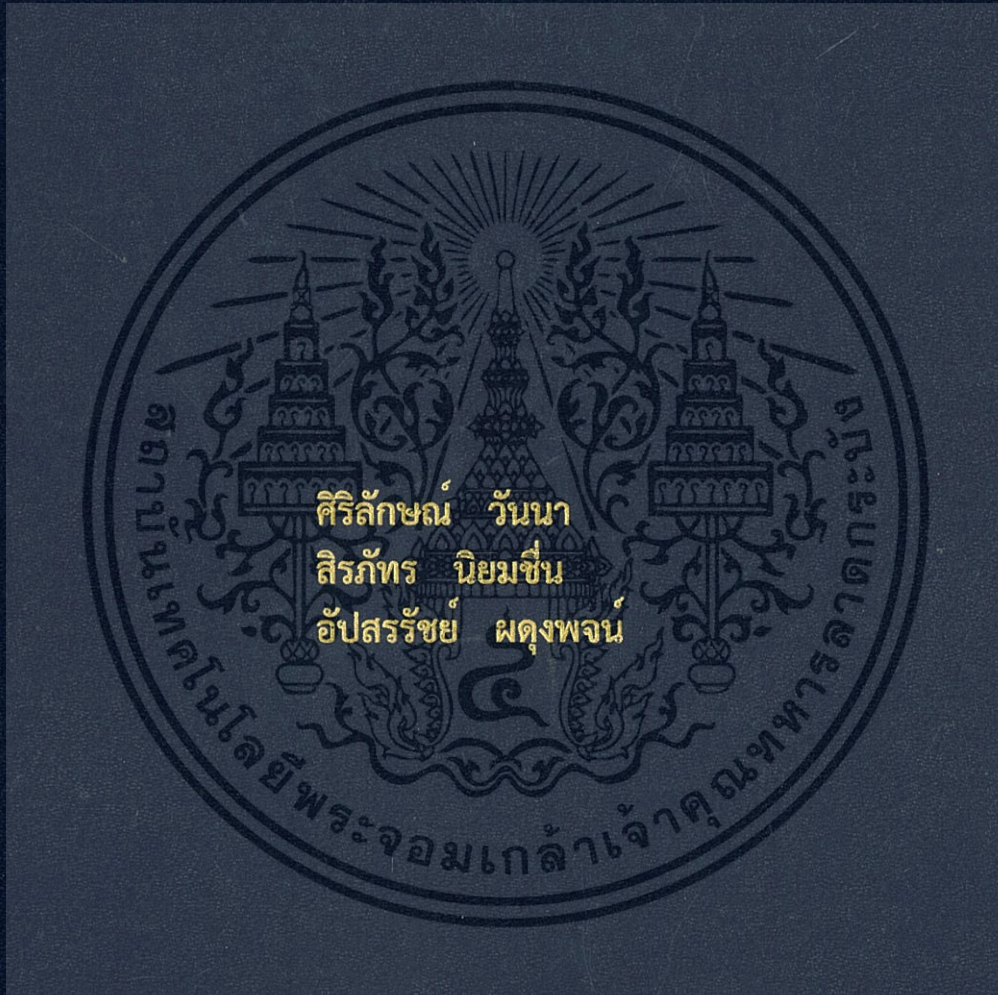


การศึกษาสมบัติความทนทานต่อแสงยูวีและการหดตัวของแผ่น
โฟมยางอีวีเอ

STUDY OF UV RESISTANCE AND SHRINKAGE
PROPERTIES OF FOAM EVA SHEETS



สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาสมบัติความทนทานต่อแสงยูวีและการหดตัวของแผ่น
โฟมยางอีวีเอ

STUDY OF UV RESISTANCE AND SHRINKAGE
PROPERTIES OF FOAM EVA SHEETS



สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF UV RESISTANCE AND SHRINKAGE PROPERTIES OF FOAM EVA SHEETS



SIRILAK WANNA
SIRAPAT NIYOMCHUEN
APSONRAT PHADUNGPOD

A COOPERATIVE EDUCATION SUBMITTED IN PARTIAL
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติความทนทานต่อแสงยูวีและการหดตัวของแผ่นโฟมยางอีวีเอ
Study of UV Resistance and Shrinkage Properties of Foam EVA
Sheets

ชื่อนักศึกษา นางสาวศิริลักษณ์ วันนา รหัสนักศึกษา 57050521
นางสาวสิรภัทร นิยมชื่น รหัสนักศึกษา 57050528
นางสาวอัปสรรัชย์ ผดุงพจน์ รหัสนักศึกษา 57050561

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)


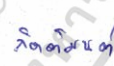


ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2560

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติ
ให้สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ประธานกรรมการ	
ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติคุณ กรรมการ	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติความทนทานต่อแสงยูวีและการหดตัวของแผ่นโฟมยางอีวีเอ		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศิริลักษณ์ วันนา	รหัสนักศึกษา	57050521
	นางสาวสิริภัทร นิยมชื่น	รหัสนักศึกษา	57050528
	นางสาวอัปสรรัชย์ ผดุงพจน์	รหัสนักศึกษา	57050561
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2560		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด		

บทคัดย่อ

สหกิจศึกษานี้เป็นการศึกษาสมบัติความทนทานต่อแสงยูวี และการหดตัวของแผ่นโฟมยางอีวีเอ เพื่อแก้ไขปัญหาของแผ่นโฟมยางอีวีเอให้ได้ตามความต้องการของบริษัท ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการนำอีวีเอและพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ตามสูตรที่ต้องการผสมกับสารเติมแต่งต่าง ๆ ด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่ 90°C เป็นเวลา 13 นาที แล้วผสมต่อด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งที่ 90°C เป็นเวลา 8 นาที นำแผ่นยางผ่านเครื่องรีดกลิ้งเพื่อทำการหล่อเย็นและปรับความหนาของแผ่นยางคอมปาวด์ จากนั้นขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องกดอัด เรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่า โฟมยางอีวีเอ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนสีและการเสื่อมสภาพของแผ่นโฟมยางอีวีเอ โดยศึกษาผลของอัตราส่วนของสารป้องกันยูวี (UV 326 และ UV 70): สารแอนติออกซิแดนต์ (Deox 10 และ Deox 68): ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีต่อสมบัติความทนทานต่อแสงยูวีด้วยการทดสอบการเร่งสภาวะด้วยเครื่องทดสอบที่มีหลอดอัลตราไวโอเลตเอ (UV-A lamp) ในช่วงความยาวคลื่น 315-400 นาโนเมตร เป็นเวลา 400 ชั่วโมง พบว่าแผ่นโฟมยางอีวีเอทุกสูตรไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและการเสื่อมสภาพอย่างชัดเจน เนื่องจากการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพช่วยต่อต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และยับยั้งปฏิกิริยาการสูญเสียหมู่อะซิเตต (Deacetylation) และเพราะ ZnO ช่วยจับกรดอะซิติกและสารแอลดีไฮด์ที่เกิดขึ้น ทั้งนี้แผ่นโฟมยางอีวีเอมีสีดำจากการเติมเขม่าดำ จึงช่วยดูดแสงยูวีและกระจายพลังงาน และเพื่อแก้ไขปัญหาการหดตัวของแผ่นโฟมยางอีวีเอ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ LD2426K:เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (TPE) Engage™ 8100:TPE Engage™ 8450 ต่อการหดตัวของแผ่นโฟมยางอีวีเอ โดยนำไปอบที่ 80°C เป็นเวลา 3

ชีวโม่ง พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการหดตัวของแผ่นโพลียเอทอีเอ คือ ปริมาณของอิลาสโตเมอร์และการเชื่อมโยงในระบบ โดยสูตรที่ 5 ที่มีปริมาณของ LD2426K:Engage™ 8100:Engage™ 8450:CaCO₃ เท่ากับ 55.0:5.0:10.0:30.0 phr มีการหดตัวที่ต่ำที่สุด คือในด้านตามขวางเครื่อง (TD) เท่ากับ 1.35% และด้านตามแนวเครื่อง (MD) เท่ากับ 1.40% และมีความแข็งอยู่ที่ 45 Shore C ตามความต้องการบริษัท เมื่อนำแผ่นโพลียเอทอีเอไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ พบว่า ความแข็งแรงดึง, ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด, ความแข็งแรงฉีกขาด และการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งมีค่าน้อย และสมบัติเชิงกลของทุกสูตรผ่านมาตรฐาน มอก. ของแผ่นโพลียเอทอีเอ 2377-2559

คำสำคัญ: การเสื่อมสภาพ การหดตัว ความทนทานต่อแสงยูวี แผ่นโพลียเอทอีเอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Study of UV Resistance and Shrinkage of EVA Foam Sheets	
Students	Miss Sirilak Wanna	Student ID 57050521
	Miss Sirapat Niyomchuen	Student ID 57050528
	Miss Apsonrat Phadungpot	Student ID 57050561
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2017	
Advisor	Assistant Professor Dr.Suparat Rukchonlatee	
Co-advisor	Associate Professor Dr.Ittipol Jangchud	

Abstract

This coroporative study involved a research on UV resistance and shrinkage of EVA foam sheets as requested by the company. The EVA foam compounds were prepared by mixing EVA, thermoplastic elastomer and other additives using an internal mixer at 90°C for 13 minutes before charging to a two-roll mill and mixing at 90°C for 8 minutes. Then each EVA foam compound was passed through a calendering machine for cooling and thickness adjusting. The compound sheet was further shaped using a compression molder and the product was called as EVA foam sheet. This work was to solve problems on color change and degradation of the EVA foam sheets. By varying the ratios of UV absorber (UV 326 and UV 70):antioxidant (Deox 10 and Deox 68):zinc oxide (ZnO), the UV resistance of EVA foam sheets was examined under accelerating condition in an UV oven (with UV-A lamp 160 watts) in a wavelength range of 315-400 nm for 400 hours. It was found that there was insignificant color change and degradation of all formulas of the EVA foam sheets. This was because the antioxidants protected the deacetylation reaction and also ZnO could react with acetic acid and aldehyde occurred. Additionally, carbon black pigment in the EVA foam sheets could absorb UV and dissipate the energy. In order to solve the shrinkage problem of the EVA foam sheets, the effect of the ratios of low density polyethylene LD2426K: thermoplastic elastomer Engage™ 8100:thermoplastic elastomer Engage™ 8450 was

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

studied by heating the sheet in a hot air oven at 80°C for 3 hours. It was found that the main factors affecting sheet shrinkage was elastomer content and crosslink density. Formula 5, having LD 2426K:Engage™ 8100:Engage™ 8450:CaCO₃ as 55.0:5.0:10.0:30.0 phr, had the lowest shrinkage (1.35% in the transverse direction and 1.40% in the machine direction) with 45 Shore C hardness. This formula 5 was as requested by the company. In addition, other properties, such as tensile strength, %elongation at break, tear strength and change in properties after accelerating condition, were acceptable with Thai Standard of EVA foam sheets No. 2377-2559.

Keywords: Degradation, Shrinkage, UV resistance, EVA foam sheet



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

สหกิจศึกษาเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากผู้มีอุปการะคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ ที่ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษาสหกิจศึกษา คอยให้คำปรึกษา แนะนำตลอดจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และกำลังใจ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท ศรีสำอังก์ ซัพพลายเออร์ จำกัด ที่ให้ความกรุณาเข้าร่วมวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ร่วมกับคณะผู้ทำสหกิจศึกษา ตลอดจนเอื้อเฟื้อสถานที่ สารเคมี วัสดุ อุปกรณ์ต่าง ๆ จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษา ช่วยเหลือและให้ความรู้ด้านวิชาการ

ขอขอบพระคุณ คุณสมหวัง นาโศก และเจ้าหน้าที่ บริษัท ศรีสำอังก์ ซัพพลายเออร์ จำกัด ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและข้อมูลต่าง ๆ ตลอดการทำสหกิจศึกษา

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ประจำอาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่อำนวยความสะดวกตลอดการทำสหกิจศึกษา

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมาก ซึ่งมีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้ด้วย

ศิริลักษณ์ วันนา

สิริภัทร นิยมชื่น

อัปสรรัชย์ ผดุงพจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เอทิลีนไวโนลอะซิเตตโคพอลิเมอร์.....	5
2.2 พอลิเอทิลีน.....	9
2.3 ยางเอทิลีนพรอพิลีน.....	11
2.4 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์.....	12
2.5 สารเติมแต่งสำหรับยาง.....	14
2.5.1 สารเชื่อมโยง.....	14
2.5.2 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง.....	21
2.5.2.1 ซิงค์ออกไซด์.....	21
2.5.2.2 กรดไขมัน.....	22
2.5.3 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ.....	22
2.5.3.1 แอนต็อกซิแดนต์.....	24
2.5.3.2 สารป้องกันแสงยูวี.....	27
2.5.4 สารให้สี.....	32
2.5.5 สารให้ฟอง.....	33
2.6 การหดตัวของพอลิเมอร์.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.1 การจัดเรียงตัวของสายโซ่.....	34
2.6.2 ปริมาณของอิลาสโตเมอร์.....	35
2.6.3 ปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุล.....	35
2.6.4 ระบบการเชื่อมโยงโมเลกุล.....	35
2.6.5 ความเค้นตกค้าง.....	35
2.7 งานวิจัยที่งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	44
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	44
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	49
3.4 วิธีการทดลอง.....	49
3.4.1 การเตรียมยางผสมสูตร.....	49
3.4.2 การผสมยาง.....	51
3.4.3 การรีดยางคอมปาวด์.....	52
3.4.4 การเตรียมชิ้นงาน.....	53
3.4.4.1 การขึ้นรูปแผ่นโฟมยางอีวีเอ.....	53
3.4.4.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแผ่นโฟมยางอีวีเอเพื่อทดสอบ สมบัติความทนทานของต่อแสงยูวีและการเสื่อมสภาพ.....	53
3.4.4.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแผ่นโฟมยางอีวีเอเพื่อทดสอบ การหดตัว.....	54
3.4.4.4 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่น โฟมยางอีวีเอ.....	55
3.4.5 การทดสอบสมบัติของแผ่นโฟมยางอีวีเอที่เตรียมได้	
3.4.5.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	56
3.4.5.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	59
4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความทนทานแสงยูวีและการเสื่อมสภาพของแผ่น โฟมยางอีวีเอ.....	59
4.1.1 การศึกษาชนิดและอัตราส่วนของสารป้องกันยูวี:สารแอนติออกซิ- แดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่มีผลต่อความทนทานแสงยูวี การเสื่อมสภาพ และสมบัติของโฟมยางอีวีเอ.....	59
4.1.1.1 การศึกษาสมบัติความทนทานต่อแสงยูวีและการเสื่อมสภาพ ของแผ่นโฟมยางอีวีเอ.....	60
4.1.1.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของแผ่นโฟม ยางอีวีเอ.....	61
4.1.1.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งของแผ่นโฟมยางอีวีเอ	65
4.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวของแผ่นโฟมยางอีวีเอ.....	
4.2.1 การศึกษาชนิดและปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การ หดตัวและความแข็งของแผ่นโฟมยางอีเอ.....	69
4.2.1.1 การศึกษาผลการหดตัวและความแข็งของแผ่นโฟมยางอีวีเอ สูตรที่ 1 และสูตรที่ 2.....	70
4.2.1.2 การศึกษาผลการหดตัวและความแข็งของแผ่นโฟมยางอีวีเอ สูตรที่ 2 และสูตรที่ 3.....	72
4.2.1.3 การศึกษาผลการหดตัวและความแข็งของแผ่นโฟมยางอีวีเอ สูตรที่ 3 และสูตรที่ 4.....	73
4.2.1.4 การศึกษาผลการหดตัวและความแข็งของแผ่นโฟมยางอีวีเอ สูตรที่ 4 และสูตรที่ 5.....	74
4.2.2 การศึกษาชนิดและปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ที่มีผลต่อความหนาแน่น ของแผ่นโฟมยางอีวีเอ.....	76
4.2.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลและกายภาพของแผ่นยางโฟมยางอีวีเอ.....	79
4.2.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งของแผ่นโฟมยางอีวีเอ.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
เอกสารอ้างอิง.....	87
คำรับรองเล่มสหกิจศึกษา.....	90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบสมบัติตามปริมาณไวโนลอะซิเทตในโครงสร้าง.....	6
2.2 การแบ่งชนิดของพอลิเอทิลีนตามลักษณะโครงสร้างของสายโซ่.....	9
2.3 หน้าที่ของตัวดูดยูวีและ HALS.....	32
3.1 สูตรที่ใช้ในการทดลองความทนทานของสีแผ่นโฟมยางอีวีเอต่อแสงยูวี.....	50
3.2 สูตรที่ใช้ในการทดลองการหดตัวของแผ่นโฟมยางอีวีเอ.....	51
4.1 ผลการทดสอบความต้านทานของแผ่นโฟมยางอีวีเอต่อแสงยูวี โดยการเติมสาร ป้องกันแสงยูวี:สารแอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	61
4.2 ค่าความแข็งแรงดึงก่อนและหลังทดสอบการบ่มแรงของแผ่นโฟมยางที่มีอัตราส่วนของ สารป้องกันแสงยูวี:สารแอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน.....	66
4.3 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการบ่มแรงของแผ่นโฟมยางอีวีเอที่มี อัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี:สารแอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน...	66
4.4 ค่าความแข็งแรงก่อนและหลังการบ่มแรงของแผ่นโฟมยางอีวีเอที่มีอัตราส่วนของสาร ป้องกันแสงยูวี:สารแอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน.....	67
4.5 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มแรงของแผ่นโฟมยางอีวีเอที่มีอัตราส่วน ของสารป้องกันแสงยูวี:สารแอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน.....	68
4.6 ตารางสรุปค่าการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลเทียบกับมาตรฐาน มอก. แผ่นยาง ปูพื้น 2377-2559.....	68
4.7 ปริมาณเนื้อพอลิเมอร์ของแผ่นโฟมยางอีวีเอ สูตรที่ 1 และสูตรที่ 2.....	70
4.8 ปริมาณเนื้อพอลิเมอร์แผ่นโฟมยางอีวีเอ สูตรที่ 2 และสูตรที่ 3.....	72
4.9 ปริมาณเนื้อพอลิเมอร์และสารตัวเติมของแผ่นโฟมยางอีวีเอของสูตรที่ 3 และ สูตรที่ 4.....	73
4.10 ปริมาณเนื้อพอลิเมอร์และปริมาณสารตัวเติมของแผ่นโฟมยางอีวีเอของสูตรที่ 4 และสูตรที่ 5.....	75
4.11 ค่าความแข็งแรงดึงก่อนและหลังทดสอบการบ่มแรงของแผ่นโฟมยางอีวีเอและ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง.....	82
4.12 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังทดสอบการบ่มแรงของแผ่นโฟมยางอีวี และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดก่อนและหลังทดสอบการบ่มแรงของแผ่นโฟมยางอีวีเอและ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง.....	83
4.14 ค่าความแข็งก่อนก่อนและหลังทดสอบการบ่มแรงของแผ่นโฟมยางอีวีเอและ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง.....	84
4.15 ตารางสรุปเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลเทียบกับมาตรฐาน มอก. แผ่นยางปูพื้น 2377-2559.....	84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อีวีเอ.....	1
1.2 แผ่นรองพื้นเจ็ตสกี.....	2
2.1 โครงสร้างของอีวีเอ.....	5
2.2 กลไกการเชื่อมสภาพของอีวีเอผ่านปฏิกิริยา Deacetylation.....	7
2.3 กลไกการเชื่อมสภาพของแผ่นอีวีเอผ่านปฏิกิริยาการตัดสายโซ่.....	8
2.4 โครงสร้างของพอลิเอทิลีน.....	9
2.5 ความแตกต่างทางโครงสร้างของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิด.....	11
2.6 โครงสร้างของยาง EPDM.....	12
2.7 กลไกการเชื่อมโยงยางด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์.....	16
2.8 กลไกอัตราเร็วในการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์.....	17
2.9 อนุพลอิสระของเปอร์ออกไซด์ที่แตกตัวที่ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยง.....	17
2.10 กลไกการสลายตัวของสาร Dicumyl peroxide.....	18
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยางกับ สมบัติเชิงกลบาง ประการของยาง.....	20
2.12 การเชื่อมสภาพของยางแบบตัดสายโซ่และการเชื่อมโยง.....	23
2.13 วัฏจักรการเชื่อมสภาพของพอลิเมอร์.....	25
2.14 กลไกการกำจัดอนุมูลอิสระของแอนติออกซิแดนท์ปฐมภูมิ.....	26
2.15 กลไกการกำจัดอนุมูลอิสระของแอนติออกซิแดนท์ทุติยภูมิ.....	26
2.16 ความสัมพันธ์ของพลังงานที่ดูดซับโดยโมเลกุลกับความยาวคลื่นของแสงที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นพลังงานและความยาวคลื่นที่สามารถทำลายพันธะต่าง ๆ ได้.....	28
2.17 การแบ่งชนิดของยูวี.....	29
2.18 กลไกการเชื่อมสภาพของพอลิเมอร์ด้วยแสง.....	30
2.19 ปริมาณการใช้ตัวดูดยูวีและHALSที่เหมาะสม.....	31
3.1 แผงผังการดำเนินการ.....	45
3.2 ตัวอย่างชิ้นงานแผ่นโฟมยางอีวีเอสำหรับทดสอบความทนทานต่อแสงยูวี.....	54
3.3 ตัวอย่างชิ้นงานแผ่นโฟมยางอีวีเอสำหรับทดสอบการหดตัว.....	55
3.4 ชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ และรูปปีกนก.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อแสงยูวี.....	58
4.1 ค่าความแข็งแรงดึงของแผ่นโพลีเอทิลีนที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี:สารแอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน.....	62
4.2 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของแผ่นโพลีเอทิลีนที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี:สารแอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน.....	63
4.3 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นโพลีเอทิลีนที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี:สารแอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน.....	63
4.4 ค่าความหนาแน่นของแผ่นโพลีเอทิลีนที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี:สารแอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน.....	64
4.5 ค่าความแข็งแรงของแผ่นโพลีเอทิลีนที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี:สารแอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน.....	65
4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีนของสูตรที่ 1 และสูตรที่ 2.....	71
4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีนของสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3.....	72
4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีนของสูตรที่ 3 และสูตรที่ 4.....	74
4.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีนของสูตรที่ 4 และสูตรที่ 5.....	75
4.10 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีนของสูตรที่ 1, 2, 3, 4 และสูตรที่ 5.....	76
4.11 ความหนาแน่นของแผ่นโพลีเอทิลีนก่อนนำไปทดสอบการหดตัว.....	77
4.12 ความหนาแน่นของแผ่นโพลีเอทิลีนหลังจากนำไปทดสอบการหดตัว.....	78
4.13 ความหนาแน่นของแผ่นโพลีเอทิลีนก่อนและหลังจากนำไปทดสอบการหดตัว.....	78
4.14 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ของแผ่นโพลีเอทิลีน.....	80
4.15 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation) ของแผ่นโพลีเอทิลีน.....	80
4.16 ค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear Strength) ของแผ่นโพลีเอทิลีน.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

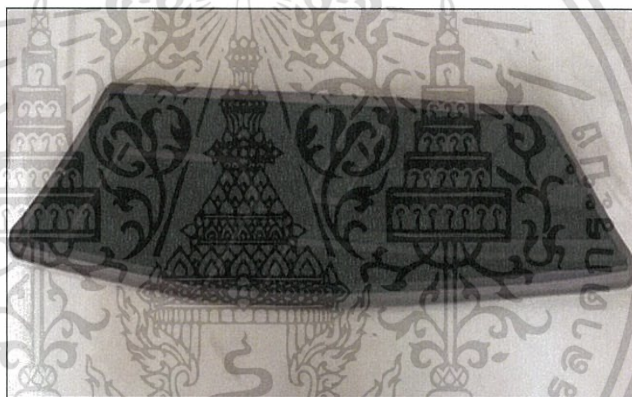
ปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตโฟมยางอีวีเอและพื้นรองเท้าอีวีเอเป็นที่แพร่หลายและเจริญเติบโตเป็นอย่างมาก เนื่องจากอีวีเอมีความนุ่ม ยืดหยุ่น น้ำหนักเบา ทนทาน ทนต่อแรงกระแทก ทำความสะอาดง่าย ทำลวดลายได้หลากหลาย อีวีเอจึงเป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ผลิตเป็นสินค้าในงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามอีวีเอมีข้อจำกัดในการใช้งานบางประการ คือ การเสื่อมสภาพของอีวีเอเมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อน และจากสภาพภูมิอากาศในการใช้งาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของอีวีเอ จากการศึกษาพบว่าเมื่อผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง อีวีเอจะเกิดสีเข้มขึ้นเปลี่ยนเป็นสีเหลืองจนถึงน้ำตาล เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า “Yellowing หรือ EVA browning” [1] โดยปกติอีวีเอที่เก็บไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 เดือนจะไม่เกิดการเสื่อมสภาพ ในขณะที่อีวีเอที่นำมาใช้งานกลางแจ้งจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองพร้อมทั้งมีผลิตภัณฑ์ (By product) ประเภทกรดอะซิติกและสารแอลดีไฮด์เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยา Deacetylation และการตัดสายโซ่ โดยระดับความเข้มของสีอีวีเอจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่เริ่มเกิดการเสื่อมสภาพ, ชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งที่ใช้รวมถึงสภาพแวดล้อมในการใช้งาน [2] นอกจากนี้ยังเกิดการหดตัว, มีกลิ่นไม่พึงประสงค์ ฯลฯ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำจากอีวีเอ เช่น ผลิตภัณฑ์ใช้งานภายนอก ได้แก่ พื้นโฟมยางกันกระแทก, พื้นรองเท้าและแผ่นยางปูพื้น เป็นต้น



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อีวีเอ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริษัท ศรีสำอางค์ ซัพพลายเออร์ จำกัด มีความประสงค์ที่จะเพิ่มความสามารถทางการตลาด ให้สามารถแข่งขันเชิงธุรกิจทั้งในและต่างประเทศได้มากขึ้น จึงได้ขยายตลาดทางการค้าไปยังกลุ่ม เอเชีย-แปซิฟิก โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ส่งออก คือ แผ่นโฟมยาง ซึ่งนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องเจ็ต สกี เป็นที่ทราบโดยทั่วไปเจ็ตสกีเป็นกีฬาทางน้ำ ประเภทกลางแจ้ง ลักษณะการใช้งานของแผ่นโฟม ยางจำเป็นต้องเจอทั้งน้ำ, แสงแดดจากดวงอาทิตย์, ออกซิเจนและสภาพแวดล้อม ส่งผลให้แผ่นโฟม ยางเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลาประมาณ 6 เดือน โดยปัญหาที่พบคือแผ่นโฟมยางมีสี ที่ซีดเร็ว ไม่ทนทานต่อแสงยูวี ทำให้ระยะเวลาในการใช้งานแผ่นโฟมยางไม่ได้ตามความต้องการของ ลูกค้า นอกจากนี้บริษัทยังพบปัญหาผลิตภัณฑ์ไม่ผ่านมาตรฐาน ทำให้ไม่สามารถส่งออกได้ เนื่องจาก แผ่นโฟมยางอีวีเอหดตัวมาก (สูงกว่า 2%) ซึ่งทำให้แผ่นโฟมยางไม่ยึดติดตะแกรง ที่ใช้ในการติดตั้ง แผ่นโฟมยางอีวีเอในการปูพื้น จึงได้ทำการพัฒนาสูตร เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวทั้งสองประการ ให้เป็นไปตาม ความต้องการของบริษัท



รูปที่ 1.2 แผ่นรองพื้นเจ็ตสกี

จากการศึกษาการพัฒนาอย่างธรรมชาติบนดินฟ้าอากาศและรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) สำหรับผลิตภัณฑ์ภายนอกอาคาร พบว่าสารแอนตี้ออกซิแดนต์ (Antioxidant) ประเภท N,N'-diphenyl-1,4-phenylenediamine, Irganox, Irgafos และสารเพิ่มความเสถียรต่อแสงยูวี (UV - stabilizer) คือ Tinuvin มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการทนต่อแสงยูวีเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของ ยางธรรมชาติ [3] ดังนั้นจึงได้นำงานวิจัยดังกล่าวมาพัฒนาแผ่นโฟมยางให้ทนทานต่อแสงยูวี โดย ศึกษาชนิดและปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพจากแสงยูวี ได้แก่ สารแอนตี้ออกซิแดนต์ทั้ง ชนิดปฐมภูมิ คือ Tetrakis methylene-3 (3', 5'-di-tert-butyl-4'-hydroxyphenyl propionate) methane [DEOX 10] และ ชนิดทุติยภูมิ คือ Tris (2,4-di-tert-butylphenyl) phosphite [DEOX 68] อย่างละ 0.05 phr. และ 0.10 phr. ซึ่งสารแอนตี้ออกซิแดนต์จะต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ไม่เกิดการเสื่อมสภาพของสีและเพิ่มอายุการใช้งานให้ยาวนานขึ้น สารกำจัดอนุมูลอิสระ ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hindered amine stabilizer คือ Bis (2, 2, 6, 6- tetramethyl - 4 – piperidyl) sebacate) [UV-70 SABOSTAB] จะทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระและสลายสารประกอบเปอร์ออกไซด์ เพื่อปกป้องพอลิเมอร์ไม่ให้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสงแดด เปราะ และมีสีซีด และ สารดูดซับแสงยูวี คือ (2'-Hydroxy -3' -tert -butyl -5'-methyl-phenyl)-5-chlobenzotriazole) [Benzotriazole, UV 326] ซึ่งจะดูดซับรังสีในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต ทำให้แสงยูวีไม่ส่งผลกระทบต่อพันธะของสายโซ่ในโมเลกุลพอลิเมอร์ นอกจากนี้การเติมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ยังมีส่วนช่วยในการจับกรดอะซิติกและแอลดีไฮด์ที่เกิดจากปฏิกิริยา Deacetylation เพื่อป้องกันการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์

นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวของพอลิเมอร์ ซึ่งได้แก่ ปริมาณของอีลาสโตเมอร์ จากการศึกษาพบว่าเมื่อมีการผสมกันของสองเมทริกซ์ ระหว่างพลาสติกกับยาง ความสามารถในการหดตัวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณส่วนของยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อให้ความร้อน ส่วนที่เป็นยางจะสามารถเกิดการคืนตัวได้เนื่องจากความยืดหยุ่น (Elastic recovery) ส่งผลให้เกิดการหดตัว นอกจากนี้ ทำให้มีปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุล (Crosslink content) มากขึ้น การหดตัวจึงเพิ่มสูงขึ้น และการหดตัวอาจเกิดจากความเป็นผลึกของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ซึ่งหากพอลิเมอร์มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสูง อาจส่งผลให้การหดตัวสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจากผลการศึกษาดังกล่าวจึงได้นำมาเป็นแนวทางในการแก้ปัญหการหดตัวของแผ่นยางปูพื้น โดยการเพิ่มปริมาณของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ, เพิ่มปริมาณของอีวีเอ และลดปริมาณของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ เพื่อสามารถผลิตแผ่นโพนยางอีวีเอได้ตามความต้องการของลูกค้า

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

1. แก้ไขปัญหาความทนทานต่อแสงยูวีและการเสื่อมสภาพของแผ่นโพนยางอีวีเอ ต้องสามารถทนยูวีเอที่ 400 ชั่วโมง และมีความแข็งในช่วง 50-55 Shore C โดยศึกษาปริมาณของการใส่สารป้องกัน แสงยูวี สารแอนติออกซิแดนต์และการเติมสารเติมแต่งในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน
2. แก้ไขปัญหการหดตัวของแผ่นโพนยางอีวีเอ ต้องหดตัวน้อยกว่า 1.5% และมีความแข็งในช่วง 40-45 Shore C โดยศึกษาชนิดและปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ที่มีผลต่อการหดตัวของแผ่นโพนยางอีวีเอ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ตอนที่ 1 ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของแผ่นโพนยางอีวีเอที่ทนต่อแสงยูวี โดยมีปัจจัยศึกษาดังต่อไปนี้

- เปรียบเทียบสมบัติโพนยางอีวีเอที่ใส่สารป้องกันแสงยูวีปริมาณ 0.05, 0.10 และ 0.40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปรียบเทียบสมบัติของแผ่นโฟมยางอีวีเอที่ใส่สารแอนตี้ออกซิแดนต์ 0.00, 0.05 และ 0.10 phr
- เปรียบเทียบสมบัติของแผ่นโฟมยางอีวีเอที่ใส่ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 2.30, 3.00 และ 4.00 phr

