟอกโครมเป็นการฟอกที่ทำในถังหมุน ซึ่งจะใส่สารเคมีจำพวกโครม (Chrome) ลงไปสารนี้เป็นพวกเกลือของโครเมียม เช่น โครมิก (Chromic) เป็นตัวฟอกซึ่งจะทำให้หนังมีสภาพเป็นเส้นใย (Fiber) เมื่อนำไปตากแห้งแล้วจะแข็งมีสีเขียว โดยทั่วไปแล้วประมาณร้อยละ 70 ของโครเมียมที่เติมลงไปจะทำปฏิกิริยากับหนังที่เหลืออีกร้อยละ 30 จะถูกปล่อยทิ้งไปกับน้ำเสีย การตรึงโครมให้อยู่กับหนังสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ดังนั้นระหว่างการฟอกโครมจึงต้องมีการเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ลงไปทีละน้อยอย่างช้าๆ เพื่อให้ค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ คือ 4.5 หนังที่ผ่านการฟอกโครมแล้วเรียกว่า หนังเขียว (Wet Blue) ขั้นตอนต่อมา คือการล้างล้าง (Neutralization)

2.4.2.2 การฟอกฝาด (Vegetable Tanning) การฟอกประเภทนี้จะนำสารสกัดประเภทแทนนินซึ่งสกัดได้จากเปลือกไม้พวยยูคาลิปตัส คิวบราโค และอื่นๆ มาเป็นตัวฟอกทำได้ในถังไม้บ้นหรือบ่อคอนกรีตที่ต่อแบบอนุกรม (เรียงๆ กันไป) ทั้งนี้ น้ำที่ใช้ฟอกแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกเพราะสารที่ใช้ฟอกนั้นเป็นสารธรรมชาติขั้นตอนต่อมาคือ การล้างหนัง (Rinsing) โดยการใช้กรดออกซาลิกล้างฝาดออกจากหนังเพื่อล้างฝาดส่วนเกินซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพหนังอย่างมาก

จากนั้นหนังที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการฟอกจะถูกนำไปรีดน้ำเพื่อให้แห้ง และมีการตัดเจียนผิวด้วยเครื่องตัดแต่งและคัดเลือก เพื่อเก็บไว้รอจำหน่ายหรือแปรรูปตามความต้องการของตลาดต่อไป

2.4.3 การตกแต่ง (Finishing process)

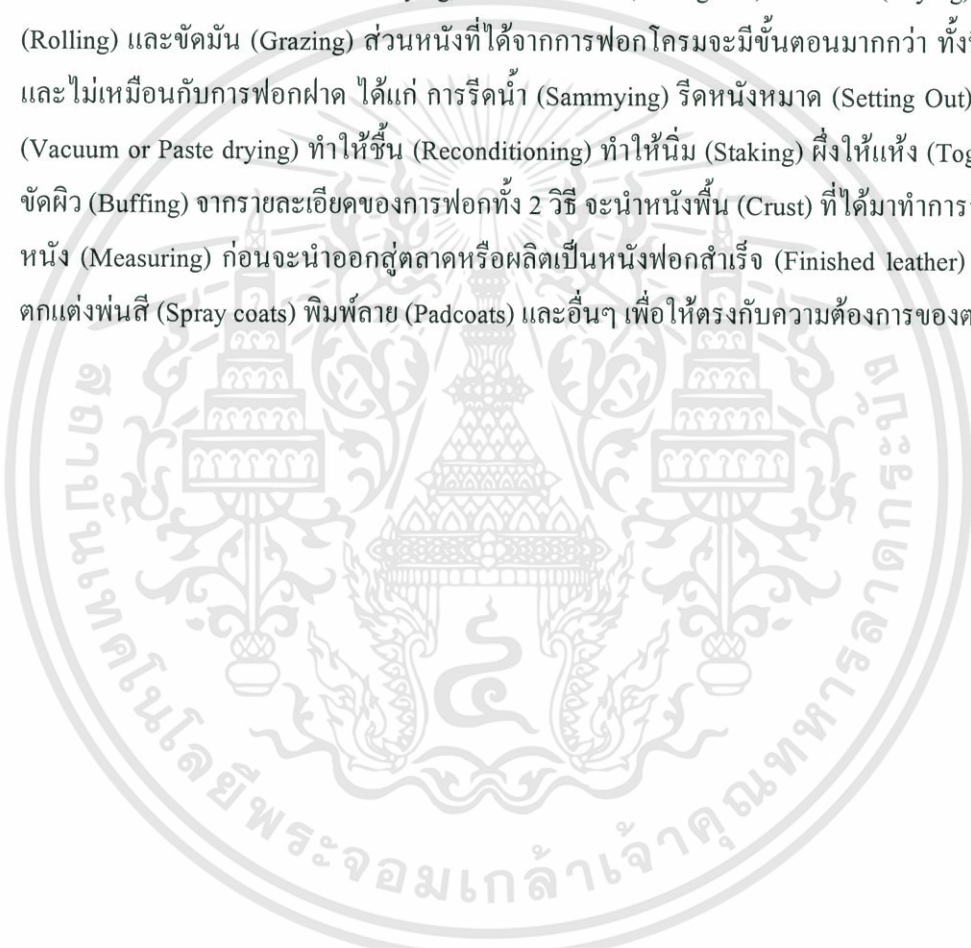
การตกแต่งนี้ แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนหลักๆ คือ การฟอกทับ (Retannage) การย้อมสี (Dyeing) และการใส่น้ำมัน (Fat liquoring)

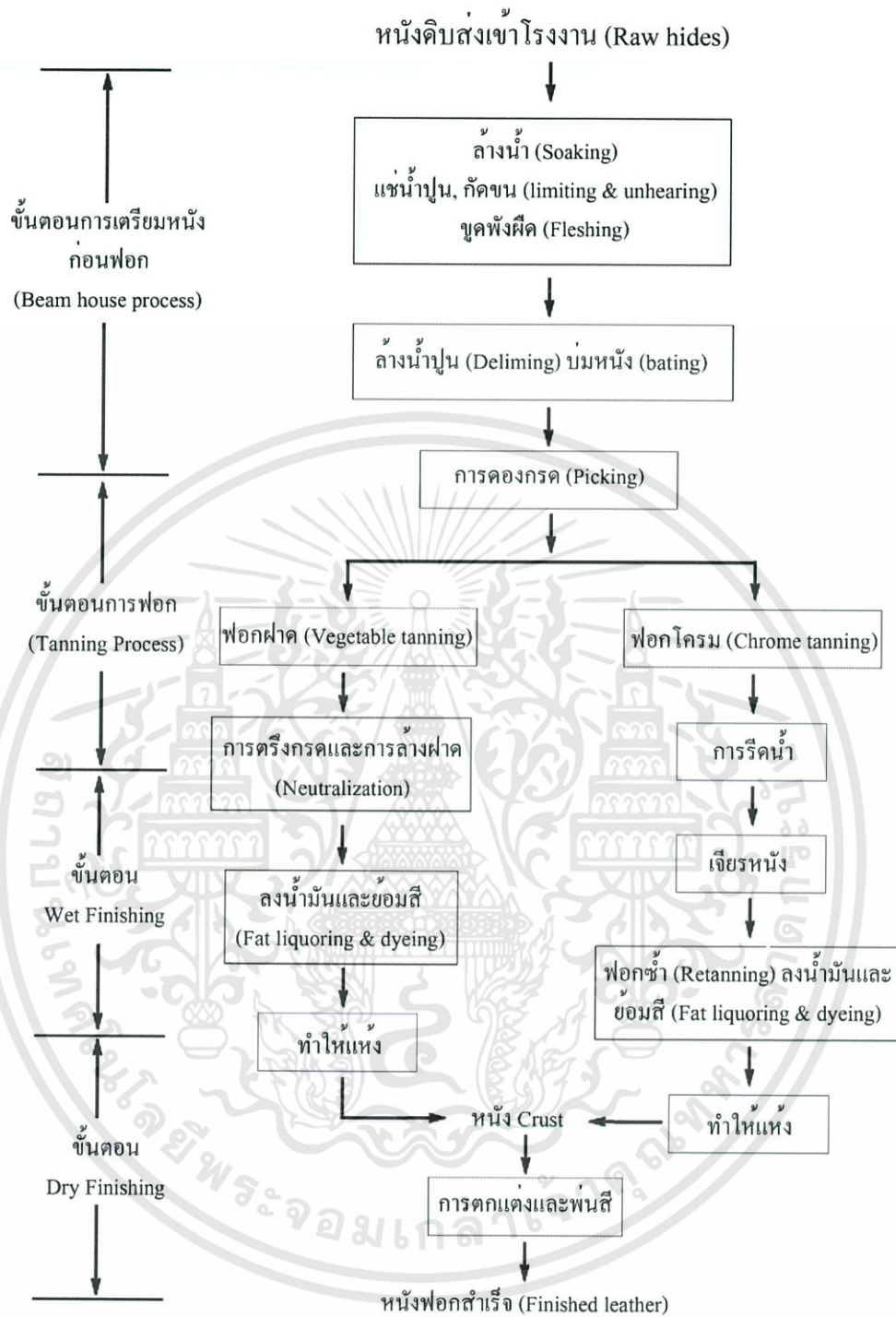
การฟอกทับ (Retannage) เป็นการนำหนังเขียว (Wet blue) ที่ได้จากการฟอกโครม (Chrome tanning) มาฟอกทับเพื่อปรับปรุงคุณภาพหนังให้เหมาะสมกับความต้องการของตลาด สารที่ใช้ในการฟอกทับมีทั้งที่เป็นสารเคมี เช่น โครเมียม สารสกัดจากธรรมชาติ เช่น แทนนิน และสารสังเคราะห์ เช่น ซินแทน หลังจากนั้นจะนำหนังที่ได้จากการฟอกทับนี้ไปทำการย้อมสี (Dyeing)

สำหรับการฟอกฝาด (Vegetable tanning) จะไม่มีการฟอกทับ แต่จะใช้กรดฟอร์มิกปรับสภาพหนังก่อน แล้วจึงนำไปทำการย้อมสี (Dyeing) และตรึงสีให้ติดหนัง โดยมากมักใช้น้ำทำให้น้ำ และน้ำย้อมสีร้อน

การใส่น้ำมัน (Fat liquoring) ให้แก่หนังที่ได้จากการฟอกทั้ง 2 วิธีจะเป็นการทำให้หนังมีความอ่อนนุ่มอยู่ตัว โดยอาจทำพร้อมกับการฟอกทับ หรือการย้อมสี หรืออาจแยกทำต่างหากก็ได้ หนังที่ได้จากเราเรียกว่า หนังพื้น (Crust)

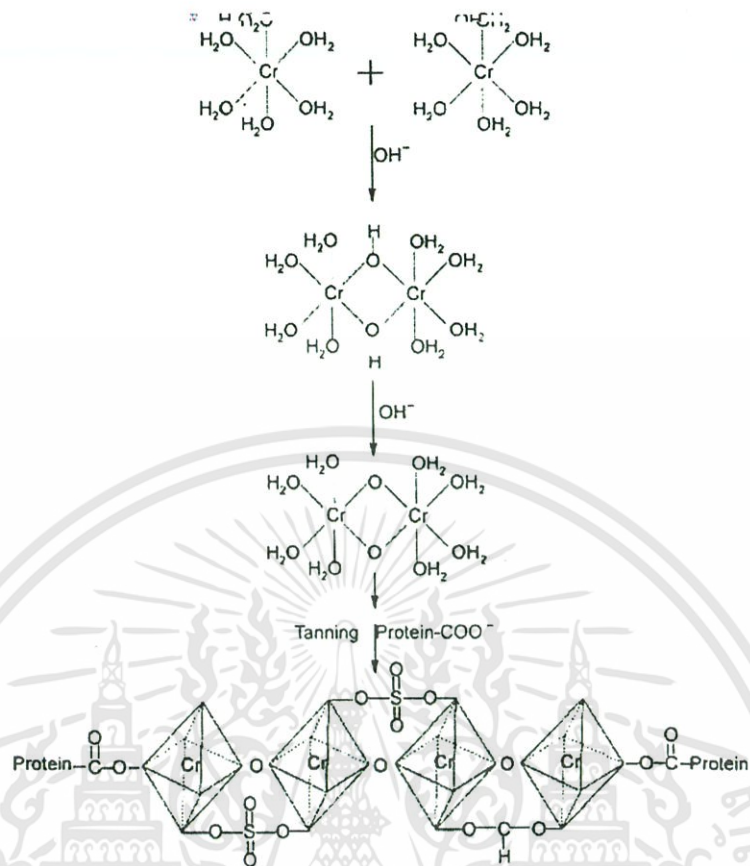
หนังพื้น (Crust) ที่ได้จากการฟอกทั้ง 2 กรรมวิธี เมื่อเสร็จจากขั้นตอนการย้อมสีและใส่น้ำมันแล้วจะต้องนำมาทำให้แห้งโดยวิธีที่แตกต่างกันตามกรรมวิธีการฟอกคือ หนังที่ได้จากการฟอกฝาดนั้นจะทำการรีดน้ำ (Sammying) รีดหนังหมาด (Setting out) ตากแห้ง (Drying) รีดหนัง (Rolling) และขัดมัน (Grazing) ส่วนหนังที่ได้จากการฟอกโครมจะมีขั้นตอนมากกว่า ทั้งที่เหมือนและไม่เหมือนกับการฟอกฝาด ได้แก่ การรีดน้ำ (Sammying) รีดหนังหมาด (Setting Out) ออบแห้ง (Vacuum or Paste drying) ทำให้ชื้น (Reconditioning) ทำให้นิ่ม (Staking) ฝึ่งให้แห้ง (Toggle dry) ขัดผิว (Buffing) จากรายละเอียดของการฟอกทั้ง 2 วิธี จะนำหนังพื้น (Crust) ที่ได้มาทำการวัดขนาดหนัง (Measuring) ก่อนจะนำออกสู่ตลาดหรือผลิตเป็นหนังฟอกสำเร็จ (Finished leather) โดยการตกแต่งพื้นสี (Spray coats) พิมพ์ลาย (Padcoats) และอื่นๆ เพื่อให้ตรงกับความต้องการของตลาด





รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตหนังสัตว์ฟอก [10]

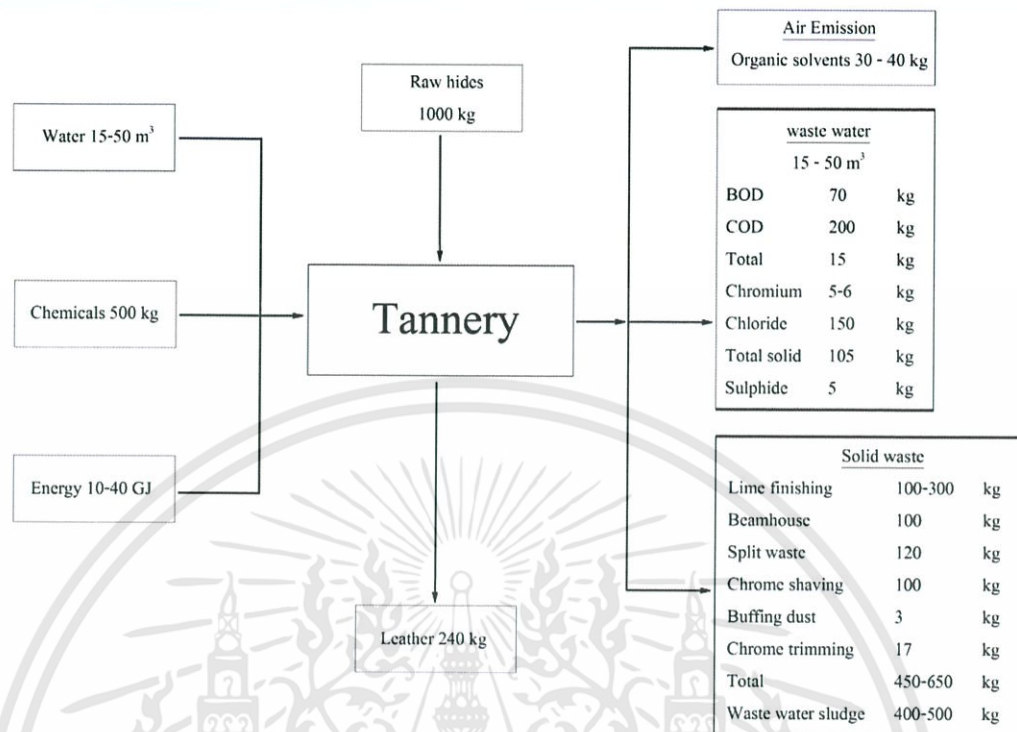
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาระหว่างโครเมียมกับโปรตีนในหนังดิบ [11]

2.5 ของเสียและวิธีการลดของเสียจากกระบวนการฟอกหนัง

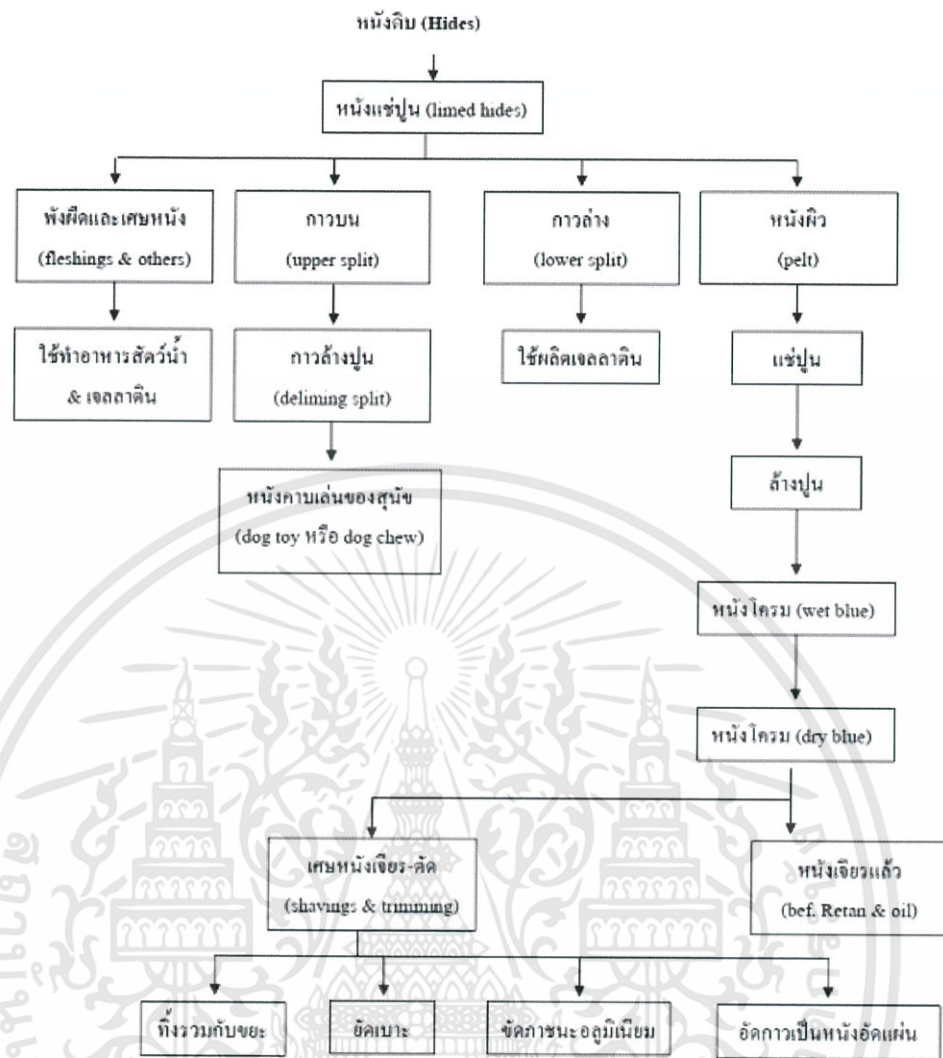
การฟอกหนังเป็นกระบวนการแปรรูปหนังสัตว์ โดยอาศัยน้ำ สารเคมี และกระบวนการทางกล และของเสียที่เกิดขึ้นสามารถสรุปได้ดังตารางดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ของเสียจากการผลิตหนังฟอกสำเร็จ 1,000 kg [12]

2.6 กากของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต [13]