ตอนที่ 2 ศึกษาความสามารถในการหดตัว ความแข็งของแผ่นโฟมยางอีวีเอ โดยมีปัจจัยศึกษาต่อไปนี้

- เปรียบเทียบการเติมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (TPE) Engage™ 8100 และ Engage™ 7467
- เปรียบเทียบปริมาณของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LD2426K) ที่ 30, 35, 45 และ 55 phr
- เปรียบเทียบปริมาณของเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA 8038) ระหว่าง 20 และ 25 phr
- เปรียบเทียบปริมาณของ TPE Engage™ 8100 ที่ 0, 5, 10, 15 และ 25 phr
- เปรียบเทียบปริมาณของ TPE Engage™ 8450 ที่ 10, 15 และ 20 phr

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

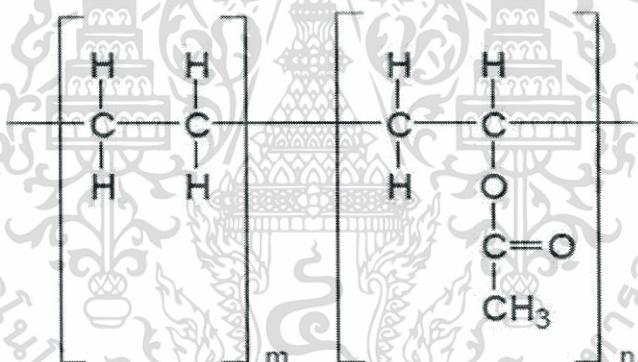
1. เพื่อให้ทราบถึงวิธีการปรับปรุงสูตรและกระบวนการผลิตแผ่นโฟมยางที่เหมาะสมให้ได้แผ่นโฟมยางที่สามารถทนทานต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต มีระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น และลดการหดตัว ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ส่งเสริมการผลิตแผ่นยางอีวีเอในระดับอุตสาหกรรม ให้สามารถแข่งขันกับจีนธุรกิจทั้งในและต่างประเทศได้มากขึ้น เพื่อจะนำมาซึ่งการลดต้นทุนและตอบสนองความต้องการของลูกค้า
3. สามารถนำความรู้ที่ได้มาพัฒนาในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยางอีวีเอ เพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์

เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymers, EVA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟินส์ เกิดจากการทำพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของสารเอทิลีนมอนอเมอร์ (Ethylene monomer) กับสารไวนิลอะซิเตตมอนอเมอร์ (Vinyl acetate monomer) โดยลักษณะโมเลกุลเป็นสายยาวของเอทิลีนและมีไวนิลอะซิเตตเกาะกระจายแบบสุ่มบนสายโซ่โมเลกุล ในลักษณะโครงสร้างโคพอลิเมอร์แบบไม่เป็นระเบียบ (Random copolymer) เนื่องจากสารชนิดนี้เกิดจากการรวมกันของมอนอเมอร์ 2 ชนิดคือ เอทิลีนเป็นเนื้อหลักกับไวนิลอะซิเตตเป็นหมู่ฟังก์ชัน ดังนั้นสมบัติของอีวีเอจึงเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของไวนิลอะซิเตตในโมเลกุล [4]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอีวีเอ [5]

สมบัติทั่วไป

- เป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดใสจนถึงขุ่น
- มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณ 0.926-0.950
- ค่าการหักเห 1.480 ~ 1.510
- จุดเปราะ (Brittle point) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -70°C
- จุดอ่อนตัว (Softening point) อยู่ระหว่าง $60-80^{\circ}\text{C}$
- อุณหภูมิการสลายตัว $229-230^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าความแข็งกด (Hardness) Shore D เท่ากับ 90-95
- ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับ 2.9-19.6 MPa
- ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) เท่ากับ 500-700%
- มีเสถียรภาพทางเคมีที่ดีและความต้านทานต่อโอโซน
- ความต้านทานต่อน้ำมันต่ำ
- นิ้ม ยืดหยุ่นได้ดี
- ใส มันวาง
- ขึ้นรูปได้ง่าย
- ขึ้นรูปและปิดผนึกได้ด้วยความร้อน
- โค้งงอได้ดีโดยไม่ต้องใช้พลาสติกไซเซอร์

การประยุกต์ใช้งาน

- เอทิลีนไวนิลอะซิเตตเป็นพลาสติกที่นำมาประยุกต์ เช่น ฟิล์มรัดของชนิดหัดได้ ทางการแพทย์ชนิดใช้ครั้งเดียว กาวหลอมด้วยความร้อน (Hot melt adhesives) ของเด็กเล่น ฉนวนหุ้มลวดไฟฟ้า
- ใช้ในงานการผลิตรองเท้าและเบาะรองนั่ง [4]

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติตามปริมาณไวนิลอะซิเตตในโครงสร้าง [5]

ปริมาณไวนิลอะซิเตตมาก	ปริมาณไวนิลอะซิเตตน้อย
ความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนลดลง	ความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนมากขึ้น
จุดหลอมเหลวของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตลดลง	จุดหลอมเหลวของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตสูงขึ้น
ค่ามอดุลัสของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตลดลง	ค่ามอดุลัสของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตสูงขึ้น
ความแข็งของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตลดลง	ความแข็งของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมากขึ้น
สภาพขั้วของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตสูงขึ้น	สภาพขั้วของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตลดลง
ความสามารถในการป้องกันแก๊สซึมผ่านของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตลดลง	ความสามารถในการป้องกันแก๊สซึมผ่านของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตเพิ่มขึ้น
ความทนทานต่อแรงกระแทกของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมากขึ้น	ความทนทานต่อแรงกระแทกของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมากขึ้น

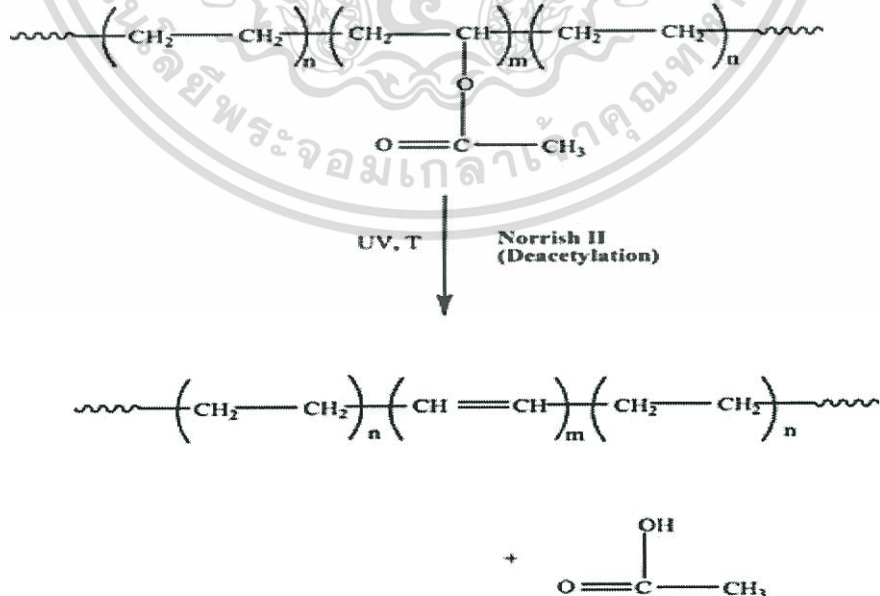
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ปริมาณไวนิลอะซิเตตมาก	ปริมาณไวนิลอะซิเตตน้อย
ความทนทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์ของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตลดลง	ความทนทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์ของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมากขึ้น
เอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีความใสมากขึ้น	เอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีความใสน้อยลง

การเสื่อมสภาพของอีวีเอ

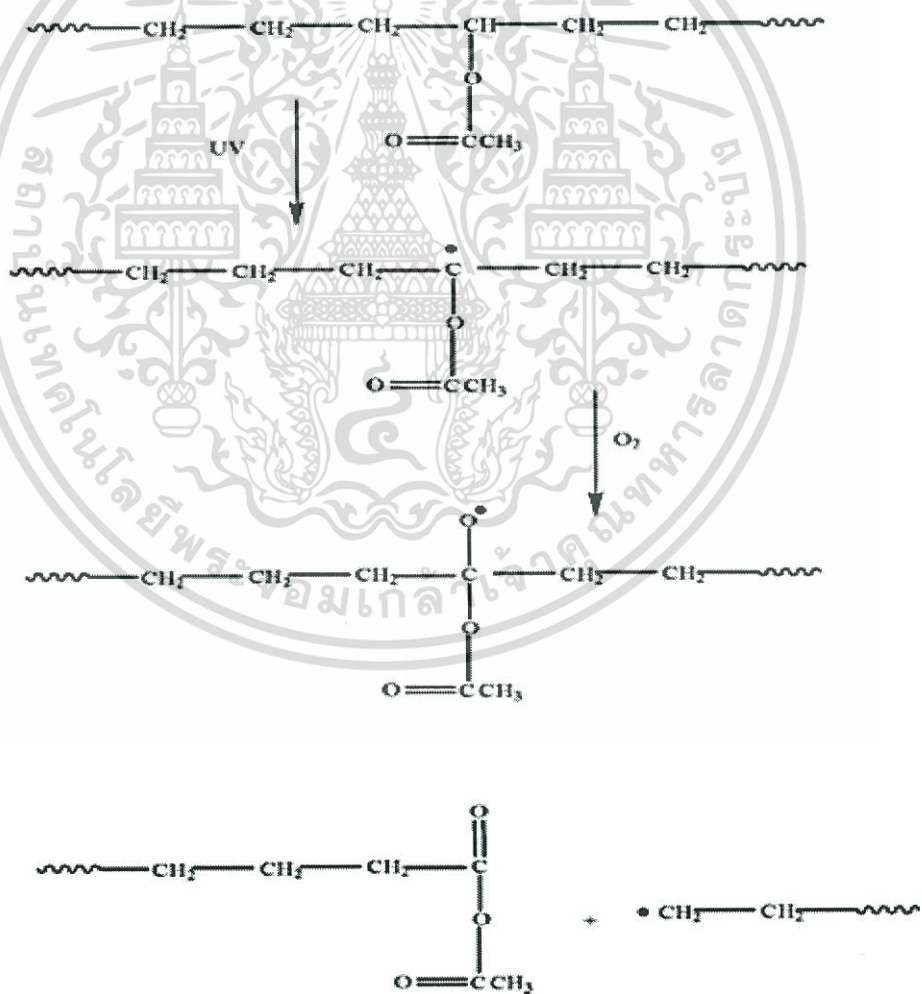
การเสื่อมสภาพของอีวีเอนั้นถือเป็นปัญหาสำคัญในการใช้งานอีวีเอในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีอีวีเอเป็นองค์ประกอบ เพราะการเสื่อมสภาพของอีวีเอทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีผลิตภัณฑ์ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสีของอีวีเอจากใส ไม่มีสี เป็นสีเหลืองหรือสีน้ำตาลเมื่อเจอความร้อนหรือแสงยูวี โดยปกติการเสื่อมสภาพของอีวีเอ เมื่อได้รับความร้อนหรือแสงยูวีนั้นเกี่ยวข้องกับกลไกปฏิกิริยาเคมีที่หลากหลาย รวมไปถึง Norrish type I และ Norrish type II โดยปฏิกิริยา Norrish type II คือกลไกการเกิด Deacetylation ที่หมู่อะซิเตต (Acetate) ตรงบริเวณสายโซ่กิ่งของอีวีเอ ทำให้หมู่อะซิเตตถูกกำจัดออกจากโมเลกุลสายโซ่อีวีเอ ผลของปฏิกิริยาทำให้เกิดโมเลกุลพอลิอิน (Polyene) และกรดอะซิติกเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By product) โครงสร้างคอนจูเกตของโมเลกุลพอลิอินเปรียบเสมือนเป็นโครโมฟอร์ สามารถดูดกลืนแสงได้จึงก่อให้เกิดการเปลี่ยนสีของอีวีเอ [6]



รูปที่ 2.2 กลไกการเสื่อมสภาพของอีวีเอผ่านปฏิกิริยา Deacetylation [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการเสื่อมสภาพผ่านปฏิกิริยา Deacetylation อีวีเอยังสามารถเกิดการเสื่อมสภาพผ่านกลไกปฏิกิริยาการตัดสายโซ่หรือสายโซ่ขาด โดยกลไกจะเหมือนกับการเสื่อมสภาพของพอลิพรอ-พิลีน (Polypropylene) การเสื่อมสภาพของอีวีเอแบบตัดสายโซ่ อาจเกิดขึ้นผ่านการก่อตัวของอนุมูลอิสระบนคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary carbon) ในโมเลกุลอีวีเอ คาร์บอนตติยภูมิค่อนข้างมีความเสถียรเนื่องจากผลของความเกะกะ (Steric effect) และผลของการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนผ่านพันธะ (Inductive effect) จากสายโซ่กิ่งของหมู่อะซิเตต ดังนั้นปฏิกิริยานี้จึงเกิดขึ้นมากในทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) เกิดการแตกออกของโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีอนุมูลอิสระเป็นโมเลกุลเดี่ยวซึ่งทำให้มีสายโซ่พอลิเมอร์อีวีเอสั้นลงและเกิดอนุมูลอิสระชนิดปฐมภูมิขึ้น และการเกิดการเชื่อมโยงระหว่างอนุมูลอิสระของคาร์บอนตติยภูมินั้นไม่สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากความสามารถในการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระนั้นต่ำ โดยมีผลมาจาก Steric effect ขนาดใหญ่ของหมู่อะซิเตต [6]

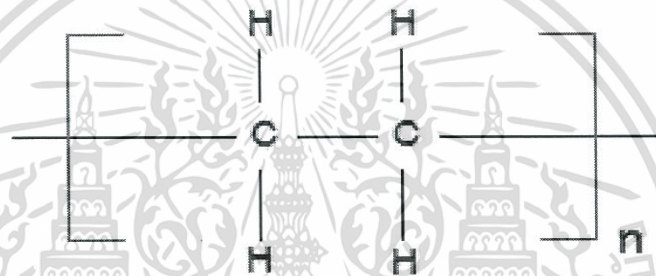


รูปที่ 2.3 กลไกการเสื่อมสภาพของอีวีเอผ่านปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เกิดจากการพอลิเมอไรเซชันของแก๊สเอทิลีนโดยใช้กระบวนการที่แตกต่างกัน ทำให้ได้ PE ชนิดต่าง ๆ จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้องพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องพอลิเมอร์สามารถพองตัวและละลายได้ในพาราไซลีน (p-Xylene) เดกเคน (Decan) และเดกคาลิน (Decalin) เป็นต้น โดยทั่วไป PE มีสีขาวขุ่นโปร่งแสง มีความลื่นมันในตัวเอง เมื่อสัมผัสจึงรู้สึกลื่น ยืดหยุ่นได้ดี ไม่มีกลิ่น และรส มีความเหนียว ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดีมาก ใสสีผสมได้ง่าย มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ดี [7]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของพอลิเอทิลีน [8]

ตารางที่ 2.2 การแบ่งชนิดของพอลิเอทิลีนตามลักษณะโครงสร้างของสายโซ่

ชนิด	โครงสร้างของสายโซ่	ความเป็นผลึก	กระบวนการผลิต	ความหนาแน่น (g/cm ³)	การใช้งาน
LDPE	เชิงเส้น/มีโซ่กิ่งมาก	~ 50%	ใช้ความดันสูง	0.91-0.93	ขึ้นรูปขวด, หีบห่ออาหาร, ของเล่น
LLDPE	เชิงเส้น/มีโซ่กิ่งน้อย	> 50%	ใช้ความดันต่ำ	0.92-0.94	ถุงพลาสติก, ของเล่น
HDPE	เชิงเส้น	< 90%	ใช้ความดันต่ำ	0.95-0.97	ใช้ทำถุง, หีบห่อและท่อน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

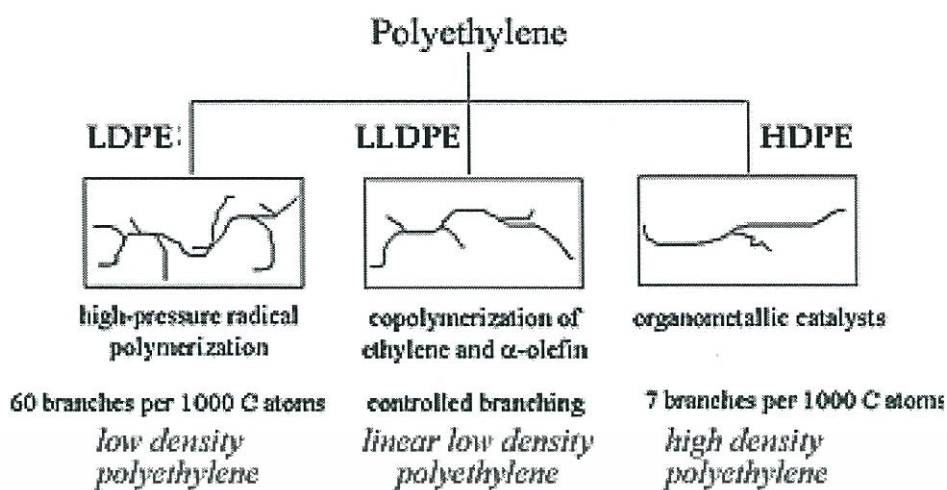
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เป็นพอลิเมอร์ที่เหนียวและยืดหยุ่นได้ดี ทนต่อการกรอบแตก มีความนิ่ม แต่ใสไม่เท่าพลาสติกชนิด PP มีความแข็งแรงทนทานน้อยกว่า HDPE และทนความร้อนได้ไม่มาก แต่ทนสารเคมีได้ดี ทนอุณหภูมิสูงถึง 95°C ในช่วงสั้น ๆ ได้ โดย LDPE หลอมตัวที่ 120°C และทนความเย็นได้ถึง -50°C LDPE มีสีขาวขุ่น โปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว มีความเหนียวและยืดหยุ่น เหมาะสำหรับผลิตแผ่นฟิล์มต่าง ๆ เช่น ถุงเย็น, ถุงพลาสติก, ของเด็กเล่น และ LDPE มีเครื่องหมายสัญลักษณ์ในการใช้ Recycle คือ หมายเลข 4 [9]

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่น ซึ่งมีกิ่งสั้น มีความหนาแน่นของตำแหน่งของสายโซ่ที่มีระยะห่างที่ชัดเจน จึงทำให้ LLDPE เป็นพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงโมเลกุลเป็นระเบียบกว่า LDPE (ความยาวของกิ่งและตำแหน่งของกิ่งเป็นแบบสุ่ม) ความเป็นระเบียบของโครงสร้างของกิ่งใน LLDPE ได้มาจากการใช้มอนอเมอร์ร่วม เช่น บิวเทน (Butane), พรอไพลีน (Propylene), เฮกเซน (Hexane) เป็นต้น LLDPE มีความนิ่ม นิยมนำมาทำเป็นแผ่นฟิล์มหรือแผ่นพลาสติก ซึ่งอาจใช้ตัวเดียวหรือผสมกับ LDPE เพื่อจุดประสงค์ในการเพิ่มความเหนียว [9]

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรง มีอุณหภูมิการอ่อนตัวและปริมาณความเป็นผลึกสูงกว่า PE ชนิดอื่น ๆ โครงสร้างทางเคมีที่เป็นกิ่งน้อย แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง จึงมีค่าความหนาแน่นสูง ส่งผลให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น ทนสารเคมีและตัวทำละลายได้ดีกว่า LDPE ทนต่อสภาพอากาศดีพอสมควร มีความยืดหยุ่นต่อแรงกระทบกระแทก ไม่แตกร้าวง่าย ป้องกันการซึมผ่านของความชื้นได้สูง แต่อากาศสามารถซึมผ่านได้ ไม่เหมาะบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ใช้การอัดอากาศ HDPE มีสีขาวขุ่น โปร่งแสง แสงผ่านได้น้อยกว่า LDPE และ LLDPE สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ โดยเฉพาะการผลิตภาชนะบรรจุที่เตรียมจากการเป่าจากแม่พิมพ์ (Blow molding) เนื่องจากหดตัวในแม่พิมพ์ได้ดี ทำให้สามารถปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย HDPE มีเครื่องหมายสัญลักษณ์ในการใช้ Recycle คือ หมายเลข 2 [9]



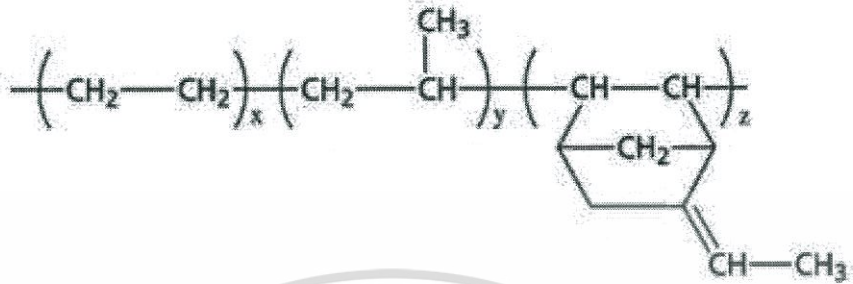
รูปที่ 2.5 ความแตกต่างทางโครงสร้างของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิด [10]

2.3 ยางเอทิลีนพรอพิลีน

ยางเอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene-Propylene Rubber, EPM and EPDM) ซึ่งเกิดจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ของเอทิลีนกับพรอพิลีน จะได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน และมีสมบัติเป็นยางเรียกว่า ยาง EPM เนื่องจากโมเลกุลของยางชนิดนี้ไม่มีส่วนที่ไม่อิ่มตัว (ไม่มีพันธะคู่) ดังนั้นยางชนิดนี้จึงมีสมบัติเด่นในด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน โอโซน และสารเคมี อย่างไรก็ตาม ข้อเสียหลักของยางชนิดนี้คือไม่สามารถเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur, S) เหมือนยางทั่ว ๆ ไปได้ จึงต้องใช้สารประเภทเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ในการเชื่อมโยง ซึ่งมีราคาแพง ยุ่งยาก ปัจจุบันได้มีการพัฒนาโดยการเติมมอนอเมอร์ตัวที่สามคือ ไดอีนชนิดไม่คอนจูเกต (Nonconjugated diene) ที่มีพันธะคู่สองพันธะที่ไม่สลับกัน การที่มีพันธะคู่สองพันธะเมื่อใช้พันธะหนึ่งในการเกิดพอลิเมอร์ร่วมทำให้ยังเหลือพันธะคู่ที่ไม่อิ่มตัวอีกหนึ่งพันธะอยู่ภายนอกสายโซ่หลัก เกิดพอลิเมอร์ร่วมชนิดที่สาม (Terpolymer) ในปริมาณเล็กน้อยในโครงสร้างเป็นโครงสร้างไม่อิ่มตัว ใช้เป็นตำแหน่งในการเชื่อมโยง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ยางจึงสามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถันและเรียกยางชนิดนี้ว่ายาง เอทิลีนพรอพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (Ethylene propylene diene monomer, EPDM) [11]

เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวไม่ได้อยู่ภายในสายโซ่หลักแต่อยู่ที่หมู่ข้างเคียง ดังนั้นยางชนิดนี้จึงยังคงมีความทนทานต่อโอโซนและดินฟ้าอากาศดี เช่นเดียวกับ EPM สำหรับสมบัติการเชื่อมโยงของ

ยางจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของไดอีนที่ใช้ ถ้ามีปริมาณพอลิเมอร์ร่วมชนิดที่สามหรือไดอีนมาก จะส่งผลให้สามารถเชื่อมโยงยาง EPDM ได้รวดเร็ว



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของยาง EPDM [12]

สัดส่วนของเอทิลีนและพรอพิลีนในยาง EPM มีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติของยาง กล่าวคือยางที่มีปริมาณเอทิลีนสูงจะมีความแข็งแรงในสภาพที่ยังไม่คงรูปสูง แต่เมื่อปริมาณของเอทิลีนลดลง ยางจะนิ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น

สมบัติของยางเอทิลีนพรอพิลีน

- ยางมีความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 0.86-0.87 g/cm³
- อุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ 60°C
- เมื่อได้รับการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมที่เหมาะสมยาง EPDM จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูง
- มีค่าเปอร์เซ็นต์การคืนตัวของยางต่ำมาก
- มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพอากาศ ออกซิเจน โอโซน แสงแดด
- มีความเป็นฉนวนสูงและสามารถรักษาสมบัติความเป็นฉนวนได้ดีแม้ที่อุณหภูมิสูง ๆ
- ยาง EPM และ EPDM เป็นยางไม่มีขั้ว ดังนั้นยางชนิดนี้จึงไม่ทนต่อน้ำมัน หรือ ตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วแต่จะทนต่อตัวทำละลายที่มีขั้วได้ดี ยางชนิดนี้จึงทนต่อกรด ด่าง แอลกอฮอล์ น้ำ

2.4 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer, TPEs) เป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยาง นิ่มตัว, ยืดหยุ่น แต่แตกต่างจากยางทั่วไปคือ สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งคล้าย เทอร์โมพลาสติก การที่ TPEs สามารถขึ้นรูปหรือไหลได้ที่อุณหภูมิสูง และกลายเป็นยางที่อุณหภูมิใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก TPEs มีการเชื่อมโยงทางเชิงกล (Physical crosslink) แทนที่จะเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีเหมือนยางทั่วไป จุดเชื่อมโยงเชิงกลนี้จะช่วยยึดให้สายโซ่โมเลกุลที่ยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ติดกันเหมือนโครงสร้างร่างแหสามมิติในยาง แต่สามารถเปลี่ยนย้อนกลับไปได้เมื่อให้ความร้อน จึงสามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งเหมือนเทอร์โมพลาสติก

TPEs ประกอบด้วยส่วนแข็ง (Hard segments) ซึ่งเป็นส่วนของพลาสติก และส่วนที่นิ่ม (Soft segments) ซึ่งเป็นส่วนของอีลาสโตเมอร์ โดยทั้งสองส่วนมีลักษณะแยกภูมิภาคกันส่วนแข็งจะให้สมบัติด้านความแข็งแรงและรวมกลุ่มกันเหมือนจุดเชื่อมโยงเชิงกลยึดสายโซ่ ที่ยืดหยุ่นของส่วนนิ่มไว้ด้วยกัน ทำให้ TPEs มีสมบัติความเป็นยาง เมื่อได้รับความร้อนภูมิภาคแข็งเกิดการหลอมเหลวและสลายตัวแยกออกจากกันได้ง่ายและกลับเข้ามารวมกันใหม่เมื่อเย็นตัว TPEs ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ Styrene-Butadiene-styrene tri-block copolymer (SBS), Styrene-Isoprene-Styrene tri-block copolymer (SIS), Polyurethane (PU) สามารถใช้ประโยชน์ได้หลายการใช้งาน เช่น พื้นรองเท้า (Shoe-sole) ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า ฯลฯ [13]

ชนิดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่

1) เทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินส์อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic polyolefins; TPOs) เป็นพอลิเมอร์ผสมทางเชิงกลระหว่างพอลิโอเลฟินส์กับอีลาสโตเมอร์ เช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน (PP) กับยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (EPDM) เทอร์โมพลาสติกชนิดนี้มีราคาถูกเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการสมบัติสูงมากนัก เช่น ปลอกหุ้มสายไฟและสายเคเบิล, ยางกันโคลน, บรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์ เป็นต้น

2) เทอร์โมพลาสติกพอลิสไตรีนอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic styrenic elastomers) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกที่มีความหนืดหลอมเหลวสูงมาก ส่วนที่เป็นอีลาสโตเมอร์ คือ โมเลกุลที่มีพันธะคู่ ส่วนแข็งคือ พอลิสไตรีน มีสมบัติเด่น เช่น มีค่าอุณหภูมิในการใช้งาน -50°C ถึง 65°C และยังมีคุณสมบัติดีกว่ายางเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ เช่น ท่อ ปลอกหุ้มสายเคเบิล วัสดุอุดกันรั่ว กาว อุปกรณ์กีฬา ฯลฯ

3) เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic polyurethanes elastomer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการสังเคราะห์พอลิเอไมด์โรเซชันแบบขั้น ระหว่างไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกับไดไอโซไซยาเนต มีสมบัติเด่น เช่น ความทนทานต่อการฉีกขาดและทนต่อการขีดสีสูง ทนต่อน้ำและตัวทำละลาย ทนความร้อนได้ -50°C ถึง 220°C ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ เช่น ท่อยาง ข้อต่อ ยาง ปลอกหุ้มสายเคเบิล เป็นต้น

4) เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic polyester elastomer) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยสายโซ่พอลิเอเทอร์ที่ไม่มีวงแหวน (Aliphatic polyether) เป็นองค์ประกอบที่เป็นส่วนอ่อน ส่วนแข็งประกอบด้วยพอลิเอสเทอร์ที่มีวงแหวนเป็นองค์ประกอบที่มีสมบัติเด่น เช่น มีความต้านทานต่อการล้าตัวเนื่องจากการหักงอสูง ความแข็งแรงสูง ช่วงอุณหภูมิในการใช้งานกว้าง ทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจนและโอโซนสูง ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ เช่น ประเก็นซิล ปลูกหุ้มสายเคเบิล สายไฮดรอลิก พื้นรองเท้ากีฬา ฯลฯ

5) เทอร์โมพลาสติกพอลิเอไมด์ (Thermoplastic polyamides elastomer) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกที่มีโครงสร้าง คือ พอลิเอเทอร์สลับกับพอลิเอไมด์ และพอลิเอสเทอร์สลับกับพอลิเอไมด์ มีสมบัติทนความร้อนได้สูง ทนสารเคมี และต้านทานต่อการหักพับได้ดี เช่น ท่อปลูกหุ้มสายเคเบิล ชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ [13-14]

2.5 สารเติมแต่งสำหรับยาง

การผสมยาง (Rubber compounding) เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิตและสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง ดังนั้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจำเป็นต้องมีการกำหนดหรือออกสูตรยาง (Rubber formula หรือ Recipe) ซึ่งเป็นการกำหนดชนิดและปริมาณสารเติมแต่ง (Additives) ต่าง ๆ ที่จะผสมเข้ากับยาง โดยสารเติมแต่งของยางมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีหน้าที่หรือสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งชนิดและปริมาณจะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ผลิตและสมบัติของยางผสมสูตรที่ต้องการ จุดประสงค์ของการใส่สารเติมแต่งคือ เพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ (Properties), เพื่อลดต้นทุน (Price) และเพื่อช่วยกระบวนการผลิต (Processability) [15]

2.5.1 สารเชื่อมโยง

การเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์เป็นระบบที่เก่าแก่รองลงมาจากการใช้คาร์บอนิลด้วยกำมะถัน เริ่มใช้ตั้งแต่ ค.ศ.1950 วิธีเชื่อมโยงแบบนี้มีข้อเด่น คือ

- สามารถใช้ได้ทั้งยางอิ่มตัว (Saturated rubber) และยางที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated rubber) นิยมใช้เฉพาะกับยางอิ่มตัวที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยง เช่น ยางพอลิไดอะไลน-เอทิลีน และซิลิโคน

- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีเสถียรภาพมากกว่ามีสมบัติการทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat-aging properties) ดีกว่า Aging properties

- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Temperature flexibility) ดีกว่า

- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีการเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent set) น้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถใช้เชื่อมโยงผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีธรรมชาติ ยางใส หรือสีขาว ไม่เป็นสีเหลืองเหมือนกับกำมะถัน และสีที่ได้มีความเสถียร ไม่มีมีการเปลี่ยนสีผลิตภัณฑ์เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV light discoloration)

เนื่องจากพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เป็นพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอน (C-C bonds) ซึ่งมีพลังงานพันธะสูง มีความเสถียรต่อความร้อนและแรงกระทำใด ๆ เทียบกับพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันทั้งแบบโมโนซัลฟิดิกและพอลิซัลฟิดิก (C-S bonds และ S-S bond) ทำให้ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีความเสถียรมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ยังมีข้อจำกัดบางประการ คือ

- ในการเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์จะเกิดกลิ่นเหม็นที่ไม่พึงประสงค์ของสารที่ปลดปล่อยออกมา ทำให้ต้องมีการทำ Post cure โดยนิยมเพิ่มขึ้นขั้นตอนการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูงอีกครั้ง ซึ่งเสียเวลาและเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต โดยการ Post cure ยังสามารถกำจัดอนุมูลอิสระที่ตกค้างอีกด้วย