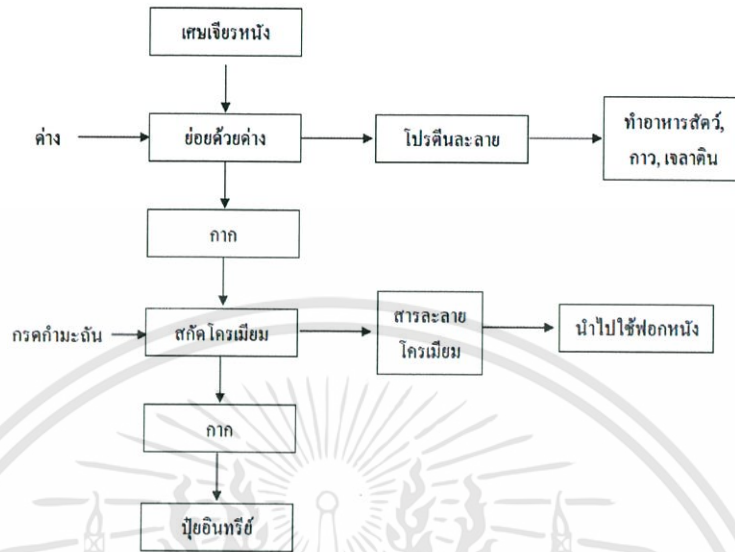
2.6.1 กากของเสียจากขั้นตอนการขูดฟัดและการแล่นหนังคือ เศษหนังชิ้นเล็กๆ ที่ใช้งานไม่ได้ และเศษขาหรือกีบเท้าสัตว์ กากของเสียนี้มีคุณค่าทางการค้า เพราะสามารถนำมาทำเป็นของขบเคี้ยวสำหรับสุนัข (Dog chew) หรือนำมาทำเป็นเจลลาตินสำหรับทำเป็นแคปซูลยา หรือทำเป็นกาวหนัง หรือสกัดเอาไขมันมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นเครื่องสำอางหรือสบู่ การนำกากของเสียนี้ไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



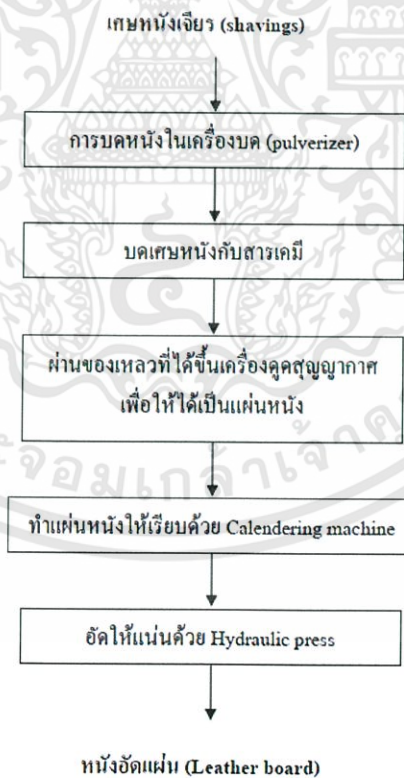
รูปที่ 2.8 วัตถุดิบและผลพลอยได้ของหนังที่ผ่านกระบวนการต่างๆ [14]

2.6.2 เศษหนังที่มีโครมหรือเศษหนังตัดเจียร สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกโดยสกัดเอาโปรตีนและโครเมียมกลับมาใช้ใหม่ สำหรับวิธีการผลิตคือนำเศษหนังตัดเจียรมาย่อยด้วยสารละลายต่างได้โปรตีนผสมออกมาในสารละลาย และโปรตีนที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตกาว หรือเป็นส่วนประกอบในอาหารสัตว์ ส่วนกากที่เหลือจากการย่อยโปรตีนก็นำไปสกัดโครเมียมออกด้วยกรดซัลฟูริก ซึ่งโครเมียมที่ได้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการฟอกหนังได้อีก กากที่เหลือจากการสกัดโครเมียมสามารถนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ ดังรูปที่ 2.9 ในต่างประเทศได้นำเศษหนังตัดเจียรมาผลิตเป็นหนังอัดแผ่น (Leather board) เพื่อใช้ในกิจกรรมหลายประเภท เช่น วัสดุดูดซับเสียง วัสดุพื้นรองเท้า และสันรองเท้า หรือทำวัสดุต่างๆที่

มีราคาถูก เช่น กระเป่าถือผู้หญิง ปกหนังสือ ซึ่งขั้นตอนการผลิตหนังอัดแผ่นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การสกัดโปรตีนและโครเมียมจากเศษหนังตัดเจียร [14]



รูปที่ 2.10 การผลิตหนังอัดแผ่นจากเศษหนังเจียร [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การลดกากของเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง [15]

ขั้นตอน	ลักษณะของเสีย	วิธีการใช้ประโยชน์/กำจัด	
		ต่างประเทศ	ในประเทศ ปัจจุบัน
1. กระบวนการก่อนฟอก การขูดฟั่งผีด การผ่าแยกชิ้น	เศษหนังตัด ฟังผีดที่มีปูนขาว หนังส่วนล่างที่มีปูนขาว กาวบน	คอลลาเจน ไขมัน อาหารโปรตีน คอลลาเจน เจลาติน เปลือกไส้กรอก ของแท่งสำหรับสุนัข (Dog Chew)	ทำอาหารปลา ปู๋ คอลลาเจน เจลาติน ของแท่งสำหรับสุนัข เจลาตินและ กาว
2. กระบวนการฟอกหนัง ฟอกโครม การตัดเจียรหนัง	เศษหนังที่มีโครเมียม	กาวแผ่นกรองเสียง เจลาติน อาหารสัตว์ ปู๋ ผลิตภัณฑ์ดูดซับเสียง leather board	ส่งกำจัด
ฟอกฟาด การตัดเจียรหนัง	เศษหนัง	ปู๋ หนังแผ่น ผลิตภัณฑ์ดูดซับเสียง leather board	ทำเป็นผลิตภัณฑ์อื่น หนัง ราคาถูก
3. การตกแต่งหนัง	เศษหนังที่มีโครเมียมและสีซ้อม	หนังราคาถูก	ขายไปทำผลิตภัณฑ์อื่นๆ, ส่งกำจัด

2.7 สารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling Agent)

สารคู่ควบเป็นสารที่เพิ่มความสามารถในการยึดติดกันระหว่างพอลิเมอร์อินทรีย์กับพื้นผิวอนินทรีย์ นอกจากนี้สารคู่ควบยังใช้เป็นตัวเคลือบพื้นผิวหรือปรับปรุงสภาพพื้นผิวอีกด้วย ความหนาของชั้นสารคู่ควบไซเลนที่มีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มการยึดติดของพื้นผิวจะเท่ากับความหนาของการจัดเรียงตัวแบบชั้นเดียวซึ่งจะเปลี่ยนไปตามประเภทของสาร ส่วนมากสารคู่ควบจะใช้เป็นสารเติมแต่งในสารยึดติด ซึ่งตัวอย่างสารคู่ควบที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม เช่น ไซเลนอินทรีย์ (Organosilanes), เซอร์โคโรเนทอินทรีย์ (Organozirconates), เซอร์โคโร-อะลูมินเอตอินทรีย์ (Organozirco-aluminates), สารเชิงซ้อนโครเมียม (Chrome Complexes)

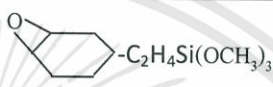
สารคู่ควบไซเลนเป็นสารคู่ควบประเภทหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการยึดติด โดยสารคู่ควบไซเลนนี้จะมีโมเลกุลที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาทางเคมีได้กับพื้นผิวของของแข็งและเข้าทำปฏิกิริยาได้ในเนื้อของพอลิเมอร์ สารคู่ควบไซเลนประกอบด้วยโมเลกุลของไซเลนเป็นส่วนใหญ่ [16] และมีโครงสร้างทั่วไปเป็น $X_3-Si-R-Y$ โดยที่ X คือ หมู่ไฮโดรไลซ์ ที่อยู่บนอะตอมของซิลิกอนซึ่งอยู่ในรูปของพันธะออกเซน (M-O-Si) R คือ โมเลกุลที่อยู่ระหว่างอะตอมของซิลิกอนกับ

หมู่ที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์และ Y คือหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ ที่สามารถสร้างพันธะกับพอลิเมอร์อินทรีย์ได้

สารคู่ควบไซเลนมีการคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1948 และถึงแม้ว่าความสามารถในการยึดติดจะเป็นปัจจัยหนึ่งของสารคู่ควบ แต่ปัจจัยอื่นๆ ก็มีความสำคัญเช่นกัน เช่นในทางปฏิบัติการเติมสารคู่ควบนั้นจะต้องทำให้สารคู่ควบนั้นสามารถซึมเข้าสู่พอลิเมอร์อย่างรวดเร็ว สำหรับตัวอย่างประเภทของสารคู่ควบไซเลนที่ใช้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.2 สำหรับสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ในการเพิ่มความสามารถในการยึดติดกันระหว่างยางพารา กับผงหนังในงานวิจัยนี้คือ สารคู่ควบไซเลนชนิด Bis - (3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (Si-69) แสดงดังรูปที่ 2.11

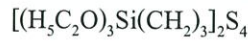
จากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นถึงกลไกการเข้าทำปฏิกิริยาของสารคู่ควบไซเลนชนิด Si-69 บนผิวของผงหนังและในเนื้อของยางธรรมชาติ โดยสารคู่ควบไซเลน Si-69 นั้นจะมีหมู่ฟังก์ชันที่เข้าทำปฏิกิริยาสองหมู่ฟังก์ชันคือหมู่ tetrasulfide และหมู่ ethoxy สำหรับหมู่ tetrasulfide นั้นทำปฏิกิริยากับยาง ส่วนหมู่ ethoxy จะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ที่ผิวของผงหนังจากกลไกที่เกิดขึ้นจะทำให้ความสามารถในการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับผงหนังเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 2.2 ประเภทของสารก่อกว้างไซเลน [17]

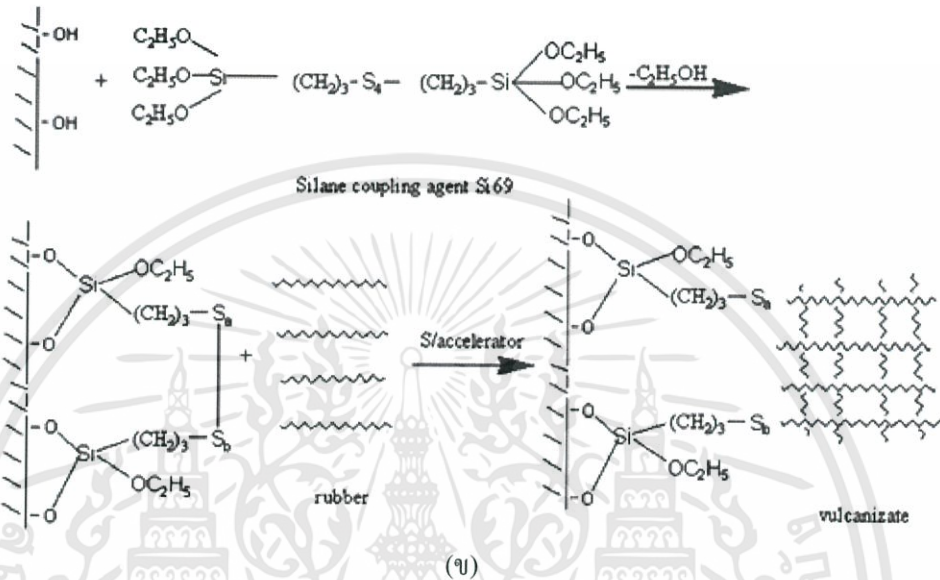
ประเภท	ชื่อทาเคมี	โครงสร้าง	เรซินหลัก
Vinylsilane	Vinyltrichlorosilane	$\text{CH}_2=\text{CHSiCl}_3$	Unsaturated polyester
	Vinyltris (β methoxyethoxy) silane	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_4\text{OCH}_3)_3$	
	Vinyltriethoxysilane	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$	Crosslinking polyethylene
	Vinyltrimethoxysilane	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OCH}_3)_3$	
Acryloxy	3-metacryloxypropyl-trimethoxysilane	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2=\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{C}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3 \\ \\ \text{O} \end{array}$	Unsaturated polyester
Epoxy silane	β -(3,4 epoxy cyclohexyl)-ethyltrimethoxysilane		Epoxy, phenolic and melamine
	γ -glycidoxypropyl-trimethoxysilane	$\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{OC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3 \\ \\ \text{O} \end{array}$	Epoxy, phenolic and melamine
	γ -glycidoxypropyl-methyldiethoxysilane	$\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{OC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2 \\ \\ \text{O} \end{array}$	Epoxy, phenolic and melamine
Aminosilane	N- β (aminoethyl)- γ -aminopropyl-trimethoxysilane	$\text{H}_2\text{NC}_2\text{H}_4\text{NHC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	Epoxy, phenolic and melamine
	N- β (aminoethyl)- γ -aminopropyl-methyldimethoxysilane	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{H}_2\text{NC}_2\text{H}_4\text{NHC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_2 \end{array}$	Epoxy, phenolic and melamine
	3-aminopropyl-triethoxysilane	$\text{H}_2\text{NC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	Nylon, phenolic, epoxy and melamine
	N-phenyl- γ -aminopropyl-triethoxysilane	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NHC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	Polymido, epoxy, phenolic and melamine
อื่นๆ	γ -mercaptopropyl-trimethoxysilane	$\text{HSC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	Rubber
	γ -chloropropyl-trimethoxysilane	$\text{ClC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	Epoxy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Si-69



(ก)



รูปที่ 2.11 (ก) สูตรทางเคมีของ Bis - (3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (ข) การเกิดปฏิกิริยาของ ethoxy group กับ OH group บนพื้นผิวของผงแห้ง [18]

2.8 ทฤษฎีการยึดเกาะ (Theories of Adhesion) [19]

ในวัสดุเชิงประกอบ เมทริกซ์สามารถยึดเกาะกับเส้นใยที่อินเตอร์เฟสได้หลายวิธี กลไกการยึดเกาะหลักที่อินเตอร์เฟสของวัสดุเชิงประกอบมี 5 กลไกซึ่งอาจเกิดอย่างใดอย่างหนึ่งหรือเกิดร่วมกันดังนี้

2.8.1 การดูดซับและการเปียก (Adsorption and Wetting)

เมื่อพื้นผิวสองพื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากพอ จะเกิด “แรงดึงดูดเชิงกล” (Physical attraction) เช่นการเปียก (Wetting) ของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง ในกรณีของของแข็ง 2 ชนิดอยู่ใกล้ชิดกันมากถึงระดับจุลภาค (ไมครอน) หรือระดับอะตอม ความขรุขระ (Roughness)

ของพื้นผิวจะเป็นสิ่งขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะหรือสัมผัส จะมีเพียงบางตำแหน่งเท่านั้นที่สามารถเกิดการสัมผัสกันได้

ตามทฤษฎีแรงยึดเกาะนี้มีความแข็งแรงสูงแต่ในทางปฏิบัติจะมีแรงเชิงกลนี้ต่ำเนื่องจาก

- พื้นผิวเส้นใยมีความสกปรก (Contamination) เกิดเป็นชั้นของสิ่งสกปรกที่มีค่าพลังงานพื้นผิวอิสระหรือแรงดึงผิวต่ำ
- ในขั้นตอนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเกิดฟองอากาศของฟองก๊าซถูกขังอยู่บนพื้นผิวเส้นใยทำให้พื้นผิวสัมผัสน้อยลง
- เกิดการหดตัวของเรซินเมทริกซ์หลังการเชื่อมโยง ทำให้เกิดแรงเค้น (Stresses) และเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์

2.8.2 การแพร่เข้าหากันหรืออินเทอร์ดิฟฟิวชัน (Interdiffusion)

การยึดเกาะของพื้นผิวพอลิเมอร์สองชนิดสามารถเกิดได้ ถ้าโมเลกุลพอลิเมอร์บริเวณพื้นผิวสัมผัสทั้งสองชนิดมีการแพร่ (Diffusion) เข้าหากันและกันดังรูปที่ 2.12 ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุล (Molecular entanglement) ว่ามีมากหรือน้อย อีกทั้งขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนสายโซ่โมเลกุล เนื่องจากความสามารถในการแพร่และการพันกันของสายโซ่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล (Molecular motion) ดังนั้นการยึดเกาะแบบอินเทอร์ดิฟฟิวชันสามารถเพิ่มโดยการใส่ตัวทำละลาย (Solvents) ที่พื้นผิว หรือการใช้สารเติมแต่งจำพวกพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) ทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย กลไกการยึดเกาะแบบนี้สามารถเกิดกับพื้นผิวที่มีการเคลือบพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงผิวก่อนแล้วจึงทำการเคลือบkawลงไป

2.8.3 แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Attraction)

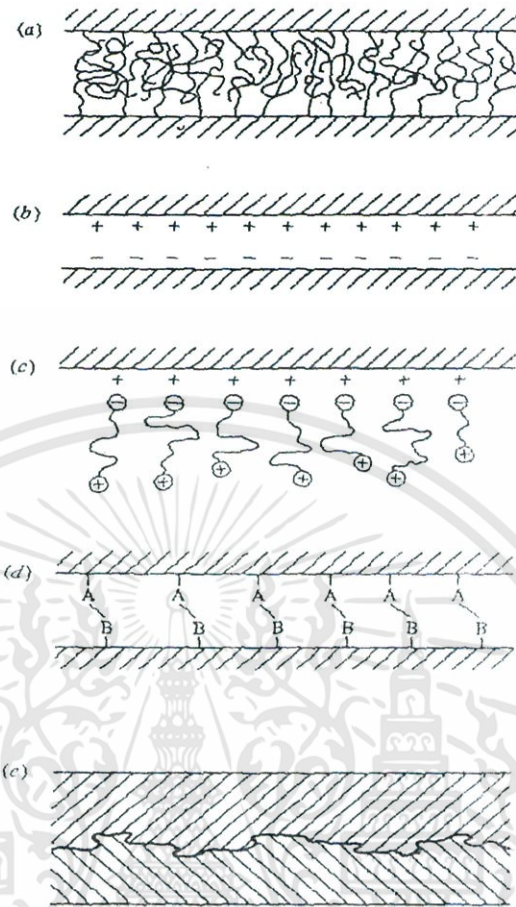
แรงดึงดูดจะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวทั้งสองชนิดที่มีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน นั่นคือถ้าพื้นผิวหนึ่งมีประจุบวก (Net positive charge) และอีกพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นลบ (Net negative charge) ตัวอย่างเช่น อันตรกิริยาระหว่างกรด-เบส (Acid-base interaction) และพันธะไอออนิก (Ionic bonding) แสดงในรูป (b) และ (c) ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับความหนาแน่นประจุ (Charge density) แรงดึงดูดระหว่างประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์จะไม่ใช้แรงยึดเกาะหลักระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิว แต่แรงดึงดูดชนิดนี้มีส่วนร่วมกับกลไกการยึดเกาะชนิดอื่นช่วยให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่างสองพื้นผิวได้ดีขึ้น เช่นการยึดเกาะของสารคู่ควบประเภทไซเลน (Silane coupling agent) ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุบวก (Cationic function groups) เป็นต้น

2.8.4 พันธะทางเคมี (Chemical Bonding)

เป็นกลไกการยึดเกาะที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่ง แสดงในรูป (d) เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวหนึ่งมีหมู่ฟังก์ชันทางเคมี (Function groups) บนพื้นผิวและอีกพื้นผิวหนึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดเป็นพันธะทางเคมีได้แก่ พันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิว ซึ่งเป็นการยึดเกาะที่แข็งแรง ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น การเสถียรภาพของพื้นผิวระหว่างอินเตอร์เฟซจะเกี่ยวข้องกับการแตกหักของพันธะเคมีนี้ ตัวอย่างการยึดเกาะด้วยพันธะทางเคมีได้แก่ การเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสารคู่ควบ (Coupling agent) กับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นทั้งสอง

2.8.5 การยึดเกาะเชิงกล (Mechanical Adhesion หรือ Mechanical Interlocking)

การยึดเกาะเชิงกลเกิดเมื่อกาวเปียกไปบนพื้นผิวที่เป็น backing ขณะเป็นของไหลสามารถแทรกตัวไปบนพื้นผิวที่ขรุขระของ Backing รวมทั้งซอกร่องรูและ ช่องว่างอื่นๆ บนพื้นผิวเมื่อสารละลายระเหย ทำให้เกิดการเซตตัว เป็นเหตุเกิดการล็อกติดอยู่กับพื้นผิวของ Backing แสดงดังรูปที่ (e) ความแข็งแรงของการยึดเกาะนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระ (Roughness) ของพื้นผิวที่จะเกิดการสัมผัส ทำให้เกิดการแทรกตัวของกาว รวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถของกาว ในการเปียกและแทรกตัวในพื้นผิวที่จะยึดติด เช่น ความหนืดของกาวพื้นผิวที่มีความเรียบเกินไปจะเกิดการยึดเกาะเชิงกลน้อยหรือ ไม่มีเลย



รูปที่ 2.12 กลไกการยึดเกาะชนิดต่างๆ (a) อินเทอร์ดิฟิวชัน (Interdiffusion) (b) แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ (c) แรงดึงดูดระหว่างประจุของโมเลกุลที่มีประจุบนพื้นผิวที่มีประจุบวก (d) พลังงานเคมีเกิดระหว่างหมู่ A บนพื้นผิวหนึ่งกับหมู่ B บนพื้นผิวหนึ่ง และ (e) การยึดเกาะเชิงกล (mechanical interlocking) [19]

2.9 กลไกของการหน่วงการติดไฟ

2.9.1 การยับยั้งหรือการกำจัดอนุมูลอิสระ

โดยทั่วไปการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาของสายโซ่อนุมูลหลักในวัฏภาคที่เป็นไอ ในบางครั้งสารอินทรีย์ประเภทฮาโลเจนอาจเกิดอนุมูลโบรมีนและคลอรีนวิ่งเข้าไปแทรกแซงสายโซ่ที่เกิดออกซิเดชันช่วยในการยับยั้งหรือกำจัดอนุมูลอิสระได้ เช่นเดียวกับสารอินทรีย์ฟอสเฟตด้วย

2.9.2 การปกคลุมก๊าซที่ไม่รวมก๊าซออกซิเจน

สารหน่วงการติดไฟอาจทำให้เกิดก๊าซซึ่งปกคลุมผิวของพลาสติกซึ่งเป็นการรักษาพลาสติกไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศและป้องกันการเผาไหม้ ก๊าซประเภทนี้ได้แก่ โบรมีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ แอนติโมนีออกไซด์ และไอน้ำ เป็นต้น

2.9.3 การเคลือบผิว

การเผาไหม้ของสารอินทรีย์ประเภทฟอสฟอรัสทำให้เกิดฟอสฟอรัสออกไซด์ซึ่งมีลักษณะคล้ายแก้วห่อหุ้ม เมื่อแข็งตัวแล้วจะเคลือบสารอินทรีย์บนพลาสติก จัดเป็นสารที่ไม่เกิดการติดไฟ และช่วยแยกออกซิเจนในบรรยากาศต่อไป

2.9.4 การเกิดถ่าน

กระบวนการเผาไหม้บางชนิดเปลี่ยนพอลิเมอร์ประเภทสารอินทรีย์ให้เป็นถ่านคาร์บอนที่มีฟองอยู่ โดยจะแยกออกซิเจนในบรรยากาศและทำหน้าที่เป็นฉนวนเก็บความร้อนของเปลวเพลิงไม่ให้ออกจากพลาสติกและป้องกันการแตกสลายของพลาสติกไปเป็นไอระเหยของสารอินทรีย์ที่เกิดจากการสันดาป

2.9.5 การดูดความร้อน

สารหน่วงการติดไฟที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงประเภทดูดความร้อนและมีผลทำให้พลาสติกเย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิของการสลายตัวจะช่วยป้องกันการเผาไหม้โดยการระเหยกลายเป็นไอน้ำได้ เช่นอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์

2.9.6 การไหลเป็นหยดก่อนเผาไหม้

ในการทดสอบเทอร์โมพลาสติกในห้องปฏิบัติการพบว่า ตอนปลายสุดของการเผาไหม้สารตัวอย่างที่หลอมเหลวเป็นหยดและมีเปลวไฟติดอยู่ด้วย แต่เมื่อทำให้สารตัวอย่างเย็นตัวลงจะไม่เกิดการเผาไหม้อีกต่อไป เรียกพฤติกรรมแบบนี้ว่า “การดับไฟด้วยตนเอง (Self extinguishing)”

การเลือกใช้สารหน่วงการติดของเปลวไฟจะใช้ปริมาณมากน้อยเพียงไรขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความไม่สามารถเข้ากันได้ (Incompatibility) การไหลออกจากเนื้อสาร (Extrudation) ความเป็นพิษ (Toxicity) และเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) เป็นต้น โดยที่สารหน่วงการติดไฟในทางอุดมคติควรมีลักษณะดังนี้

- ช่วยหน่วงการติดของเปลวไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิผล

- สามารถทนต่ออุณหภูมิของกระบวนการได้
- ไม่เกิดการกัดกร่อน ไม่มีพิษ และมีควันน้อย
- ไม่มีผลกระทบต่อสมบัติของพลาสติก
- สามารถเข้ากันได้ดีกับพลาสติก
- ไม่เกิดการไหลออกจากเนื้อพลาสติก (Bleeding)

การเติมสารหน่วงการติดของเปลวไฟมีผลหลักต่อสมบัติต่างๆ ของพลาสติกดังนี้

- สมบัติทางกล ทำให้ความแข็งแรงลดลง
- สมบัติทางไฟฟ้า ทำให้การนำไฟฟ้าลดลง
- สมบัติทางเคมี ชนิดที่เป็นสารปรับแต่งทำให้ความต้านทานต่อสารเคมีลดลง
- สมบัติทางความร้อน ชนิดที่เป็นสารปรับแต่งทำให้การนำความร้อนลดลง แต่ถ้าเป็นแบบว่องไวต่อปฏิกิริยาจะช่วยปรับปรุงต้านทานต่อความร้อน
- สมบัติเมื่อเวลาผ่านไป (Aging) ในระยะเวลาที่มีผลทำให้สมบัติลดลง

2.10 วิธีการทดสอบการเผาไหม้ [A]

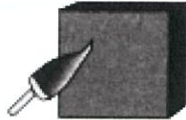


วิธีการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการติดไฟและประเมินความเสี่ยงภัยที่มีอยู่หลายวิธี แต่นิยมใช้กันในห้องปฏิบัติการหลักๆ มีดังนี้

2.10.1 การทดสอบแบบยูแอล 94 (UL 94 Tensile)

วิธีการทดสอบแบบ UL 94 เป็นการบ่งชี้เบื้องต้นสำหรับการยอมรับได้ของพลาสติกที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในส่วนของอุปกรณ์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ด้วยการพิจารณาถึงขีดความสามารถในการติดไฟได้ของวัสดุที่นำมาทำเป็นชิ้นงานส่วนประกอบ โดยวิธีการนี้ไม่ได้มีจุดมุ่งหมายที่จะแสดงให้เห็นถึงอันตรายของวัสดุภายใต้การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริง แต่เป็นเพียงการประเมินเบื้องต้นในการจุดติดของเปลวไฟสำหรับพลาสติกแต่ละชนิดเท่านั้น

วิธีการทดสอบแบบ UL 94 สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ การเผาไหม้แบบแนวนอน การเผาไหม้บริเวณพื้นผิว และการเผาไหม้แบบแนวตั้ง โดยมีลักษณะการเผาไหม้ดังรูปที่

2.13

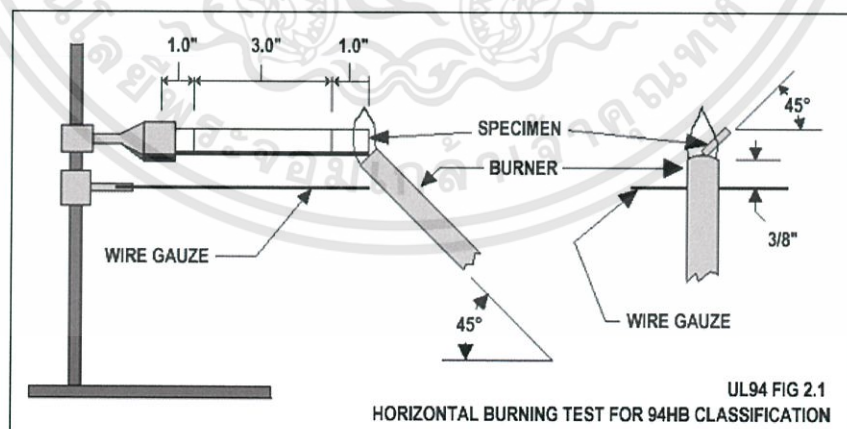
SURFACE BURN	VERTICAL BURN	HORIZONTAL BURN
		
Doesn't Ignite Under Hotter Flame UL 94 5VA UL 94 5VB	Self Extinguishing UL 94 V-0 (Best) UL 94 V-1 (Good) UL 94 V-2 (Drips)	Slow Burn Rating Takes more than 3 min. to burn 4 inches

รูปที่ 2.13 ลักษณะการเผาไหม้ชิ้นงานทดสอบของแต่ละประเภท [20]

แต่ละประเภทสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับรูปร่างของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ เช่น แผ่น (Sheet) ท่อ (Tube) ท่อน (Rod) และฟิล์ม (Film) อธิบายพอสังเขปดังนี้

- การเผาไหม้แบบแนวนอน (Horizontal Burning Test) [21]

การเผาไหม้แบบแนวนอนหรือวิธี “ 94H-B ” เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด โดยที่แท่งพลาสติกจะถูกวางอยู่ในแนวราบโดยปลายด้านหนึ่งผูกติดไว้ ถ้าพลาสติกโค้งงอได้อาจช่วยพวยงด้วยตะแกรงและมีตะเกียบขุนเช่นวางอยู่ได้ปลายอีกด้านหนึ่ง ถ้าพลาสติกไม่ติดไฟจะรายงานว่า “ไม่เกิดการเผาไหม้ (Non-burning)” ถ้าพลาสติกติดไฟต้องวัดอัตราการเกิดเปลวไฟในหน่วยนิ้วต่อนาที และรายงานผลเป็น “อัตราการเผาไหม้ (Rate of burning)” ถ้าติดไฟเพียงครั้งทางแล้วหยุดจะรายงานเป็น “สามารถดับได้ด้วยตัวเอง (Self-extinguishing)” และถ้าระยะทางที่ถูกเผาไหม้เป็นนิ้ว ซึ่งวัสดุที่มีความหนา น้อยกว่า 0.918 นิ้ว จะถูกจำแนกให้อยู่ในวิธี 94H-B



รูปที่ 2.14 ลักษณะการจัดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการเผาไหม้แบบแนวนอน [21]

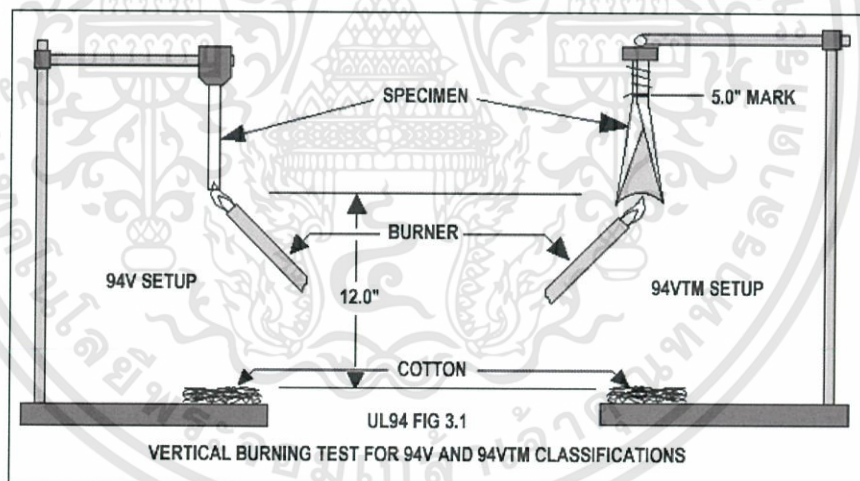
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเผาไหม้บริเวณพื้นผิว (Surface burning Test)

การเผาไหม้บริเวณพื้นผิว เป็นวิธีการทดสอบที่นิยมใช้เปลวไฟเผาไหม้บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ แล้วพิจารณาถึงระยะเวลาในการเผาไหม้และดับไฟด้วยตัวเองรวมถึงพิจารณา ลักษณะทางกายภาพหลังจากที่เกิดการเผาไหม้ เช่น เมื่อทำการเผาไหม้จะเกิดรูหรือช่องว่างเกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบซึ่งวิธีนี้จะมีอยู่ 2 ประเภท คือ 94-5VA และ 94-5VA

- การเผาไหม้แบบแนวตั้ง (Vertical Burning Test) [22]

การเผาไหม้แบบแนวตั้งเป็นวิธีการทดสอบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อน และสามารถประเมินผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เรียกสั้นๆ ว่า “ 94-V ” ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ 94-V0, 94-V1 และ 94-V2 โดยทำการนำชิ้นงานทดสอบที่มีขนาด ½ นิ้ว x 5 นิ้ว มาวางในแนวตั้งปลายด้านหนึ่งถูกยึดติดไว้ จากนั้นก็นำเปลวไฟมาเผาชิ้นงานทดสอบ โดยมีเส้นใยฝ้าย (Cotton) มารองรับเพื่อศึกษาถึงการเผาไหม้แบบหยด (Drips burning) ของวัสดุบางชนิด แต่สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะบางจะใช้วิธีทดสอบที่มีลักษณะเช่นเดียวกับวิธี 94-V แต่ชิ้นงานทดสอบต้องบางและมีขนาด 8 นิ้ว x 2 นิ้ว ซึ่งจะนำมาหมุนตามยาวเป็นรูปทรงกรวย โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ ½ นิ้ว คือ การเผาไหม้แบบแนวตั้งของวัสดุบาง (Thin material vertical burning test, 94-VMT)



รูปที่ 2.15 ลักษณะการเปรียบเทียบข้อแตกต่างในการจัดอุปกรณ์สำหรับทดสอบการเผาไหม้แบบ 94-V และ 94-VTM [21]

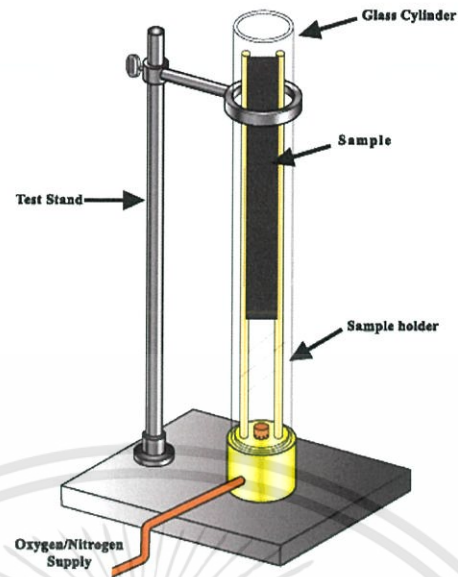
จากวิธีดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปลักษณะการบ่งชี้เบื้องต้นและการประเมินการจุดติดของเปลวไฟของแต่ละประเภทตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ลักษณะความสามารถในการติดไฟของวิธีการทดสอบแต่ละชนิด [23]

การบ่งชี้ลักษณะ	ลักษณะการวิเคราะห์ผลความสามารถในการติดไฟ
5VA Surface Burn	การเผาไหม้สามารถหยุดภายใน 60 วินาทีและตัวอย่างทดสอบไม่มีการเผาไหม้จนทะลุผ่าน (ไม่มีรู/ช่อง)
5VB Surface Burn	การเผาไหม้สามารถหยุดภายใน 60 วินาทีและตัวอย่างทดสอบมีการเผาไหม้จนทะลุผ่าน (มีรู/ช่อง)
V-0 Vertical Burn	การเผาไหม้หยุดภายใน 10 วินาที ไม่มีการไหลหยดและไม่เกิดการลุกไหม้ของเปลวไฟภายใน 30 วินาที
V-1 Vertical Burn	การเผาไหม้หยุดภายใน 60 วินาที ไม่มีการไหลหยดและไม่เกิดการลุกไหม้ของเปลวไฟภายใน 60 วินาที
V-2 Vertical Burn	การเผาไหม้หยุดภายใน 60 วินาที มีการไหลหยดและไม่เกิดการลุกไหม้ของเปลวไฟภายใน 60 วินาที
HB Horizontal Burn	ถ้าไม่ติดไฟจะรายงานว่า “ไม่เกิดการเผาไหม้” ถ้าติดไฟจะรายงานเป็น “อัตราการเผาไหม้” ในหน่วยนิ้ว/นาที ถ้าอัตราการเผาไหม้ที่น้อยกว่า 3 นิ้ว/นาที หรือหยุดเผาไหม้ก่อนจุดที่ทำให้เครื่องหมายบอกระยะ 5 นิ้วจะรายงานเป็น “การดับไฟด้วยตนเอง”

2.10.2 ดัชนีออกซิเจนหรือการทดสอบแบบเทียนไข (Oxygen index or Candle test)

วิธีการนี้จะวางพลาสติกยาวเข้าไปในหลอดแก้วที่อยู่ตามแนวตั้งและตรงไว้ที่ฐาน ผสมก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ถูกควบคุมและป้อนเข้าไปที่ฐานของหลอดทดสอบอย่างต่อเนื่องและออกทางรูเปิดด้านบน จากนั้นนำเปลวไฟจ่อลงตรงส่วนบนสุดของตัวอย่างพลาสติกเพื่อให้เกิดการเผาไหม้เหมือนจุดติดเทียนไข ถ้าไม่เกิดการลุกไหม้ให้ลดเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนลงจนกระทั่งหยุด ส่วนเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนวิกฤติ (Critical percent oxygen) ซึ่งเป็นเส้นแบ่งกันการลุกไหม้พอลิเมอร์จะรายงานเป็นดัชนีออกซิเจน (Oxygen index)



รูปที่ 2.16 การทดสอบการเผาไหม้ด้วยวิธีดัชนีออกซิเจน [24]

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Przepiorowska [25] ศึกษาการใช้ผงหนั่งที่ได้จากการขัด เป็นสารตัวเติมในยางคาร์บอกรีต บิวทาไดอิน – อะคริโลไนไท์ (XNBR) และยางคาร์บอกรีต บิวทาไดอิน – อะคริโลไนไท์ (NBR) โดยเน้นศึกษานิดของยางคือ ยาง XNBR และยาง NBR จากการทดลองใช้ผงหนั่งขนาด 10 mesh พบว่า ผงหนั่งเป็นสารตัวเติมที่ดีทั้งในยาง XNBR และยาง NBR แต่เนื่องจากโปรตีนในสารตัวเติมสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลในยาง XNBR ได้ จึงทำให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยง ความแข็งแรงดึง และความแข็งของยาง XNBR มีค่ามากกว่ายาง NBR

อาชีชัน แกสมาน, พนิดา สุภัทรพงศ์ และณัฐนี โล่ห์พัฒนานนท์ [26] ศึกษาการเตรียมยางวัลคาไนซ์จากการเบลนดซ์ของยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนไวนิลอะซีเตท โดยใช้โคคิวมิลเปอร์ออกไซด์และไตรเมทิลอลโดรเพนไตรเมทาคริเลตเป็นสารวัลคาไนซ์ จากการทดลองใช้ผงหนั่งขนาด 20 mesh จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณผงหนั่ง ทำให้เวลาสกอซและเวลาสุกของยางเบลนดซ์มีค่าลดลง โดยสมบัติด้านการดึงมีค่าลดลงอย่างมากแต่ความต้านทานต่อการฉีกขาดและความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นผลจากการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างหนั่งแท้และหนั่งเทียมที่เตรียมจากเบลนดซ์ของยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนไวนิลอะซีเตท ซึ่งผสมผงหนั่ง 75 phr และเคลย์

25 phr พบว่า หนึ่งแท่งแสดงสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่าหนึ่งแท่งเทียมพีวีซี ยกเว้นความสามารถในการยืดขาด