- เปอร์ออกไซด์ว่องไวต่อปฏิกิริยากับสารเติมแต่งชนิดอื่นในยางมากกว่ากำมะถัน ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดในการใช้และต้องมีความรอบคอบในการเลือกใช้สารเคมีอย่างไม่ควรเลือกใช้เทคนิคการให้ความร้อนที่มีบรรยากาศของออกซิเจนในการเชื่อมโยงยาง เช่น เทคนิคการให้ความร้อนเชื่อมโยงโดยใช้อากาศร้อน (Hot air cures) เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เคลื่อนย้ายจากเปอร์ออกไซด์ไปยังสายโซ่พอลิเมอร์ในปฏิกิริยาเชื่อมโยงอาจจะถูกออกซิไดซ์ จากออกซิเจนในอากาศทำให้เกิดหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide) และไม่เกิดการเชื่อมโยง กล่าวคือ ยางจะเกิดการเสียสภาพสลายตัวเนื่องจากความร้อนนั่นเอง

- ยางบิวทิล (Butyl rubber, IIR) เกิดการเสียสภาพเมื่อเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากเกิดอนุมูลของคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary carbon radical) ไม่เสถียรเกิดการขาดของสายโซ่ที่ตำแหน่งเบต้า (β -scission reaction) นำไปสู่การเสื่อมสลายของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงมีข้อยกเว้นไม่สามารถใช้สารเปอร์ออกไซด์ในการเชื่อมโยงยางบิวทิล

สารประกอบเปอร์ออกไซด์หลายชนิดที่สามารถใช้ได้ในการเชื่อมโยงยาง เช่น ไดเอซิลเปอร์ออกไซด์ (Diacyl peroxides) และเปอร์ออกซีเอสเทอร์ (Peroxy esters) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติสารเปอร์ออกไซด์ที่นิยมในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่

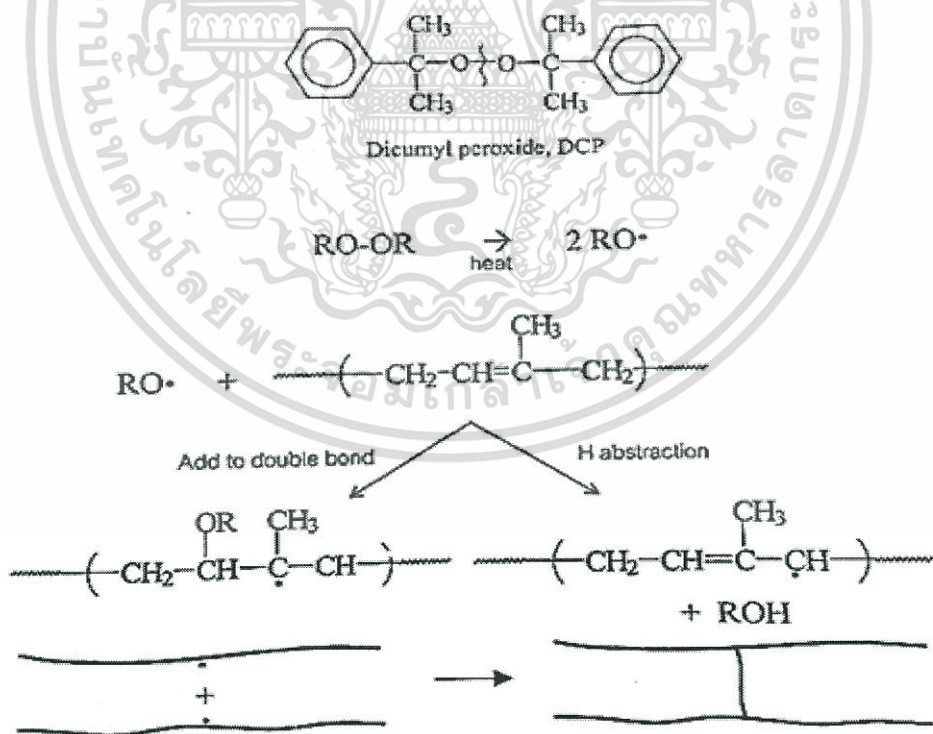
- 1) ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP)
- 2) ไดบิวทิลเปอร์ออกไซด์ (Di-*t*-butyl peroxide, DBP)
- 3) ไดเมทิลไดบิวทิลเปอร์ออกซีเฮกเซน (2,5-dimethyl-2,5di(*t*-butyl-peroxy) hexane)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมคือ DCP มีจำหน่ายทั้งในรูปผงของแข็งและของเหลว ความบริสุทธิ์ประมาณ 90-99% เนื่องจาก DCP มีความไวต่อปฏิกิริยาสูง ไม่นิยมใช้เนื่องจากปัญหาขณะการเก็บรักษาจึงมีการจำหน่ายในรูปของผสมกับสารตัวกลางเฉื่อยบางชนิด เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 40-50% นอกจากนี้ยังใช้ในรูปของผสมพร้อมสารเพิ่มเนื้อในการใช้งานสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ควรหลีกเลี่ยงการเก็บสารที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 40°C) เพื่อหลีกเลี่ยงการเสื่อมสลาย นอกจากนี้ควรเก็บให้ห่างจากแหล่งให้ความร้อนและไฟฟ้าสถิตเนื่องจากเปอร์ออกไซด์ติดไฟง่ายและดับยาก [15]

กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์

กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เริ่มต้นจากปฏิกิริยาโฮโมไลติกดีคอมโพสิชันสลายตัวเนื่องจากความร้อน แตกตัวเกิดเป็นอนุมูลอัลคอกซี (Alkoxy radical, RO•) สองตัว ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาในเชื่อมโยง การเชื่อมโยงด้วยระบบเปอร์ออกไซด์จะเหมาะสมกับยางชนิดที่ไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ (NR) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่บนสายโซ่เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระอยู่ (Polymer radicals หรือ Macroradicals) จากนั้นจะเกิดการรวมกันของอนุมูลอิสระที่อยู่ต่างสายโซ่เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง

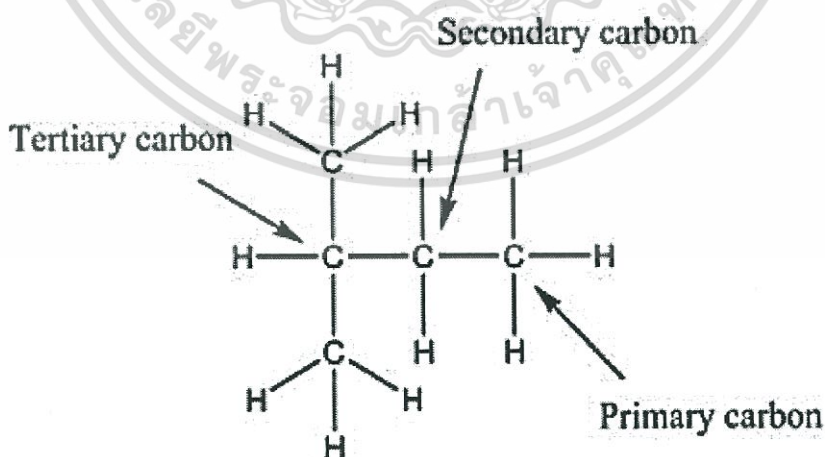


รูปที่ 2.7 กลไกการเชื่อมโยงด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ [15]

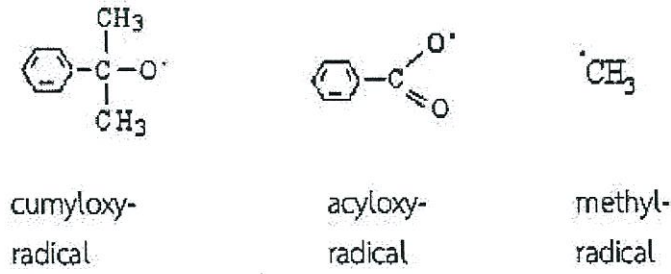
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้อนุมูลอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ในยางไม่อิ่มตัวแล้ว อนุมูลอิสระยังเข้าจับไฮโดรเจนในตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Allylic hydrogen) เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระ เช่นเดียวกันในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เชื่อมโยงยางที่ไม่อิ่มตัวการรวมอนุมูลอิสระที่อยู่ต่างสายโซ่ทำให้เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงเช่นเดียวกัน

ทั้งนี้อัตราเร็วในการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ยังขึ้นอยู่กับกลายตัวของเปอร์ออกไซด์ โดยขึ้นกับอุณหภูมิ แสงหรือรังสี และการทำปฏิกิริยากับสารอื่น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเปอร์ออกไซด์จะสลายตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ความเสถียรของสารเปอร์ออกไซด์ขึ้นอยู่กับหมู่ที่เข้าไปแทนที่ในคาร์บอนอะตอมนั้น ๆ เช่น สารเปอร์ออกไซด์ที่มีการเข้าเกาะที่ตำแหน่ง Primary carbon จะมีครึ่งชีวิตสั้นและสามารถเกิดการแตกตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำ หากเป็นตำแหน่ง Secondary carbon ครึ่งชีวิตของเปอร์ออกไซด์สั้น แต่การสลายแตกตัวจะอยู่เหนืออุณหภูมิห้องเล็กน้อย ดังนั้นตำแหน่ง Tertiary carbon จึงเป็นที่นิยมในการนำมาใช้งาน เนื่องจากมีความเสถียรสูง ใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งในรูปที่ 2.8 เป็นอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ที่แตกตัวทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะ เช่น อนุมูลอิสระ Methyl radical (สาร Diacyl peroxide) และ Acyloxy radical (สาร Dibenzoyl peroxide) จัดเป็น Primary carbon และอนุมูลอิสระ Cumyloxy radical (สาร DCP) จัดเป็น Tertiary peroxide มีอุณหภูมิการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์ที่ค่าครึ่งชีวิต (Half life) ที่ 6 นาที ที่ 155°C และอุณหภูมิในการเกิดพันธะเชื่อมโยงอยู่ที่อุณหภูมิการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์ที่ค่าครึ่งชีวิตที่ 1 ชั่วโมง ที่ 170°C แต่สาร Dibenzoyl peroxide จะมีอุณหภูมิการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์ที่ค่าครึ่งชีวิตที่ 1 ชั่วโมง อยู่ที่ 92°C ทำให้เกิดการแตกตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน [15]



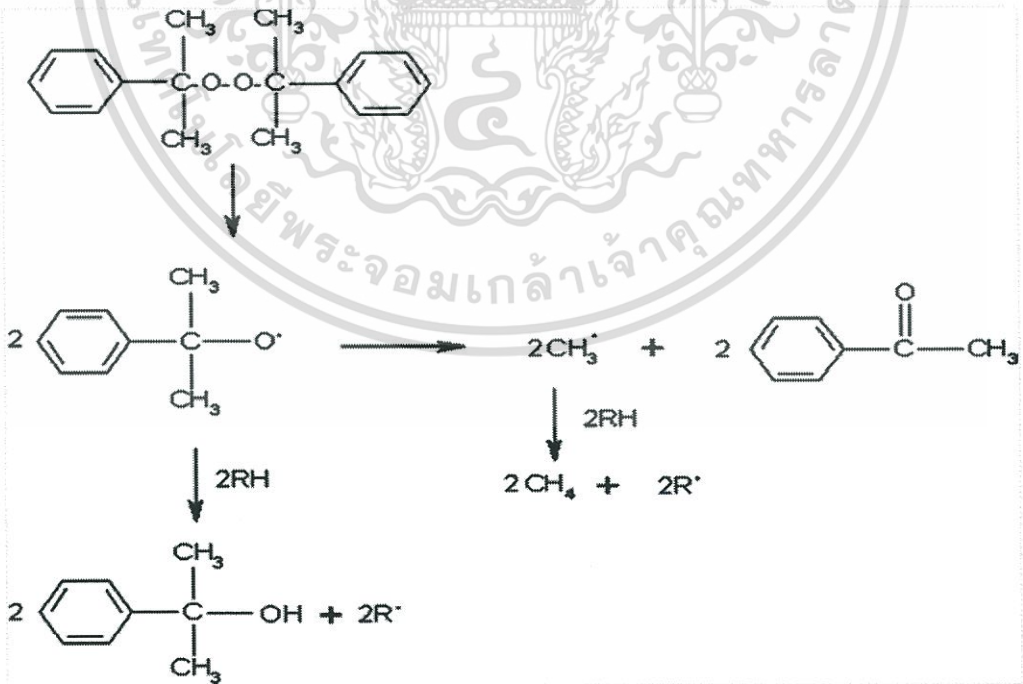
รูปที่ 2.8 กลไกอัตราเร็วในการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ [15]



รูปที่ 2.9 อนุพลอิสระของเปอร์ออกไซด์ที่แตกตัวทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยง [16]

กลไกการสลายตัวของสาร DCP

DCP จัดเป็น Tertiary peroxide มีอุณหภูมิการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์ที่ค่าครึ่งชีวิตที่ 6 นาที ที่ 155°C เมื่อ DCP ได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวเป็น Cumyloxy radical ซึ่งจะเข้าไปแทนที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่ง Tertiary carbon ส่งผลให้เกิดการ Crosslink ซึ่ง Cumyloxy radical อาจเกิดการแตกตัวได้เป็น Methyl radical (สาร Diacyl peroxide) ซึ่งจัดเป็น Primary peroxide ที่มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 40-90°C ทำให้แตกตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน และหากมีอนุพลอิสระนี้ตกค้างอยู่ อาจส่งผลให้เกิดการ Crosslink ได้อีกครั้งหนึ่ง [16]



รูปที่ 2.10 กลไกการสลายตัวของสาร Dicumyl peroxide [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครึ่งชีวิตของสารประกอบเปอร์ออกไซด์

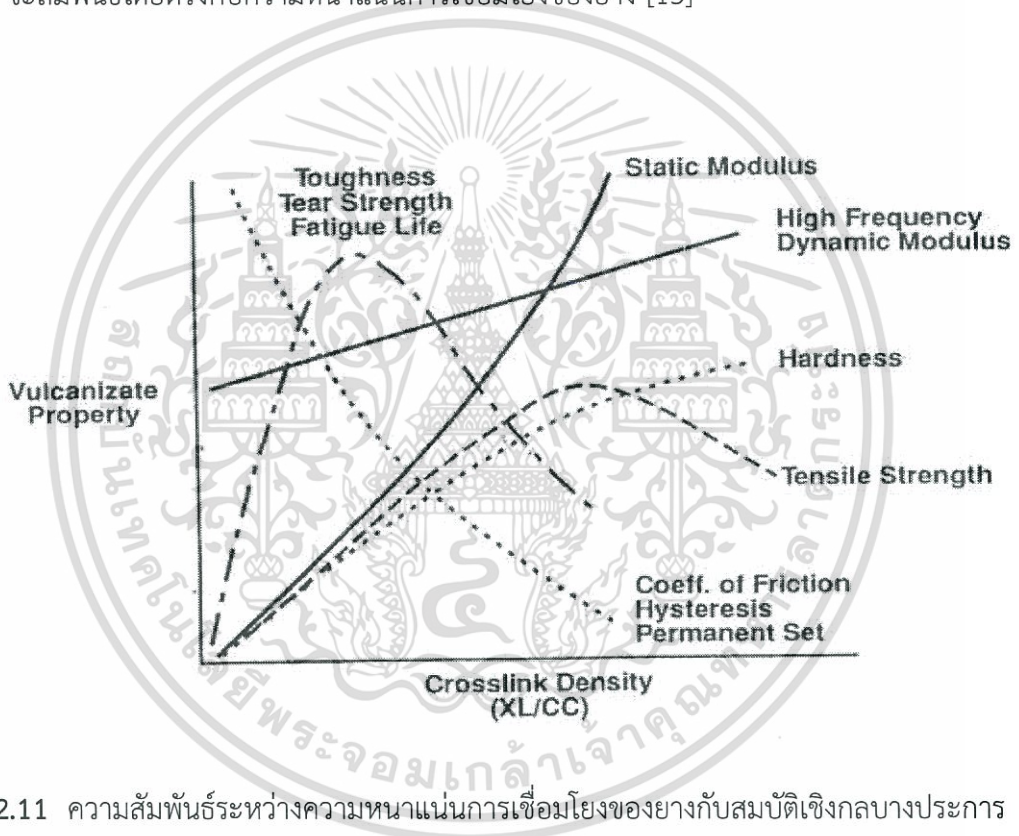
ครึ่งชีวิตของสารประกอบเปอร์ออกไซด์ คือเวลาที่ใช้ในการสลายตัวของสารประกอบเปอร์ออกไซด์หายไปครึ่งหนึ่ง ดังนั้นครึ่งชีวิตจึงสามารถใช้เป็นตัวบอกรหรือใช้เปรียบเทียบเสถียรภาพและความเร็วในการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ กล่าวคือถ้าเปอร์ออกไซด์มีครึ่งชีวิตสั้นแสดงว่าเปอร์ออกไซด์ชนิดนั้นแตกตัวเร็ว ว่องไวสูง หรือมีเสถียรภาพต่ำ ทำให้มีอัตราเร็วการเชื่อมโยงสูง แต่จะเริ่มเชื่อมโยงเร็ว (Scorch time สั้น) วิธีหนึ่งที่ยอมรับเทียบเสถียรภาพของเปอร์ออกไซด์คือ “อุณหภูมิครึ่งชีวิต 10 ชั่วโมง” (10 Hour half-life temperature, 10-hr HL) นิยามเท่ากับอุณหภูมิที่ต้องใช้ในการสลายครึ่งหนึ่งของเปอร์ออกไซด์ในเวลา 10 ชั่วโมง อีกค่าหนึ่งที่ยอมรับใช้ในอุตสาหกรรมคือ “อุณหภูมิครึ่งชีวิต 1 ชั่วโมง” (1 Hour half-life temperature, 1-hr HL) ซึ่งจะช่วยให้ทราบได้ว่า ถ้าเปอร์ออกไซด์มีอุณหภูมิ 10-hr HL หรือ 1-hr HL มากจะมีเสถียรภาพสูงกว่า แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระช้ากว่า เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงช้ากว่าและจะเสี่ยงต่ออันตรายในการใช้งานน้อยกว่า เช่น ไม่เสี่ยงต่อการเชื่อมโยงก่อนเวลาหรือสกอร์ช (Scorch)

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า เปอร์ออกไซด์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา การใส่สารเคมีบางชนิด เช่น สารหล่อลื่นหรือน้ำมันและสารแอนตี้ออกซิแดนท์อาจเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง เป็นผลให้เกิด “ปรากฏการณ์เจือจางการเชื่อมโยง” (Dilute cross effect) ได้ความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อยกว่าที่ควรจะเป็น หลีกเลี่ยงการใส่สารเติมแต่งที่เป็นกรด เช่น สารตัวเติมซิลิกา (Silica) หรือเขม่าดำ (Carbon black) ที่เป็นกรด เนื่องจากกรดสามารถเร่งให้เปอร์ออกไซด์สลายตัวแบบไม่เกิดอนุมูลอิสระ (Nonradical generating decomposition) ทำให้เกิดการสูญเสียของสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ เช่นเดียวกับสารเติมแต่งชนิดอื่น เช่น แอนตี้ออกซิแดนท์หรือแว๊ก (Wax) อาจหยุดปฏิกิริยา หรือเปลี่ยนแปลงอนุมูลอิสระระหว่างเกิดปฏิกิริยาไม่ให้ทำปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ เป็นผลให้ไม่เกิดพันธะเชื่อมโยงหรือเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงน้อย อีกทั้งประสิทธิภาพการเชื่อมโยงอย่างด้วยเปอร์ออกไซด์ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของเปอร์ออกไซด์ในยางและจำนวนฟังก์ชันและไฮโดรเจนของโครงสร้างยางที่สามารถถูกจับได้ด้วยอนุมูลอิสระ โดย ปกติในการเชื่อมโยงอย่างด้วยเปอร์ออกไซด์นิยมใช้ปริมาณไม่เกิน 2.5 phr (ส่วนในร้อยส่วนของยาง) ที่อุณหภูมิเชื่อมโยงตั้งแต่ 150–230°C การใช้อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาน้อยลงประมาณ 2-2.5 เท่า ทุก 10°C ที่เพิ่มขึ้น แต่จะเสี่ยงกับการเสียสภาพของยางและต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น การใช้ปริมาณสารเชื่อมโยงมากเกินไป จะทำให้ใช้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากเกินไปทำให้สมบัติบางประการลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) เป็นต้น [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยงกับสมบัติเชิงกลของยาง

เมื่อยางเกิดการเชื่อมโยงด้วยสารเชื่อมโยงต่าง ๆ จะทำให้โครงสร้างโมเลกุลของยางเปลี่ยนจากโครงสร้างเส้นตรง เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ สมบัติของผลิตภัณฑ์ยางขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยงของยางที่เพียงพอและเหมาะสม เพื่อให้ยางแข็งแรงเหมาะกับการใช้งาน ปริมาณการเชื่อมโยงสามารถระบุได้โดยใช้ “องศาการเชื่อมโยง” (Degree of vulcanization) หรือความหนาแน่นการเชื่อมโยง (Crosslink density) ซึ่งจะสัมพันธ์กับจำนวนพันธะเชื่อมโยงในหนึ่งหน่วยปริมาตรของยาง ถ้าใช้ปริมาณสารเชื่อมโยงปริมาณมาก รวมทั้งใช้เวลาในการเชื่อมโยงนาน ยางจะเกิดพันธะเชื่อมโยงมาก มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง สมบัติต่าง ๆ ของยางโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยาง [15]



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยางกับสมบัติเชิงกลบางประการของยาง [15]

จะเห็นได้ว่าสมบัติบางประการของยาง เช่น ค่ามอดูลัส (Modulus) และความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นของการเชื่อมโยงยางเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลบางประการ โดยเฉพาะสมบัติที่เกิดการแตกหัก (Fracture properties) เช่น ความแข็งแรง ฯลฯ จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดจุดหนึ่ง (Optimum point) จากนั้นสมบัติเหล่านี้จะลดลง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่สมบัติความแข็งแรงของยาง เช่น โมดูลัส และความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนพันธะเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น น้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมโยง (M_c) น้อยลง จะทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ยากขึ้น ถูกพันธะเชื่อมโยงยึดเหนี่ยวไว้ ทำให้ยางแข็งขึ้น ต้องใช้แรงมากขึ้นเพื่อทำให้ยางเปลี่ยนขนาดหรือเปลี่ยนรูป

สมบัติเชิงกลที่ทดสอบแล้วเกิดการแตกหักของยาง เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาดร้อยละการยืด ณ จุดขาด เกิดจุดสูงสุดที่ความหนาแน่นเชื่อมโยงหนึ่งเท่านั้นทั้งนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ที่ก่อนจุดสูงสุด ยางยังเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์ โครงสร้างโมเลกุลยางเป็นสายโซ่ตรง ยังไม่เป็นร่างแหสามมิติ เมื่อให้แรงกับวัสดุยาง สายโซ่โมเลกุลยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันและหลุดออกจากกันได้ โดยไม่เกิดการขาดของพันธะหรือสายโซ่โมเลกุล แต่เมื่อยางเชื่อมโยงมากขึ้น เกิดจุดเชื่อมโยงกลายเป็นโครงสร้างร่างแหมากขึ้น ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่หลุดออกจากกันยากขึ้นเมื่อได้รับแรง เป็นผลให้ความแข็งแรงของวัสดุยางสูงขึ้น

2) ที่จุดสูงสุดหรือจุดเกิดเจล โครงสร้างโมเลกุลยางจะเกิดการเชื่อมโยงกลายเป็นโครงสร้างร่างแหแบบสามมิติอย่างสมบูรณ์ วัสดุยางกลายเป็นวัสดุประเภทเทอร์โมเซตไม่สามารถขึ้นรูปใหม่ได้

3) ที่หลังจุดสูงสุด สายโซ่ถูกยึดเข้าด้วยกันเป็นสามมิติด้วยพันธะเชื่อมโยง เมื่อวัสดุยางได้รับแรง สายโซ่โมเลกุลยางจะขาดออกเนื่องจากการทำลายพันธะเคมี-โควาเลนต์ ความแข็งแรงอันเนื่องจากการแตกหัก เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด จะขึ้นอยู่กับความสามารถของวัสดุในการเก็บและการกระจายพลังงานที่ได้รับจากแรงกระทำภายนอก ผ่านออกในรูปการเคลื่อนไหวโมเลกุล เช่น การเคลื่อนตำแหน่ง การสั่น และการหมุน ทำให้เกิดการกระจายพลังงานที่ได้รับ เปลี่ยนให้เป็นพลังงานในรูปอื่น เช่น พลังงานความร้อน ฯลฯ

4) ที่ความหนาแน่นเชื่อมโยงสูง สายโซ่เคลื่อนไหวอย่างจำกัด เนื่องจากเกิดโครงสร้างร่างแห ที่แน่นทำให้ไม่สามารถเคลื่อนไหวเพื่อกระจายพลังงานที่ได้รับ เป็นผลให้ความแข็งแรงของวัสดุต่ำลง วัสดุยางกลายเป็นแข็งแต่เปราะ แตกหักง่ายจะเห็นได้ว่า วัสดุยางต้องการความหนาแน่นเชื่อมโยงที่พอเหมาะไม่สูงหรือต่ำเกินไปเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ วัสดุมีเสถียรภาพของรูปร่าง ไม่เกิดการไหลเสียรูปร่าง ไม่เปราะและแตกหัก [15]

2.5.2 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators) อาจเรียกสั้น ๆ ว่า “สารกระตุ้น” ที่นิยมคือ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ร่วมกับกรดสเตียริก (Stearic acid) ซึ่งทำให้สารเร่งมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น มีอัตราเร็วของการเชื่อมโยงสูงขึ้น เวลาในการเชื่อมโยงลดลง [15]

2.5.2.1 ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์จะทำงานร่วมกับกรดสเตียริกเกิดเป็น “ซิงค์สเตียเรต” ซึ่งสามารถละลายได้ในยาง และช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง โดยปกติในอุตสาหกรรมปริมาณการใช้ ZnO คือ 3-5 phr หากมีการใช้ ZnO เกิน 4 phr มีผลเล็กน้อยต่อการกระตุ้นการเชื่อมโยง และ ZnO ปริมาณมาก เช่น 6-8 phr อาจใช้ในกรณี “เพิ่มการนำความร้อน” ในยางเนื่องจากยางมีความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี [15]

2.5.2.2 กรดไขมัน

กรดไขมัน (Fatty acid) จะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในการเชื่อมโยงและยังมีส่วนช่วยในการกระจายตัวของสารเติมเต็มหรือเม็ดสีต่าง ๆ เนื่องจากมันทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricants) ในการผสมยางจะทำให้ความหนืดของยางลดลง เพิ่มความสามารถในการไหลของยาง และช่วยให้การอัดขึ้นรูปเป็นไปได้ง่ายขึ้นด้วย [15]

2.5.3 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ

การเสื่อมสภาพของยางช่วงอายุการใช้งานผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากยาง เกิดการเสื่อมสภาพมากขึ้น ตามอายุการใช้งาน การเสื่อมสภาพมีความสำคัญและเกิดขึ้นมากโดยเฉพาะยางที่มีโครงสร้างไม่อิมิตัว เช่น ยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ ฯลฯ ยางเหล่านี้มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่หลัก โดยพันธะคู่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับออกซิเจนและโอโซน ในบรรยากาศ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และโอโซนเช้น ตามลำดับ เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยาง นอกจากนี้ปฏิกิริยาเสื่อมสภาพของยางสามารถถูกเร่งให้เกิดเร็วขึ้นเนื่องจากหลายปัจจัย เช่น ความร้อน สิ่งปนเปื้อนจำพวกโลหะหนัก แสง ความชื้น ฯลฯ การเสื่อมสภาพของยาง เกิดการเปลี่ยนแปลง 2 แบบ คือ

- 1) การเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยง (Crosslinking) การเสื่อมสภาพทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่ แล้วเกิดการเชื่อมต่อเป็นพันธะเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการแตกออกของพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิก แล้วเชื่อมโยงใหม่เป็นพันธะเชื่อมโยงเดี่ยวโมโนซัลฟิดิก หลาย ๆ พันธะ เป็นผลให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น ความทนทานต่อการล้าลดลง เปราะ หักง่ายขึ้น ยางที่มีแนวโน้มจะแสดงกลไกการเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยงได้แก่ ยางเอสปีอาร์ ยางอีพีดีเอ็ม ยางไนไตรล์ และยางคลอโรพรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การเสื่อมสภาพแบบสายโซ่ขาด (Chain scission) สายโซ่พอลิเมอร์ขาดออกจากกัน เป็นผลให้ยางนุ่มขึ้น มีความแข็งลดลง ความต้านทานการเสียดสีขัดถูลดลง ความหนืดลดลง เนื่องจากความยาวของสายโซ่โมเลกุลสั้นลง ถ้าเสื่อมสภาพมากอาจเหลวเหนียวติดวัสดุข้างเคียง งามที่เกิดการเสื่อมสภาพแบบนี้ได้แก่ ยางธรรมชาติ และยางไอโซพรีน [15]

การตัดสายโซ่ (Chain scission)



-การเชื่อมโยง (Crosslinking)



รูปที่ 2.12 การเสื่อมสภาพของยางแบบตัดสายโซ่และการเชื่อมโยง [17]

สิ่งเร้าทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์

- แสง/แสงยูวี
 - ออกซิเจน/โอโซน
 - ความร้อน
 - สิ่งสกปรก (Impurities) ปนเปื้อนในเนื้อผลิตภัณฑ์ เช่น โลหะหนัก ฯลฯ
 - แรงกระทำ เช่น แรงเฉือน (Shear force)
 - การสัมผัสสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำสบู่ น้ำมัน ฯลฯ แรงให้เกิด ESC (Environmental stress cracking)
- แสงยูวี เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันจากอนุมูลอิสระโดยเฉพาะที่ผิวหน้าสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะแสงอาทิตย์เกิดเป็นชั้นของยางออกไซด์ที่เสื่อมสภาพจากความร้อน และ ความชื้นสามารถก่อให้เกิดการแตกที่ผิวหน้าของยาง โดยยางที่มีสีอ่อนจะเกิดการเสื่อมสภาพที่ผิวหน้ามากกว่ายางสีดำนวมเข้มดำ เนื่องจากสีดำมีความสามารถในการป้องกันการทะลุผ่านของแสง
- โลหะหนัก เช่น เหล็ก แมงกานีส และทองแดง สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของยาง โดยยางผสมสูตรที่ใช้สารกระตุ้นจำพวกเกลือของโลหะเหล่านี้ เช่น โอเลียเอต และสเตียเรต จะเกิดการ

เสื่อมสภาพได้ง่ายเนื่องจากโลหะอยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง ควรใช้สารต่อต้านการเสื่อมสภาพจำพวก ฟีนิลิน-ไดเอมีนผสมในยางเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโลหะเหล่านี้

การป้องกันต่อต้านการเสื่อมสภาพเพื่อยืดอายุการใช้งานยาง สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเลือกชนิดยาง (ใช้ยางที่อิมตัวหรือยางผสม) การเลือกระบบเชื่อมโยง และการใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradant) การเลือกระบบเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีแนวโน้มที่จะได้ยางที่ทนทานกว่า เกิดการเสื่อมสภาพน้อยกว่า เนื่องจากไม่มีกัมมะถันที่อาจเร่งการเสื่อมสภาพ และการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C-C bonds) มีเสถียรภาพที่ดีกว่าการเชื่อมโยงจากอะตอมของกำมะถัน [15]

วิธีทำให้พอลิเมอร์มีอายุใช้งานยาวนาน

- แอนต้ออกซิแดนต์
- แอนตีโอโซนแนนต์
- สารเพิ่มเสถียรภาพทางแสง (UV/ Light stabilizers)
- สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Heat stabilizers)

2.5.3.1 แอนต้ออกซิแดนต์

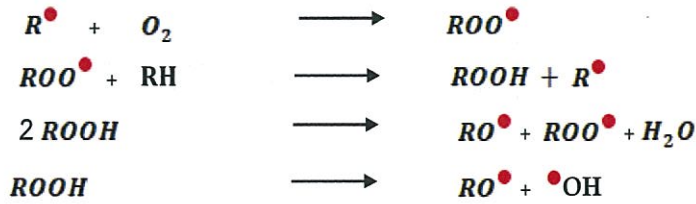
- แอนต้ออกซิแดนต์ (Antioxidants) ทำหน้าที่คือ ต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันจากออกซิเจน ทำให้ทนอุณหภูมิสูงขณะขึ้นรูป, เพิ่มอายุการใช้งาน, ไม่เกิดการเสื่อมสภาพสีและสมบัติไม่เปลี่ยน
 - แอนต้ออกซิแดนต์ แบ่งเป็นทั้งชนิดเป็นอนิสและไม่เป็นอนิส
 - มักใช้ 2 ชนิดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพมากกว่า $1+1=3$ (Synergistic effect)
 - แอนต้ออกซิแดนต์จำเป็นมาก โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ (NR), ยางไออาร์ (IR) ฯลฯ และพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างวงไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ (Degradation) โดยกลไกการตัดสายโซ่ และกลไกการเชื่อมโยง
- กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยาง
- กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางที่ไม่อิมตัวเกิดผ่านอนุมูลอิสระ ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเอง (Auto oxidation) สามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