นางสาวจันทนา เทศเจริญ [27] ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบจากขวดพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วกับเศษผงหนังสัตว์ เพื่อใช้ทดแทนไม้หมอนรางรถไฟ โดยศึกษาผลกระทบของขนาดและปริมาณของผงหนัง ปริมาณยางรีเคลม และการปรับปรุงพื้นผิวของผงหนังด้วยสารกลุ่มควบ จากการทดลองให้ผงหนังขนาด 5 ถึง 7 mesh และ 20 ถึง 29 mesh โดยปรับเปลี่ยนปริมาณ 10, 30, 50, 70 และ 90 phr และใช้ยางรีเคลมในปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr พบว่าผงหนังขนาด 5 ถึง 7 mesh ในปริมาณ 70 phr และยางรีเคลมในปริมาณ 20 phr เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติเชิงกลที่มีค่าดีที่สุด ส่วนการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของผงหนังเพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะของเนื้อวัสดุด้วยไซเลน พบว่า 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน เข้มข้น 5% (โดยน้ำหนัก) มีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุด ขณะที่ เอ็น-อะมิโนเอทิล 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน ให้ผลดีที่ความเข้มข้น 3% (โดยน้ำหนัก)

อรอุยา ศิริคุตต์ [28] สังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบคล้ายหนัง (หนังกึ่งสังเคราะห์) จากพีวีซีและผงหนัง เพื่อให้มีสมบัติใกล้เคียงกับหนังแท้ (หนังฟอก) และปรับสภาพผิวของผงหนังด้วยอะมิโนไซเลนเปรียบเทียบกับไวนิลไซเลนที่ 1%, 3% และ 5% ในสารละลายน้ำ พบว่าความเข้มข้นของอะมิโนไซเลน 5% ในสารละลายน้ำมีค่าความทนแรงดึงมากที่สุด และมากกว่าไวนิลไซเลนที่ความเข้มข้นเดียวกัน

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นความร่วมมือระหว่างภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) กับห้างหุ้นส่วนจำกัด กริชมณีโปรดักส์ เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากเศษผงหนังธรรมชาติ (Leather) เป็นสารตัวเติม (Filler) ในยางธรรมชาติ (NR) โดยเลือกใช้ยางธรรมชาติชนิดยางแท่งเกรด (STR-5L) ในงานวิจัยนี้ได้แก่การศึกษาออกเป็น 3 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของการใช้ Poly(ethylene glycol) (PEG) และสารคู่ควบไซเลน (Si-69)

ตอนที่ 2 ศึกษาขนาดของผงหนังที่มีผลต่อยางธรรมชาติ

ตอนที่ 3 ศึกษาปริมาณผงหนังที่มีผลต่อยางธรรมชาติ

3.1 สารเคมี

- 3.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ยางแท่งเอสทีอาร์ 5L (STR-5L) บริษัท เอ็ม.บี.เจ. อินเตอร์ไพร์ส จำกัด สมบัติบางประการของยางแท่งเอสทีอาร์ 5L สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1
- 3.1.2 เศษผงหนังตัดเจียร (Leather power) ห้างหุ้นส่วนจำกัด กริชมณีโปรดักส์
- 3.1.3 สารเชื่อมโยงกำมะถัน (Sulfur) เกรดการค้า บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด
- 3.1.4 สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activator) กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า บริษัท ยูนิตี้ อินเตอร์บิสซิเนส จำกัด
- 3.1.5 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activator) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เกรดการค้า บริษัท ยูนิตี้ อินเตอร์บิสซิเนส จำกัด
- 3.1.6 สารหล่อลื่นน้ำมันแนฟทานิก (Naphthenic oil) เกรดการค้า บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด
- 3.1.7 สารเพิ่มเสถียรภาพ (Antioxidant) Wingstay L) เกรดการค้า บริษัท เอ็ม.บี.เจ. อินเตอร์ไพร์ส จำกัด
- 3.1.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerator) MBTS (Mercaptobenzothiazole Disulfide) เกรดการค้า บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด
- 3.1.9 ตัวเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerator) TMTD (Tetramethyl Thiuram Disulfide) เกรดการค้า บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.10 สารคู่ควบ (coupling agent) ไซเลน69 (Silane69) เกรดการค้า บริษัท S.K.Polymer

3.1.11 PEG (Polyethylene glycol) เกรดการค้า บริษัท S.K.Polymer

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติชนิดยางแท่งเอสทีอาร์ 5L (STR 5L)

สมบัติ	ค่า
เปอร์เซ็นต์สิ่งสกปรก (Dir) (% wt)	0.04
เปอร์เซ็นต์เถ้า (Ash) (%wt)	0.40
ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter; V.M.) (%wt)	0.80
ปริมาณไนโตรเจน (%wt)	0.60
ค่าพลาสติกซิตี (Plasticity number; P ₀)	35
ดัชนีความอ่อนตัว (Plasticity retention index; PRI)	60

หมายเหตุ ข้อมูลจากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บริษัท Lab Tech Engineer

3.2.2 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) บริษัท Lab Tech Engineer

3.2.3 แม่แบบ (Mold) ขนาด 6 x 6 นิ้วหนา 2 มิลลิเมตร

3.2.4 เครื่องอัดแรงลม

3.2.5 เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile testing machine) รุ่น LR 5 บริษัท Lloyd instrument

3.2.6 เครื่องทดสอบความแข็งแรงกด (Durometer hardness tester) ชนิด Shore A บริษัท ATS Faar S.p.A

3.2.7 เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่น SMV-201 บริษัท Shimudzu

3.2.8 เครื่องวัดการเชื่อมโยง MDR (Moving Die Rheometer) Curelastomer บริษัท Nichigo Shoji Co., Ltd.

3.2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น S-3400N บริษัท Hitachi High-Technologies Europe GmbH

3.2.10 เครื่องชั่งแบบละเอียด

3.2.11 ตู้อบความร้อน บริษัท โปรโทเทค อินเทอร์เน็ต จำกัด

3.2.12 เครื่องร่อนขนาด บริษัท Retach

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมผงหนัง

- ทำการแยกขนาดของเศษผงหนังด้วยเครื่องร่อนขนาด โดยผ่านตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาด 12-35 mesh และน้อยกว่า 35 mesh

- นำผงหนังที่ได้ไปอบที่ตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่ เพื่อกำจัดความชื้น ก่อนการผสม

3.3.2 การศึกษาผลของผงหนัง (Leather powder) ที่มีผลต่อยางธรรมชาติ (NR)

ตอนที่ 1 ผลของสารช่วยผลของ การใช้ Polyethylene glycol (PEG) และ สารคู่ควบไซเลน (Si-69)

- ตัดและชั่งยางธรรมชาติ รวมทั้งสารเคมีต่างๆตามตารางที่ 3.2 โดยเพิ่มน้ำหนักเพื่อให้ได้ยางผสมสูตรตามอัตราส่วนที่กำหนด

- ผสมไซเลน 69 (Silane 69) ในเอทานอล โดยมีความเข้มข้น 25% w/w ทำการฉีดไซเลน 69 ที่ผสมแล้วในผงหนังให้ทั่ว (สูตรที่ใช้ไซเลน 69 (Silane 69))

- ทำการใส่สารต่างๆ ยกเว้นสารเชื่อมโยงและสารเร่ง ค่อยๆ ใส่ระหว่างลูกกลิ้งและทำการผสมโดยการกรีดพับยาง (Cut-and-fold) เพื่อให้สารตัวเติมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในยาง ใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 10-15 นาที

- ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 5 มิลลิเมตร แล้วกรีดแผ่นยางออกจากลูกกลิ้ง ระมัดระวังอย่าให้พับติดกัน

- ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 2x2 นิ้ว จำนวน 2 แผ่นแล้วนำไปวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscosity) โดยใช้เครื่องมือวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscometer) กำหนดอุณหภูมิการวัดความหนืดที่ 100 °C โดยหาค่าความหนืด ML 1+4 (100°C) ของยางผสมสูตรก่อนการเชื่อมโยง

หมายเหตุ – ML 1+4 (100°C) หมายถึงความหนืดมูนนี่ (M = Mooney) โดยใช้แกนหมุนขนาดใหญ่

(L = Lang rotor) ทำการให้ความร้อนก่อน 1 นาที (1 = Preheat time 1 นาที) วัดค่าความหนืดมูนนี้เมื่อเวลาผ่านไป 4 นาที โดยวัดค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 100 °C ค่าความหนืดมูนนี้ไม่มีหน่วย (Dimensionless)

ตารางที่ 3.2 สูตรผสมยางในการทดลองศึกษาผลของผงหนังในยาง

สาร	สูตรที่ (phr)
ยางธรรมชาติ (NR)	100
ผงหนัง*	30, 60, 90, 120
Polyethylene glycol (PEG)*[29]	0, 1**
ไซเลน69 (Silane69)*[29]	0, 1**
Lubricant - Naphthenic oil	7
Activator - Stearic acid	2
Activator - ZnO	5
สารเชื่อมโยงกำมะถัน	1.5
สารเร่ง (Accelerator) - MBTS	1
สารเร่ง (Accelerator) - TMTD	0.5
Antioxidant - Wingstay L	1

หมายเหตุ *ปัจจัยที่จะศึกษา

- ปริมาณการใช้ PEG และสารคู่ควบไซเลน (Si-69)
- ขนาดผงหนัง (12-35 mesh และน้อยกว่า 35 mesh)
- ปริมาณผงหนัง (30, 60, 90, 120)

- phr = ส่วนโดย 100 ส่วนของยาง (โดยน้ำหนัก)

** 3% โดยน้ำหนักของปริมาณผงหนัง

- ใส่ยางธรรมชาติในเครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เพื่อให้แรงเฉือนระหว่างลูกกลิ้งทำการบดย่อย (Mastication) ให้ยางธรรมชาตินิ่มตัวและสามารถพันรอบลูกกลิ้งทำการกรีดพับยาง (Cut-and-fold) จนกระทั่งยางนิ่มจะใช้เวลาประมาณ 3-5 นาที

- เมื่อตัดตัวอย่างเพื่อใช้ทดสอบความหนืดมูนนี้แล้ว จึงใส่สารเชื่อมโยงได้แก่ตัวเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerator) และสารเชื่อมโยงก้ำมะถัน โดยค่อยๆ ใส่ระหว่างลูกกลิ้ง ทำการผสมโดยการกรีดและพับยางต่อจนกระทั่งสารกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกับยาง ขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 5 นาที

- ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 5 มิลลิเมตร แล้วกรีดแผ่นยางออกจากลูกกลิ้ง ระวังอย่าให้พับติดกัน

- ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 2x2 นิ้ว แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ด้วยเครื่อง MDR (Moving Die Rheometer) Curelaster เพื่อหาเวลาการเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) และเวลาก่อนการเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time, t_{s2}) ที่อุณหภูมิ 150 °C

- ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้ใส่แม่แบบ 6x6 นิ้ว แล้วนำไปใส่เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) เพื่อทำการขึ้นรูปให้เป็นแผ่นตัวอย่าง โดยทำการอัดร้อนที่อุณหภูมิที่ 150 °C และกำหนดเวลาเท่ากับเวลาเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) ที่ได้จากเส้นกราฟ โดยใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น $t_{c(90)} \times 1.2$ สำหรับเวลาในการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่แบบและภายในชิ้นงาน

- ทำการทดลองใหม่โดยเปลี่ยนปัจจัยในการทดลอง

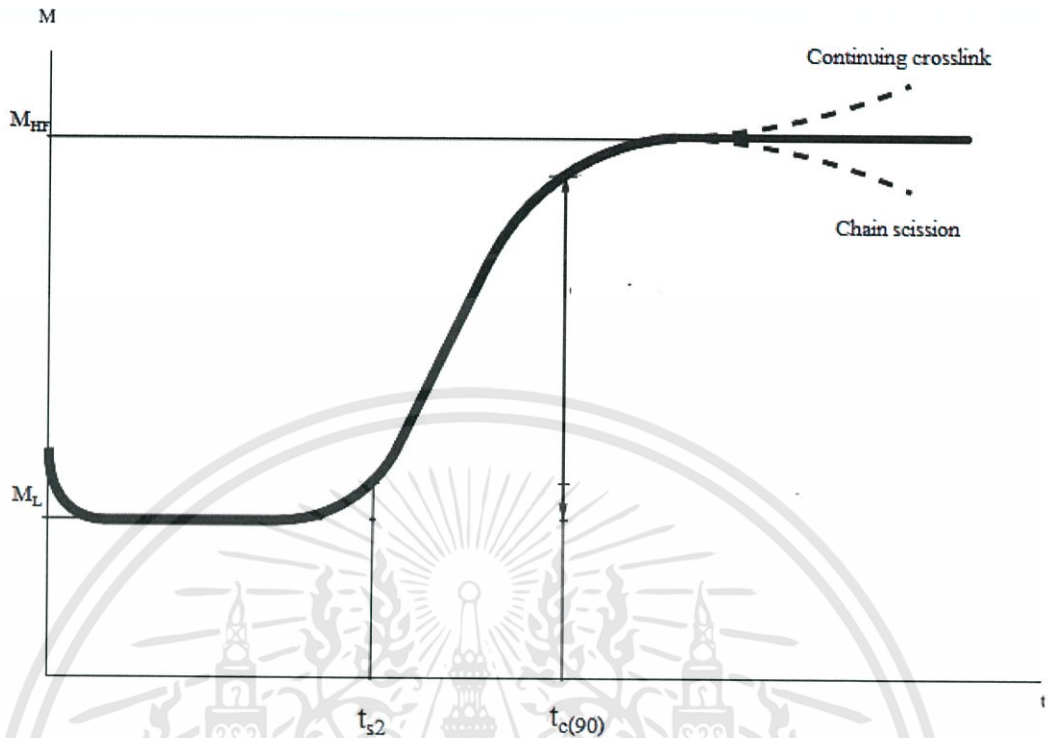
ตอนที่ 2 ผลของขนาดผงหนังที่มีผลต่ออย่างธรรมชาติ

- ทำตามขั้นตอนที่ 1 โดยเปลี่ยนขนาดผงหนัง

ตอนที่ 3 ผลของปริมาณผงหนังที่มีผลต่ออย่างธรรมชาติ

- ทำตามขั้นตอนที่ 1 โดยเปลี่ยนปริมาณผงหนัง

3.3.3 การศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic)



รูปที่ 3.1 ตัวอย่าง Cure curve แสดงลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)

เมื่อ M_L คือแรงบิด (Torque) ต่ำสุด
 M_{HF} คือแรงบิด (Torque) สูงสุด
 t_{s2} คือเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) เป็นเวลาที่ค่าแรงบิดเพิ่มสูงขึ้น 2 นิวตันเมตร (N.m) เป็นเวลาที่กำมะถันเริ่มทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Curing) กำหนดเป็นช่วงเวลาที่เราสามารถขึ้นรูปยางผสมสูตรเป็นรูปร่างผลิตภัณฑ์ยางตามที่ต้องการ โดยที่ยังไม่เกิดการเชื่อมโยง
 $t_{c(90)}$ คือเวลาเชื่อมโยง (Cure time) เป็นเวลาที่ยางเกิดการเชื่อมโยงที่ดีที่สุดกำหนดเป็นเวลาที่ยางเชื่อมโยง 90 เปอร์เซ็นต์ หรือแรงบิดเพิ่ม 90 เปอร์เซ็นต์จากค่าแรงบิดต่ำสุด

หาได้จาก $M_{t_{90}} = 0.9(M_{HF} - M_L) + M_L$

CRI (Cure rate index) คือดัชนีอัตราเร็วในการคงรูป

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

3.3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบแรงดึง (Tensile tests) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ตามมาตรฐาน ASTM D 422 โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างรูปดัมเบลล์ (Dumbbell shape) ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed : 500 mm/min

Gauge length : 30 mm

Load cell : 5 kN

- การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุ ที่รับได้เมื่อให้แรงดึง (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาได้จากสมการ

$$\text{ความแข็งแรงดึง} = F / A$$

เมื่อ $F =$ แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดสูงสุด (N)

$A =$ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (mm^2)

- เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) หาได้จากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด} = \frac{(l - l_0) \times 100}{l_0}$$

เมื่อ $l =$ ความยาวสุดท้าย ณ จุดขาดของชิ้นงาน (mm)

$l_0 =$ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm) หรือความยาวเกจ

- โมดูลัสของยาง (Rubber modulus) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ (M100) คือ ค่าความเค้นดึง (Tensile stress) ที่ค่าความเครียด 100 เปอร์เซ็นต์ (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่)

- ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนก (Right Angle)

$$\text{ความแข็งแรงดึง} = F / A$$

เมื่อ $F =$ แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดสูงสุด (N)

$A =$ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (mm^2)

- การทดสอบความแข็งกด (Hardness)

วัดความแข็งกดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D2440 ด้วย Shore A Durometer hardness โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะต้องมีความหนาอย่างน้อย $\frac{1}{4}$ นิ้ว หรือ 0.25 นิ้ว ทำการทดสอบหาค่าความแข็งกดตัวอย่างละ 10 จุด สเกลสำหรับอ่านค่าความแข็งกด อยู่ในช่วง 0 – 100 โดยค่าความแข็งกด 0 คือความแข็ง

กคของของเหลว และค่าความแข็งกค 100 คือ ความแข็งของวัสดุที่แข็งมากไม่ยุบตัว เช่น กระจก

3.3.5 การทดสอบสัณฐานวิทยา

ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อดูลักษณะรูปร่างของผงแห้ง และการกระจายของผงแห้งในยางธรรมชาติ เตรียมตัวอย่างโดยการแช่ตัวอย่างในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 30 นาที แล้วหักตัวอย่างอย่างรวดเร็ว ทำการเคลือบตัวอย่างด้วยทอง แล้วส่องที่กำลังขยายต่าง ๆ

3.3.6 การทดสอบสมบัติการลามไฟ

วิธีการทดสอบสมบัติการลามไฟในการทดลองนี้จะใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 โดยใช้ในการทดสอบการลามไฟแบบแนวตั้ง (Vertical Burning Test) ดังนี้

- ชิ้นงานทดสอบมีขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว x 5 นิ้ว โดยยึดปลายด้านหนึ่งไว้ตามแนวตั้งและทำเครื่องหมายบอกระยะที่ 1 นิ้ว และ 5 นิ้ว จากปลายด้านที่ไม่ได้ยึด โดยจัดรูปแบบการทดลองดังรูปที่ 2.15
- ทำการจ่อเปลวไฟเป็นเวลา 30 วินาทีหรือจนกว่าจะเผาไปถึงระยะที่ทำเครื่องหมายบอกระยะไว้ 1 นิ้ว แล้วนำเปลวไฟออก
- ถ้าการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจะทำให้การจับเวลาระหว่างจุดที่ทำเครื่องหมายบอกระยะที่ 1 นิ้ว และ 5 นิ้ว
- ถ้าการเผาไหม้หยุดก่อนจุดที่ทำเครื่องหมายบอกระยะ 5 นิ้ว จะทำการบันทึกเวลาและระยะที่เผาไหม้ระหว่างจุดที่ทำเครื่องหมายไว้
- ทำการทดสอบชิ้นงานทั้งหมด 5 ตัวอย่าง

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของการใช้เศษผงหนังเป็นสารตัวเติม (Filler) ใน ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) โดยเบื้องต้นการวิจัยนี้ได้มุ่งหวังศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อความเป็นไปได้ในการใช้เศษผงหนังเป็นสารตัวเติม ดังนี้

- ผลของการใช้ PEG และสารคู่ควบไซเลน
- ขนาดของผงหนังที่มีผลต่อยางธรรมชาติ ได้แก่ น้อยกว่า 35 Mesh (500 ไมครอน) และ 12-35 Mesh (1680 - 500 ไมครอน)
- ปริมาณผงหนังที่มีผลต่อยางธรรมชาติ ได้แก่ 30, 60, 90, 120 phr

โดยศึกษาสมบัติเชิงกล สัมฐานวิทยา และสมบัติการลามไฟ สำหรับอักษรย่อของสูตรที่ใช้ในงานวิจัย แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

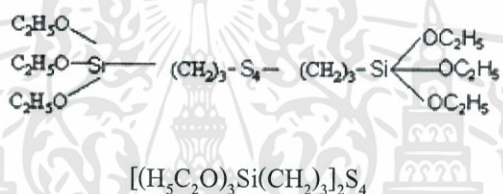
ตารางที่ 4.1 อักษรย่อของสูตรที่ใช้ในงานวิจัย

สูตร	คำอธิบาย
L-35[N30]	L-35 = ผงหนังที่มีขนาดน้อยกว่า 35 Mesh
L-35[NP30]	(น้อยกว่า 500 ไมครอน)
L-35[NSi30]	L-12-35 = ผงหนังที่มีขนาดระหว่าง 12-35 Mesh
L-35[NSiP30]	(1680 - 500 ไมครอน)
L-12-35[NSiP30]	N = ยางแท่งเอสทีอาร์ 5L (STR-5L)
L-12-35[NSiP60]	P = PEG (Polyethylene glycol) 400
L-12-35[NSiP90]	Si = Silane – 69
L-12-35[NSiP120]	30, 60, 90, 120 = ปริมาณผงหนัง (phr)

4.1 การศึกษาผลของการใช้สารคู่ควบไซเลนและ PEG

สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) เป็นสารคู่ควบที่นิยมใช้เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติการยึดเกาะระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ โดยสารคู่ควบไซเลนนี้จะมีโมเลกุลที่สามารถเข้าทำ

ปฏิกิริยาทางเคมีได้กับพื้นผิวของสารตัวเติม และเข้าทำปฏิกิริยาได้ในเนื้อของพอลิเมอร์ ในอุตสาหกรรมยางที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันนิยมใช้ Si-69 (แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 4.1) ซึ่งเป็นเมอแคปโทไซเลนที่มีอะตอมกำมะถันเป็นหมู่ฟังก์ชันในการเกิดปฏิกิริยากับยางที่มีพันธะคู่ ส่วน PEG เป็นสารเติมแต่งที่นิยมเติมในสูตรยางที่มีการใช้สารตัวเติมที่มีขั้วได้แก่ ซิลิกา ทำหน้าที่เคลือบอนุภาคสารตัวเติมซิลิกา ทำให้ความมีขั้วของสารตัวเติมลดลง และช่วยปกป้องไม่ให้สารตัวเติมดูดซับสารเคมีเชื่อมโยงเช่น ZnO และสารเร่ง (Accelerator) ในการทดลองตอนนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาว่า อนุภาคผงหน้างซึ่งมีโครงสร้างที่มีขั้วสูงมีความจำเป็นหรือไม่ที่จะต้องใส่ PEG และ/หรือ Silane (Si-69) โดยขั้นตอนนี้ทำการควบคุมปริมาณผงหน้างที่ 30 phr และใช้ขนาดผงหน้างน้อยกว่า 35 mesh (น้อยกว่า 500 ไมครอน)

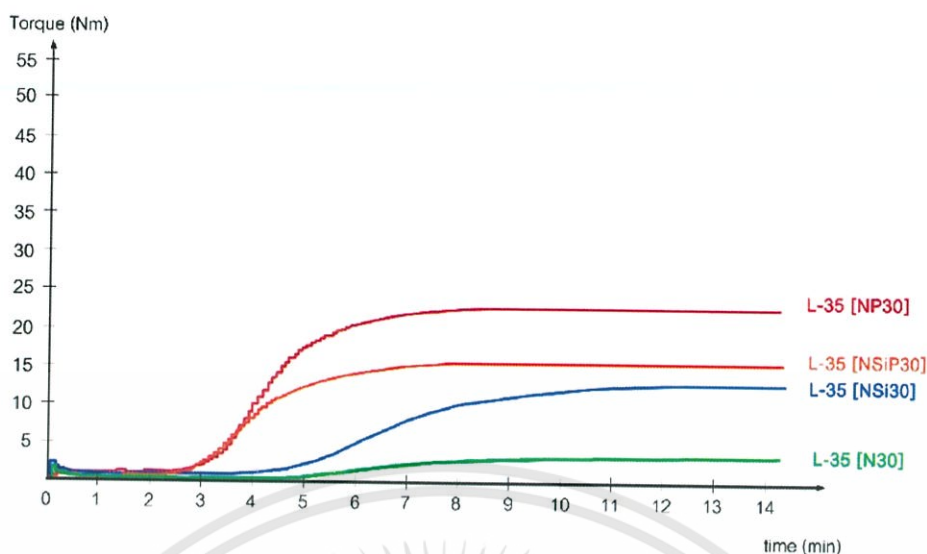


รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนชนิด Bis - (3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (Si-69)

4.1.1 การศึกษาพฤติกรรมของการเชื่อมโยงของยาง

โดยทั่วไปกระบวนการผสมยางจะต้องมีการวัดความหนืดมูนนี้ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพของยางในแต่ละครั้งของการผสมให้มีค่าใกล้เคียงกัน จากงานวิจัยได้ทำการทดสอบหาค่าความหนืดมูนนี้ที่สภาวะ ML (1+4) 100 °C โดยสามารถแสดงค่าความหนืดมูนนี้ได้ดังตารางที่ 4.2

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาพฤติกรรมของการเชื่อมโยงของยาง ซึ่งใช้เวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง (Scorch time, t_2) และเวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) ดัชนีอัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index) จากงานวิจัยได้ทดสอบด้วยเครื่องเอ็มดีอาร์ (Moving die rheometer, MDR) ที่อุณหภูมิ 150 °C แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร แสดงผลของการใช้ PEG และ Si-69

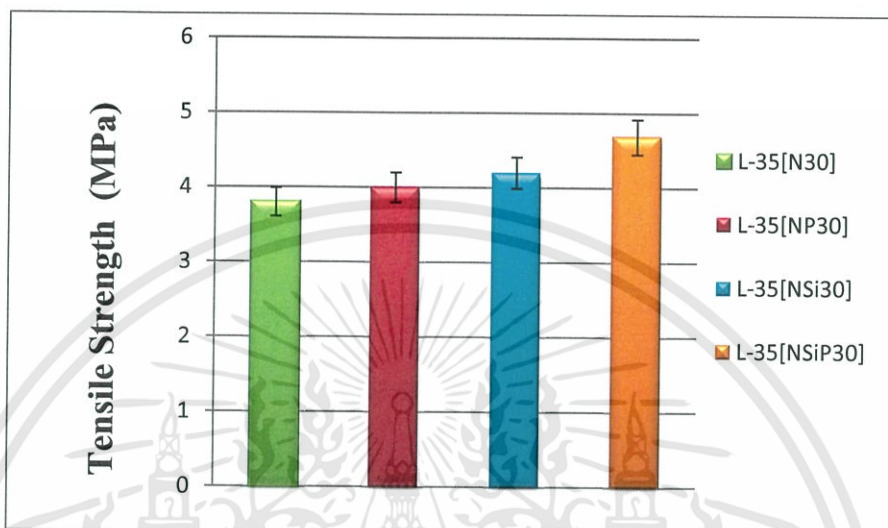
ตารางที่ 4.2 ค่าพฤติกรรมการณ์เชื่อมโยงของการใช้ PEG และ Si-69

Sample	Mooney (ML (1+4) 100 °C)	M_L (kgf.cm)	M_H (kgf.cm)	t_{s2} (s)	$t_{c(90)}$ (s)	CRI (s ⁻¹)
L-35[N30]	20.4	0.1	3.3	270	540	0.3
L-35[NP30]	20.8	0.5	22.5	198	366	0.6
L-35[NSi30]	21.0	1	13	318	549	0.4
L-35[NSiP30]	21.5	0.8	15.5	180	372	0.5

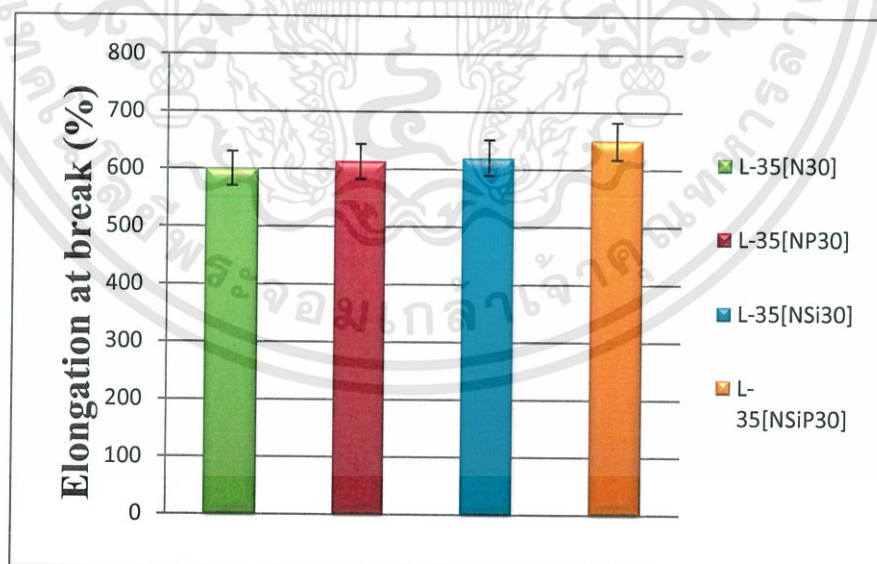
จากรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 แสดงการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร เมื่อมีการเติม PEG (สูตร L-35[NP30] และ L-35[NSiP30]) พบว่า ดัชนีอัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) เร็วขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่เติม PEG (สูตร L-35[N30] และ L-35[NSi30]) ทั้งนี้เนื่องจาก หนึ่งมีโครงสร้างเคมีเป็นโพรตีนมีหมู่ฟังก์ชันเอไมด์ (Amide group) บนพื้นผิว ซึ่งสามารถดูดซับสารเคมีที่มีขั้วโดยเฉพาะสารเคมีที่ใช้เป็นสารเชื่อมโยงได้แก่ ZnO และสารเร่ง MBTS และ TMTD ทำให้สารเชื่อมโยงบางส่วนหายไปจากระบบ ส่งผลให้การเชื่อมโยงของยางน้อยลง ดังนั้นสูตรที่ใช้ PEG (สูตร L-35[NP30] และ L-35[NSiP30]) มีประสิทธิภาพการเชื่อมโยงดีกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความแตกต่างของการใช้ไซเลน (Si-69) ไม่เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนเหมือนในกรณี PEG

4.1.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาผลการใช้ PEG และสารคู่ควบไซเลน (Si-69) ของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนัง เป็นสารตัวเติม ต่อความแข็งแรงดิ่งกับเปอร์เซ็นต์การยึด ฌ จุดขาด แสดงดังรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4



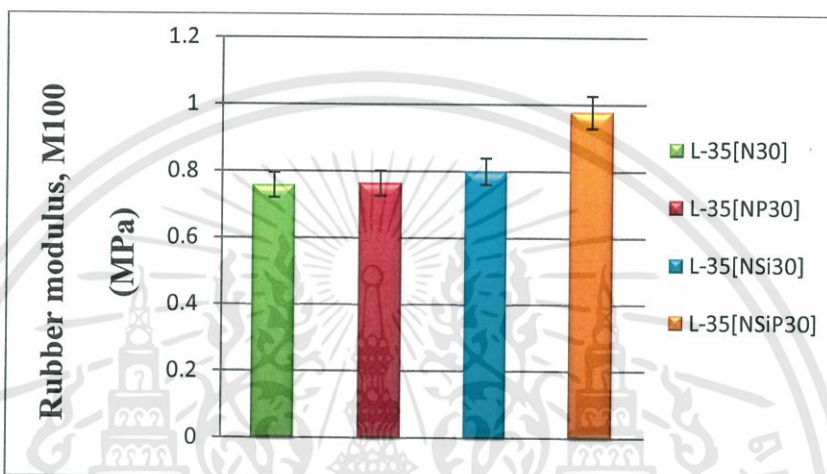
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดิ่งของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติม แสดงผลของการใช้ PEG และ Si-69



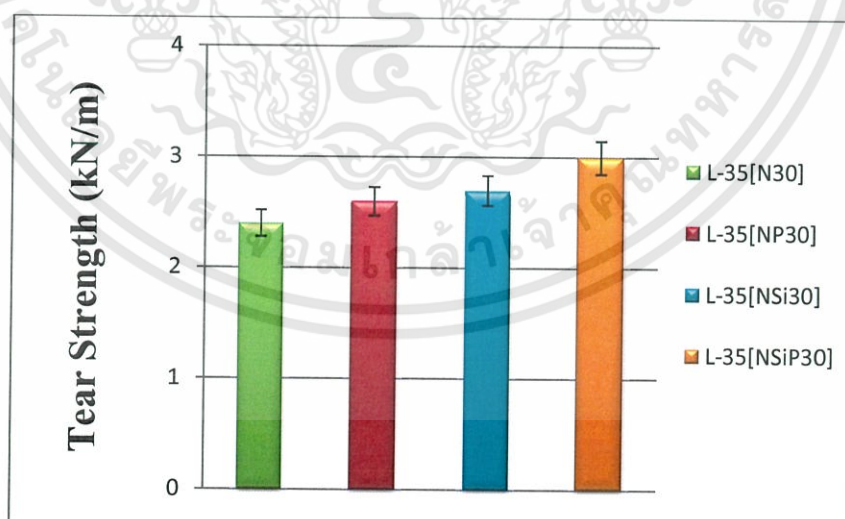
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ฌ จุดขาดของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติม แสดงผลของการใช้ PEG และ Si-69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

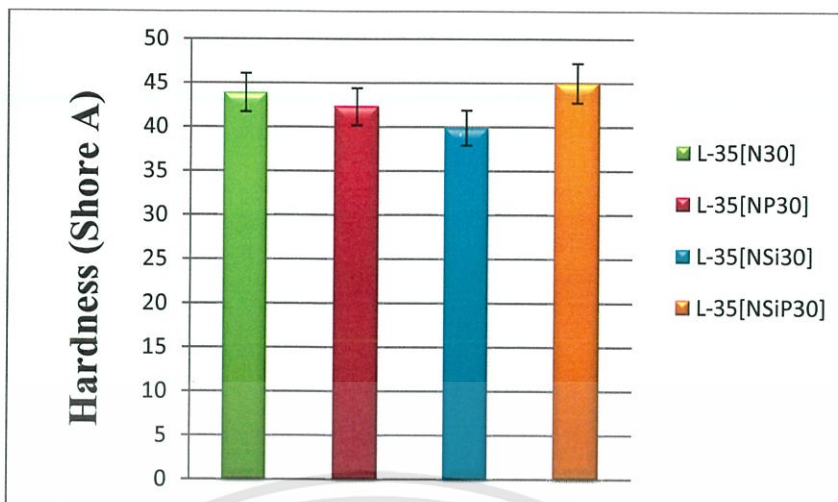
จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด พบว่ายางธรรมชาติที่ผสมผงหนังที่มีการเติม PEG และไซเลน-69 มีความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงสุด เนื่องจากไซเลน-69 มีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มการยึดติดของพื้นผิวของผงหนังที่มีขั้ว (Amide group) กับยางธรรมชาติซึ่งไม่มีขั้วได้ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ Si-69 ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเป็น -SH ดังนั้นกำมะถันจึงมีส่วนร่วมในการเชื่อมโยงทำให้เกิดการยึดเกาะที่ศีรษะหว่างยางกับอนุภาคของผงหนัง และ PEG ช่วยป้องกันการดูดซับสารเคมีเชื่อมโยงส่งผลให้การเชื่อมโยงของยางเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยึดของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติม แสดงผลของการใช้ PEG และ Si-69

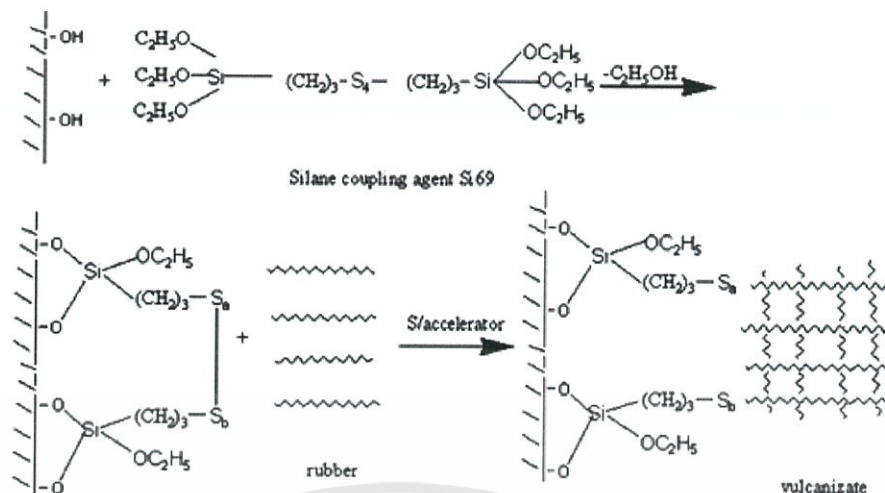


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติม แสดงผลของการใช้ PEG และ Si-69



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติม แสดงผลของการใช้ PEG และ Si-69

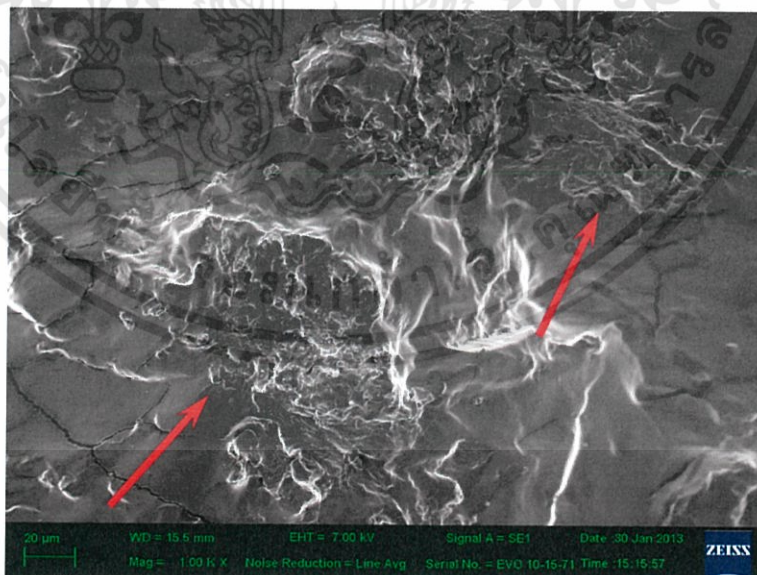
จากรูปที่ 4.5 - 4.7 พิจารณาการใช้ PEG และ สารคู่ควบไซเลน จะมีผลต่อค่าความแข็งแรง นึกขาด มอดุลัส 100 % และค่าความแข็งกด พบว่าในสูตรที่มีการใช้สารคู่ควบไซเลน และ PEG (L-35 [NSiP30]) มีค่าความแข็งแรงนึกขาด มอดุลัส 100 % มีค่ามากกว่ายางผสมสูตรที่ไม่ได้ใช้สาร คู่ควบไซเลนและ/หรือ PEG (สูตร L-35[N30], สูตร L-35[NP30] และ L-35[NSi30]) ดังที่กล่าว มาแล้วข้างต้น จากทฤษฎี ไซเลน-69 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยึดติดกันระหว่างผงหนังกับยาง ธรรมชาติ และ PEG ช่วยป้องกันการดูดซับสารเคมีเชื่อมโยง ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงได้อย่าง สมบูรณ์ แต่เนื่องจากปริมาณ PEG และ ไซเลน-69 ที่ใช้อ้างอิงมาจากปริมาณที่ใช้กับซิลิกาซึ่งมี อนุภาคเป็นทรงกลม ส่วนผงหนังมีลักษณะเป็นเส้นใย อาจส่งผลให้ปริมาณ PEG และ สารคู่ควบ ไซเลน-69 ไม่เพียงพอ จึงทำให้ค่าสมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาค่าความแข็ง กด มีแนวโน้มเป็นไปตามค่าความแข็งแรงนึกขาด มอดุลัส 100 % เช่นกัน แต่เนื่องจากค่าความแข็ง กดมีการแกว่งของค่า สาเหตุอาจเนื่องมาจากการวัดค่าความแข็งแรงบนพื้นผิว จึงมีโอกาสถูก ดูบริเวณของยางที่ไม่เกิดการเชื่อมโยง ส่งผลให้ค่าความแข็งกดน้อย ส่วนยางผสมสูตรที่มีการใช้สาร คู่ควบไซเลน และ PEG (L-35 [NSiP30]) เนื่องจากไซเลน-69 มีอะตอมของซิลเฟอร์ช่วยในการ เชื่อมโยงของยาง และPEG ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้พื้นผิวของยางผสม สูตร L-35 [NSiP30] มีค่าความแข็งกดสูงที่สุด