ปฏิกิริยาขั้นต้น (Initiation)

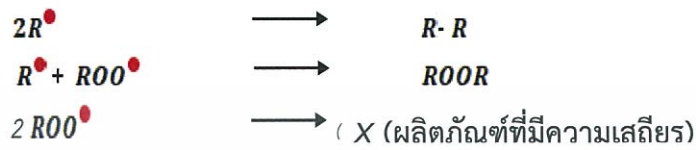


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาขั้นต่อเนื่อง (Propagation)

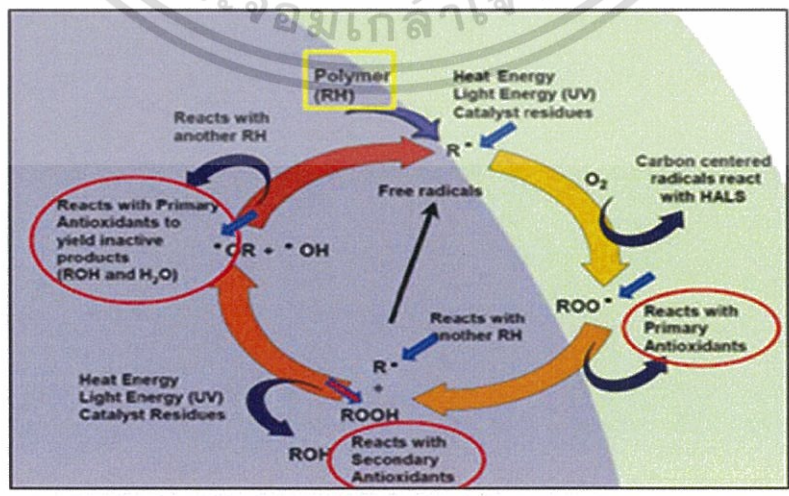


ปฏิกิริยาขั้นสุด (Termination)



การเริ่มปฏิกิริยาขั้นต้นของการเสื่อมสภาพของยางจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเริ่ม โดยการเกิดหน่วยที่มีอนุมูลอิสระ (Free radical species) เมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ (RH) เกิดการแตกออกในระหว่างกระบวนการผลิตอาจได้รับแรงเค้น (Stress) หรือได้รับอุณหภูมิสูง เมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ขาดสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นยางเปอร์ออกไซด์ (ROO•) ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่อื่น เกิดเป็นยางที่มีหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ROOH) และยางที่มีอนุมูลอิสระ (R•) ปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่แสดงเป็นปฏิกิริยาช่วยเร่งการเกิดออกซิเดชันด้วยตัวเอง ถ้าวัสดุยางได้รับแสงยูวี ยางที่มีหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ROOH) อาจแตกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์อนุมูลอิสระอื่น ๆ (RO•, ROO•, •OH) ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพจากการออกซิเดชันเร็วขึ้น ปฏิกิริยานี้สิ้นสุดได้โดยสายโซ่ยางที่มีอนุมูลอิสระ 2 ตัวเจอกัน เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง (R-R หรือ ROOR) หรือเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเสถียรภาพไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ [15]

วัฏจักรการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ (Polymer degradation cycle)

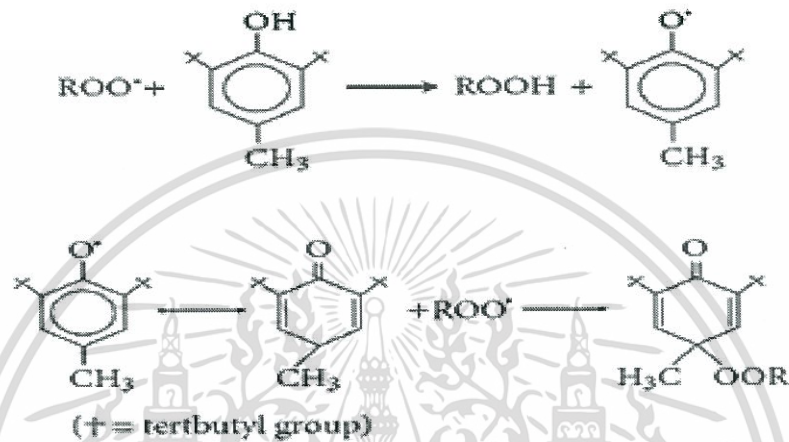


รูปที่ 2.13 วัฏจักรการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของแอนติออกซิแดนต์นิยมใช้แอนติออกซิแดนต์ 2 ชนิดร่วมกัน เพื่อให้เกิด Synergistic effect (1+1=3) มีประสิทธิภาพสูงสุดในการป้องกันออกซิเดชัน ได้แก่

1) แอนติออกซิแดนต์ปฐมภูมิ (Primary antioxidant) ชนิดนี้ยับยั้งปฏิกิริยาโดยกำจัดอนุมูลอิสระที่เกิด (Propagating radicals) แล้วเกิดเป็นสารเสถียรที่ไม่แตกตัวต่อ เช่น สารประกอบฟีนอล (Hindered phenols) และเอมีน (Aromatic amines)



รูปที่ 2.14 กลไกการกำจัดอนุมูลอิสระของแอนติออกซิแดนต์ปฐมภูมิ [17]

2) แอนติออกซิแดนต์ทุติยภูมิ (Secondary antioxidants) ทำหน้าที่สลายสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide decomposer) ให้กลายเป็นสารอื่นที่เสถียร เช่น สารประกอบฟอสไฟต์ (Phosphites) หรือ Phosphonites

-Phosphites



-Thioethers



รูปที่ 2.15 กลไกการกำจัดอนุมูลอิสระของแอนติออกซิแดนต์ทุติยภูมิ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกชนิดและปริมาณของแอนติออกซิแดนต์ ขึ้นกับ

- ชนิดเรซิน ความเข้ากันได้และการละลายของแอนติออกซิแดนต์ในเรซิน มีผลต่อการแพร่เข้าทำงาน การเปื้อนสี (Stain) การหลุดออกภายหลังขณะใช้งาน
- อุณหภูมิในการขึ้นรูป การระเหยกลายเป็นไอของแอนติออกซิแดนต์
- ประสิทธิภาพการทำงานเสริมกัน (Synergism)

ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการใช้แอนติออกซิแดนต์

- 1) การเปื้อนสี (Discoloration หรือ Staining) สีอ่อนควรใช้สารที่ไม่เปื้อนสีส่วนผลิตภัณฑ์สีดำไม่จำเป็นต้องระวังเรื่องการเปื้อนสี อาจใช้สารป้องกันจำพวกเอมีนที่มีประสิทธิภาพได้
- 2) ความยากง่ายในการระเหย (Volatility) สารป้องกันที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยอาจเกิดการระเหย สูญหายไปก่อนการใช้งาน สารน้ำหนักโมเลกุลมากจะเกิดการระเหยมากกว่า
- 3) ความสามารถในการละลาย (Solubility) ถ้าความสามารถในการละลายของแอนติออกซิแดนต์ ในพอลิเมอร์น้อยจะเกิดการแพร่ออกมาที่ผิวได้ง่าย ปัจจัยนี้จึงมีผลมากต่อประสิทธิภาพของสารป้องกัน
- 4) เสถียรภาพทางเคมี (Chemical stability) เช่น เสถียรภาพต่อความร้อน ความชื้น แสง ออกซิเจน ตัวทำละลาย ฯลฯ มีผลต่อความทนทานในการใช้งาน
- 5) ปริมาณการใส่ (Concentration) ใส่มากเกินไปจะเกิด Pro-oxidant effect

2.5.3.2 สารป้องกันแสงยูวี

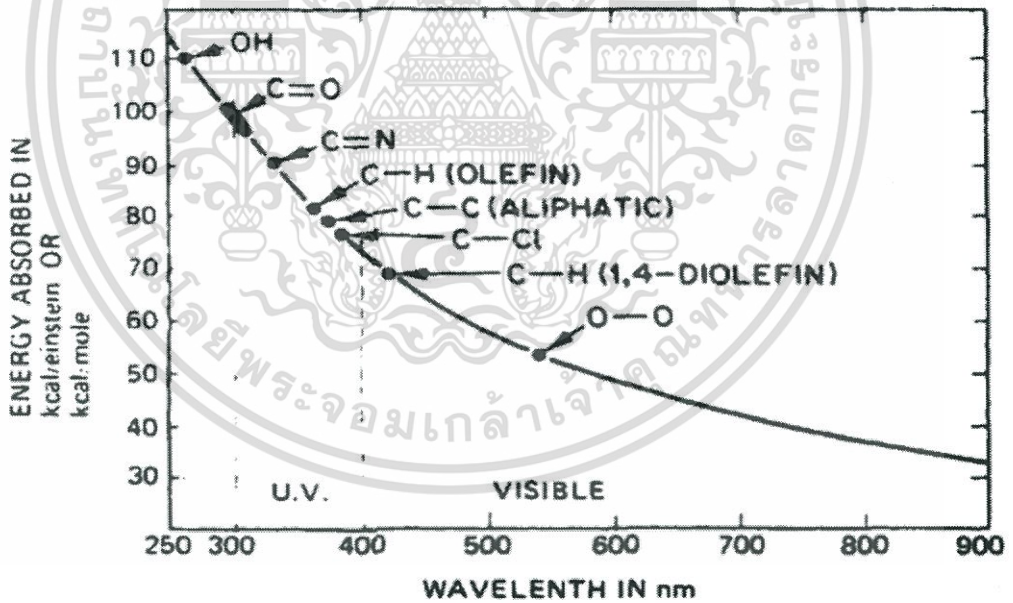
ความเสถียรของพันธะโคเวเลนต์ในพอลิเมอร์เป็นสิ่งสำคัญ แสงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการเสถียรภาพ แสงอาทิตย์จะเข้ามาสู่ชั้นบรรยากาศของโลกโดยผ่านชั้นโอโซนซึ่งจำกัดความยาวคลื่นที่สั้นกว่า 290 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่มากกว่า 290 นาโนเมตร ถึง 400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นรังสีอัลตราไวโอเล็ต จะแผ่มายังโลกเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์รังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือแสงยูวี

แสงยูวี (Ultraviolet) หรือรังสีเหนือม่วง เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นเดียวกับคลื่นวิทยุ รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา แสงแดด หรือ แสงสว่าง ก็เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นกัน แต่มีช่วงความยาวคลื่นที่ตาของมนุษย์สามารถรับรู้ความรู้สึกได้ ทำให้เราสามารถมองเห็นสิ่งต่าง ๆ ได้ เราจึงเรียกว่า แสงสว่าง หรือ แสงที่ตามองเห็น (Visible light) แสงหรือรังสีที่กล่าวมาแล้วต่างเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกันเพียงแต่มีความยาวคลื่นต่างกัน ถ้านำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ มาเรียงลำดับตามขนาดความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตร จะได้แถบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า สเปกตรัม (Spectrum)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นจะมีพลังงานสูงกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นมาก ซึ่งความยาวคลื่นและแอมพลิจูดกับความถี่ กล่าวคือ แสงที่มีความยาวคลื่นสั้น ความถี่จะสูง และแสงที่มีความยาวคลื่นยาว จะมีความถี่ต่ำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง

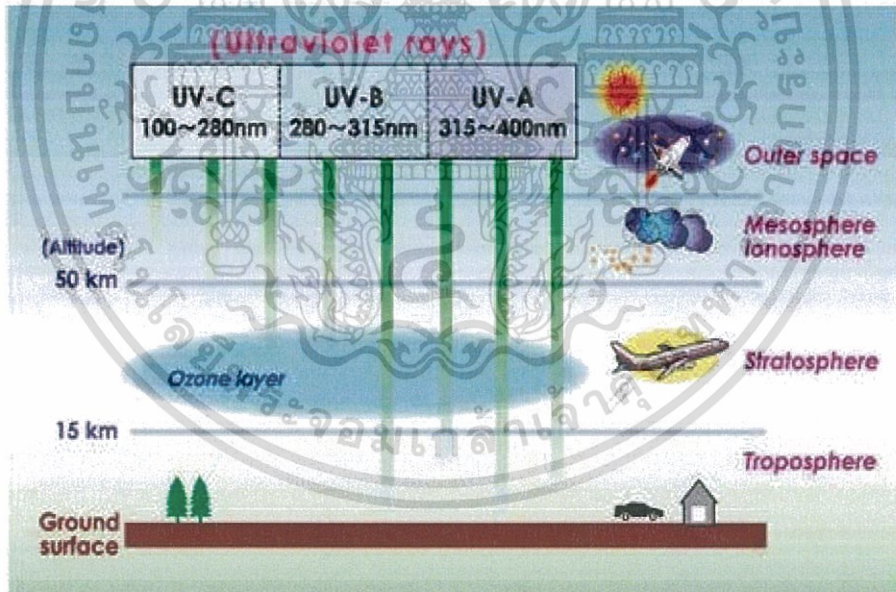
โดยปกติคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 100-1,000 นาโนเมตร จะสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ ถ้าความยาวคลื่นมากกว่า 1,000 นาโนเมตร จะมีพลังงานต่ำจนไม่สามารถกระตุ้นให้สารเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ คลื่นแสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 700-1,000 นาโนเมตร ที่เรียกว่า “Near infrared” จะมีพลังงานที่ใช้กระตุ้นสารให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้น้อยมากยกเว้น แบทที่เรียบางชนิดที่สามารถเก็บสะสมพลังงานที่มีความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร แต่ถ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 1,000 นาโนเมตร ช่วงคลื่นอินฟราเรดที่เรียกว่า “far infrared” จะไม่สามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ แสงยูวีเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 100 ถึง 400 นาโนเมตร ความถี่ 10^{15} - 10^{17} Hz ตามมนุษย์ไม่สามารถมองเห็น มีพลังงานสูงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้มาก ถ้าแสงยูวีที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 200 นาโนเมตร มีพลังงานมากพอที่จะทำลายพันธะทางเคมีได้ อาจทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radicals) ที่มีพลังงานสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ได้อย่างต่อเนื่อง [18]



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของพลังงานที่ดูดซับโดยโมเลกุลกับความยาวคลื่นของแสงที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นพลังงานและความยาวคลื่นที่สามารถทำลายพันธะต่าง ๆ ได้ [17]

แสงยูวีแบ่งเป็น 3 ช่องตามลักษณะที่มีผลกระทบต่อผิวหนังของมนุษย์

1. UVA ช่วงความยาวคลื่น 315–400 นาโนเมตร มีระดับพลังงาน 3.10-3.94 eV เป็นช่วงความยาวคลื่นที่มีพลังงานต่ำที่สุดของแสง UV ซึ่งจะส่งผลกระทบทำให้ผิวหนังมีสีน้ำตาลแต่เนื่องจากเป็นคลื่นที่อยู่ใกล้กับแสงที่ตามองเห็น จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Near UV
2. UVB ช่วงความยาวคลื่น 280–315 นาโนเมตร มีระดับพลังงาน 3.94-4.43 eV จะมีพลังงานสูงขึ้น สามารถทำให้ผิวหนังไหม้เกรียม และมีหลักฐานว่า ทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้
3. UVC ช่วงความยาวคลื่น 200–280 นาโนเมตร มีระดับพลังงาน 4.43-12.4 eV ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าแสงยูวีทั้งสองชนิดแรก สามารถดูดกลืนโดย DNA, RNA ในนิวเคลียสของเซลล์ได้ ส่งผลให้เซลล์เกิดการกลายพันธุ์ เกิดเซลล์มะเร็ง และเกิดการตายของเซลล์ สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและไวรัสได้ บางครั้งเรียกว่า Germicidal UV rang แสงยูวีที่มีความคลื่นน้อยกว่า 200 nm เรียกว่า Vacuum UV ซึ่งจะเป็นช่วงที่มีพลังงานมากพอที่จะทำลายพันธะทางเคมี และถูกดูดกลืนโดยสารประกอบได้ บางครั้งอาจเรียกว่า Ozone UV เพราะเป็นแสงยูวีที่สามารถกระตุ้นออกซิเจนในอากาศให้เป็นโอโซนได้ เนื่องจากแสงยูวีช่วงความยาวคลื่นนี้ถูกดูดกลืนโดยสารประกอบไอน้ำ และออกซิเจนในอากาศแสงยูวีนี้จึงคลื่นที่ผ่านตัวกลางที่เป็นสุญญากาศจึงเรียก Vacuum UV

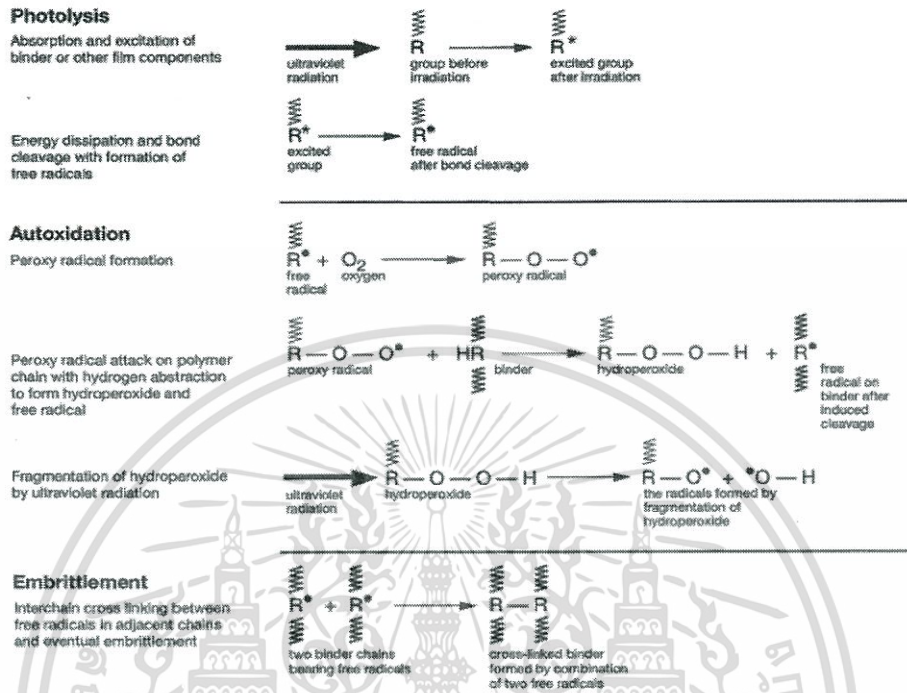


รูปที่ 2.17 การแบ่งชนิดของแสงยูวี [19]

โดยปกติแสงยูวีในธรรมชาติมาจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านมาจนถึงบรรยากาศของโลก ในชั้นบรรยากาศชั้นโอโซนสเฟียร์ ซึ่งมีโอโซนที่สามารถดูดกลืนแสงยูวีซี (UV-C) เกือบทั้งหมดจะเหลือแสงยูวีบี (UV-B) และแสงยูวีเอ (UV-A) ที่ส่องถึงผิวโลกที่เราใช้ในการอาบแดดเพื่อปรับสีผิวให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสีน้ำตาล (Sun tanning) แต่ทุกวันนี้โอโซนในชั้นบรรยากาศลดลง จึงทำให้แสงยูวีซี ทะลุผ่านถึงพื้นโลกมากขึ้น [18]



รูปที่ 2.18 กลไกการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ด้วยแสง [17]

สารป้องกันแสงยูวีซีเพื่อปกป้องพอลิเมอร์โดยเฉพาะเรื่องสีซีด, เปราะ, และเสื่อมสภาพจากแสงแดด

สารป้องกันแสงยูวีมี 5 กลุ่มใหญ่ดังนี้

1. ตัวดูดยูวี (UV Absorber) คือ สารเคมีที่มีโครงสร้างที่สามารถดูดแสงยูวีแล้วกระจายพลังงานในรูปแบบที่ไม่ทำอันตรายคือมีการปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่าหรือพลังงานต่ำกว่าออกมาในรูปความร้อน ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อพันธะของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้แสงยูวีไม่สามารถทำอันตรายต่อเนื้อพลาสติกได้ โดยสารนี้ต้องมีเสถียรภาพสูง ไม่เกิดการสลายตัว

2. ตัวลดพลังงาน (Excited state quenchers) คือ ตัวเพิ่มเสถียรภาพทางแสง ที่โครงสร้างสามารถดูดพลังงานแสงโดยหมู่โครโมฟอร์ (Chromophore, K) พลังงานที่ดูดโดย Quenchers สามารถกระจายในรูปความร้อนหรือฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) โดยพอลิเมอร์ดูดกลืนพลังงานแสงยูวีและสามารถกำจัดพลังงานออกได้โดยไม่เกิดการแตกสลายกับพอลิเมอร์ โดยการผสมสารลดอุณหภูมิ จะทำให้พอลิเมอร์สามารถกลับมาสู่สภาวะที่เสถียรได้ กลไกที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ คือ การถ่ายโอนพลังงานระหว่างโมเลกุล สารลดอุณหภูมิจะเป็นตัวรับพลังงานที่มากเกินไป หลังจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

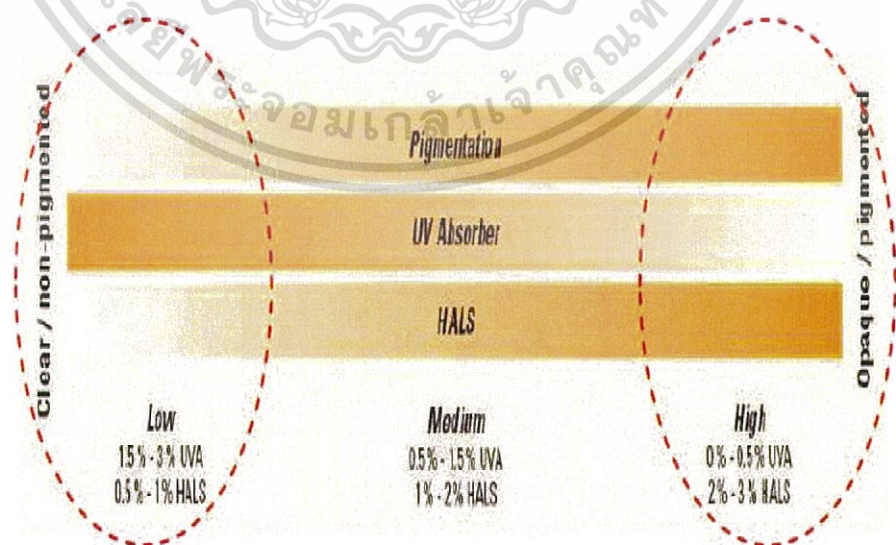
นั้นสารลดอนุมูลอิสระจะปลดปล่อยพลังงานที่มากเกินไปออกมาโดยไม่ทำให้เกิดการแตกสลายแก่พอลิเมอร์ ตัวอย่างสารลดอนุมูลอิสระ ได้แก่ สารประกอบบอร์แกโนนิเกิล ซิงก์-ไดเอทิลไดโทโอคาร์บาเมท

3. ตัวกำจัดอนุมูลอิสระ (Free-radical terminators) คือตัวกำจัดอนุมูลอิสระ (Free-radical) ที่เกิดขึ้นทำงานคล้ายกรณี Antioxidants ที่นิยม ได้แก่ Sterically hindered amine-type light stabilizers (HALS)

4. ตัวกรองแสงยูวี (Screening agent, light screens) ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการดูดซับแสงยูวีได้ดี และเป็นส่วนที่ไม่สามารถกระเจิงหรือสะท้อนแสงได้ ตัวอย่างตัวกรองแสง ผงสี (Pigment) เช่น เขม่าดำ ที่ขนาดอนุภาค 15-25 nm ปริมาณ 2-3 phr ให้ประสิทธิภาพสูงสุดสามารถดูดพลังงานในช่วงยูวี

5. สารสะท้อนแสงยูวี (UV reflector) เป็นวัสดุต้านทานแสงยูวี โดยเกิดการสะท้อนแสงทำให้สามารถป้องกันพลังงานของแสงยูวีที่จะมาถึงพอลิเมอร์ได้ สามารถป้องกันและยืดอายุการใช้งานกลางแจ้งได้เป็นอย่างดี การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) และแผ่นอะลูมิเนียมเคลือบพอลิเมอร์จะช่วยป้องกันไม่ให้แสงยูวีเข้ามาถึงพอลิเมอร์ การเคลือบด้วยโลหะแข็งจะทำให้เกิดการสะท้อนได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถป้องกันแสงยูวีได้อย่างสมบูรณ์เช่นเดียวกัน

ในการใส่สารป้องกันการเสื่อมสภาพต่าง ๆ นั้นเราต้องคำนึงถึงปริมาณการใส่ให้มีความเหมาะสมกับประเภทของผลิตภัณฑ์ของเรา เช่น สีของผลิตภัณฑ์ ความใสของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ในบางครั้งพอลิเมอร์ได้มีการใส่สารป้องกันการเสื่อมสภาพอยู่แล้ว จึงต้องวิเคราะห์ปริมาณในการใส่สารป้องกันการเสื่อมสภาพให้เหมาะสมถ้าใส่น้อยเกินไปจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการป้องกันไม่ดี แต่ถ้าใส่มากเกินไปอาจส่งผลให้เกิด Pro-oxidant effect ได้ [17]



รูปที่ 2.19 ปริมาณการใช้ตัวดูดยูวีและ HALS ที่เหมาะสม [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่ข้อมูลเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 หน้าทีของตัวดูดยูวีและ HALS [17]

	UV Absorbers	Radical Scavengers
ชนิดของสารเคมี	Benzophenones, Benzotriazoles, Triazines, Oxalanilides	Sterically hindered amines (HALS)
กลไกการทำงาน	ดูดซับรังสียูวี (Physical principle)	กำจัดอนุมูลอิสระ (ปฏิกิริยาเคมี)
หน้าที่ป้องกัน	ชั้นเคลือบด้านในและด้านนอก	ชั้นเคลือบด้านนอก
ป้องกันบริเวณ	ทุกชั้นที่ถูกเคลือบ, ชั้นรองพื้น (Base coat)	บริเวณพื้นผิวของชั้นเคลือบ
ป้องกันไม่ให้เกิด	สีเปลี่ยนแปลง, เกิดการพองหรือ พองอากาศบนชั้นเคลือบ และ สูญเสียความสามารถในการยึด ติด	ความมันวาวลดลง, การแตก และเป็นฝุ่นผงตรงบริเวณ พื้นผิว (Chalking)

2.5.4 สารให้สี

สารให้สี (Colorants) ทำให้เกิดสีต่าง ๆ เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มีสี เพื่อความสวยงาม จึงจำเป็นต้องมีการใส่สารที่ทำให้เกิดสีลงไป ในยาง สีที่ใส่ลงไป ในยางควรมีประสิทธิภาพ ทนทานแสง ความร้อน ไม่ตกสี ไม่เป็นพิษ มีราคาแพง ไม่มีผลต่ออายุของยาง และอัตราการเร็วในการทำใหยางเชื่อมโยง

สารให้สีสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ สีอินทรีย์ (Organic colorant) และ สีอนินทรีย์ (Inorganic colorant)

1 สีอินทรีย์ (Organic colorant) เป็นสีชนิดที่มีประสิทธิภาพดี นำมาใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย ประมาณ 1 phr สีอินทรีย์บางชนิดเปลี่ยนสีหรือสีจางลงได้ง่ายถ้าถูกแสงเป็นเวลานาน หรือถูกสารเคมี แต่ไม่ทนต่อการแปรรูปที่อุณหภูมิสูง อาจใช้สีอินทรีย์ในรูปของผงสี หรือในรูปของส่วนผสมของยางกับสารเคมี หรือ มาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 สีสอนินทรีย์ (Inorganic colorant) เป็นสีชนิดที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าพวกสีอนินทรีย์ ราคาค่อนข้างถูก แต่ต้องใช้ปริมาณมาก ประมาณ 5-10 phr สีค่อนข้างทึบไม่ใส แต่มีความคงตัวอยู่นาน สีมักไม่จาง และทนอุณหภูมิสูง ตัวอย่างสารให้สีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เช่น เขม่าดำ (Carbon Black) มีราคาที่ถูก ใส่ได้ในปริมาณมาก (ประมาณ 50-100 phr) และมีความสามารถในการช่วยเสริมแรงให้กับยาง ทำให้ความแข็งแรงของยางเพิ่มขึ้น 10 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปให้ง่ายขึ้น เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์หลังจากการขึ้นรูป เป็นต้น [15]

2.5.5 สารให้ฟอง

สารให้ฟอง (Blowing agent) คือ สารเคมีที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์แล้วช่วยให้เกิดรูพรุนภายในโครงสร้างของยาง โดยโมเลกุลของสารให้ฟองจะเกิดการแตกสลายเมื่อได้รับความร้อน และให้แก๊สออกมา ซึ่งทำให้พอลิเมอร์เป็นรูพรุนในรูปแบบของฟองน้ำ หรือยางไมโครเซลลูลาร์ ตัวอย่างสารทำให้เกิดฟอง ได้แก่ โซเดียมโบคาร์บอเนต ซึ่งให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสารอินทรีย์บางชนิดให้แก๊สไนโตรเจน ส่วนพวกแอมโมเนียมคาร์บอเนตชนิดเม็ด (Pellet) ให้แก๊สแอมโมเนียขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นในยางนั้นควบคุมได้ด้วยชนิดสารที่ให้แก๊สและอัตราเร่งของการเกิดแก๊ส โฟม ฟองน้ำ หรือวัสดุรูพรุน (Cellular structure)

ชนิดของสารให้ฟองแบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

1) สารประกอบเอโซ (Azo compounds)

Azo compounds เช่น Diazoamino - Compound Azonitile และ Azodicarbonamide (AZ) โดย AZ มีอุณหภูมิสลายตัวที่ 215°C มีอุณหภูมิสลายตัวที่ 215°C แต่จะเริ่มปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกมาที่อุณหภูมิประมาณ 140°C สามารถปล่อยก๊าซได้ปริมาณมากถึง $190\text{ cm}^3/\text{g}$ ไม่เปลี่ยนสียางและไม่ทำให้ยางมีกลิ่น

2) สารประกอบไนโตรโซ (N-nitroso compounds)

N-nitroso compounds เช่น N,N'-Dinitrosopentamethylene tetramine (DNPT) N,N'-Dimethyl-N,N'-Dinitrosophthalamide เป็นต้น โดย DNPT เริ่มสลายตัวให้แก๊สที่อุณหภูมิประมาณ $120 - 125^{\circ}\text{C}$ สามารถปลดปล่อยให้แก๊สได้ปริมาณสูงถึง $260\text{ cm}^3/\text{g}$

3) อนุพันธ์ของไฮดราซีน (Hydrazine derivatives)

Hydrazine derivatives เช่น Benzene-1,3-disulfohydrazide, Benzenesulfohydrazide (BSH) เป็นต้น โดย BSH มีอุณหภูมิการสลายตัวในยางประมาณ $80 - 90^{\circ}\text{C}$ ปล่อยแก๊สไนโตรเจนได้ $115 - 130\text{ cm}^3/\text{g}$ โดยไม่เปลี่ยนสียางและไม่ทำให้ยางมีกลิ่น [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของสารให้ฟอง

- ชี้นงานมีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ
- ลดต้นทุน ใช้น้ำหนักวัตถุดิบน้อย แต่ได้ผลิตภัณฑ์ปริมาณมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลายชิ้น
- เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี
- มีการใช้งานหลากหลาย เช่น วัสดุฉนวน วัสดุกันกระแทก เป็นต้น

ตัวกระตุ้นหรือคิกเกอร์

ตัวกระตุ้นหรือคิกเกอร์ (Kickers) คือสารที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารให้ฟอง โดยช่วยลดอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง และทำให้ง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง ตัวอย่างเช่น

- สารที่เป็นกรด เช่น กรดซาลิไซลิก และกรดพทาลิก (Phthalic) เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีกลิ่น และกรดทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงช้าลง
- สารที่เป็นด่าง เช่น ยูเรีย และสารผสมที่มียูเรีย เป็นต้น
- สารที่เป็นกลาง เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น การใช้สารที่เป็นกลาง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีกลิ่น
- Transition metal compounds เช่น Zn-, Cd-, Pb- ในรูปออกไซด์ หรือเกลือของกรดไขมัน
- Amines, Amides และ Glycols