รูปที่ 4.8 การเกิดปฏิกิริยาของ Ethoxy group กับ OH group บนพื้นผิวของผงแห้ง และอะตอมของกำมะถันในไซเลน-69 ที่ส่งผลต่อการเชื่อมโยงของยาง

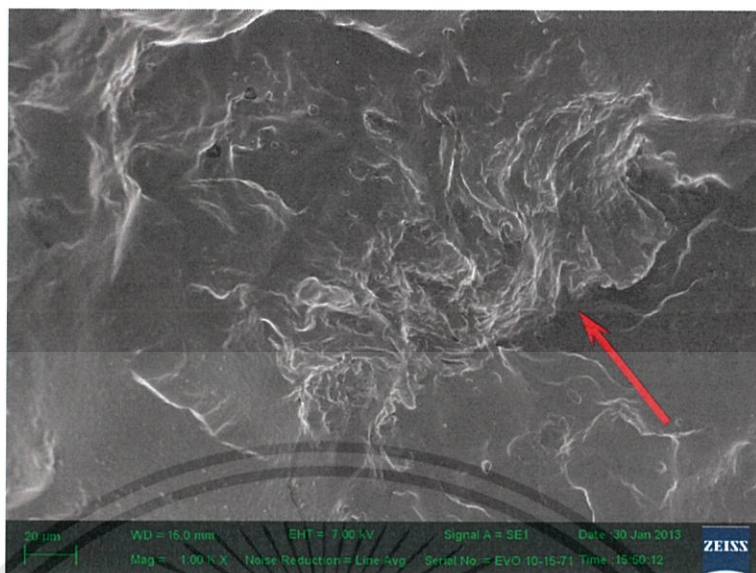
4.1.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา

ศึกษาสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของยางธรรมชาติที่ใช้ผงแห้งเป็นสารตัวเติมแสดงการใช้ PEG และสารคู่ควมไซเลน (Si-69) ที่ทำการหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังรูปที่ 4.9

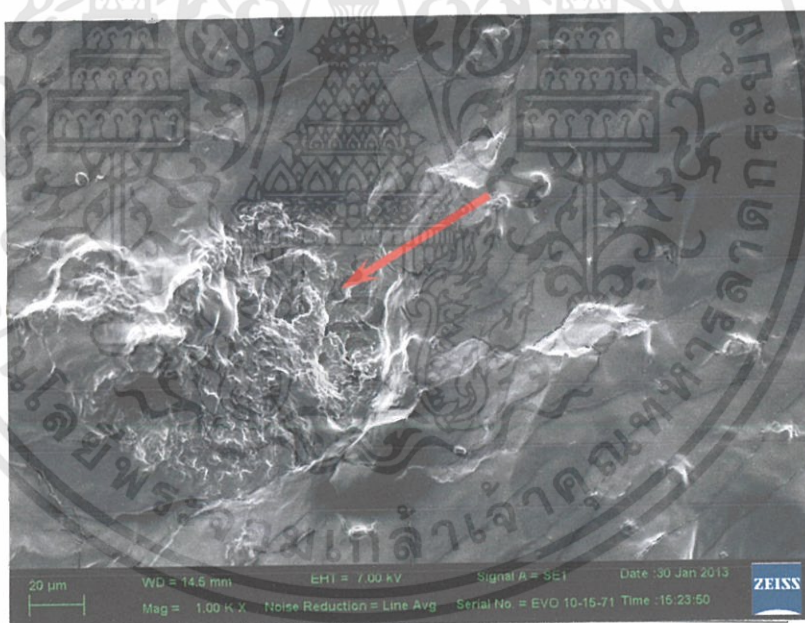


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

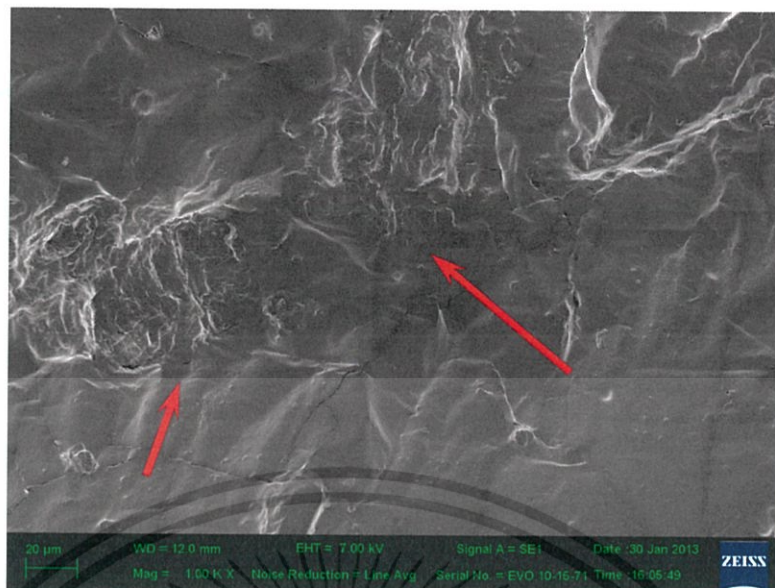


(ข)



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

รูปที่ 4.9 SEM micrographs แสดงลักษณะของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมที่มีผลจาก PEG และสารคู่ควบไซเลน (Si-69) กำลังขยาย 1000 เท่า (ก) L-35[N30] (ข) L-35[NP30] (ค) L-35[NSi30] (ง) L-35[NSiP30]

จากรูปที่ 4.9 แสดงการยึดระหว่างวัฏภาค (Interfacial bonding) พบว่าไม่เห็นความแตกต่างของการใช้ PEG และ Si-69 ทุกสูตรมีการยึดเกาะที่ติระหว่างอนุภาคผงหนังกับยางธรรมชาติ สังเกตได้จากบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของยางกับผงหนัง (ลูกศรในภาพ) ไม่พบช่องว่างหรือรูบริเวณรอยต่อ

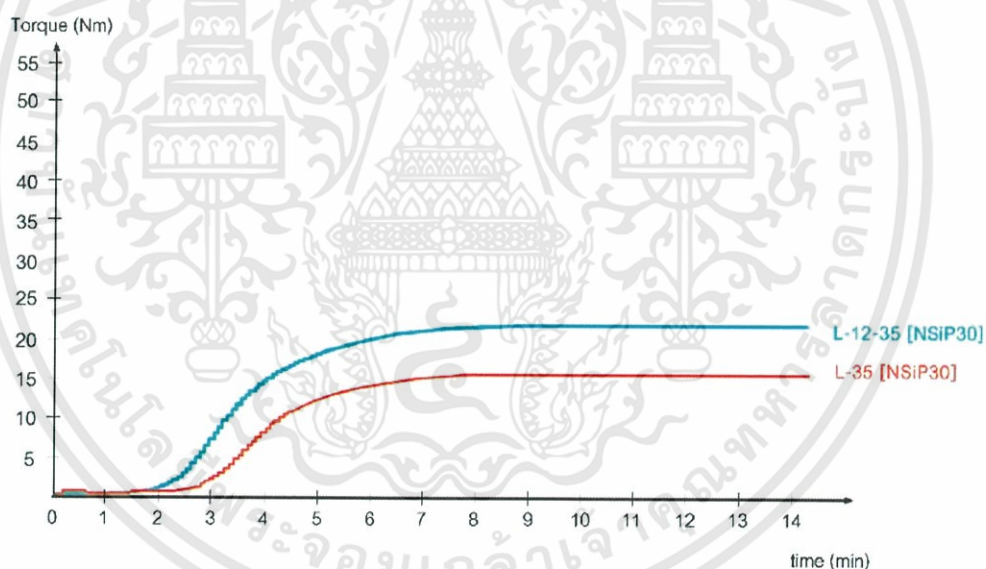
จากการศึกษาหัวข้อ 4.1 พบว่าการใช้ PEG และ Si-69 ส่งผลอย่างมีนัยต่อลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกล ดังนั้นในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 จึงเลือกใช้ PEG และ Si-69 ปริมาณอย่างละ 1 phr ซึ่งเป็นอัตราส่วนต่อปริมาณของผงหนังในทุกสูตร

4.2 การศึกษาขนาดของผงแห้งที่มีผลต่ออย่างธรรมชาติ

เนื่องจากขนาดของอนุภาคมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการเสริมแรง และมีผลโดยตรงต่อในแง่การผลิต โดยตอนนี้ทำการแปรขนาดอนุภาคของผงแห้งที่มีขนาด น้อยกว่า 35 mesh และระหว่าง 12-35 mesh โดยศึกษาพฤติกรรมกรรมการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกล คือ ความแข็งแรงดึง, % Elongation at break, มอดูลัสของยาง (M100), ความแข็งแรงนิกษาด, ความแข็งกด และศึกษาฐานฐานวิทยาด้วย SEM

4.2.1 การศึกษาพฤติกรรมกรรมการเชื่อมโยงยาง

จากรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติการเชื่อมโยงของยางที่ผสมผงแห้งที่มีผงแห้งขนาดน้อยกว่า 35 mesh และ 12-35 mesh พบว่าเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) เวลาเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) คัดนี้อัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) ต่างกันเล็กน้อย ผงแห้งขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าอาจเกิดการดูดสารเคมีเชื่อมโยงเช่น ZnO และ Accelerator บางส่วน PEG ที่ใช้อาจไม่เพียงพอ หรือผสมไม่ดี ทำให้เกิดการหน่วงการเชื่อมโยงมากกว่า



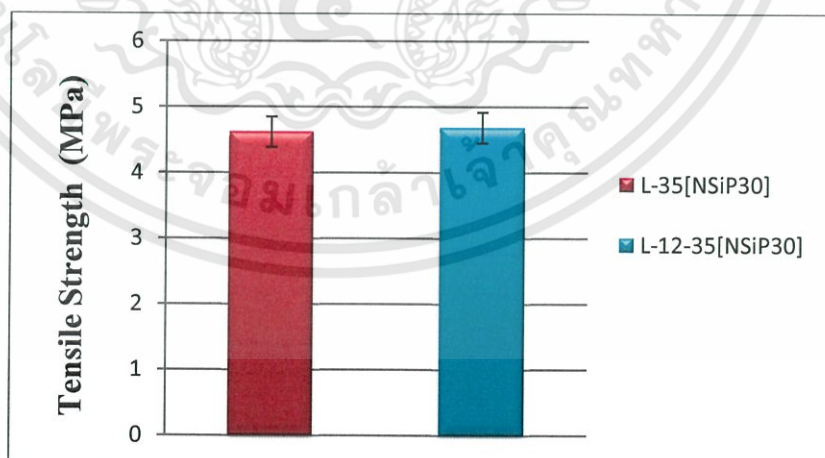
รูปที่ 4.10 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร แสดงผลของขนาดผงแห้ง

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพฤติกรรมกรรมการเชื่อมโยง แสดงผลของขนาดผงหนึ่ง

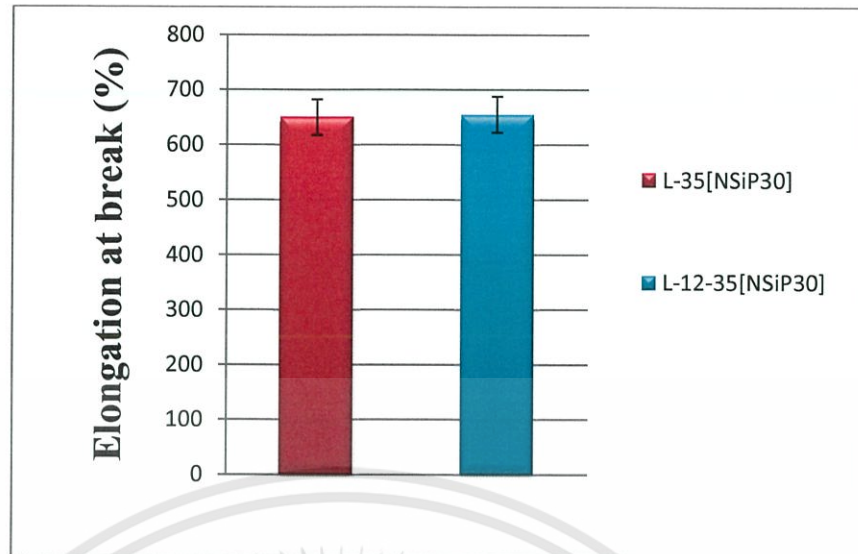
Sample	Mooney (ML (1+4) 100 °C)	M_L (kgf.cm)	M_H (kgf.cm)	t_{s2} (s)	$t_{c(90)}$ (s)	CRI (s^{-1})
L-35[NSiP30]	21.50	0.8	15.5	180	372	0.5
L-12-35[NSiP30]	22.00	0.5	22.2	144	342	0.5

4.2.1 การศึกษาสมบัติเชิงกล

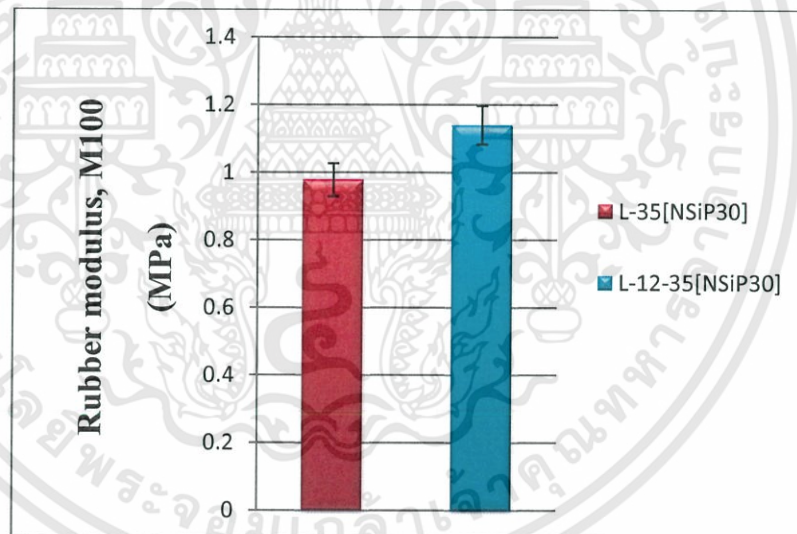
จากรูปที่ 4.11 – 4.12 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด พบว่ายางธรรมชาติที่ผสมผงหนึ่งที่มีการแปรขนาดอนุภาคของผงหนึ่งที่มีขนาดน้อยกว่า 35 mesh และระหว่าง 12-35 mesh พบว่า ยางธรรมชาติที่ผสมผงหนึ่งขนาดน้อยกว่า 35 mesh ค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดใกล้เคียงกับค่าของยางธรรมชาติที่ผสมผงหนึ่งขนาด 12 - 35 mesh ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคของผงหนึ่งมีขนาดต่างกันเพียงเล็กน้อย เพราะหนึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยจากการแยกขนาดของอนุภาคของผงหนึ่ง ใช้ตระแกรงร่อนที่มีลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยม ดังนั้นจึงไม่สามารถแยกขนาดความยาวของผงหนึ่งได้ ซึ่งอาจทำให้ปริมาณขนาดอนุภาคของผงหนึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ยางธรรมชาติที่ผสมผงหนึ่งที่มีขนาดน้อยกว่า 35 mesh และระหว่าง 12-35 mesh ค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดจึงมีต่างกันเล็กน้อย



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีขนาด น้อยกว่า 35 mesh และ 12-35 mesh



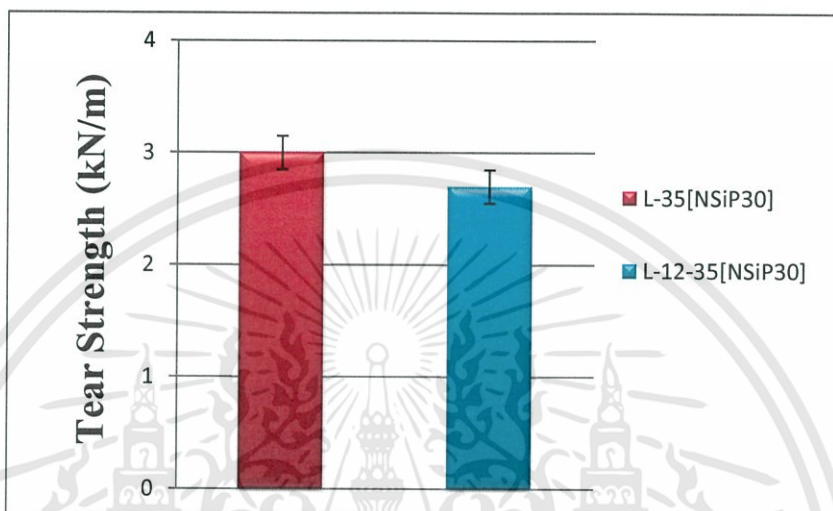
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมที่มีขนาดน้อยกว่า 35 mesh และ 12-35 mesh



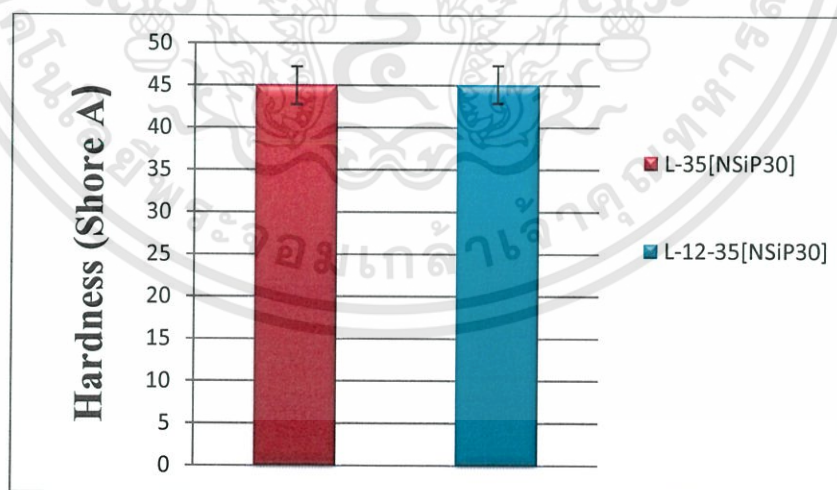
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยางที่ 100% ดึงยืดของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมที่มีขนาดน้อยกว่า 35 mesh และ 12-35 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 – 4.15 พิจารณาค่าความแข็งแรงนิกษาค มอดูลัส 100 % และค่าความแข็งแรงกของยางธรรมชาติที่ผสมผงหนังที่มีการแปรขนาดอนุภาคของผงหนังที่มีขนาดน้อยกว่า 35 mesh และระหว่าง 12-35 mesh มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกัน เนื่องจากอนุภาคของผงหนังมีขนาดต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีสาเหตุเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้ค่าความแข็งแรงนิกษาค มอดูลัส 100 % และค่าความแข็งแรงกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัย



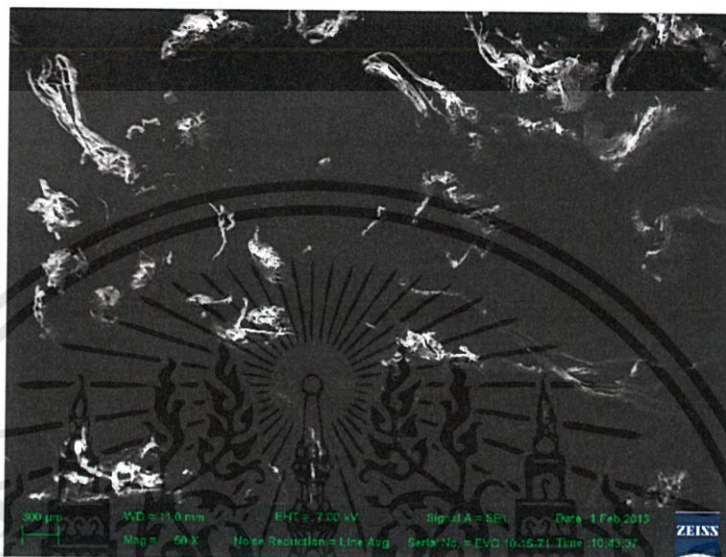
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงนิกษาคของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมที่มีขนาดน้อยกว่า 35 mesh และ 12-35 mesh



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติมที่มีขนาดน้อยกว่า 35 mesh และ 12-35 mesh

4.2.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา

ศึกษาสัณฐานวิทยาของผงหนังที่มีอนุภาคน้อยกว่า 35 mesh และ 12-35 mesh ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังรูปที่ 4.16



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.16 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาขนาดอนุภาคของผงหนัง (ก) น้อยกว่า 35 mesh (ข) 12-35 mesh กำลังขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 แสดงลักษณะวิทยาขนาของผงหนึ่งขนาดน้อยกว่า 35 mesh และขนาด 12-35 mesh พบว่าลักษณะของอนุภาคของผงหนึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใย ซึ่งมีขนาดความยาวในแต่ละอนุภาคไม่เท่ากันทั้งขนาดน้อยกว่า 35 mesh และขนาด 12-35 mesh อาจส่งผลให้พื้นที่ผิวที่เกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติมีค่าเฉลี่ยของแต่ละขนาดเท่ากัน

จากผลการทดลองที่ 4.2 พบว่า ขนาดอนุภาคของผงหนึ่งขนาดน้อยกว่า 35 mesh และขนาด 12-35 mesh มีผลต่อสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัย ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้ได้ทั้งสองขนาด ซึ่งการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ร้อนแยกขนาดออกมาได้ ดังนั้นในการทดลองต่อไป จึงเลือกใช้ผงหนึ่งที่มีขนาดอนุภาค 12-35 mesh ซึ่งมีปริมาณมากกว่าขนาดน้อยกว่า 35 mesh ตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณขนาดอนุภาคของผงหนึ่งที่ร้อนได้ใน 1 กิโลกรัม

ขนาด (mesh)	น้อยกว่า 35 mesh	12-35 mesh	มากกว่า 12 mesh
ปริมาณ (กรัม)	155	345	500

4.3 การศึกษาปริมาณผงหนึ่งที่มีผลต่ออย่างธรรมชาติ

การใช้ปริมาณผงหนึ่งมีผลโดยตรงกับประสิทธิภาพการเสริมแรง และผลของการลดต้นทุน ดังนั้นจึงมีการศึกษาการเติมผงหนึ่งในปริมาณ 0, 30, 60, 90 และ 120 phr ว่ามีผลต่อสมบัติเชิงกลอย่างไร ในการทดลองเลือกใช้ขนาดผงหนึ่ง 12-35 mesh ใส่ PEG และไซเลน (Si-69) (ตามอัตราส่วนปริมาณผงหนึ่ง)

4.3.1 การศึกษาพฤติกรรมกรรมการเชื่อมโยงยาง

จากงานวิจัยได้ทำการทดสอบหาค่าความหนืดมูนนี่ที่สภาวะ ML (1+4) 100 °C โดยสามารถแสดงค่าความหนืดมูนนี่ ได้ดังตารางที่ 4.2 พบว่าความหนืดมูนนี่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของผงหนึ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของยางผสมสูตรกับปริมาณสารตัวเติม (Filler) เป็นไปตามความสัมพันธ์ของ “สมการของกัธโกลด์” (Guth-Gold equation) กล่าวคือ

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

η_f คือ ความหนืดของยางผสมสารตัวเติม (Filler rubbers)

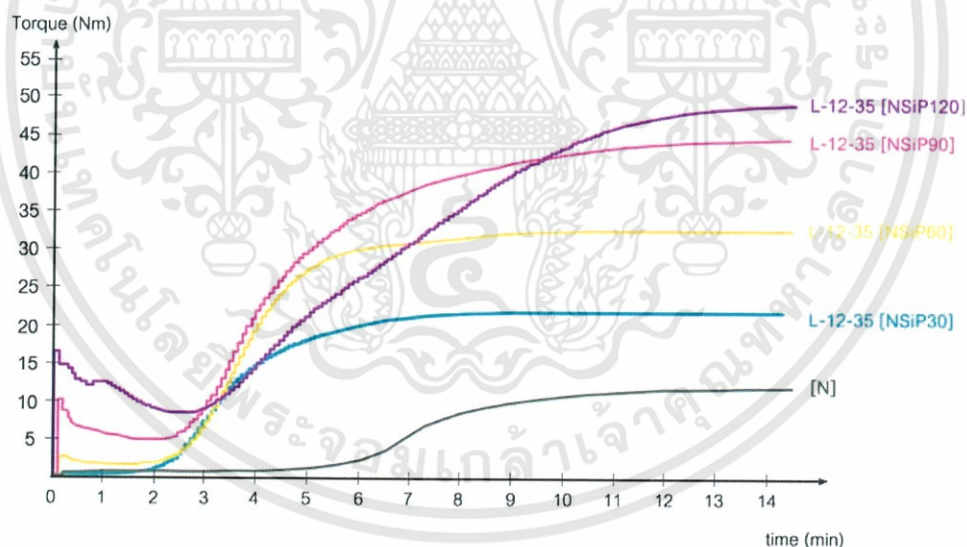
η_u คือ ความหนืดของยางดิบไม่ผสมสารตัวเติม

Ø คือ อัตราส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของสารตัวเติมในยางมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 (ไม่มีหน่วย)

จากสมการจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม (Filler) จะทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางจะแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของผงหนั และเมื่อผสมผงหนัในปริมาณมาก ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของยางลดลง

และเมื่อพิจารณาปริมาณของผงหนัที่มีผลต่อความหนืด พบว่ายางผสมผงหนัที่มีปริมาณผงหนั 0, 30, 60, 90, 120 phr จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงหนัที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมผงหนัลงไปเป็นจำนวนมากจะส่งผลให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี เกิดเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Agglomerates) ความหนืดที่วัดได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น

ผลของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติการเชื่อมโยงของยาง นับเป็นปัจจัยสำคัญอีกข้อหนึ่งที่มีผลต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพที่เหมาะสมตรงตามความต้องการได้ นอกเหนือจากสมบัติเชิงกล ปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมโยง คือเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) และเวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) ดัชนีอัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index) จากงานวิจัยได้ทดสอบด้วยเครื่องเอ็มดีอาร์ (Moving die rheometer, MDR) ที่อุณหภูมิ 150 °C



รูปที่ 4.17 พฤติกรรมการเชื่อมโยงยาง แสดงผลของปริมาณการใส่ผงหนั

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพฤติกรรมกรเชื่อมโยงแสดงผลของปริมาณการใส่ผงหนั

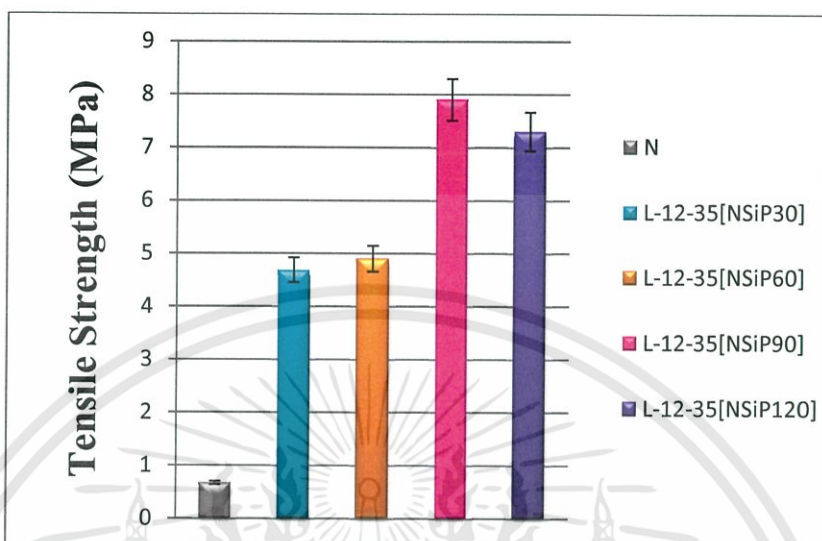
Sample	Mooney (ML (1+4) 100 °C)	M_L (kgf.cm)	M_H (kgf.cm)	t_{s2} (s)	$t_{c(90)}$ (s)	CRI (s ⁻¹)
[N]	22.7	0.8	11.9	378	600	0.4
L-12-35[NSiP30]	22.0	0.5	22.2	144	342	0.5
L-12-35[NSiP60]	43.2	1.9	32.1	162	348	0.5
L-12-35[NSiP90]	73.65	5	44	168	540	0.3
L-12-35[NSiP120]	129.4	8.5	48.5	210	630	0.2

จากรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อปริมาณผงหนัเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนืด Mooney มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการของกัธโกลด์ (Guth-Gold equation) และจากพฤติกรรมกรเชื่อมโยง พบว่ามีค่าเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเวลาเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) เพิ่มขึ้นมาก และค่าดัชนีอัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) จะลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณผงหนั เนื่องจากผงหนัที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การผสมทำได้ยาก ส่งผลให้ PEG อาจปกคลุมพื้นผิวของผงหนัไม่ทั่ว ผงหนัจึงสามารถดูดสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยงซิงค์สเตียเรต (ซิงค์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิงค์สเตียริก) และตัวเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (MBTS และ TMTD) ทำให้บางส่วนเกิดการเชื่อมโยงช้า

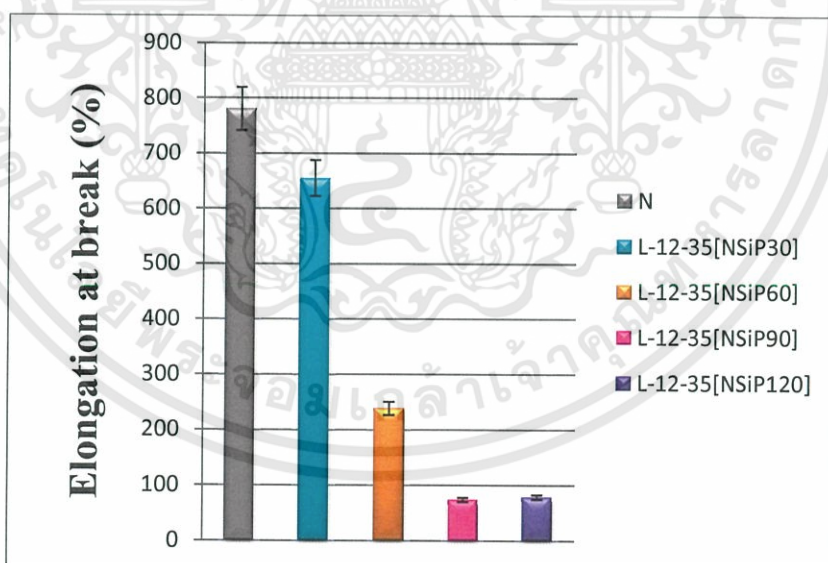
4.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของผงหนั โดยศึกษาที่อัตราส่วนของปริมาณผงหนัเท่ากับ 0, 30, 60, 90 และ 120 phr ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.18-4.22 พบว่าค่าความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากผงหนัมีลักษณะเป็นเส้นใยซึ่งมีความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) สูง ส่งผลให้สามารถเสริมแรงได้ดี อย่างไรก็ตามสมบัติเหล่านี้มีค่าสูงสุดที่ 90 phr แล้วลดลงเมื่อใส่ปริมาณผงหนัสูงเกินไปที่ 120 phr เริ่มพบช่องว่างในสารผสม เนื่องจากการผสมทำได้ยากทำให้มีช่องว่างเกิดเป็นรอยตำหนิ (Defect) ขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลเหล่านี้ลดลง การใส่ผงหนัในปริมาณมากจะทำให้ผงหนัเข้าไปแทรกตัวในสายโซ่ของยาง

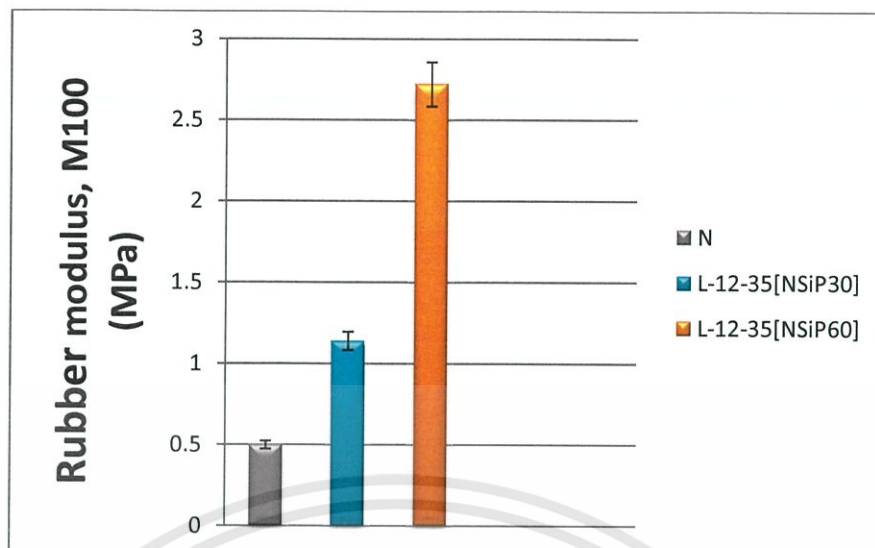
ธรรมชาติทำให้สายโซ่ของยางไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ปริมาณผงหนังกี่เพิ่มขึ้นจะแปรผันตรงกับปริมาณ Si-69 ซึ่งมีอะตอมของกำมะถัน จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งกดของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติลดลง



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังกี่เป็นสารตัวเติม โดยใส่ปริมาณผงหนังกี่เท่ากับ 0, 30, 60, 90 และ 120 phr

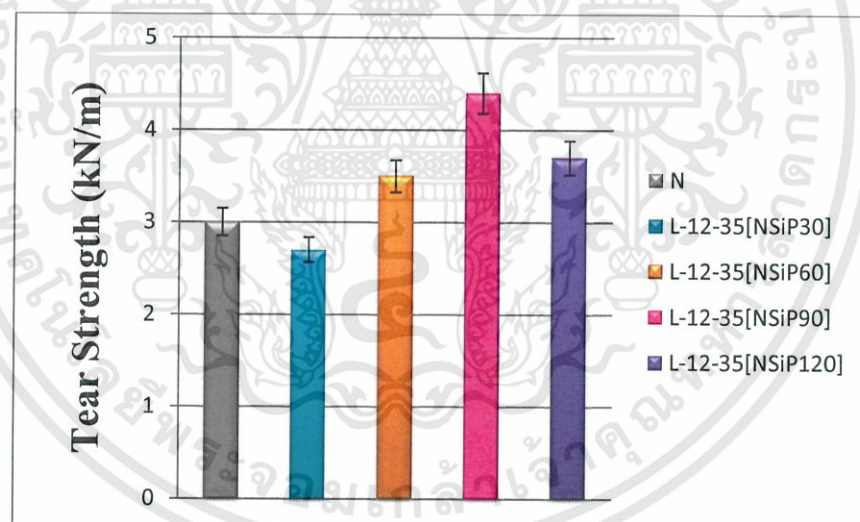


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังกี่เป็นสารตัวเติม โดยใส่ปริมาณผงหนังกี่เท่ากับ 0, 30, 60, 90 และ 120 phr

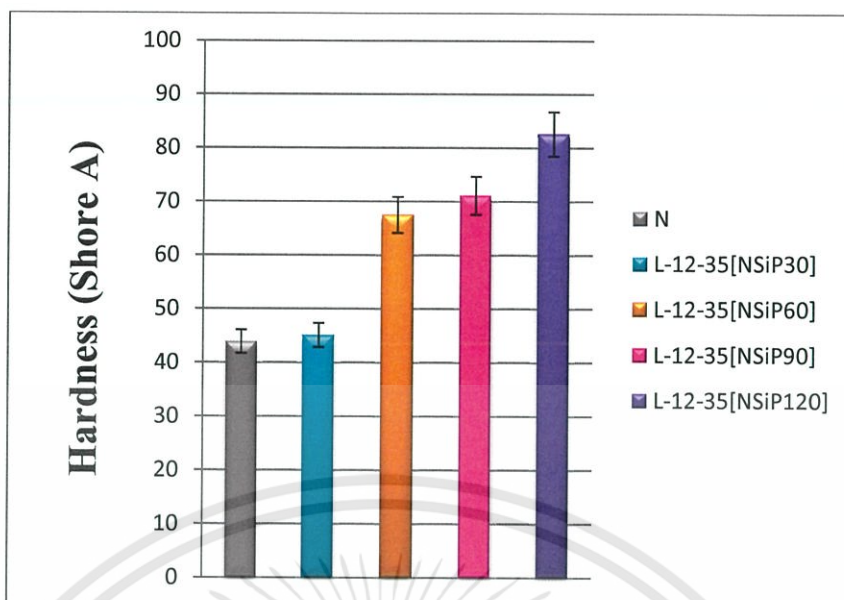


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืดของยางที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติม โดยใส่ปริมาณผงหนังเท่ากับ 0, 30 และ 60 phr

หมายเหตุ ยางสูตรผสม L-12-35[NSiP90] และ L-12-35[NSiP120] ไม่มีค่ามอดุลัส 100% เนื่องจากทำการดึงยืดได้ไม่ถึง 100 %



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติม โดยใส่ปริมาณผงหนังเท่ากับ 0, 30, 60, 90 และ 120 phr



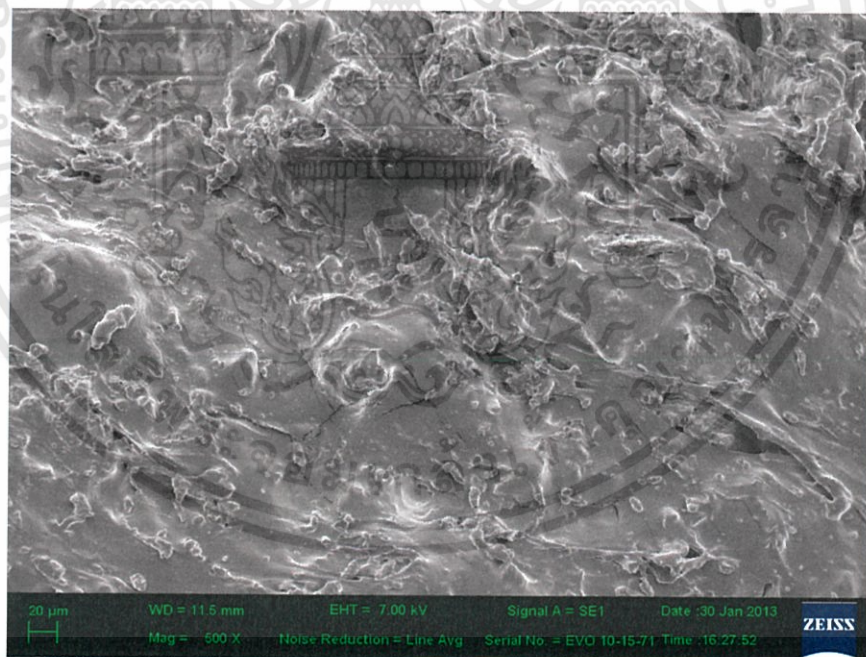
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติม โดยใส่ปริมาณผงหนังเท่ากับ 0, 30, 60, 90 และ 120 phr

4.3.3 สันฐานวิทยา

ทำการศึกษาสันฐานวิทยาของพื้นผิวตัวอย่างยางผสมผงหนัง ที่ทำการหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากรูปที่ 4.23 – 4.26 พบว่าหนังมีการกระจายตัวที่ดีในยาง และไม่เกิดช่องระหว่างรอยต่อ แต่เมื่อปริมาณผงหนังเพิ่มขึ้นการกระจายตัวของหนังในยางจะลดลง เช่น ใช้ผงหนังปริมาณ 120 phr ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ผงหนังปริมาณมากจะทำให้ผงหนังจับตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) ทำให้ยางไม่สามารถคลุมผงหนังได้ทั่วถึง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง