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟอง

- 1) ชนิดและปริมาณสารให้ฟอง (CBA)
- 2) เกรด (ความบริสุทธิ์ ขนาดอนุภาค การกระจายตัว ฯลฯ)
- 3) อุณหภูมิ และเวลาการให้ความร้อน
- 4) ชนิดและปริมาณ Kicker
- 5) ความหนืดของพอลิเมอร์ขณะเกิดฟอง
- 6) ความดัน (Pressure) ของระบบ
- 7) ผลของสารเคมีอื่น ๆ ในสูตร

2.6 การหดตัวของพอลิเมอร์

ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวของพอลิเมอร์ ได้แก่

2.6.1 การจัดเรียงตัวของสายโซ่

ระยะยืดเพิ่มขึ้นความสามารถหดตัวด้วยความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวเพิ่มมากขึ้นและมีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น เมื่อให้ความร้อนแก่สายโซ่โมเลกุลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์จะพยายามหดตัวมา ณ ตำแหน่งก่อนดึงยึด ดังนั้นสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวมาก จะก่อให้เกิดการหดตัวมากเช่นกัน

2.6.2 ปริมาณของอีลาสโตเมอร์

พอลิเมอร์ผสมระหว่างพลาสติกกับยาง เช่น อีวีเอกับยางคาร์บอซิลเลตไนไตรล์ ความสามารถในการหดตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณส่วนของยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อให้อุณหภูมิหดตัวส่วนที่ทำหน้าที่ในการหดตัวกลับส่วนหนึ่งคือ อีลาสโตเมอร์ ดังนั้นเมื่อ ปริมาณยางเพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้น

2.6.3 ปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุล

พอลิเมอร์ที่มีปริมาณการเชื่อมโยง (Crosslink content) มากจะมีค่าความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อนมากกว่าพอลิเมอร์ที่มีปริมาณการเชื่อมโยงต่ำ เนื่องจากเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงมากทำให้มีจุดเชื่อมโยงโมเลกุลมากซึ่งจุดเชื่อมโยงโมเลกุลนี้เปรียบเสมือน Memory point ในการหดกลับ ดังนั้นเมื่อมีปริมาณการเชื่อมโยงมาก ทำให้เกิดการหดตัวเพิ่มขึ้น

2.6.4 ระบบการเชื่อมโยงโมเลกุล

พอลิเมอร์ผสมระหว่างพลาสติกกับยาง เช่น พอลิโอเลฟินส์ (Polyolefin) กับยาง EPDM พบว่าการเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยเปอร์ออกไซด์จะทำให้ค่าการหดตัวด้วยความร้อนมากกว่าระบบการเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยกำมะถันเนื่องจากระบบการเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยกำมะถันจะเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลเฉพาะส่วนของยาง EPDM แต่ระบบการเชื่อมโยงด้วยสารเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลทั้งสองส่วน คือ พอลิโอเลฟินส์ และยาง EPDM จึงทำให้เกิดการหดตัวเพิ่มขึ้น

2.6.5 ความเค้นตกค้าง

เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์สูงขึ้น แล้วนำชิ้นงานมาทำการหล่อเย็นจะทำให้เกิดการหดตัวเพิ่มมากขึ้น แต่จะส่งผลให้ชิ้นงานมีผิวที่สววย เพราะมีความเค้นตกค้าง เนื่องจากภายในชิ้นงาน มีการเย็นตัวที่ช้ากว่า บริเวณด้านนอกของชิ้นงาน โดยเฉพาะชิ้นงานที่หนา แต่หากใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ต่ำลง จะทำให้การหดตัวน้อยลง เพราะมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่น้อยกว่า จึงทำให้มีความเค้นตกค้างในชิ้นงานน้อยกว่า [21]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pern, F.J. และคณะ [2] ศึกษาผลกระทบของกระบวนการขึ้นรูปโดยความร้อน และการเสื่อมสภาพของอีวีเอเนื่องจากสภาพของภูมิอากาศ ที่มีผลต่อการเกิดสีของอีวีเอพบว่าอีวีเอที่เก็บไว้ในที่มีดที่อุณหภูมิปกติจะไม่เกิดการเสื่อมสภาพ ในขณะที่ฟิล์มอีวีเอที่ใช้งานกลางแจ้งจะเริ่มกลายเป็นสีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลืองพร้อมทั้งมีผลิตภัณฑ์ประเภท กรดอะซิติกและสารอัลติไฮต์เกิดขึ้นถ้าหากปริมาณของ UV absorber ชนิด Cyasorb UV 531 มีปริมาณลดลงต่ำกว่า 70% ของปริมาณที่ผสมลงไปตอนเริ่มต้น นอกจากนั้นพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเชื่อมสภาพจะมีลักษณะเป็นเจล หรือเกิดการ Crosslink ขึ้น แสดงให้เห็นว่ากลไกของการเชื่อมสภาพของ EVA จะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ โดยที่บริเวณตรงกลางจะมีสีเหลืองเข้มกว่าและมีปริมาณกรดอะซิติกเกิดขึ้นสูงกว่า ที่บริเวณขอบรอบ ๆ แผ่นฟิล์ม ซึ่งอาจเกิดจากการ Crosslink ใน EVA ทำให้ปริมาตรอิสระของ EVA ลดลง และ UV absorber จึงถูกขับออกมาโดยการแพร่จากตรงกลางมาบริเวณรอบ ๆ ทำให้ตรงกลางมีปริมาณ UV absorber ลดลง ในขณะที่ตรงบริเวณรอบ ๆ ของแผ่นฟิล์มมีปริมาณ UV absorber มากขึ้น เมื่อนำสารตั้งต้นอีวีเอ (Elvax 150) มาสกัดด้วยเมธานอล และ อะซิโตนแล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติทางด้านการดูดกลืนแสง พบว่าสารตัวอย่างดังกล่าวจะถูกดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 280 นาโนเมตร ซึ่งมีฟังก์ชันดังกล่าวอาจเกิดจากส่วนของตัวเริ่มปฏิกิริยา ที่ติดอยู่ในสายโซ่ของ EVA ซึ่งได้แก่หมู่ฟังก์ชัน Alpha, Beta-, Unsaturated carbonyl groups จะมีความไวต่อการถูกกระตุ้นด้วยแสง (Photosensitizer) สามารถทำให้พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมสภาพ นอกจากนั้นกระบวนการขึ้นรูปทางความร้อน เช่น การอัดรีดและการ Curing มีผลทำให้ลักษณะของสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ EVA เปลี่ยนไปด้วย โดยมีการขยับพีคของการดูดกลืนแสง จากที่ 355 นาโนเมตร เป็นที่ 383 นาโนเมตร และมีพีคใหม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 322 นาโนเมตร ซึ่งเชื่อว่าน่าจะเกิดจากการที่หมู่คาร์บอนิลที่ติดมากับสารตั้งต้น EVA เปลี่ยนแปลงไปเป็น Chromophore ชนิดใหม่ เมื่อผ่านกระบวนการ Curing โดย Curing agent ที่เกิดปฏิกิริยาช้า เช่น 2,5-dimethyl-2,5-di-*t*-butylperoxyhexane [Lupersol101] จะทำให้เกิด Chromophore มากขึ้นกว่าสาร Curing agent ที่เกิดปฏิกิริยาเร็ว เช่น O,*o*-*t*-butyl-O-(2-ethylhexyl)monoperoxy carbonate [Lupersol TBEC] เนื่องจากมีสารตกค้างประเภทอนุมูลอิสระเปอร์ออกซีเหลืออยู่มาก เพราะ Curing agent เกิดปฏิกิริยาช้า ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้จะมีส่วนร่วมในการเร่งให้เกิด Chromophore และการเชื่อมสภาพของ EVA โดยเกิดปฏิกิริยาการขจัดกรดอะซิติก (Deacetylation) ได้มากขึ้น นอกจากนั้น ยังพบว่าการเติม UV absorber เช่น 2-hydroxy-4-*n*-octylbenzophenone [Cyasorb UV 531] ลงไปจะไม่สามารถป้องกันการเกิดสีหรือการเชื่อมสภาพของ EVA ได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากว่า Cyasorb UV 531 จะไม่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นสูงกว่า 360 นาโนเมตร ได้ ซึ่งช่วงดังกล่าว เป็นช่วงที่หมู่ Unsaturated carbonyl ที่แฝงอยู่ในโมเลกุลอีวีเอจะเกิดการดูดกลืนแสง ยิ่งไปกว่านั้นจากการศึกษาภายหลังต่อมาพบว่าสาร UV absorber จะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วและมีส่วนเร่งให้เกิดสีขึ้นในชิ้นงานโดยเน้นที่การเลือกใช้สาร Curing agent ที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็ว ซึ่งจะมีผลดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือช่วยลดปริมาณอนุมูลอิสระตกค้างและสารระเหยหรือแก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยาซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลให้สารแอนติออกซิแดนต์ไม่เกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพจากความชื้นและอุณหภูมิ

ประชิด สระโมหี [22] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวของพอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็ม (สัดส่วน 70:30 phr) และสมบัติทางกายภาพของยางวัลคาไนซ์ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ปริมาณและชนิดสารตัวเติม (เขม่าดำ, ซิลิกา, ดินขาว และแคลเซียมคาร์บอเนต) และระบบการวัลคาไนซ์ จากการทดลองพบว่า ยางคอมปาวด์เติมด้วยดินขาวมีการหดตัวน้อยที่สุด โดยหดเพียง 1-2% เนื่องจากลักษณะอนุภาคของดินขาวที่เป็นแผ่น เกิดการจัดเรียงตัวได้ง่าย และอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ยางคอมปาวด์เติมด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตมีการหดตัวมากที่สุด เนื่องจากอนุภาคแทรกระหว่างส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ ไม่มีพันธะระหว่างสารตัวเติม หรือสารตัวเติมกับยางเกิดขึ้น ส่วนยางคอมปาวด์ที่เติมด้วยเขม่าดำ และซิลิกามีการหดตัวคล้ายคลึงกันโดยหดน้อยรองมาจากดินขาว การใส่เขม่าดำและซิลิกาในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลให้สารตัวเสริมสามารถเสริมแรงให้กับยางได้ด้วยแรงดึงดูดระหว่างสารตัวเติมที่ก่อตัวเป็นอะกรีเกต (Aggregates) สำหรับยางวัลคาไนซ์ทั้งหมดพบว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในคอมปาวด์ ทำให้การหดตัวของยางวัลคาไนซ์ลดลง เนื่องจากสัดส่วนของยางซึ่งเป็นส่วนที่หดตัวมีปริมาณลดลง นอกจากนี้ยังพบว่ายางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์ประสิทธิภาพ (EV) มีการหดตัวน้อยกว่ายางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์กึ่งประสิทธิภาพ (SEV) และระบบวัลคาไนซ์ปกติตามลำดับ เนื่องจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่มากกว่าระบบอื่น เกิดการเชื่อมขวางสูงที่สุด ทำให้ปริมาณ Free volume ลดลง เกิดการจำกัดและขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ยางวัลคาไนซ์มีความแข็งแรงเหนียวทำให้มีการหดตัวต่ำ

วิรัชญา แก้ววัฒนะ และคณะ [3] ศึกษาผลของการเติมสารแอนติออกซิแดนต์ ได้แก่ N,N'-diphenyl-1,4-phenylenediamine, Irganox, Irgafos และ สารเพิ่มความเสถียรต่อแสงยูวี ได้แก่ Tinuvin ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการทนต่อแสงยูวีเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้นำไปใช้ในอาคารที่ต้องเผชิญกับแสงแดด ความร้อน โอโซน เป็นต้น โดยการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ในสัดส่วน 60/35, 60/40, 70/30 โดยใช้ขนาด Batch size เท่ากับ 250 กรัม ทำการบดผสมในเครื่อง Brabender Plasticorder ที่ 130°C เป็นเวลาประมาณ 18-20 นาที พบว่า Irganox และ Irgafos ที่เป็นสารแอนติออกซิแดนต์ ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีค่าความต้านแรงดึง และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด สูงขึ้นเมื่อใช้สารทั้งสองควบคู่กันในปริมาณ 0.5 และ 0.5 phr ตามลำดับ นอกจากนี้การเติมสารเพิ่มความเสถียรต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต ชนิด Tinuvin ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีค่า Compression set ลดลง แต่สารชนิด N,N'-diphenyl-1,4-phenylenediamine ให้ผลตรงกันข้าม และในเรื่องทดสอบสมบัติความทนทาน

ต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตพบว่า การเติม Tinuvin ในปริมาณ 0.5 phr มีส่วนช่วยในการยืดอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น มีรอยแตกเพียงเล็กน้อยหรือไม่มี ทนต่อแสงยูวี และสีของชิ้นงานกระเบื้อง ปูพื้น ยางจางช้ากว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติม Tinuvin เนื่องจาก Tinuvin ช่วยปกป้องสีไม่ได้รับพลังงานจากแสงยูวี และจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้ควบคู่กับสารแอนติออกซิแดนซ์ชนิด Irganox, และ Irgafos ในปริมาณ 0.5 และ 0.5 phr. ตามลำดับ

Lewis, K.J and Megerle, C.A. [23] ศึกษาการใช้สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เพื่อเพิ่มเสถียรของแผ่นฟิล์มอีวีเอ และเพื่อช่วยให้เซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น เนื่องจากวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งวัสดุดังกล่าวต้องสามารถทนต่อการเสื่อมสภาพโดยแสงแดดหรือแสงยูวี สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากวัสดุที่ใช้ห่อหุ้มเซลล์คืออีวีเอ จุดอ่อนคือเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างการใช้งาน โดยมีลักษณะการเกิดสีเข้มขึ้นเป็นสีเหลืองไปจนถึงน้ำตาลซึ่งเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า Yellowing หรือ EVA browning นอกจากนี้ยังพบว่า การเกิดสีในลักษณะดังกล่าวมีผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงถึง 30% เมื่อเผชิญกับสภาพแวดล้อม ดังนั้นผู้ทดลองจึงได้ใช้สารเติมแต่งประเภท Peroxide curing agent ได้แก่ 1,1-di-(t-butylperoxy)-3,3,5-trimethyl-cyclohexane สารเพิ่มเสถียรภาพทางแสง (UV Stabilizer) ได้แก่ Bis-(N-octyloxy-tetramethyl) piperidine sebacate และสารแอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidant) ได้แก่ Tris(2,4-di-tert-butylphenyl)phosphite หรือ 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)phosphite ปริมาณ 1.5, 0.1, 0.2 phr ตามลำดับ โดยการเตรียมอีวีเอคอมปาวด์ผสมพอลิเมอร์กับสารเคมี ๆ ข้างต้น โดยใช้เครื่องอัดรีด (Extrusion) ที่ 90°C รีดออกมาเป็นแผ่นซีทแล้วนำฟิล์มอีวีเอไปผ่านกระบวนการลามิเนชันเข้ากับชิ้นส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยสภาวะในการผลิตใช้อุณหภูมิ 110-120°C เพื่อเร่งให้สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่ผสมอยู่ในอีวีเอคอมปาวด์เกิดการแตกตัวและชักนำให้โมเลกุลอีวีเอเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล จากนั้นนำแผ่นฟิล์มอีวีเอผ่านการให้ความร้อนแล้วไปวางในเครื่องเร่งสภาวะที่มีหลอดอัลตราไวโอเล็ต UV-B lamp เป็นเวลา 800 ชั่วโมง พบว่าสมบัติเชิงกลดีขึ้นและวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพโดยแสงแดดหรือแสงยูวีได้นานขึ้น

Rani, M. และคณะ [24] ศึกษาผลของสารป้องกันรังสียูวีและสารแอนติออกซิแดนซ์ที่มีในพลาสติกที่ใช้ขึ้นรูปเรือและผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยนำเศษพลาสติก 3 ชนิด ได้แก่ พลาสติกที่ได้จากเรือบริเวณชายฝั่งทะเล, พลาสติกที่เรืออยู่บริเวณความอุดมสมบูรณ์ และพลาสติกที่พบบ่อยในการขึ้นรูปเรือ ซึ่งนำตัวอย่างทั้งหมดมาเคลือบด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งปนเปื้อนและนำไปเก็บที่อุณหภูมิ -20°C ก่อนที่จะนำไปทดสอบด้วย UV 320, UV 326, UV327, UV 328, Irganox1076,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Irganox1010, BHT และ 2,4-DTBP พบว่าสารป้องกันรังสียูวีและสารแอนติออกซิแดนต์ ช่วยเพิ่มศักยภาพของพลาสติกที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทางทะเลและยังยืดอายุการใช้งานให้นานขึ้น

Badiee, A. และคณะ [25] ศึกษาการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์อีวีเอ ที่มีการใช้ เป็นกาวและตัวห่อหุ้ม (Encapsulant) แผงโซลาร์เซลล์ สาเหตุที่มีการใช้อีวีเอมากในอุตสาหกรรมนี้ เนื่องจาก ราคาถูก ความแข็งแรงยึดติดสูง โปร่งใส และมีความทนทานต่อไฟฟ้า ในการใช้งานอีวีเอกับ แผงโซลาร์เซลล์จะใช้อีวีเอ ที่มีปริมาณไวโนลอะซิเตท 28-33% โดยน้ำหนักและผสมกับสารเติมแต่ง อื่น ๆ เช่น สารเชื่อมโยง, UV Absorbers, Photo antioxidants และ Thermo antioxidants อีวีเอ ทำหน้าที่ยึดติดซิลิโคนเซลล์ กับพื้นผิวกระจกด้านหน้า และแผ่นด้านหลังของแผงโซลาร์เซลล์ การ เคลือบโซลาร์เซลล์ด้วยอีวีเอมีความสำคัญต่อการป้องกันการทำลายจากสิ่งแวดล้อม เช่น ฝน, ความ ร้อน และแรงเชิงกล เป็นต้น เมื่ออีวีเอพบเจอสถานะที่ใช้งานแผงโซลาร์เซลล์จะส่งผลให้เกิดการ เสื่อมสภาพทางเคมี โดยเฉพาะเมื่อมีความร้อน, ความชื้น และรังสียูวี เป็นตัวเร่งการเสื่อมสภาพ ทำให้ เกิดการแยกชั้นของแผงโซลาร์เซลล์, เกิดการเปลี่ยนสีของอีวีเอ และเกิดการกัดกร่อนในส่วนของโลหะ เนื่องจากกรดอะซิติกที่เกิดขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบแผ่นซีทีอีวีเอโดย DMA (Dynamic Mechanical Analysis), DSC (Differential Scanning Calorimetry) และ TGA (Thermo gravimetric Analysis) การทดสอบจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกล เมื่อชิ้นงานรับอุณหภูมิ เป็นระยะเวลาหนึ่งและเปอร์เซ็นต์การเสื่อมสภาพเมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานาน จากผลการ ทดลองพบว่าการเสื่อมสภาพส่งผลให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ โครงสร้างเป็นระยะยาว ค่อนข้างมากกว่าการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ทางเคมีของวัสดุ โดยกระบวนการ เสื่อมสภาพของอีวีเอประกอบด้วย กระบวนการแรก คือปฏิกิริยา Deacetylation และกระบวนการที่ สอง คือการขาดของสายโซ่หลักอีวีเอ

Jentsch, A. และคณะ [26] ศึกษาการเสื่อมสภาพของอีวีเอที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในการ เคลือบแผงโซลาร์เซลล์ซิลิโคน เพื่อทำหน้าที่ในการยึดองค์ประกอบต่าง ๆ ของแผงโซลาร์เซลล์ให้คงที่ เป็นฉนวนไฟฟ้า และ ปกป้องแผงโซลาร์เซลล์จากแรงเชิงกลและแรงจากสิ่งแวดล้อม เมื่ออีวีเอเผชิญกับ สภาพแวดล้อมที่ใช้งานจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ โดยเป็นการเสื่อมสภาพแบบ Photo degradation ทำให้อีวีเอเกิดการสลายตัวก่อให้เกิดการตัดสายโซ่หลักพอลิเมอร์ และเกิดไอระเหย ซึ่ง ล้วนส่งผลให้อีวีเอสูญเสียความสามารถในการยึดติด ก่อให้เกิดการแยกชั้นของแผงโซลาร์เซลล์ และ บริเวณอีวีเอพอยล์เปลี่ยนเป็นสีเหลืองเนื่องจากแสงทำให้ปฏิกิริยา Deacetylation ทำให้เกิดการ เปลี่ยนโครงสร้างของ อีวีเอเป็นโครงสร้างคอนจูเกตซึ่งทำหน้าที่เป็น Chromophore จึงทำให้เกิดการ เปลี่ยนสี สิ่งเหล่านี้ล้วนส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ลดลง ดังนั้นวิธีการที่จะทำให้แผงโซ ลาร์เซลล์มีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นคือการใส่สาร Stabilizer ต่าง ๆ เช่น UV

absorber (UVAbs) , Hindered amine light stabilizer (HALS) และ Phosphite เป็นต้น ลงไปในพอลิเมอร์เพื่อยับยั้งและหลีกเลี่ยงการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตามแม้จะมีการใส่สาร Stabilizer แต่อียูเอยังคงเกิดการเสื่อมสภาพ ในบางตัวอย่างที่มีการใส่ Stabilizer ที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบพอลิอียูเอที่มีการผสมสารเติมแต่งในสูตรที่ต่างกัน โดยสูตร 1 ไม่มีการใส่สาร Stabilizer, สูตร 2 ใส่ UVAbs, สูตร 3 ใส่ HALS, สูตร 4 ใส่ UVAbs และ HALS, สูตร 5 ใส่ Phosphite, สูตร 6 ใส่ UVAbs และ Phosphite, สูตร 7 ใส่ HALS และ Phosphite และสูตรที่ 8 ใส่สาร stabilizer ทั้ง 3 ชนิด โดยมีการเคลือบพอยล์และไม่เคลือบพอยล์ และมีการให้รังสี UV ในอุณหภูมิ 50°C และนำไปทดสอบด้วย ATR-FTIR, ทดสอบการยึดติด สี และการส่องผ่าน (Transmission) จากผลการทดลองพบว่าการเสื่อมสภาพด้วยแสงของอียูเอสามารถชะลอได้ด้วยการเติม UVAbs ร่วมกับ HALS ในขณะที่การใส่ Phosphite และการใส่ UVAbs มากเกินไป ผลทดสอบการยึดติดและสีพบว่า UVAbs และ Phosphite มีผลต่อกระบวนการแยกชั้นและเปลี่ยนเป็นสีเหลืองที่มาจากเกิดการเสื่อมสภาพด้วยแสง โดยเมื่อ UVAbs ได้รับพลังงานทำให้เกิดการสลายตัวก่อให้เกิดกรดเบนโซอิกและฟีนอล ซึ่งกรดเบนโซอิกทำให้การยึดติดระหว่างอียูเอและพื้นผิวกระจกสูญเสียไปขณะที่ฟีนอลทำให้อียูเอเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ส่วนการเสื่อมสภาพของ Phosphite ส่งผลให้ Phosphite เปลี่ยนเป็นสีเหลืองเช่นกัน และสรุปได้ว่าวิธีการลดการเปลี่ยนสีของอียูเอและการยึดติดคือการใส่สาร Stabilizer ชนิด HALS

Chweet, K.H. และคณะ [27] ศึกษาผลของรังสียูวี ต่อความต้านทานแรงดึง พอลิเมอร์ผสมของอียูเอ และพอลิไวนิลฟลูออไรด์เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Poly(vinyl fluoride- Ethylene-vinyl acetate), PVF) เนื่องจากปัจจุบันใช้พอลิเมอร์ในงานภายนอกเป็นจำนวนมาก โดยทำการศึกษาอียูเอและอียูเอผสม PVF ชิ้นงานทดสอบได้รับแสงยูวี เป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 วัน แล้วจึงนำไปทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงและปริมาณการยืดตัว (Elongation) เพื่อเปรียบเทียบสมบัติกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการรับรังสียูวี จากผลการทดลองพบว่ารังสียูวี ได้ทำลายพันธะโคเวเลนต์ ทำให้เกิดการตัดสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ความยาวของสายโซ่ลดลง โดยตำแหน่งที่โดนตัดขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ เมื่อเทียบชิ้นงานอียูเอที่ไม่ได้รับรังสียูวี กับชิ้นงานอียูเอที่ได้รับรังสียูวี เป็นระยะเวลาต่างกัน พบว่าชิ้นงานที่รับรังสีนานมากเท่าไรจะทำความแข็งแรงเชิงกลลดลง เกิดความเปลี่ยนแปลงกับสมบัติเชิงกล เนื่องจากเกิดการเสียหายของอียูเอ โดยดูได้จากค่าความแข็งแรงดึงที่ลดลง ส่วนการทดสอบชิ้นงานอียูเอผสม PVF จากผลการทดลองพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่ได้รับรังสียูวี เป็นเวลา 1 และ 7 วันมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้รับรังสียูวี แต่ชิ้นงานที่รับรังสียูวี เป็นเวลา 3 และ 5 มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้รับรังสียูวี ซึ่งแสดงถึงสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นสาเหตุเนื่องจากเกิดอนุมูลอิสระขึ้นในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการเชื่อมโยงส่งผลให้ชิ้นงานมีความเอนกสารนี้เป็นเอนกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปแล้วชิ้นงานอีวีเอผสม PVF ที่ได้รับรังสียูวี เป็นระยะเวลา 7 วันยังมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพคือสีที่เปลี่ยนไป และน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการแตกหักและเสียหายต่อไป

National Institute of Standards and Technology [28] ศึกษาการเสื่อมสภาพของอีวีเอที่มีการใช้งานในแผงโซลาร์เซลล์ โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสียหายคือ รังสี, อุณหภูมิ และความชื้น แต่การเสียหายด้วยออกซิเจนยังไม่สามารถบอกถึงกลไกการเสื่อมสภาพได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะศึกษาในเรื่องนี้ เนื่องจากในการใช้งานออกซิเจนจะแพร่ไปสู่บริเวณตรงกลางของชิ้นอีวีเอที่ติดกับชั้นอื่น ซึ่งมีการแพร่มากกว่าบริเวณขอบของแผงโซลาร์เซลล์ เปลี่ยนสภาวะของชิ้นอีวีเอจาก Anaerobic เป็น Aerobic วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาการเสื่อมสภาพของอีวีเอในสภาวะมีอากาศและสภาวะอาร์กอนและได้รับรังสี UV นอกจากนี้ยังศึกษาผลของความยาวคลื่นต่อการเสื่อมสภาพของอีวีเอในทั้งสองสภาวะ โดยเตรียมชิ้นงานจากกระบวนการ Spin Casting ส่วนประกอบที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานคืออีวีเอ, Chimasorb 81 ทำหน้าที่เป็น UV Absorber และ Tinuvin 770 คือ HALS อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงานทั้ง 2 สภาวะคือ 50°C ใช้ 4 ช่วงความยาวคลื่นในการทดสอบคือ 306 nm, 326 nm, 354 nm และ 452 nm หลังจากการทดสอบนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ผลด้วย Ultraviolet-Visible spectroscopy เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพทางแสง, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพทางเคมี และ Atomic Force Microscopy (AFM) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา จากผลการทดลองพบว่าออกซิเจนส่งผลกระทบต่ออีวีเอที่รับรังสียูวี โดยก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางแสงและทางเคมี การเสื่อมสภาพของอีวีเอโดยสาเหตุหลักในการเกิดเสื่อมสภาพและการเปลี่ยนสีของอีวีเอเป็นสีเหลืองคือ รังสียูวี และออกซิเจน ซึ่งออกซิเจนมีผลต่อการเปลี่ยนสีมากกว่าอาร์กอน, การสูญเสีย UV absorber และ HALS จะเกิดขึ้นเมื่ออีวีเอได้รับรังสียูวี และในช่วงความยาวคลื่นสั้นยิ่งส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้นทั้งในสภาวะ Anaerobic และ Aerobic

พรพจน์ ตันเส็ง และ พลอนันต์ สดโคกกรวด [29] ศึกษาวิจัยผลเนื่องจากอิทธิพลของปูนขาวต่อการหดตัวและคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวบวมตัวที่พบในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการวิจัยได้ทดลองปรับปรุงดินบวมตัวด้วยปูนขาว 3 ชนิดได้แก่ แคลเซียมออกไซด์, แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนต โดยดินที่ใช้มีสัดส่วนผสมของดินเหนียวบวมตัวสูงต่อดินเหนียวไม่บวมตัวเท่ากับ 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 และ 100:0 โดยได้ทดลองผสมปูนขาว 1, 3, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับดินผสม จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและทดสอบการหดตัวพร้อมกับตรวจสอบปริมาณน้ำในดิน โดยการที่ดินมีความเป็นพลาสติกสูง ทำให้บด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัดได้ยาก ต้องใช้น้ำในการบดอัดเพิ่มขึ้นจึงทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัดเพิ่มขึ้นและดินที่บดอัดยังคงมีการบวมและหดตัวสูง เมื่อตัวอย่างแห้งสนิทในอากาศแล้วนำตัวอย่างไปศึกษาเนื้อดินที่เปลี่ยนแปลงไป ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ปูนขาวชนิดแคลเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์สามารถลดดัชนีพลาสติกของดินได้ดี แต่ปูนขาวแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่สามารถลดดัชนีพลาสติกได้อย่างมีนัยสำคัญ การศึกษาเนื้อดินพบว่าเม็ดดินมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ดินเหนียวมีพฤติกรรมเหมือนกับดินซิลท์มีความเป็นพลาสติกสูงมาก ในงานวิจัยนี้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนที่ใช้และชนิดของปูนต่อการหดตัวของดิน ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการประมาณปริมาณปูนขาวที่ใช้และปริมาณการหดตัวของดินที่อาจเกิดขึ้น โดยถ้าในดินมีปริมาณดินบวมตัวมากกว่า 50% การหดตัวสุดท้ายเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผสมกับปูนขาว ดังนั้นในการใช้งานต้องเลือกปรับปรุงดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกไม่เกินกว่า 60% ซึ่งทำได้โดยการผสมดินบวมตัวกับดินที่บวมตัวต่ำไม่เกิน 50% แล้วจึงปรับปรุงด้วยปูนขาว ปูนขาวแคลเซียมออกไซด์หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์

Plenco Plastics Engineering company [30] ศึกษาวิธีแก้ปัญหาที่พบเจอในกระบวนการขึ้นรูป Compression molding โดยสาเหตุในการขึ้นรูป Compression molding ของพลาสติกเทอร์โมเซตนั้นมีอยู่หลายปัจจัย เช่น วัสดุ หรือ เครื่องมือ เป็นต้น แต่ปัจจัยหลักสำคัญ 3 อย่าง คือ อุณหภูมิ, ความดัน และเวลา ในการตรวจสอบกระบวนการเพื่อลดปัญหา ไม่ใช่เพียงการตรวจสอบขั้นตอน Compression molding เท่านั้น จะต้องมีการตรวจสอบสถานะ Preform, Preheater, แม่พิมพ์ และแรงดันในการกดอัด ส่วนปัญหาในเรื่องการหดตัวในกระบวนการขึ้นรูป Compression molding นั้นมีอยู่ 2 ประเภทคือ 1. ชิ้นงานที่ได้หดตัวมากเกินไปทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กกว่าที่ต้องการ และ 2. ชิ้นงานที่ได้หดตัวน้อยไปทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการ วิธีแก้สำหรับปัญหาประเภทแรกคือ เพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์, เพิ่มอุณหภูมิช่วง Preheat, ตรวจสอบช่องระบายอากาศ (Venting) ถ้าชำรุดให้ทำการแก้ไข และวิธีแก้สุดท้ายคือการเพิ่มเวลาในการเชื่อมโยง วิธีในการแก้ปัญหาประเภท 2 คือ ลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์, ตรวจสอบช่องระบายอากาศ (Venting) ถ้าชำรุดให้ทำการแก้ไข และลดเวลาเชื่อมโยง

Yu, Y. and Zhu, H. [31] ศึกษาสมบัติและการใช้งานซีเมนต์ที่มียางเป็นองค์ประกอบหลัก โดยในการศึกษาจะใช้ยางที่มีขนาดที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาขนาดยางที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล, ความหนาแน่น, ความคงตัว, โครงสร้างของรูพรุน (Pore structure) และสมบัติการหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage) ในการทดสอบใช้ยางครัมบ์ (Crumb rubber) ที่มีขนาด 2–4 mm (ยาง A), 1–3 mm (ยาง B), 0–2 mm (ยาง C), และผสมกับองค์ประกอบอื่น ๆ เพื่อทำเป็นซีเมนต์ จากผลการทดสอบพบว่าความคงตัวลดลงเมื่อขนาดของยางลดลง ดังนั้นซีเมนต์ยาง A มีความคงตัวมากที่สุด เรื่องความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นนั้นในปริมาณที่เท่ากันความหนาแน่นของซีเมนต์ลดลงเมื่อขนาดของยางลดลง เนื่องจากปริมาณของรูพรุนในซีเมนต์ที่ผสมยางขนาดเล็กมีขนาดใหญ่กว่าซีเมนต์ที่มียางขนาดใหญ่ การเพิ่มปริมาณยางและการลดขนาดยางทำให้ปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามขนาดของยางไม่ได้มีนัยสำคัญต่อปริมาณเมโซพอร์ (รูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2–50 nm) และปริมาณเมโซพอร์ของซีเมนต์เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่เนื่องจากปริมาณยางที่เพิ่มขึ้น ในการทดสอบความแข็งแรงเชิงกลของซีเมนต์พบว่าความแข็งแรงเชิงกลของซีเมนต์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยางหรือใส่ยางที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากยางมีความแข็งแรงต่ำและขนาดยางที่เล็กทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่เป็นปริมาณมากจึงเป็นเหตุผลให้ความแข็งแรงของซีเมนต์ลดลง และผลการทดสอบสมบัติการหดตัวเมื่อแห้งพบว่าการหดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นหรือใส่ยางที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นในปริมาณที่เท่ากันซีเมนต์ที่มีการใส่ยาง C เกิดการหดตัวเมื่อแห้งมากที่สุดแต่อย่างไรก็ตามขนาดยางไม่ส่งผลต่อปริมาณเมโซพอร์อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นขนาดของยางจึงมีผลต่อการหดตัวเมื่อแห้งและลดความสามารถในการคงรูปของซีเมนต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงาน

สหกิจศึกษานี้เป็นศึกษาอัตราส่วนของสารป้องกันยูวี:แอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่มีผลต่อความทนทานแสงยูวีของแผ่นโพลีเอทิลีนและการศึกษาปริมาณและชนิดของเนื้อพอลิเมอร์ที่มีผลต่อการหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีน โดยมีการดำเนินงานดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาอัตราส่วนของสารป้องกันยูวี:แอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่มีผลต่อความทนทานแสงยูวีของแผ่นโพลีเอทิลีน

ตอนที่ 2 การศึกษาชนิดและปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ที่มีผลต่อการหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีน

ทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

การศึกษาสมบัติเชิงกล

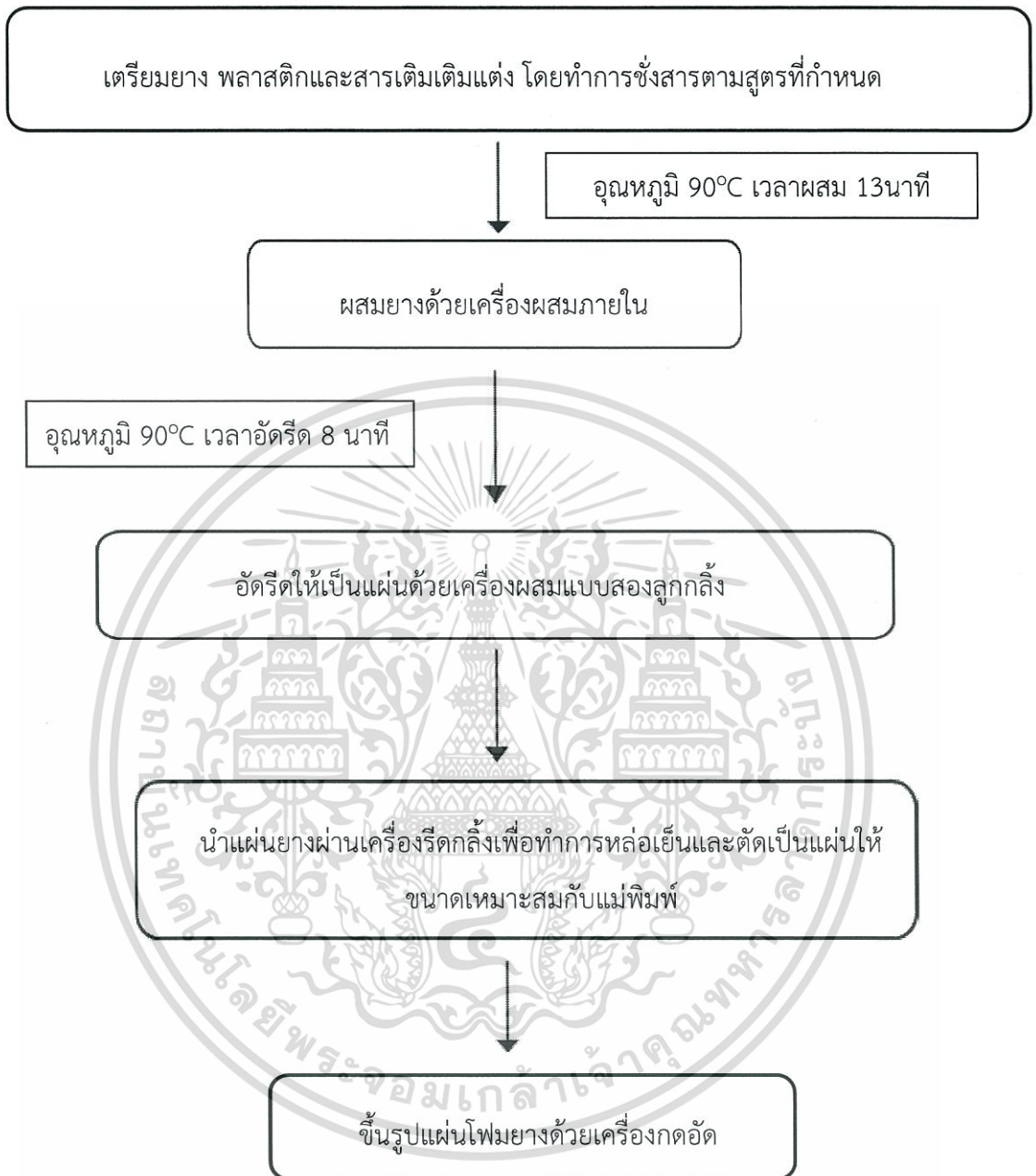
- ความแข็งแรงดึง
- ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด
- ความแข็งกดแบบดิวโรมิเตอร์
- การบ่มเร่งการเสื่อมอายุ
- ความแข็งแรงฉีกขาด

การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

- ความหนาแน่น
- การหดตัว
- ความทนทานต่อแสงยูวี

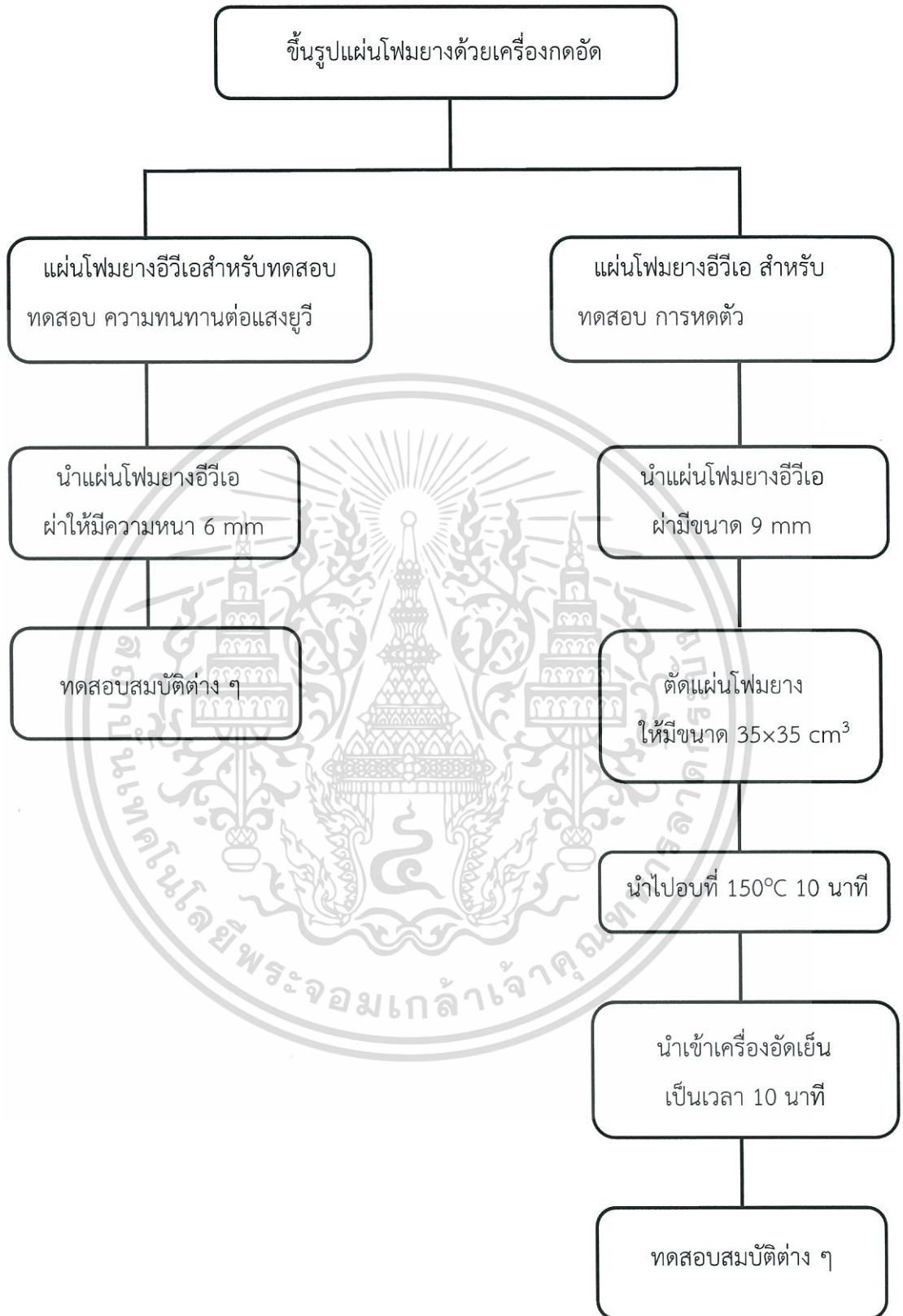
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการดำเนินงานสามารถสรุปเป็นแผนผังแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิ (เอทิลีน-โค-1-ออกทีน) (Poly (ethylene-co-1-octene), TPE) ENGAGE™ 8100, Dow Chemical Company
2. พอลิ (เอทิลีน-โค-1-ออกทีน) ENGAGE™ 8450, Dow Chemical Company
3. พอลิ (เอทิลีน-โค-1-บิวทีน) (Poly (ethylene-co-1-butene), TPE) ENGAGE™ 7467, Dow Chemical Company
4. เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ EVA 7350, Formosa Plastics Corporation
5. เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ EVA 8038, TPI Polene (Public) Co.,Ltd
6. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) LD2426K, PTT Global Chemical
7. ยางอีพดีเอ็ม (EPDM) Nordel® IP 3745P, Dow Chemical Company

สมบัติบางประการของ EPDM มีดังนี้

- ความหนืดมูนนี่ [ML 1+4 ที่ (100°C)] = 45
- ปริมาณ Ethylene = 70
- ปริมาณ Propylene = 29.5%
- ปริมาณ Diene = 0.5%
- ความหนาแน่น = 0.88 g/cc
- Total Volatiles = 0.4%

8. สารตัวเติม

- แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃), Chinchana Industries (Thailand) Co., Ltd.
- แผ่นโฟมยางอีวีเอผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ, SRI SUM ANK Co., Ltd.

9. สารเชื่อมโยง ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP), Sigma-Aldrich Co., Ltd. (Decomposition temperature (SADT) 90°C)

10. สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), Expa-Interbusiness Co., Ltd.

สมบัติบางประการของ ZnO ดังนี้

- Purity = 50–55%
- Zinc oxide/hydroxide (%) = 50-55% Min
- Ignition Loss = 15% Max
- Heavy metal AS (Pb) = 0.0020% Max
- Mn = 0.0015% Max
- Cu = 0.0015% Max

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Iron (Fe) = 0.0070% Max
- Moisture = 0.2% Max

11. สารให้ฟอง (Blowing agent) C,C'-azodi (formamide) SUPERCELL-EX12.AF
.Supercell Co., Ltd.

สมบัติบางประการของ Azodi (formamide) ดังนี้

- Boiling Point : Not applicable
- Vapor Pressure : Not applicable
- Density : About 1.6 g/cm³
- Solubility capability : About 35 mg/l at 20°C
- Flash point : 225°C
- Specific gravity (H₂O =1) : 1.43 at 25°C
- Melting point : Decomposes at 200°C
- Evaporation rate : Not applicable (Butyl Acetate =1)

12. สารดูดซับแสงยูวี (UV Absorber) 2-(2'-Hydroxy-3'-tert-butyl-5'-methylphenyl)-5-chlorobenzotriazole (Benzotriazole) UV 326, Guangzhou-chengshuai New Co., Ltd.

13. สารกำจัดอนุมูลอิสระ (Free-radical terminator) Bis (2,2,6,6-tetramethyl-4-piperidyl) sebacate (HALS) SABOSTAB UV-70 GR, SABO Co., Ltd.

14. สารให้สี (Colorants)

- เขม่าดำ (Carbon black) ชนิด N503, Polymer Innovation Co., Ltd.
- มาสเตอร์แบทช์สีน้ำตาล EVB Brown 5A020, บริษัท ไทยมาสเตอร์คัลเลอร์ จำกัด

15. กรดไขมัน (Stearic acid) 1- pentadecanecarboxylic acid, บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด

16. สารป้องกันออกซิเดชันปฐมภูมิ tetrakis [methylene-3(3',5'-di-tert-butyl-4-hydroxyphenyl) propionate]methane Deox 10, Chitec Technology Co., Ltd.

17. สารป้องกันออกซิเดชันทุติยภูมิ Tris (2,4-di-tert-butylphenyl) Deox 68, Chitec Technology Co., Ltd.

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมยางระบบปิด ขนาด 1.5 ลิตร, Sumitomo Heavy Industrial Co., Ltd.
2. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง, บริษัท บุญทอง จำกัด
3. เครื่องกดอัด, บริษัท บุญทอง จำกัด
4. เครื่องรีดกลิ้ง ลูกกลิ้งขนาด 18 นิ้ว Yitzung K.Y.S, TIWAN R.O.C Co., Ltd.
5. เครื่องชั่งยาง UWE, Taiwan Co., Ltd.
6. เครื่องอบร้อน (Hot air dryer), Dah Tyan Hydrolic Machine Industrial Co., Ltd.
7. เครื่องกดอัดแบบเย็น (Cold press machine), Dah Tyan Hydrolic Machine Industrial Co., Ltd.
8. เครื่องชั่งสาร (Analytical balance) รุ่น DW-6000E, Universal Weight Enterprise Co., Ltd.
9. เครื่องชั่งสาร รุ่น JWA 0015, Universal Weight Enterprise Co., Ltd.
10. เครื่องผ่าแผ่นยาง, Ten-Sheeg Machinery Co., Ltd.
11. เครื่องปั๊มยาง, Dah Tyan Hydrolic Machine Industrial Co., Ltd.
12. เครื่องตัดยาง (Rubber cutting machine), Shenyang Head Science & Technology Co., Ltd
13. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine) รุ่น TCA-200, Sithiporn Associates Co., Ltd.
14. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester) รุ่น GS-719N, Teclock Japa Co., Ltd.
15. เครื่องวัดความหนา (Thickness Gauge), Inctech Metrological Center Co., Ltd.
16. เครื่องทดสอบความทึบตามต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต, Thai Master Color Co., Ltd.
17. ตู้อบ (Oven) BM, Benh Meyer Co., Ltd.

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมยางผสมสูตร

- การทวนทานต่อแสงยูวีของแผ่นโฟมยางจะเตรียมยางผสมสูตรโดยแบ่งออกเป็น 9 สูตร
- การหัดตัวของแผ่นโฟมยางอีวีเอจะเตรียมยางผสมสูตรโดยแบ่งออกเป็น 5 สูตร
- การเตรียมยางผสมสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ซั่งยาง พลาสติกและสารเคมีต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.1 และ 3.2 เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นโฟมยางอีวีเอทนทานแสงยูวีและแผ่นยางอีวีเอที่หดตัวน้อยกว่า 1.5%

ตารางที่ 3.1 การศึกษาอัตราส่วนของสารป้องกันยูวี : แอนติออกซิแดนต์ : ซิงค์ออกไซด์ ที่มีผลต่อความทนทานแสงยูวีของแผ่นโฟมยางอีวีเอ

สาร	ปริมาณโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง, phr)								
	สูตรที่	สูตรที่	สูตรที่	สูตรที่	สูตรที่	สูตรที่	สูตรที่	สูตรที่	สูตรที่
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
EVA 8038	33.10	33.10	33.10	33.10	33.10	33.10	33.10	33.10	33.10
TPE (ENGAGE 8100)	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70
LDPE (LD2426K)	51.20	51.20	51.20	51.20	51.20	51.20	51.20	51.20	51.20
EPDM (Nordel® IP 3745P)	11.10	11.10	11.10	11.10	11.10	11.10	11.10	11.10	11.10
CaCO ₃	58.10	58.10	58.10	58.10	58.10	58.10	58.10	58.10	58.10
Stearic acid	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
Dicumyl peroxide	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.70	1.70	1.70	1.70
Zinc oxide	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	3.00	3.00	4.00	4.00
Azodi (formamide)	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10
Benzotriazole (UV 326)	0.40	0.05	0.10	0.05	0.10	0.05	0.10	0.05	0.10
HALS (UV 70)	0.40	0.05	0.10	0.05	0.10	0.05	0.10	0.05	0.10
Deox 10	-	-	-	0.05	0.10	0.05	0.10	0.05	0.10
Deox 68	-	-	-	0.05	0.10	0.05	0.10	0.05	0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การศึกษาชนิดและปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ที่มีผลต่อการหดตัวของแผ่นโฟมยางอีวีเอ

สาร	ปริมาณโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง, phr)				
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5
TPE (ENGAGE™ 7467)	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TPE (ENGAGE™ 8450)	20.00	20.00	20.00	15.00	10.00
EVA 8038	20.00	20.00	25.00	25.00	25.00
TPE (ENGAGE™ 8100)	0.00	25.00	15.00	10.00	5.00
LDPE (LD2426K)	45.00	30.00	35.00	35.00	55.00
แผ่นโฟมยางอีวีเอผสมพอลิเอ ทิลีนความหนาแน่นต่ำ	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00
EPDM (Nordel® IP 3745P)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
CaCO ₃	30.00	30.00	30.00	35.00	30.00
Stearic acid	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Dicumyl peroxide	1.20	1.00	1.00	1.00	1.00
Zinc oxide	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Azodi (formamide)	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
UV 326 (Benzotiazole)	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
EVB Brown 5A020	8.30	8.30	8.30	8.30	8.30

3.4.2 การผสมยาง

- นำวัตถุดิบที่เป็นเคมีทั้งหมดมาจัดเรียงไว้ให้ครบ จัดเป็นชุด ๆ
- ตั้งอุณหภูมิในการผสมและแรงดันลมตามข้อกำหนดและมาตรฐานการตรวจสอบ
 - อุณหภูมิที่ตั้งไว้ 90°C
 - แรงดันลม 5-6.5 kg/cm²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการผสมยางผสมสูตรโดยใส่วัตถุดิบทั้งหมดลงในห้องผสมของเครื่องผสมระบบปิด ซึ่งจะทำการใส่ EVA, LDPE, Stearic acid, CaCO₃ และวัตถุดิบอื่น ๆ ลงไปก่อน สารเคมีเหล่านี้ทำปฏิกิริยากับความร้อนอย่างรวดเร็ว

4. จับเวลาการผสมยางซึ่งจะใช้เวลาในการผสมประมาณ 13 นาที โดยเมื่อทำการผสมจนถึงนาทีที่ 5 ให้ทำการกลับยางครั้งที่ 1, นาทีที่ 8 ให้ทำการกลับยางครั้งที่ 2 และนาทีที่ 11 ทำการกลับยางครั้งที่ 3

5. เมื่อฝาอัดเปิดแล้วให้สังเกตดูเนื้อยางในห้องผสมว่าวัตถุดิบและสีผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวหรือไม่

5.1 ถ้าหากพบว่ายังไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ให้เพิ่มเวลาในการผสมอีกประมาณ 1-2 นาที

5.2 ถ้าหากพบว่าผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ให้ดำเนินการต่อไปในขั้นตอนที่ 6

6. ปรับลดระดับความเร็วของใบพัด เพื่อทำการเทยางนำยางออกมาจากห้องผสมบนแท่นที่ทำความสะอาดเตรียมไว้

3.4.3 การรีดยางคอมปาวด์

1. เตรียมเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง โดยการเปิดวาล์ว ให้อุ่นเข้าสู่ลูกกลิ้งทั้งหมดและเปิดเครื่องให้ทำงานประมาณ 10-15 นาที ซึ่งเครื่องจะทำงานเต็มที่

- ตั้งอุณหภูมิลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 100°C

- ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้มีขนาดประมาณ 1 mm เพื่อการผสมและปรับ

ความหนาของแผ่นยางที่ออกมา

2. เตรียมเครื่องรีดกลิ้งสำหรับการหล่อเย็น

- ปรับเครื่องคูลิ่งทาวเวอร์ (Cooling tower) ให้ลูกกลิ้งมีอุณหภูมิเท่ากับ 60°C

- เปิดพัดลมสำหรับการหล่อเย็นให้หมุนตลอดเวลา

- ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้มีขนาด 0.5 mm

- ความเร็วของลูกกลิ้ง 20 เฮิร์ตซ์ (Hertz, Hz)

- ปรับความเร็วของใบมีดในการตัดแผ่นยางคอมปาวด์หลังลูกกลิ้งสุดท้ายให้มี

ความเร็วเท่ากับ 17 เฮิร์ตซ์

3. นำยางคอมปาวด์ผ่านลูกกลิ้งของเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง เพื่อให้ยางมีความหนาตามระยะห่างของลูกกลิ้งที่กำหนดไว้ โดยระวังอย่าให้ยางหกออกจากกระบะรับยางด้านล่าง

4. ผู้ผสมต้องทำการกรีดยางแผ่นคอมปาวด์และพับไปมา (Cut and Fold) ซึ่งยางที่ถูกตัดพับจะถูกใส่กลับไปยังช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะช่วยให้สารเคมีต่าง ๆ กระจายตัวเข้าไปในเนื้อยางได้ดี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม
5. เมื่อเนื้อยางคอมปาวด์เข้าเป็นเนื้อเดียวกันจะทยอยส่งยางคอมปาวด์ไปยังเครื่องรีดกลิ้งต่อไปโดยจะทำการตั้งคูใบมีดบนลูกกลิ้งของเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งให้มีระยะห่างเท่ากับ 9 นิ้ว เพื่อทำการตัดยาง
6. กรีดยางคอมปาวด์บนลูกกลิ้งเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง เมื่อดึงยางคอมปาวด์ออกจากลูกกลิ้งจะได้แผ่นยางคอมปาวด์ที่มีความกว้างเท่าระยะห่างของใบมีด
7. นำแผ่นยางคอมปาวด์ใส่ระหว่างลูกกลิ้งของเครื่องรีดกลิ้งเพื่อทำการหล่อเย็นและรีดให้แผ่นยางมีความหนาตามระยะห่างของลูกกลิ้งที่กำหนด
8. หลังจากแผ่นยางคอมปาวด์ผ่านเครื่องรีดกลิ้ง 1 รอบ แผ่นยางคอมปาวด์จะถูกตัดด้วยใบมีดให้มีความยาวเท่ากับ 40 นิ้ว
9. แผ่นยางคอมปาวด์ที่ผ่านการตัดเข้าสู่สายพานลำเลียงออก
10. นำแผ่นยางคอมปาวด์ที่ได้มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และนำไปชั่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 1.35 กิโลกรัม เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานต่อไป

3.4.4 การเตรียมชิ้นงาน

3.4.4.1 การขึ้นรูปแผ่นโฟมยางอีวีเอ

ทำการขึ้นรูปโดยใช้การขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression molding)

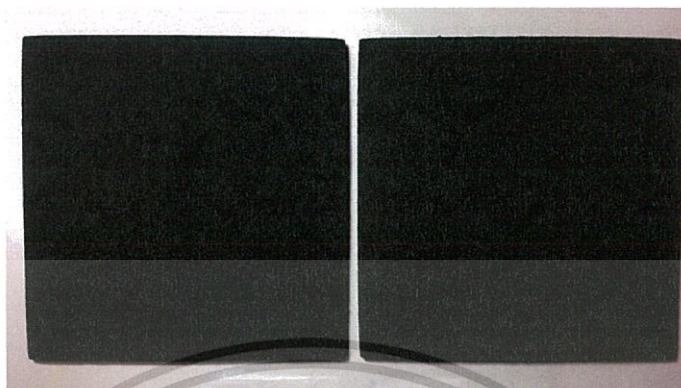
1. ฉีดน้ำยาซิลิโคนที่ผสมน้ำไว้แล้วให้ทั่วแม่พิมพ์ แล้วใช้ลมเป่าอีกครั้งเพื่อไล่เศษยางที่ตกค้างอยู่ออกให้หมด
2. ตั้งอุณหภูมิของเครื่องที่ 160°C และใช้เวลาในการกดอัด 20 นาที
3. วางแผ่นยางคอมปาวด์ที่ชั่งน้ำหนักไว้บนแม่พิมพ์ จากนั้นนำเข้าสู่เครื่องกดอัด
4. เมื่อครบเวลาที่ตั้งไว้สัญญาณจะดังขึ้น นำชิ้นงานที่ได้ออกจากแม่พิมพ์
5. จากนั้นทำให้ชิ้นงานเย็นตัวโดยใช้ลมเป่า ประมาณ 15-20 นาที

3.4.4.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแผ่นโฟมยางอีวีเอเพื่อทดสอบสมบัติความทนทานต่อแสงยูวีและการเสื่อมสภาพ

1. เมื่อชิ้นงานจากเครื่องกดอัดเย็นตัวแล้ว นำไปผ่าด้วยเครื่องผ่าแผ่นยาง ให้มีความหนาเท่ากับ 6 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำชิ้นงานที่ผ่ามาทำการตัดด้วยเครื่องตัดยางให้มีขนาด ความยาวเท่ากับ 13 cm ความกว้างเท่ากับ 13 cm เพื่อส่งทดสอบความทนทานต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อไป



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างชิ้นงานแผ่นโพรพอยลีนสำหรับทดสอบความทนทานต่อแสงยูวี

3. วิธีการทดสอบความทนทานต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต คือ

3.1 นำแผ่นโพรพอยลีนทุกสูตรเข้าสู่เครื่องเร่งสภาวะที่มีหลอดอัลตราไวโอเล็ต UV-A lamp ในช่วงความยาวคลื่น 315-400 นาโนเมตร กำลังไฟฟ้า 160 วัตต์ เป็นเวลา 400 ชั่วโมง

3.2 เมื่อครบ 400 ชั่วโมง นำแผ่นโพรพอยลีนออกจากเครื่องเร่งสภาวะเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแผ่นโพรพอยลีนแต่ละสูตรที่ได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลาเท่ากัน เช่น สี พื้นผิวของชิ้นงาน เป็นต้น

3.4.4.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแผ่นโพรพอยลีนเพื่อทดสอบการหดตัว

1. เมื่อชิ้นงานจากเครื่องกดอัดเย็นตัวแล้ว นำไปผ่าด้วยเครื่องผ่าแผ่นยาง ให้มีความหนาเท่ากับ 9 mm

2. ชิ้นงานที่ถูกผ่าให้มีความหนา 9 mm จะถูกนำไปยังเครื่องตัดยาง โดยตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $35 \times 35 \text{ cm}^2$ เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นยางบุพื้น

3. นำชิ้นงานขนาด $35 \times 35 \text{ cm}^2$ เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 10 นาที

4. เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วนำชิ้นงานวางบนแม่พิมพ์ที่มีลวดลาย จากนั้นนำเข้าเครื่องอัดเย็นอย่างรวดเร็ว โดยทำการอัดเย็นเป็นเวลา 5 นาที เพื่อบ่มลายแผ่นยางบุพื้น

5. เมื่อครบ 5 นาที ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกนำออกจากเครื่องอัดเย็น จากนั้นจะทำการตัดโพรพอยลีนส่วนที่เกินออกและวัดความหนาของแผ่นโพรพอยลีน โดยหลังจากกดอัดเย็น ชิ้นงานจะต้องมีความหนาประมาณ 5 mm

6. ทำการวัดความกว้างและความยาวของชิ้นงานหลังจากที่เราอัดเย็น โดยทำการวัดโดยใช้ไม้บรรทัดฟุตเหล็กขนาด 40 นิ้ว วัดด้านกว้างและด้านยาว ด้านละ 3 ตำแหน่ง หาค่าเฉลี่ยและจดบันทึกค่า



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างชิ้นงานแผ่นโฟมยางอีวีเอสำหรับทดสอบการหดตัว

3.4.4.4 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นโฟมยางอีวีเอ

1. ชิ้นงานแผ่นโฟมยางที่เย็นตัวแล้วนำไปผ่าด้วยเครื่องผ่าอย่าง ให้มีขนาด 2.5 mm
2. ชิ้นงานที่ถูกตัดให้มีความหนา 2.5 mm จะถูกนำไปยังเครื่องบีบยาง โดยจะตัดชิ้นงานเป็นรูปด้าย C (Die C) หรือเป็นรูปดัมเบลล์ ที่มีความยาวเกจ (Gauge length) 25 mm และรูปปีกนก ที่มีความหนา 2.5 mm
3. ตัวอย่างชิ้นงานจะถูกนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์และรูปปีกนก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 การทดสอบสมบัติของแผ่นโพลีเอทิลีนที่เตรียมได้

3.4.5.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

1) การทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile tests) ตามมาตรฐาน ISO 37-2011 ใช้ชิ้นงานตัวอย่างรูปดัมเบลล์ โดยกำหนดสภาวะในการทดสอบ ดังนี้

ความเร็วในการดึง	500 มิลลิเมตรต่อนาที
ความยาวเกจ	25 มิลลิเมตร
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	2 กิโลนิวตัน
จำนวนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ	10 ชิ้นงาน

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

- ค่าความแข็งแรงดึง เท่ากับความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุที่รับได้เมื่อให้แรงดึงต่อพื้นที่ โดยมีหน่วยเป็น MPa หรือ N/mm² หาได้จากสมการ

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง} = \frac{F}{A} \quad \dots (3.1)$$

เมื่อ F = แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดขาด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตอนเริ่มต้น (mm²)

- ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด หาได้จากสมการ

$$\text{ร้อยละการยืด ณ จุดขาด} = (\Delta L / L_0) \times 100 \quad \dots (3.2)$$

เมื่อ ΔL = ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน (mm)

L_0 = ความยาวเกจ (mm)

2) การทดสอบความต้านแรงฉีกขาด (Tear tests) ตามมาตรฐาน ISO 34 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ใช้ชิ้นงานตัวอย่างรูปปีกนก โดยกำหนดสภาวะในการทดสอบ ดังนี้

ความเร็วในการดึง	500 มิลลิเมตรต่อนาที
ความหนาของชิ้นงาน	2.5 มิลลิเมตร
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	2 กิโลนิวตัน
จำนวนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ	10 ชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ค่าความแข็งแรงฉีกขาด เท่ากับค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ยางเกิดการฉีกขาดต่อความหนาของชิ้นตัวอย่าง โดยมีหน่วยเป็น N/mm หาได้จากสมการ

$$\text{ค่าความแข็งแรงฉีกขาด} = \frac{F}{t} \quad \dots (3.3)$$

เมื่อ F = แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ยางเกิดการฉีกขาด (N)

t = ความหนาของชิ้นงาน (mm)

3) การทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ทดสอบด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ชนิด ชอร์ ซี (Type C or Shore C durometer) โดยทำการตัดแผ่นโพลียูรีเทนรูปได้มาตัดให้มีขนาดความยาว 7 cm ความกว้าง 3 cm และหนา 2.5 cm วางบนแท่นทดสอบ จากนั้นโยกคานข้างล่างให้ชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับหัวกด (Indenter) เป็นเวลา 5 วินาที อ่านค่าที่ได้จากหน้าปัด ทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง

4) การบ่มเร่งการเสื่อมอายุ ตามมาตรฐาน มอก. แผ่นยางปูพื้น 2377-2559 โดยทำการอบชิ้นงานตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็ง จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในสภาวะปกติ โดยผลที่ได้ เป็นดังนี้

1. ความแข็งเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 5 Shore จากค่าก่อนการเร่งการเสื่อมอายุ
2. ความแข็งแรงดึงลดลงได้ไม่เกิน 25% จากค่าก่อนการเร่งการเสื่อมอายุ
3. ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงได้ไม่เกิน 50% จากค่าก่อนการเร่งการเสื่อมอายุ