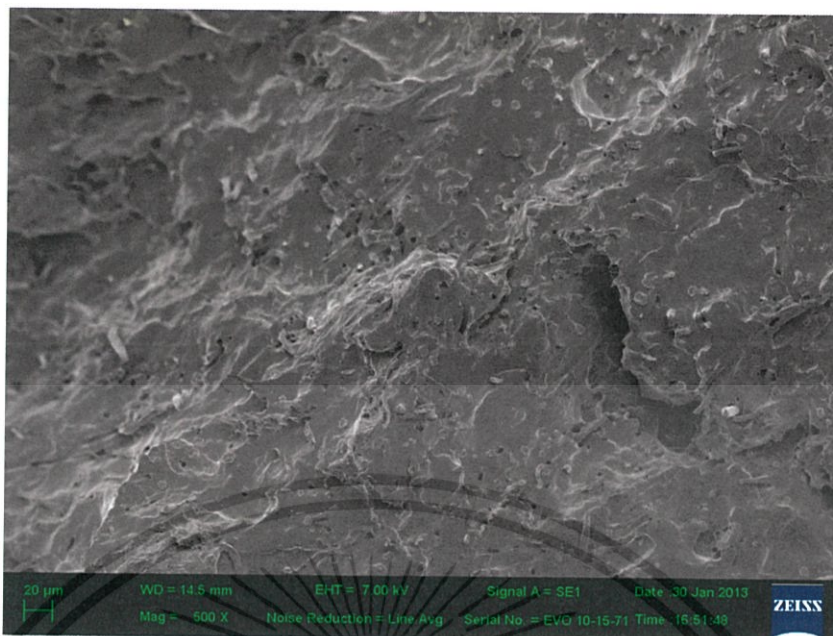


รูปที่ 4.23 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังกขนาดระหว่าง 12-35 mesh ปริมาณ 30 phr กำลังขยาย 500 เท่า

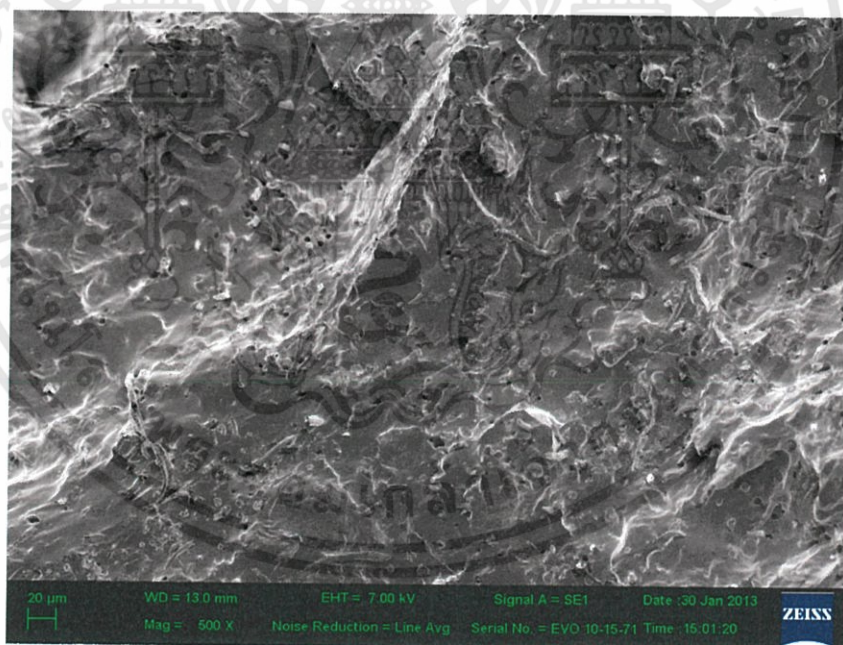


รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังกขนาดระหว่าง 12-35 mesh ปริมาณ 60 phr กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังกขนาดระหว่าง 12-35 mesh ปริมาณ 90 phr กำลังขยาย 500 เท่า

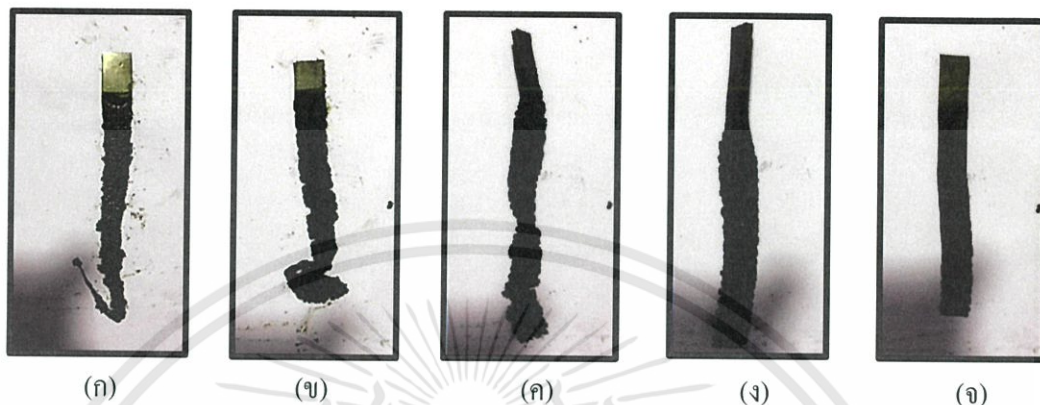


รูปที่ 4.26 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้ผงหนังกขนาดระหว่าง 12-35 mesh ปริมาณ 120 phr กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 สมบัติการลามไฟ

หนังเป็นวัสดุที่สามารถดูดความชื้นได้สูง ความชื้นในหนังจะเป็นตัวช่วยทำให้การลามไฟช้าลง แต่เนื่องจากหนังและยางเป็นวัสดุที่สามารถติดไฟจึงไม่สามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง ซึ่งลักษณะการลามไฟแสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ลักษณะการลามไฟของยางผสมสูตร (ก) [N] (ข) L-12-35[NSiP30] (ค) L-12-35[NSiP60] (ง) L-12-35[NSiP90] (จ) L-12-35[NSiP120]

ตารางที่ 4.6 อัตราเร็วในการลามไฟ

สูตร	อัตราเร็วการลามไฟ (m/min)
[N]	0.28
L-12-35[NSiP30]	0.24
L-12-35[NSiP60]	0.20
L-12-35[NSiP90]	0.17
L-12-35[NSiP120]	0.10

จากรูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณผงหนัง จะทำให้ชิ้นงานที่ถูกเผาไหม้มีอัตราการเผาไหม้ลดลง เนื่องจากผงหนังมีหมู่มีขั้วอยู่ภายใน โครงสร้าง ชิ้นงานจึงสามารถดูดความชื้นไว้ได้ ทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการเผาไหม้ มีลักษณะเป็นก้อนขมำ ส่วนชิ้นงานที่มีปริมาณผงหนังน้อย จะมีลักษณะการเผาไหม้คล้ายยาง

จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าผงหนังจะทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้การดึงยืดต่ำลง ซึ่งจะขึ้นกับการนำไปใช้งาน ถ้าต้องการรับแรงดึงสามารถใช้สูตรที่ใส่ผงหนังปริมาณ

90 - 120 phr ได้ แต่ถ้าต้องการใช้ในงานที่มีการดึงยืดอาจใช้สูตรที่ใส่ผงหนังปริมาณ 30 - 60 phr และผงหนังยังสามารถช่วยลดอัตราการลามไฟได้ เมื่อมีปริมาณผงหนังเพิ่มขึ้น

4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบของยางผสมสูตรที่ใช้ซิลิกาและผงหนังเป็นสารตัวเติม

ยางและสารเคมี	ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ (กรัม)	ราคาวัตถุดิบ (บาท/กิโลกรัม)
ยางแท่ง STR-5L	300	94
silica	(90, 180, 270, 360)	33
Leather flour	(90, 180, 270, 360)	2
Si-69	(3, 6, 9, 12)	700
Polyethylene glycol	(3, 6, 9, 12)	75
Antioxidant-Wingstay	3	248
Lubricant-Naphthanic oil	21	60
Activator-Stearic acid	6	35
Activator-ZnO	15	35
Accelerator-MBTS	3	115
Accelerator-TMTD	1.5	114
Curing agent-Sulfur	4.5	16

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบราคาสารตัวเติมชนิดซิลิกาและผงหนังที่ผสมในยาง

ปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ (กรัม)	ชนิดสารตัวเติม		ค่าใช้จ่ายที่ลดลง (%)
	ราคายางผสมสูตรที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม (บาท/กิโลกรัม)	ราคายางผสมสูตรที่ใช้ผงหนังเป็นสารตัวเติม (บาท/กิโลกรัม)	
30	81.56	77.31	5.21
60	76.98	66.76	13.28
90	73.72	60.73	17.62
120	71.30	56.18	21.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางที่มีผงหนังเป็นสารตัวเติม (Filler) เมื่อทำการเติม PEG (Poly(ethylene glycol)) และสารคู่ควบไซเลน (Si-69, Coupling agents) ขนาดอนุภาคผงหนัง และปริมาณที่แตกต่างกัน ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ที่มีผลต่อยางที่มีผงหนังเป็นสารตัวเติม โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ผลของ PEG และ สาร คู่ควบไซเลน (Si-69) ในยางผสมผงหนัง

จากการทดลองพบว่า การใช้ PEG มีผลอย่างมีนัยต่อลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมผงหนัง ทั้งเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) เวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) และดัชนีอัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index) รวมทั้งสมบัติเชิงกล อย่างไรก็ดี การใช้ PEG ร่วมกับสารคู่ควบไซเลน Si-69 ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางสูงสุด เช่น ความแข็งแรงดึง เบอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด ค่าความแข็งแรงฉีกขาด มอดูลัส 100 % และค่าความแข็งกด เมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ใส่สารคู่ควบ และ PEG หรือใส่อย่างเดียวอย่างหนึ่ง

- ผลของขนาดอนุภาคผงหนังที่มีต่อสมบัติของยาง

จากการทดสอบสมบัติการเชื่อมโยงของผงหนังขนาดต่างกัน (น้อยกว่า 35 mesh และ 12-35 mesh) พบว่าลักษณะการเชื่อมโยงแตกต่างกันเล็กน้อย ผงหนังขนาดเล็กกว่า (น้อยกว่า 35 mesh) เกิดการเชื่อมโยงช้ากว่า และมีแรงบิดสูงสุด (M_{HR}) ต่ำกว่า จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า ผงหนังขนาดเล็กให้ค่าสมบัติเชิงกลต่ำกว่าเล็กน้อย

- ผลของปริมาณผงหนังที่มีต่อสมบัติของยาง

จากการทดสอบสมบัติการเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณผงหนัง 30, 60, 90 และ 120 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงหนัง ทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเวลาเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) เพิ่มขึ้นมาก และค่าดัชนีอัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) จะลดลง พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดลดลง ค่ามอดูลัสของยางที่ 100% ค่าความแข็งแรงฉีกขาด และความแข็งกด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงหนัง

- การศึกษาทัศนฐานวิทยาของยางผสมผงหนัง

จากการศึกษาทัศนฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าผงหนังสามารถกระจายได้ดีในวัฏภาคยาง NR และมีการยึดเกาะระหว่างผงหนังกับเมตริกซ์ยางได้ดี อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณผงหนังเพิ่มขึ้นจนถึง 120 phr การกระจายตัวของหนังในยางจะลดลง และพบช่องว่างในของผสม

- การศึกษาการลามไฟของยางผสมผงหนัง

จากการทดสอบการลามไฟในแนวตั้งพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณผงหนัง จะทำให้ชิ้นงานมีอัตราการเผาไหม้ลดลงและทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการเผาไหม้ มีลักษณะเป็นก้อนเขม่า

5.2 ความเป็นได้ในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยาง

จากการทำการทดลองพบว่า ผงหนังสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในการลดต้นทุน และเสริมแรง (Reinforcing filler) เมื่อใส่ PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69 จากการศึกษาสมบัติการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล ทัศนฐานวิทยา และการลามไฟ พบว่าหนังมีการกระจายตัวที่ดีในยาง มีสมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อใช้ปริมาณการเติมไม่สูงเกินไปเช่น 30-60 phr อย่างไรก็ตามสามารถใส่ผงหนังเพื่อลดต้นทุนได้สูงถึง 120 phr ถ้าไม่ต้องการสมบัติเชิงกลที่สูงมาก

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยเป็นการศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของยางที่มีผงหนังเป็นสารตัวเติม (Filler) เมื่อทำการเติม PEG (Polyethylene glycol) สารคู่ควบ (Coupling agents) ขนาดอนุภาคผงหนัง และปริมาณที่แตกต่างกัน สามารถสรุปข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไปดังนี้

- ศึกษาผลของชนิดของหนังที่นำมาเป็นสารตัวเติม เช่น หนังฟอกฝาด
- ศึกษาปริมาณการใช้ PEG และสารคู่ควบไซเลน Si-69
- ศึกษาสมบัติอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น การต้านการขีดถู ความเป็นฉนวนความร้อน เป็นต้น
- ทดลองขึ้นรูปจริง และประยุกต์ใช้งานวัสดุผสมที่ได้เช่น หนังเทียม กระเบื้องยาง พื้นรองเท้า เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www.oie.go.th/academic/unido>
- [2] <http://wps.prenhall.com/wps/media/objects/3312/3391650/blb1202.html>
- [3] อธิธิพล แจ่มชัด. 2551. เทคโนโลยีการยาง. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีการยาง กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] ทิพวรรณ พรปัญญาวุฒิและ ศิริพร ประสพชัยชนะ “การนำไปโอพอลิเมอร์เป็นสารตัวเติม เพื่อประยุกต์ใช้งานการกระจายตัวของไวนิล” โครงการงานพิเศษหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] อรุญา สรวารี. 2546. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 5-11
- [6] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. 2534. วิทยาศาสตร์เส้นใย. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] องค์การฟอกหนัง กระทรวงกลาโหม. 2548. กระบวนการฟอกหนัง. [Online]. Available [www_tto_or_th.htm](http://www.tto_or_th.htm)
- [8] W. Holfman, **Rubber Technology Handbook**. Hanser, Munich, 1989
- [9] National Health Museum. 2006. **Collagen and elastin**. [Online]. Available : <http://www.garlandscience.com/ECB/about.html>
- [10] สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย. พฤศจิกายน. 2540
- [11] Mu,et.al. 2003. “**Towards zero discharge of chromium-containing leather waste through improve alkali hydrolysis.**” Waste Management. 23(6) : 835-843
- [12] Rydin, S. 2547. **Leather Production Technology and Possibilities for Cleaner Production**. [Online]. Available : <http://patantex.net/postscript/leather.doc>.
- [13] Kumar, M. 1992. “**Potentials of Converting Tannery Solid Wastes into Glue and Other Utilizable by-product.**” 1-26. Seminar on The Profitability of Clean Technology in The Leather Tanning Industrials. Samutprakarn. Thailand.
- [14] Zhuang, Y.H. 1992. “**Profitability of Protein Recovery from Leather Shavings of High Level Chromium Contents.**” 1-21. Seminar on The Profitability of Clean Technology in The Leather Tanning Industrials. Samutprakarn. Thailand

- [15] NOSB TAP Materials Database Compiled by OMRI. “**Leather Meal.**” 2000. [Online] :
Available:<http://www.ams.usda.gov/nop/NationalList/TAPReviews/LeatherMeal.pdf>.
- [16] E.P.Plueddemann, 1982.**Silane coupling agent**, Newyork, Plenum Publishing Corporation
- [17] “**Silane coupling agent**” [Online]. Available : <http://micchem.com/products/SilaneCouplingAgents.htm>
- [18] A. Ansarifar, H. P. Lim, R. Nijhawan, 2004. “**Assessment of the effect of a bifunctional organosilane on the bound rubber and properties of some natural compounds.**” Int.J. Adhesion and Adhesives, Vol. 24, pp. 9-22
- [19] อธิพิพล แจ่มชัด. 2544. **พอลิเมอร์คอมโพสิต**. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [20] Fire Testing Technology, **Fire Testing**, 2553, [Online].Available : <http://www.fire-testing.com/html/instruments/ul94ad.htm>
- [21] ASTM D635 2000. “**Standard Test Method for Measuring the Comparative Burning Characteristics of Solid Plastics in a Horizontal Position.**” Philadelphia : American Society for Testing and materials
- [22] ASTM D3801. “**Standard Test Method for Measuring the Comparative Burning Characteristics of Solid Plastics in a Vertical Position.**” Philadelphia : American Society for Testing and materials., 2000
- [23] Building Automation Products, **UL-94 Testing**, [Online].Available : [www.bapihvac.com /CatalogPDFs/I_Application/UL94_Rating.pdf](http://www.bapihvac.com/CatalogPDFs/I_Application/UL94_Rating.pdf)
- [24] Hendell Hull and Associations, **Oxygen index Test**, [Online].Available : http://www.wendellhull.com/oxygen_index_oi.php
- [25] A. Przepiorkowska. 2008. “**Buffing dust a filler of carboxylated butadiene-acrylonitrile rubber and butadiene-acrylonitrile rubber**” Journal of Hazardous Materials. 151 : 348 - 355
- [26] อาชีวนัน แกสมาน, พนิดา สุภัทรพงศ์ และณัฐนิ โล่ห์พัฒนานนท์. “**อิทธิพลของผงหนังก่อสมบัติของยางธรรมชาติผสมเอทิลีนไวนิลอะซิเตท**” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิตภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

- [27] นางสาวจันทนา เทศเจริญ. 2549. “การสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบจากขวดพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วกับเศษผงหนังสัตว์ เพื่อใช้ทดแทนไม้หมอนรางรถไฟ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [28] อรุษา สิริคุตต์. 2549. “การสังเคราะห์วัสดุประกอบคล้ายหนังจากพีวีซีและผงหนังสัตว์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [29] Ciullo & Hewitt. 1999. “The Rubber Formulary”. United State of America : Noyes Publications. Page 112,153





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

แสดงสูตรตัวอย่างของยางผสมสูตร

ตารางที่ ก.1 แสดงตัวอย่างปริมาณการใช้ PEG ในยางผสมสูตร

DUROMETER 65 COMPOUND FOR THICK ARTICLES

PPG

SMR CV60		100.0
Hi-Sill 190G		30.0
Ciptane I		20.0
100C Resin		5.0
Tall Oil D30		2.0
ODPA		1.0
Stearic Acid		2.0
PEG 3350		1.0
Zinc Oxide		5.0
Sulfur		3.0
TBBS		3.0
Specific Gravity		1.13
Cure Rate MDR 138C: T50 minutes		13
Cure Rate MDR 138C: T90 minutes		19
Mooney Scorch I21C: T5 minutes		30
Mooney Viscosity, ML100		45
Cure at 138C, minutes	30	120
Durometer	65	69
M300, Mpa	7.3	8.2
Tensile	34	30
Elongation, %	695	620
Aged 170 hours at 80C		
Durometer	70	72
Tensile, Mpa	31	27
Elongation, %	585	525
MG Trouser Tear, kN/m	15	15
PICO Abrasion Index	87	81
Compression Set, 70 hrs.100C. %	79	60
Pendulum Rebound (Z),%: 23C	58	54
100C	71	70
DeMattia Cut Growth, 500%, KC	15	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงตัวอย่างปริมาณการใช้ไซเลน (Si-69) ในยางผสมสูตร

DUROMETER 80 COMPOUND FOR FOOTWEAR

PEG

SSBR 715		50.0
BR 1220		40.0
NR		10.0
Hi-Sil 243LD		60.0
100C Resin		10.0
ODPA		1.0
Silane S169		1.0
Zinc Oxide		1.0
Sulfur		2.0
TBBS		1.5
MBTS		1.0
HMT		2.0
Specific Gravity		1.16
Cure Rate 150°C, T50 minutes		7
Mooney Scorch 121°C, T5 minutes		22
Mooney Viscosity, ML 100		126
Garvey Extrusion Rating		5A
Durometer (20 minutes @ 150°C) @ 23°C/@100°C		80/74
Stress/Strain(13 @ 150°C)		Original AGED 700 HRS @ 90°C
Durometer	76	86
M300, MP	10	
Tensile	19	12
Elongation, %	475	150
Abrasion Indices	PICO @ 23°C	155
	PICO @ 100°C	102
	NBS	201
	DIN (ml)	0.12
MG TROUSER TEAR, kN/m		13
Rose Flex, KC to 500%		50
Dynamic Coefficient of Friction, Wet		0.77
DMA Dynamic Modulus: 1 Hz, 15%		
	E'' at 0°C, MPa	3.1
	Tangent delta at 0°C	0.160
	E' at 30°C	13
Pendulum Rebound (Z), % @ 23°C		48
	@ 100°C	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้