3.4.5.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

1) การทดสอบความหนาแน่น (Density) โดยทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบและคำนวณปริมาตรเพื่อคำนวณค่าความหนาแน่นให้อัตโนมัติ โดยใช้หลักของการแทนที่น้ำ ดังนี้

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{m}{V} \quad \dots (3.4)$$

เมื่อ m คือ มวลรวมของวัตถุ (กรัม)

V คือ ปริมาตรรวมของวัตถุ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การทดสอบการหดตัว ตามมาตรฐาน DIN EN 434 โดยมีกระบวนการดังนี้

1. นำตัวอย่างแผ่นโพลีเอทิลีนที่ยังไม่ผ่านการอบมาวัดขนาด โดยใช้ไม้บรรทัดฟุตเหล็กขนาด 40 นิ้ว ทำการวัดด้านกว้างและด้านยาว ด้านละ 3 ตำแหน่ง หาค่าเฉลี่ยและจดบันทึกค่า

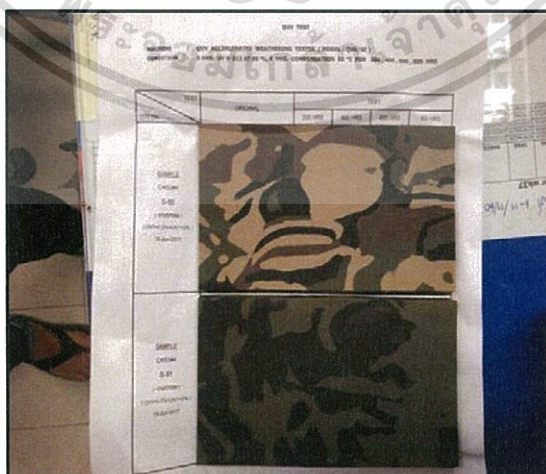
2. นำแผ่นโพลีเอทิลีนเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง รอจนครบเวลา

3. นำแผ่นโพลีเอทิลีนออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็น (ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง) ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นวัดขนาดของแผ่นโพลีเอทิลีนที่ตำแหน่งเดิมกับก่อนที่ทำการอบ หาค่าเฉลี่ยแต่ละด้าน และจดบันทึก

4. นำแผ่นโพลีเอทิลีนขึ้นเดิม กลับเข้าตู้อบอีกครั้งหนึ่ง และทำตามข้อ 2-3 จนกระทั่งแผ่นโพลีเอทิลีนมีการหดตัวคงที่ ซึ่งสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัว ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การหดตัว} = \left(\frac{\text{ความยาวชิ้นงานก่อนอบ} - \text{ความยาวชิ้นงานหลังอบ}}{\text{ความยาวชิ้นงานก่อนอบ}} \right) \times 100 \quad \dots (3.5)$$

3) การทดสอบความทนทานต่อแสงยูวี ตามมาตรฐาน บริษัท ศรีสำอางค์ฟลายเออร์ จำกัด ซึ่งต้องการให้แผ่นโพลีเอทิลีนสามารถทนทานต่อแสงยูวี UV-A lamp ในช่วงความยาวคลื่น 315-400 นาโนเมตร เวลา 400 ชั่วโมง กำลังไฟฟ้า 160 วัตต์ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น สี พื้นผิวของชิ้นงาน รอยแตกที่พื้นผิว เป็นต้น



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อแสงยูวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการดำเนินงานวิจัยศึกษาปริมาณของการใส่สารป้องกันการเสื่อมสภาพจากแสงยูวี แอนติออกซิแดนต์ และสารเติมแต่งเพื่อแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนสี การเกิดการเสื่อมสภาพของแผ่นโพลีเอทิลีน และการศึกษาชนิดและอัตราส่วนของเนื้อพอลิเมอร์เพื่อแก้ไขปัญหาการหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีน โดยการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ ผลการวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความทนทานแสงยูวีและการเสื่อมสภาพของแผ่นโพลีเอทิลีน

งานวิจัยนี้มุ่งแก้ปัญหาเรื่องความทนทานแสงยูวีและการเสื่อมสภาพของแผ่นโพลีเอทิลีน โดยบริษัทมีความต้องการที่จะยืดอายุการใช้งานของแผ่นโพลีเอทิลีน จากระยะเวลา 6 เดือนเป็น 1 ปี และมีความแข็งแรงอยู่ในช่วง 50-55 Shore C นอกจากนี้ต้องทนต่อแสงยูวีได้ 400 ชั่วโมง ซึ่งแผ่นโพลีเอทิลีนจะถูกนำไปใช้งานกลางแจ้ง เจอทั้งแสงแดด ออกซิเจน น้ำ และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของแผ่นโพลีเอทิลีน จากการวิเคราะห์พบว่า การเปลี่ยนสีของแผ่นโพลีเอทิลีน อาจเกิดจากการเปลี่ยนสีของเม็ดโพลีเอทิลีน การใส่ปริมาณของสารป้องกันการยูวีที่มากเกินไป จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ Pro-oxidation effect จึงต้องวิเคราะห์ปริมาณในการใส่สารป้องกันการเสื่อมสภาพให้เหมาะสม สาเหตุดังกล่าวจึงได้นำมาพัฒนาและแก้ปัญหาการเสื่อมสภาพของแผ่นโพลีเอทิลีน

4.1.1 การศึกษาชนิดและอัตราส่วนของสารป้องกันยูวี: สารแอนติออกซิแดนต์: ซิงค์ - ออกไซด์ ที่มีผลต่อความทนทานแสงยูวี การเสื่อมสภาพ และสมบัติของโพลีเอทิลีน

ในการแก้ปัญหาความทนทานและการเสื่อมสภาพของแผ่นโพลีเอทิลีน อาจเกิดจากการเปลี่ยนสีของเม็ดโพลีเอทิลีน โดยเฉพาะเมื่อโพลีเอทิลีนได้รับแสงยูวี ซึ่งมีพลังงานมากพอในการทำลายพันธะ จึงเกิดปฏิกิริยา Deacetylation ขึ้น ทำให้โพลีเอทิลีนเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เนื่องจากมีกรดอะซิติกและแอลดีไฮด์เกิดขึ้น ส่งผลให้โพลีเอทิลีนเกิดการเสื่อมสภาพและเกิดการเปลี่ยนสีในระยะเวลานาน ซึ่งสามารถแก้ปัญหาโดยการเติมสารป้องกันแสงยูวี ชนิดตัวดูดซับยูวี เช่น Benzotriazoles ทำหน้าที่ดูดซับแสงยูวีและกระจายพลังงานในรูปที่ไม่ทำอันตราย เช่น ความร้อน โดยสารนี้ต้องมีเสถียรภาพสูง ไม่เกิดการสลายตัว และเติมสารกำจัดอนุมูลอิสระ HALS (UV) ทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระที่ตกค้าง นอกจากนี้ได้เติมสารแอนติออกซิแดนต์ชนิดปฐมภูมิ DEOX 10 ซึ่งจะช่วยยับยั้งปฏิกิริยา โดยกำจัดอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นไม่ให้แตกตัวต่อ และเติมสารแอนติออกซิแดนต์ชนิดทุติยภูมิ DEOX 68 ทำหน้าที่สลายสารประกอบเปอร์ออกไซด์ให้กลายเป็นสารอื่นที่เสถียร นอกจากนี้การเติมสารเติมแต่ง คือ ซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไซด์ (ZnO) ยังมีส่วนช่วยในการจับกรดอะซิติกและแอลดีไฮด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Deacetylation เพื่อป้องกันการเปลี่ยนเป็นสีเหลืองของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ในกระบวนการผลิตปริมาณสารเติมแต่งมีผลต่อความทนทานของแผ่นโพลียเอทอีเอ หากเติมในปริมาณที่มากเกินไปสารเหล่านั้นจะไปกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีมากยิ่งขึ้น จึงเป็นการเร่งการเสื่อมสภาพของแผ่นโพลียเอทอีเอ ดังนั้นจึงได้พิจารณาปริมาณของสารแอนติออกซิแดนต์ที่ 2.30, 0.05, 0.10 phr การแก้ปัญหา โดยทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งของแผ่นโพลียเอทอีเอ

4.1.1.1 การศึกษาสมบัติความทนทานต่อแสงยูวีและการเสื่อมสภาพของแผ่นโพลียเอทอีเอ

เมื่อทำการขึ้นรูปแผ่นโพลียเอทอีเอแล้ว ได้นำแผ่นโพลียเอทอีเอไปทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนทานต่อแสงยูวี โดยใช้หลอดอัลตราไวโอเล็ต (UV-A lamp) ในช่วงความยาวคลื่น 315-400 nm กำลังวัตต์ 160 วัตต์ เป็นเวลา 400 ชั่วโมง

พิจารณาจากตารางที่ 4.1 แสดงผลการเปรียบเทียบความทนทานต่อแสงยูวีและการเสื่อมสภาพของแผ่นโพลียเอทอีเอ ที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันยูวี: สารแอนติออกซิแดนต์: ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน พบว่าสีของแผ่นโพลียเอทอีเอไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน มีความทนทานต่อแสงยูวีได้ดีในทุกสูตรที่ทำการศึกษา คาดว่าเกิดจากการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ซึ่งต่อต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากออกซิเจน ช่วยเพิ่มอายุการใช้งาน ทำให้ไม่เกิดการเสื่อมสภาพของสี รวมทั้งการเติมสารป้องกันแสงยูวี ทำหน้าที่ป้องกันแผ่นโพลียเอทอีเอไม่ให้เกิดปฏิกิริยา Deacetylation ส่งผลให้สีไม่ซีดหรือเสื่อมสภาพจากแสงแดด อีกทั้งแผ่นโพลียเอทอีเอมีสีดำจากการเติมเขม่าดำ ซึ่งเขม่าดำทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับยูวี โดยมีโครงสร้างที่สามารถดูดซับแสงยูวีและกระจายพลังงานจึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี และการเพิ่มซิงค์ออกไซด์ ทำหน้าที่ตัวจับกรดอะซิติกและสารแอลดีไฮด์เพื่อป้องกันการเปลี่ยนเป็นสีเหลืองของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยัง EPDM ที่ใช้โมเลกุลของยางชนิดนี้มีพันธะที่อึดตัว ดังนั้นจึงมีสมบัติเด่นในด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากความร้อน แสงแดดและสารเคมี นอกจากนี้โครงสร้างที่ไม่อึดตัวอยู่ที่หมู่ข้างเคียงจึงทำให้ยางชนิดนี้มีความทนทานต่อโอโซน และดินฟ้าอากาศอีกด้วย แต่เนื่องด้วยแผ่นโพลียเอทอีเอมีสีดำ จึงทำให้ผลสรุปที่ได้ไม่ชัดเจน และไม่สังเกตเห็นถึงการเปลี่ยนแปลง อาจต้องศึกษาด้วยการใช้สีที่อ่อนในการทดสอบแทน เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความต้านทานของแผ่นโพลีเอทอเลฟินโดยการเติมสารป้องกันแสงยูวี: สารแอนติออกซิแดนต์: ซิงค์ออกไซด์ ในอัตราส่วนที่ต่างกัน

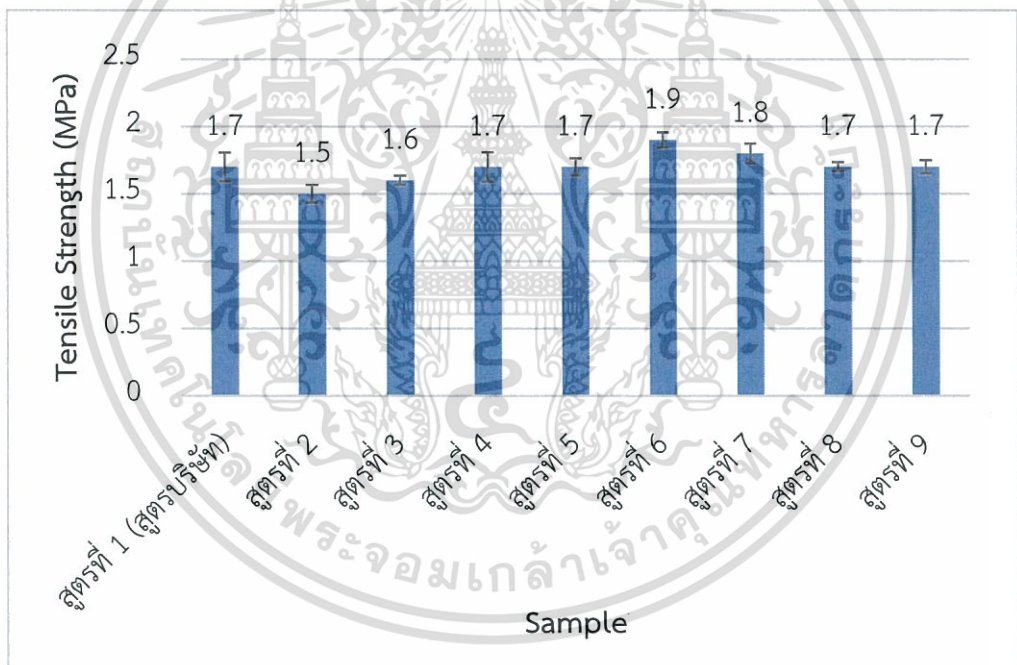
สูตร	สารป้องกันยูวี: สารแอนติออกซิ- แดนต์: ซิงค์ออกไซด์ (phr)	ความทนทานต่อแสงยูวีที่ UV-A lamp ที่ความ ยาวคลื่น 315-400 nm เวลา 400 hr
1	0.40:0.00:2.30 (สูตรบริษัท)	สังเกตการเปลี่ยนแปลงและการเสื่อมสภาพได้ยาก
2	0.05:0.00:2.30	สังเกตการเปลี่ยนแปลงและการเสื่อมสภาพได้ยาก
3	0.10:0.00:2.30	สังเกตการเปลี่ยนแปลงและการเสื่อมสภาพได้ยาก
4	0.05:0.05:2.30	สังเกตการเปลี่ยนแปลงและการเสื่อมสภาพได้ยาก
5	0.10:0.10:2.30	สังเกตการเปลี่ยนแปลงและการเสื่อมสภาพได้ยาก
6	0.05:0.05:3.00	สังเกตการเปลี่ยนแปลงและการเสื่อมสภาพได้ยาก
7	0.10:0.10:3.00	สังเกตการเปลี่ยนแปลงและการเสื่อมสภาพได้ยาก
8	0.05:0.05:4.00	สังเกตการเปลี่ยนแปลงและการเสื่อมสภาพได้ยาก
9	0.10:0.10:4.00	สังเกตการเปลี่ยนแปลงและการเสื่อมสภาพได้ยาก

4.1.1.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของแผ่นโพลีเอทอเลฟิน

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นโพลีเอทอเลฟิน จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งแรงฉีกขาด มีแนวโน้มใกล้เคียงกันทุกสูตร เนื่องจากทุกสูตรใช้มีเอกสาร์นี้เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

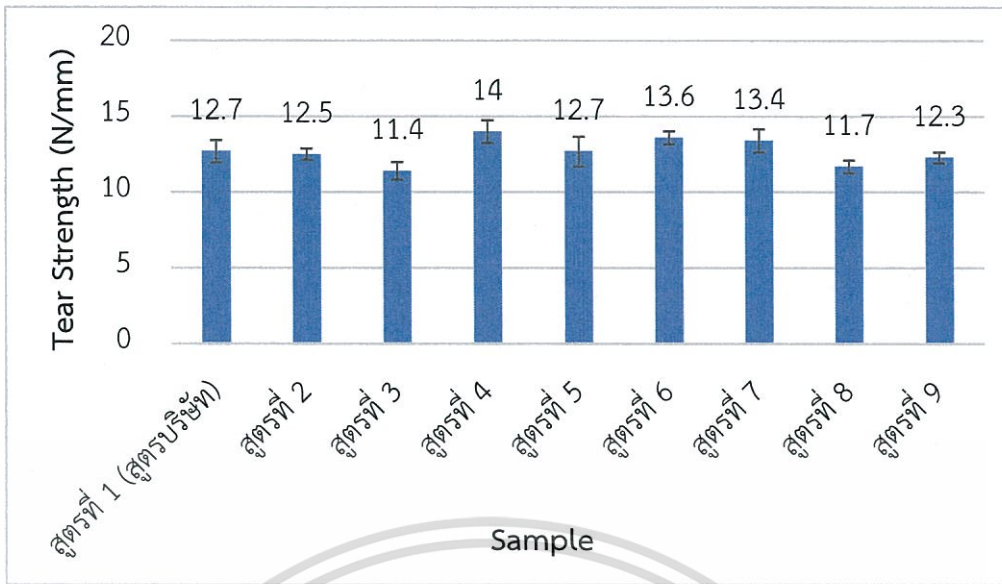
อัตราส่วนของพอลิเมอร์คือ LD2426K:Engage™ 8100:EVA 8038 เท่ากับ 51.20:4.70:33.10 phr ซึ่งเป็นเมทริกซ์หลักในส่วนที่รับแรง และกระจายแรง ทำให้ความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งแรงฉีกขาดของทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลเรื่องร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด จากรูปที่ 4.3 พบว่าทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นสูตรที่ 8 และ 9 มีค่าต่ำสุด เนื่องจากการเติมซิงค์ออกไซด์ปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น (4 phr) โดยซิงค์ออกไซด์นอกจากทำหน้าที่เป็นตัวจับกรดและสารกระตุ้นการเชื่อมโยง ยังสามารถทำหน้าที่เป็นคิกเกอร์หรือตัวกระตุ้นสารให้ฟอง ส่งผลให้ฟองทำงานดีขึ้น ทำให้เกิดฟองขนาดใหญ่จำนวนมาก ผนังของรูพรุนภายในชิ้นงานบางลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากขนาดของแผ่นโฟมยางหลังจากที่ออกมาจากเครื่องกดอัด ที่มีขนาดใหญ่กว่าสูตรอื่น ๆ ส่งผลให้โฟมยางอีวีเอมีโอกาสที่ชิ้นงานขาดได้ง่าย เนื่องจากฟองที่เกิดขึ้นนั้นเปรียบเสมือนจุดตำหนิ (Defect) ในโครงสร้าง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความหนาแน่นของสูตรที่ 8 และ 9 ต่ำกว่าสูตรอื่น ๆ ดังตารางที่ 4.4

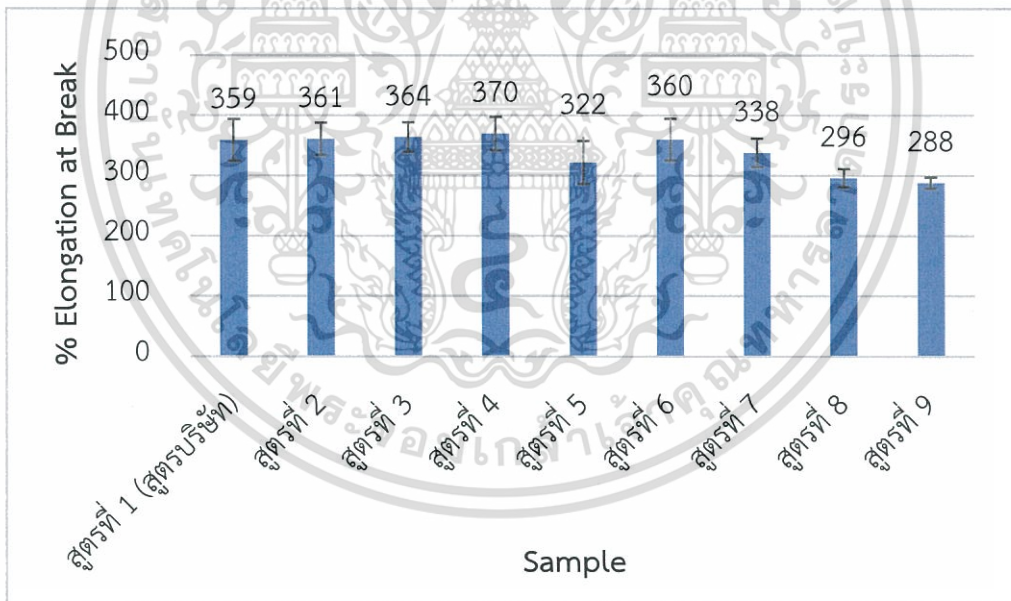


รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงดึงของแผ่นโฟมยางอีวีเอที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี: สารแอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



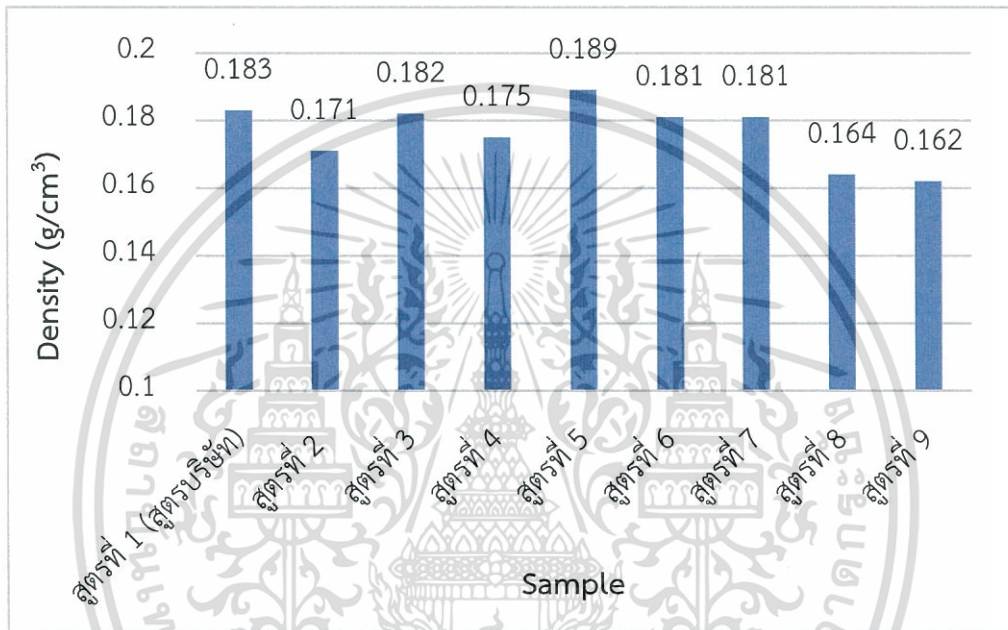
รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของแผ่นโพลีเอทิลีนที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี: สารแอนติออกซิแดนต์: ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน



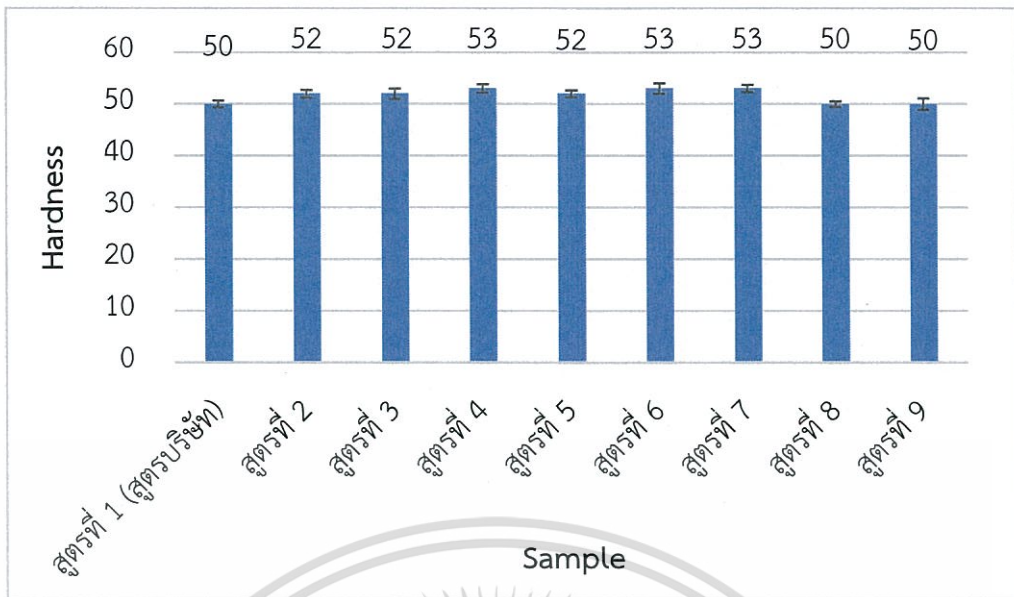
รูปที่ 4.3 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นโพลีเอทิลีนที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี: สารแอนติออกซิแดนต์: ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าความแข็งของแผ่นโฟมยางอีวีเอทุกสูตรอยู่ในช่วง 50–55 Shore C ซึ่งตรงตามความต้องการของบริษัท อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น 3 และ 4 phr ในสูตรที่ 6–9 จะทำให้ชิ้นงานเกิดฟองขนาดใหญ่ ผนังรูพรุนภายในชิ้นงานบางลง ซึ่งส่งผลให้ความแข็งที่ได้ต่ำกว่าความต้องการของบริษัท ดังนั้นจึงได้มีการเพิ่มปริมาณของ DCP จาก 1.5 เป็น 1.7 phr เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง จะส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงภายในโครงสร้างมากขึ้น มีความคงรูปและมีความแข็งมากขึ้น ตรงตามความต้องการของบริษัท ดังแสดงสูตรที่ 6–9



รูปที่ 4.4 ค่าความหนาแน่นแผ่นโฟมยางอีวีเอที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี: สารแอนตี้ออกซิแดนต์: ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งของแผ่นโฟมยางอีวีเอที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี:สารแอนตี้ออกซิ-
แดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน

4.1.1.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของแผ่นโฟมยางอีวีเอ

จากการทดสอบผลของอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี:สารแอนตี้ออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงแผ่นโฟมยางอีวีเอ ผลการทดสอบในส่วนนี้จะแสดงสมบัติที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับก่อนการทดสอบบ่มแรง โดยพบว่าทุกสมบัติเชิงกลที่ทำการทดสอบ จากตารางที่ 4.2-4.6 ผ่านตามมาตรฐาน มอก. แผ่นยางปูพื้น 2377-2559 และจากผลการทดสอบทุกสมบัติเชิงกลหลังการทดสอบบ่มแรงพบว่า มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น เนื่องจากแผ่นโฟมยางอีวีเอเกิดการเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์เมื่อแผ่นโฟมยางอีวีเอมีปริมาณเปอร์ออกไซด์ตกค้าง และเมื่อได้รับความร้อนจากการบ่มแรงอีกครั้ง ทำให้เกิดการเชื่อมโยงอีกครั้ง ปริมาณการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างของแผ่นโฟมยางมีความคงรูปมากขึ้น สายโซ่เคลื่อนที่ออกจากกันยาก เมื่อได้รับแรงจึงทำให้ความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลของแผ่นโฟมยางดีขึ้น

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงดึงก่อนและหลังทดสอบบ่มแรงของแผ่นโพนยางที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี:สารแอนต้ออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน

สูตร	UV:Antioxidant: ZnO (phr)	Tensile Strength (MPa)		เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง
		ชิ้นงานก่อน ทดสอบบ่มแรง	ชิ้นงานหลัง ทดสอบบ่มแรง	
1	0.40:0.00:2.30 (สูตรบริษัท)	1.7	1.8	5.88
2	0.05:0.00:2.30	1.5	1.6	6.66
3	0.10:0.00:2.30	1.6	1.8	12.5
4	0.05:0.05:2.30	1.7	1.9	11.76
5	0.10:0.10:2.30	1.7	1.8	5.88
6	0.05:0.05:3.00	1.9	2.0	5.26
7	0.10:0.10:3.00	1.8	2.0	11.11
8	0.05:0.05:4.00	1.7	1.8	5.88
9	0.10:0.10:4.00	1.7	1.9	11.76

ตารางที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดก่อนและหลังทดสอบบ่มแรงของแผ่นโพนยางที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี:สารแอนต้ออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน

สูตร	UV:Antioxidant: ZnO (phr)	% Elongation at Break		เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง
		ชิ้นงานก่อน ทดสอบบ่มแรง	ชิ้นงานหลัง ทดสอบบ่มแรง	
1	0.40:0.00:2.30 (สูตรบริษัท)	359	361	0.56
2	0.05:0.00:2.30	361	372	3.05
3	0.10:0.00:2.30	364	370	1.65
4	0.05:0.05:2.30	370	381	2.97
5	0.10:0.10:2.30	322	356	10.56

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

สูตร	UV:Antioxidant: ZnO (phr)	% Elongation at Break		เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง
		ชิ้นงานก่อนทดสอบบ่มเร่ง	ชิ้นงานหลังทดสอบบ่มเร่ง	
6	0.05:0.05:3.00	360	372	3.33
7	0.10:0.10:3.00	338	342	1.18
8	0.05:0.05:4.00	296	318	7.43
9	0.10:0.10:4.00	288	304	5.56

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งก่อนและหลังทดสอบการบ่มเร่งของแผ่นโพลียเอทิลีนที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี:สารแอนติออกซิแดนต์:ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน

สูตร	UV:Antioxidant: ZnO (phr)	Hardness(Shore C)		ค่าการเปลี่ยนแปลง
		ชิ้นงานก่อนทดสอบบ่มเร่ง	ชิ้นงานหลังทดสอบบ่มเร่ง	
1	0.40:0.00:2.30 (สูตรบริษัท)	50	52	2
2	0.05:0.00:2.30	52	54	2
3	0.10:0.00:2.30	52	52	0
4	0.05:0.05:2.30	53	54	1
5	0.10:0.10:2.30	52	54	2
6	0.05:0.05:3.00	53	55	2
7	0.10:0.10:3.00	53	55	2
8	0.05:0.05:4.00	50	51	1
9	0.10:0.10:4.00	50	54	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดก่อนและหลังทดสอบการบ่มเร่งของแผ่นโพนียางที่มีอัตราส่วนของสารป้องกันแสงยูวี: สารแอนติออกซิแดนต์: ซิงค์ออกไซด์ ที่แตกต่างกัน

สูตร	UV:Antioxidant: ZnO (phr)	Tear Strength (N/mm)		เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง
		ชิ้นงานก่อน ทดสอบบ่มเร่ง	ชิ้นงานหลัง ทดสอบบ่มเร่ง	
1	0.40:0.00:2.30 (สูตรบริษัท)	12.7	13.0	2.36
2	0.05:0.00:2.30	12.5	12.7	1.60
3	0.10:0.00:2.30	11.4	13.3	16.67
4	0.05:0.05:2.30	14.0	14.0	0.00
5	0.10:0.10:2.30	12.7	13.1	3.15
6	0.05:0.05:3.00	13.6	13.8	1.47
7	0.10:0.10:3.00	13.4	13.9	3.73
8	0.05:0.05:4.00	11.7	12.9	10.26
9	0.10:0.10:4.00	12.3	12.8	4.07

ตารางที่ 4.6 ตารางค่าการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลเทียบกับมาตรฐาน มอก.แผ่นยางปูพื้น 2377-2559

สมบัติเชิงกล	การเปลี่ยนแปลง	การเปลี่ยนแปลงที่ยอมรับได้ ตามมาตรฐาน
ความแข็งแรงดึง	เพิ่มขึ้น 5.26-12.50%	ลดลงได้ไม่เกิน 25%
ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด	เพิ่มขึ้น 0.56-10.56%	ลดลงได้ไม่เกิน 50%
ความแข็ง	เพิ่มขึ้น 0-4 Shore	ไม่เกิน 5 shore
ความแข็งแรงฉีกขาด	เพิ่มขึ้น 0.00-16.67%	ไม่มีการระบุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวของแผ่นโพลียเอทิลีน

งานวิจัยนี้มีความประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาการหดตัวของแผ่นโพลียเอทิลีน โดยทางบริษัทมีความต้องการให้แผ่นโพลียเอทิลีนที่มีการหดตัวน้อยกว่า 1.5% และมีความแข็งแรงอยู่ในช่วง 40-45 Shore C จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวของแผ่นโพลียเอทิลีน อาจเกิดได้จาก ปริมาณของอิลาสโตเมอร์, ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์แต่ละชนิด, ปริมาณของสารตัวเติม (Filler), ระบบการเชื่อมโยง และปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุล จากปัจจัยดังกล่าวจึงได้นำมาพัฒนาและแก้ไขปัญหาการหดตัวของแผ่นโพลียเอทิลีน

4.2.1 ศึกษาชนิดและปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวและความแข็งแรงของแผ่นโพลียเอทิลีน

การหดตัวและความแข็งแรงของแผ่นโพลียเอทิลีนนั้น ขึ้นกับชนิดและปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งอาจสัมพันธ์กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่

- 1) ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยพอลิเมอร์ชนิดที่มีความเป็นผลึกสูง จะเกิดการหดตัวได้มาก เนื่องจากโครงสร้างมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่อย่างเป็นระเบียบ ส่งผลให้มีความสามารถในการหดตัวเนื่องจากความเป็นผลึกของพอลิเมอร์
- 2) ปริมาณของอิลาสโตเมอร์ โดยเมื่อมีการผสมกันของสองเมทริกซ์ระหว่างอิลาสโตเมอร์และพลาสติก หากมีปริมาณของอิลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการหดตัวสูงยิ่งขึ้น เนื่องจากอิลาสโตเมอร์สามารถเกิดการคืนตัวได้เนื่องจากความยืดหยุ่น (Elastic recovery) นอกจากนี้การมีปริมาณการเชื่อมโยง (Crosslink content) มากขึ้น ทำให้มีความสามารถในการหดตัวสูง เนื่องจากมีจุดเชื่อมโยงโมเลกุลมาก ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงสูง ซึ่งจุดเชื่อมโยงโมเลกุลนี้เปรียบเสมือน Memory point ในการหดกลับ เมื่อมีปริมาณของจุดเชื่อมโยงมาก ทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้นด้วย
- 3) ระบบการเชื่อมโยง เมื่อมีการเชื่อมโยงระหว่างเทอร์โมพลาสติกกับยาง EPDM พบว่า การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์จะทำให้ค่าการหดตัวมากกว่าการเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยกำมะถัน เนื่องจากการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันจะเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลเฉพาะส่วนของยาง EPDM แต่การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดการเชื่อมโยงทั้งสองส่วน คือ เทอร์โมพลาสติกและยาง EPDM จึงทำให้เกิดการหดตัวเพิ่มขึ้น

ดังนั้นในการแก้ไขปัญหาการหดตัวของแผ่นโพลียเอทิลีนจึงได้ทำการลดปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ที่มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสูงลง และลดปริมาณของอิลาสโตเมอร์ ถึงแม้ว่าการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมและชนิดของสารเชื่อมโยงจะมีส่วนช่วยลดการหดตัว แต่ทางบริษัทได้มีการกำหนดปริมาณของสารตัวเติมคงที่และชนิดของสารเชื่อมโยง จึงไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งได้พัฒนาสูตรตามตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

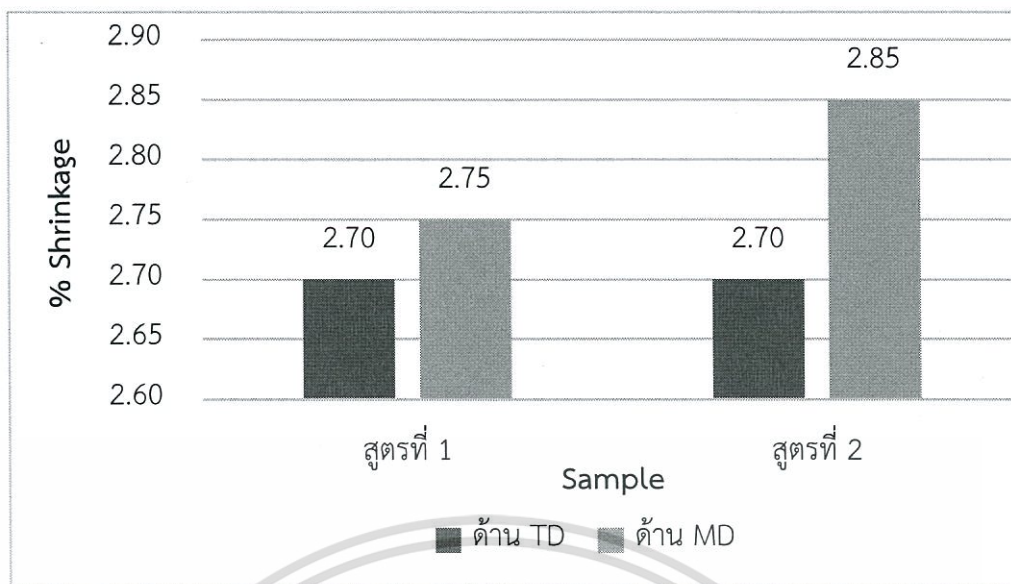
4.2.1.1 การศึกษาผลการหดตัวและความแข็งของแผ่นโพลีเอทิลีนของสูตรที่ 1 และสูตรที่ 2

จากตารางที่ 4.7 สูตรที่ 1 เป็นสูตรเริ่มต้นของทางบริษัท ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบการหดตัวพบว่ามีความมากกว่า 2% ซึ่งสูงเกินความต้องการของบริษัท ดังนั้นจึงมีการพัฒนา สูตรที่ 2 ขึ้น โดยทำการเปลี่ยนชนิดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ Engage™ 7467 เป็น Engage™ 8100 เนื่องจาก Engage™ 7467 ได้ยกเลิกการสั่งซื้อเข้ามาใช้งานในบริษัทเพราะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี อีกทั้ง Engage™ 8100 มีข้อดี คือเป็นพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานทั่วไปในบริษัท มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่มีความเป็นผลึกเท่ากับ 18% ซึ่งสูงกว่า Engage™ 7467 ที่มีความเป็นผลึกเท่ากับ 12% อาจส่งผลให้แผ่นโพลีเอทิลีนเปราะเช่นต์การหดตัวที่สูงกว่า เนื่องจากมีโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบมากกว่า ดังนั้นในการพัฒนาสูตรเพื่อแก้ไขปัญหาการหดตัว จึงได้มีการลดปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และมีความเป็นผลึกสูง โดยลดปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ชนิดที่มีความเป็นผลึกสูง ได้แก่ LD2426K ซึ่งมีความเป็นผลึกสูงเท่ากับ 60% และเพิ่มปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ชนิดที่มีความเป็นผลึกต่ำ ได้แก่ Engage™ 8100 นอกจากนี้ได้ลดปริมาณของ DCP ลง ซึ่งมีผลให้ปริมาณการเชื่อมโยงลดลง ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงลดลง การหดตัวจึงลดลงด้วย

ตารางที่ 4.7 ปริมาณเนื้อพอลิเมอร์ของแผ่นโพลีเอทิลีน สูตรที่ 1 และสูตรที่ 2

ชนิดของพอลิเมอร์	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยละของยาง, phr)	
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2
Engage™ 8100	-	25.0
Engage™ 7467	10.0	-
LD2426K	45.0	30.0
DCP	1.2	1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวแผ่นโพลีเอทิลีนของสูตรที่ 1 และสูตรที่ 2

จากผลการทดสอบเรื่องความแข็ง พบว่าในสูตรที่ 1 ซึ่งเป็นสูตรตั้งต้นของทางบริษัท มีค่าความแข็งเท่ากับ 47 Shore C ซึ่งมีค่าสูงเกินความต้องการของทางบริษัท จึงได้พัฒนาสูตรโดย เมื่อใช้ปริมาณของ DCP 1.2 phr เท่ากับสูตรที่ 1 แต่ใช้ Engage™ 8100 แทนที่ Engage™ 7467 ตามตารางที่ 4.7 พบว่าแผ่นโพลีเอทิลีนมีค่าความแข็งเท่ากับ 49 Shore C ซึ่งแข็งสูงกว่าช่วงความต้องการของบริษัท เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่สูงกว่า ดังนั้นจึงได้ลดปริมาณของ DCP ลง ส่งผลให้ค่าความแข็งของแผ่นยางปูพื้นที่ได้มีค่าลดลงเท่ากับ 41 Shore C ซึ่งอยู่ในช่วงความแข็งตามความต้องการของบริษัท

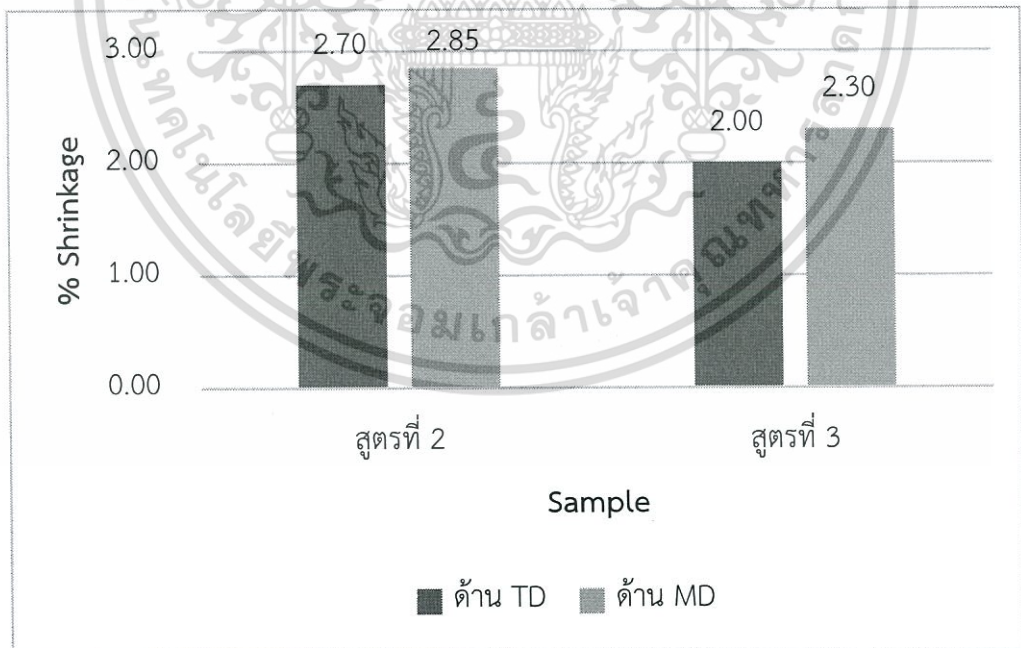
จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบการหดตัว จะเห็นได้ว่าสูตรที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวและค่าความแข็งสูงกว่าสูตรที่ 1 ซึ่งเมื่อเมทริกซ์ส่วนที่โครงสร้างมีความเป็นระเบียบ (LD2426K) ลดลง ควรส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การหดตัวและค่าความแข็งลดลงด้วย แต่เมื่อทำการทดสอบพบว่าผลไม่เป็นไปตามสมมุติฐาน เพราะว่าสูตรที่ 2 เมื่อลดปริมาณของ LD2426K ซึ่งเป็นเมทริกซ์ส่วนที่เป็นผลึก แต่เพิ่มปริมาณของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ คือ Engage™ 8100 ซึ่งมีสมบัติคล้ายยาง เป็นส่วนที่มีความยืดหยุ่น จึงทำให้เกิดการคืนตัวได้ นอกจากนี้เมื่อปริมาณของอิลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงสูง ทำให้เกิดการหดตัวสูงขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาสูตรขั้นต่อไป

4.2.1.2 การศึกษาผลการหดตัวและความแข็งของแผ่นโฟมยางอีวีเอของสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3

จากตารางที่ 4.8 ได้มีการพัฒนาสูตรที่ 3 โดยการเพิ่มปริมาณของพลาสติกและลดปริมาณของ อีลาสโตเมอร์ ซึ่งสูตรที่ 3 ได้ทำการเพิ่มปริมาณของ EVA 8038 และ LD2426K ซึ่งเป็น เมทริกซ์ ส่วนที่เป็นพลาสติก และลดปริมาณของ Engage™ 8100 ซึ่งเป็นเมทริกซ์ส่วนที่เป็นอีลาสโตเมอร์

ตารางที่ 4.8 ปริมาณเนื้อพอลิเมอร์ของแผ่นโฟมยางอีวีเอ ของสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3

ชนิดของพอลิเมอร์	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง, phr)	
	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
Engage™ 8100	25.0	15.0
EVA 8038	20.0	25.0
LD2426K	30.0	35.0



รูปที่ 4.7 เปอร์เซนต์การหดตัวแผ่นโฟมยางอีวีเอของสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบเรื่องความแข็ง สูตรที่ 2 (41 Shore C) สูตรที่ 3 ได้มีการลดปริมาณของ Engage™ 8100 ค่าความแข็งควรจะมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของอีลาสโตเมอร์ที่จะเกิดการ Crosslink ลดลง แต่การเพิ่มปริมาณของ EVA 8038 และ LD2426K มากขึ้น ซึ่งความเป็นผลึกมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็ง ทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้น แสดงว่าปัจจัยของพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างมีความเป็นระเบียบเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการเกิดผลึกมากขึ้น ส่งผลต่อค่าความแข็ง

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบการหดตัวของแผ่นยางโฟมยางอีวีเอ จะเห็นได้ว่าสูตรที่ 3 มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำกว่าสูตรที่ 2 ทั้งนี้สูตรที่ 3 มีการเพิ่มปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ที่โครงสร้างมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ควรจะมีค่าการหดตัวที่เพิ่มขึ้น แต่เพราะมีการลดปริมาณของอีลาสโตเมอร์ ส่งผลให้เกิดการคืนตัวเนื่องจากความยืดหยุ่นลดลง อีกทั้งยังส่งผลให้ปริมาณการเชื่อมโยงลดลง ทำให้ความสามารถในการหดตัวลดลงด้วย ซึ่งกล่าวได้ว่าปริมาณการเชื่อมโยงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของแผ่นโฟมยางอีวีเอมากกว่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงกว่าความต้องการของบริษัท จึงได้มีการพัฒนาสูตรต่อไป

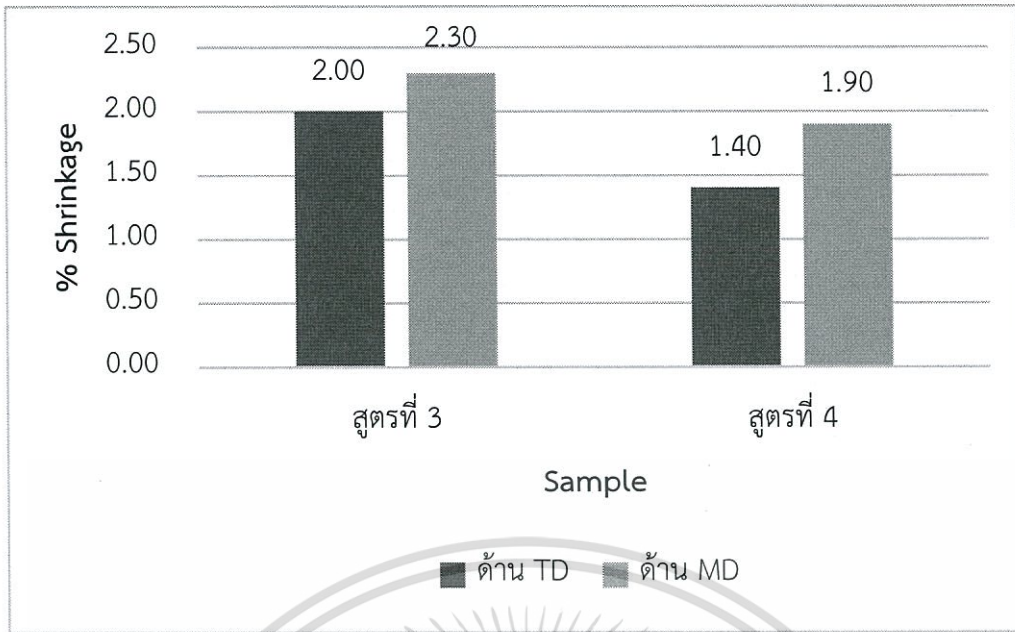
4.2.1.3 การศึกษาผลการหดตัวและความแข็งของแผ่นโฟมยางอีวีเอของสูตรที่ 3 และ สูตรที่ 4

จากตารางที่ 4.9 ได้มีการพัฒนาสูตรที่ 4 โดยลดปริมาณของอีลาสโตเมอร์ Engage™ 8100 และ Engage™ 8450 และในกระบวนการผลิตต้องคำนึงถึงน้ำหนักโดยรวมของส่วนผสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์เมื่อนำไปเข้าเครื่องกดอัด โดยน้ำหนักที่ได้ต้องไม่น้อยเกินไปเพื่อป้องกันชิ้นงานไม่เต็มแม่พิมพ์เมื่อขึ้นรูป จึงได้เพิ่มปริมาณของสารตัวเติม คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งช่วยในการเพิ่มเนื้อ และอาจมีส่วนช่วยให้การหดตัวลดลงด้วย

ตารางที่ 4.9 ปริมาณเนื้อพอลิเมอร์และสารตัวเติมของแผ่นยางโฟมยางอีวีเอของสูตรที่ 3 และ สูตรที่ 4

ชนิดของพอลิเมอร์	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง, phr)	
	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4
Engage™ 8450	20.0	15.0
Engage™ 8100	15.0	10.0
CaCO_3	30.0	35.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวแผ่นโฟมยางอีวีเอของสูตรที่ 3 และสูตรที่ 4

จากผลการทดสอบเรื่องความแข็ง พบว่าสูตรที่ 4 มีค่าความแข็งเท่ากับสูตรที่ 3 (42 Shore C) พบว่า การลดปริมาณของ Engage™ 8100 และ Engage™ 8450 ควรให้ค่าความแข็งลดลง เพราะปริมาณของ อีลาสโตเมอร์ที่จะเกิดการ Crosslink ลดลง ส่วนการเพิ่มปริมาณของ CaCO₃ ซึ่งมีความแข็งสูงกว่าพอลิเมอร์ ส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้น แสดงว่าทั้งสองปัจจัยทำให้ค่าความแข็งหักล้างกัน

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบการหดตัวของแผ่นโฟมยางอีวีเอจะเห็นได้ว่าสูตรที่ 4 มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำกว่าสูตรที่ 3 เนื่องจากสูตรที่ 4 มีปริมาณของอีลาสโตเมอร์ลดลง ส่งผลให้เกิดการคืนรูปเนื่องจากความยืดหยุ่นลดลง อีกทั้งยังมีปริมาณการเชื่อมโยงลดลง ความสามารถในการหดตัวจึงลดลงด้วย นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การหดตัวลดลง เนื่องจากอนุภาคของสารตัวเติมจะช่วยขัดขวางการหดตัวของพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์การหดตัวยังสูงเกินตามความต้องการของบริษัท จึงได้มีการพัฒนาสูตรต่อไป

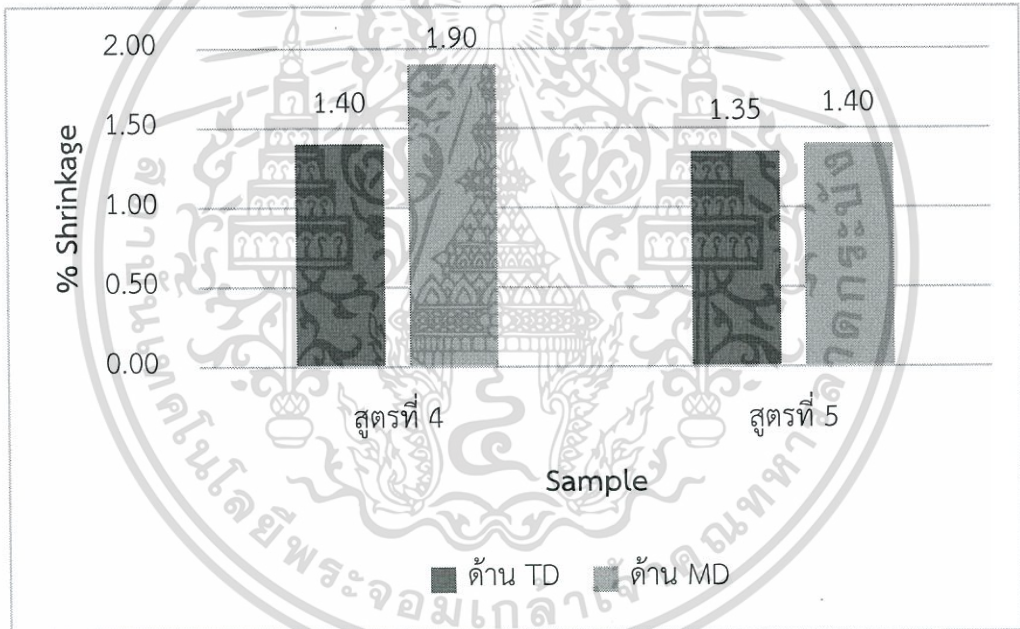
4.2.1.4 การศึกษาผลการหดตัวและความแข็งของแผ่นโฟมยางของแผ่นโฟมยางอีวีเอของสูตรที่ 4 และสูตรที่ 5

จากตารางที่ 4.10 โดยมีการพัฒนาสูตรที่ 5 ขึ้น โดยเพิ่มปริมาณของ LD2426K ซึ่งเป็นเมทริกซ์ส่วนที่เป็นพลาสติก และลดปริมาณของ Engage™ 8100 และ Engage™ 8450 ซึ่งเป็นเมทริกซ์ส่วนที่เป็นอีลาสโตเมอร์ นอกจากนี้ยังลดปริมาณของ CaCO₃ เนื่องจากทางบริษัทต้องการแผ่นยางบุพื้นที่มีน้ำหนักเบา และมีคุณภาพของเนื้อที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ปริมาณเนื้อพอลิเมอร์และปริมาณสารตัวเติมของแผ่นยางอีวีเอของสูตรที่ 4 และสูตรที่ 5

ชนิดพอลิเมอร์	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง, phr)	
	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5
Engage™ 8450	15.0	10.0
Engage™ 8100	10.0	5.0
LD2426K	35.0	55.0
CaCO ₃	35.0	30.0

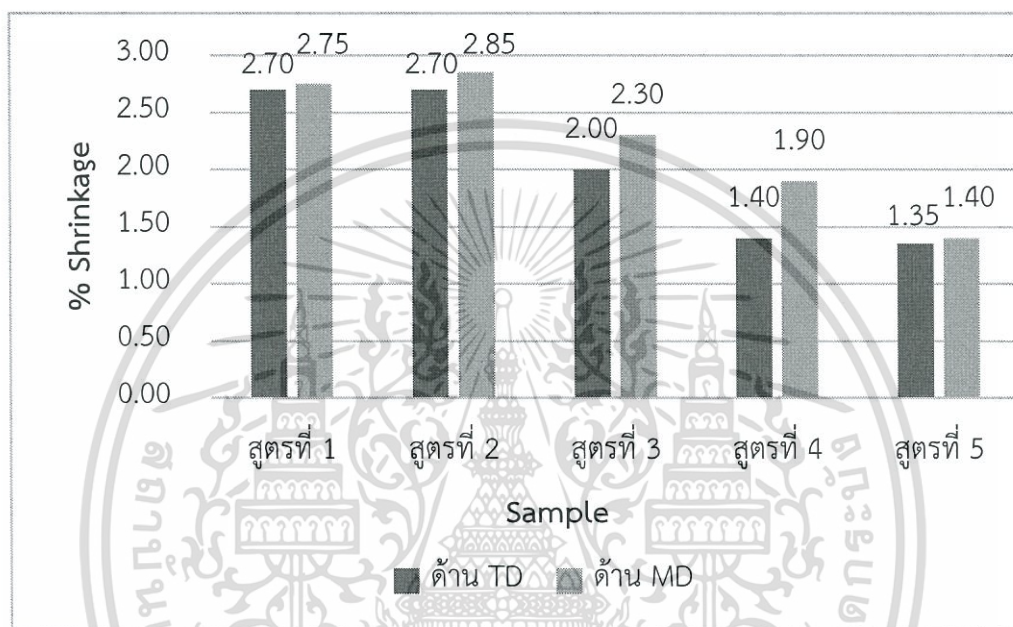


รูปที่ 4.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของแผ่นโฟมยางอีวีเอของสูตรที่ 4 และสูตรที่ 5

จากผลการทดสอบเรื่องความแข็ง พิจารณาจากรูปที่ 4.13 พบว่าสูตรที่ 5 มีค่าความแข็ง (45 Shore C) ที่สูงกว่าสูตรที่ 4 (42 Shore C) เนื่องจากสูตรที่มี 5 ได้มีการเพิ่มปริมาณของ LD2426K มากขึ้น 20 phr ซึ่งการจัดเรียงตัวของโครงสร้างมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความแข็ง แม้จะมีการลดปริมาณของอีลาสโตเมอร์ Engage™ 8100 และ Engage™ 8450 และสารตัวเติม CaCO₃ ซึ่งควรทำให้ค่าความแข็งลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบการหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีน จะเห็นได้ว่าสูตรที่ 5 มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำกว่าสูตรที่ 4 เนื่องจากสูตรที่ 5 มีปริมาณของอิลาสโตเมอร์ลดลง ส่งผลให้เกิดการคืนตัวเนื่องจากความยืดหยุ่นลดลง อีกทั้งยังส่งผลให้ปริมาณการเชื่อมโยงลดลง ความสามารถในการหดตัวจึงลดลงด้วย แม้ว่าการเพิ่มปริมาณของพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดผลึกได้ (LD2426K) มากขึ้น 20 phr และการลดปริมาณของ CaCO_3 ควรจะทำให้ค่าการหดตัวเพิ่มขึ้น แสดงว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีนคือ ปริมาณของอิลาสโตเมอร์ และปริมาณการเชื่อมโยงในระบบ



รูปที่ 4.10 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวแผ่นโพลีเอทิลีนสูตรที่ 1, 2, 3, 4 และสูตรที่ 5

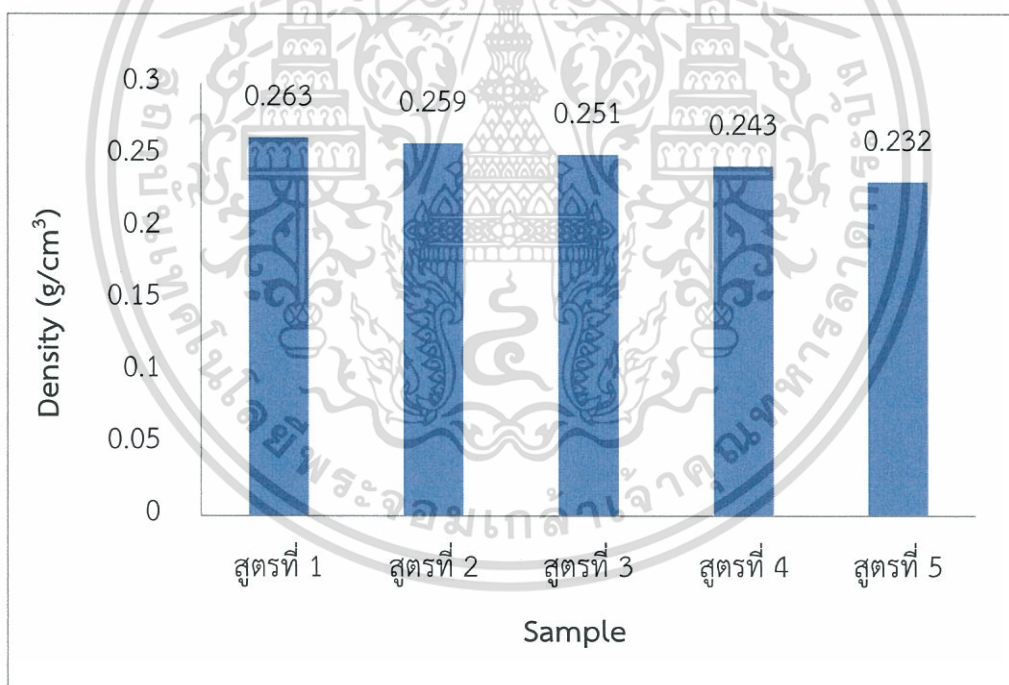
จากการพัฒนาสูตรจะเห็นได้ว่าสูตรที่ 5 มีการหดตัวที่ต่ำที่สุด ตามความต้องการของบริษัท และจากการทดลองจะเห็นได้ว่าแผ่นโพลีเอทิลีนทุกสูตรมีการหดตัวด้าน Machine direction (MD) สูงกว่า Transverse direction (TD) เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวตามแนวแรงตามลูกกลิ้ง ที่เกิดในกระบวนการอัดรีดด้วยเครื่อง two-roll mill และเกิดความเค้น (Stress) ตกค้างส่งผลให้ด้าน MD มีการหดตัวที่สูงกว่า

4.2.2 การศึกษาชนิดและปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ที่มีผลต่อความหนาแน่นของแผ่นโพลีเอทิลีน

ความหนาแน่นของแผ่นโพลีเอทิลีน อาจขึ้นกับปริมาณของฟองที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ซึ่งสัมพันธ์กับการทำงานของสารให้ฟอง (Blowing agent) และจากการพัฒนาสูตรเพื่อแก้ไขปัญหาการหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีน จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของ LD2426K เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

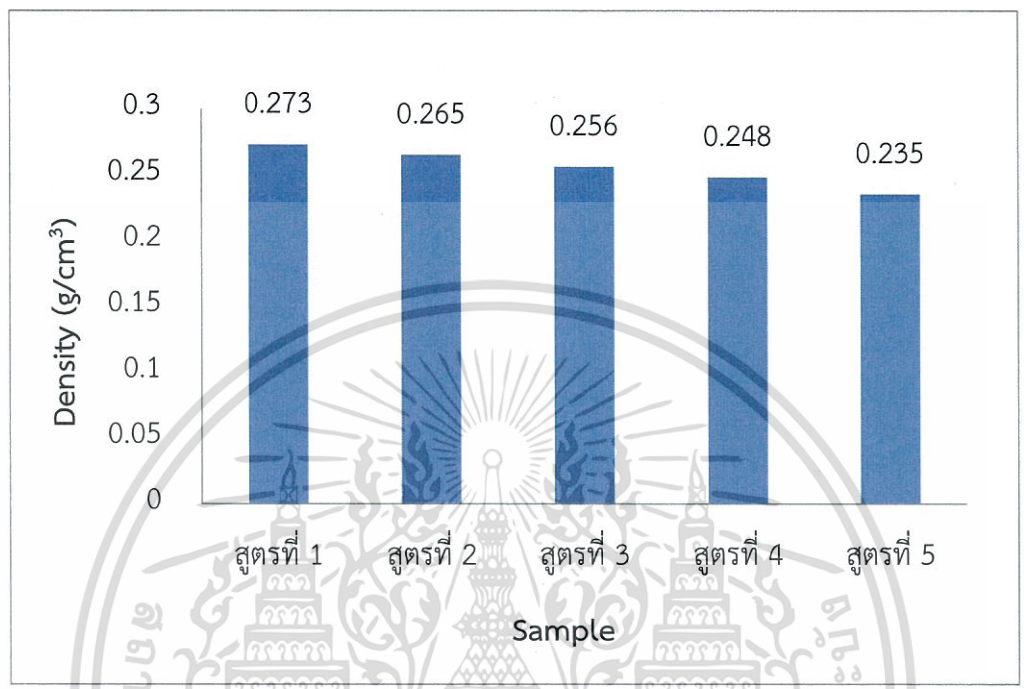
หนาแน่นของแผ่นโพลีเอทิลีนเอมีค่าแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เนื่องจาก LD2426K มีค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI) ที่สูงกว่า Engage™ 8100 และ Engage™ 8450 ที่สภาวะ 190°C ทำให้มีความหนืดต่ำ ซึ่งการใช้เมทริกซ์ปริมาณที่แตกต่างกัน จะมีผลเมื่อทำการหลอมเหลว โดยหากมีค่า MFI สูง ความหนืดต่ำจะสามารถหลอมเหลวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ค่า melt strength ต่ำลง สารให้ฟองทำงานได้ดียิ่งขึ้น จึงเกิดฟองได้ง่าย มีขนาดฟองที่ใหญ่ปริมาณมาก ผนังของรูพรุนชั้นงานบางลง ส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าลดลง ซึ่งสูตรที่ 5 มีปริมาณของ LD2426K มากที่สุด ส่งผลให้ความหนาแน่นของแผ่นโพลีเอทิลีนเอมีค่าต่ำที่สุด สังเกตได้จากขนาดของแผ่นโพลีเอทิลีนเอหลังจากการนำไปกดอัดด้วยเครื่อง Compression เมื่อทำการวัดขนาดพบว่า มีขนาดที่ใหญ่กว่าสูตรอื่น ๆ เนื่องจากมีปริมาณฟองจำนวนมาก นอกจากนี้ในสูตรที่ 1 จะเห็นได้ว่ามีค่าความหนาแน่นสูงที่สุดถึงแม้ว่าจะมีปริมาณของ LD2426K น้อยกว่าสูตรที่ 5 แต่เนื่องจากมีปริมาณของ DCP ที่มากกว่า ทำให้เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติได้มาก ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงสูง จึงไปต้านการเกิดฟอง สารให้ฟองจึงทำงานได้น้อยลง ส่งผลให้แผ่นโพลีเอทิลีนเอมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด



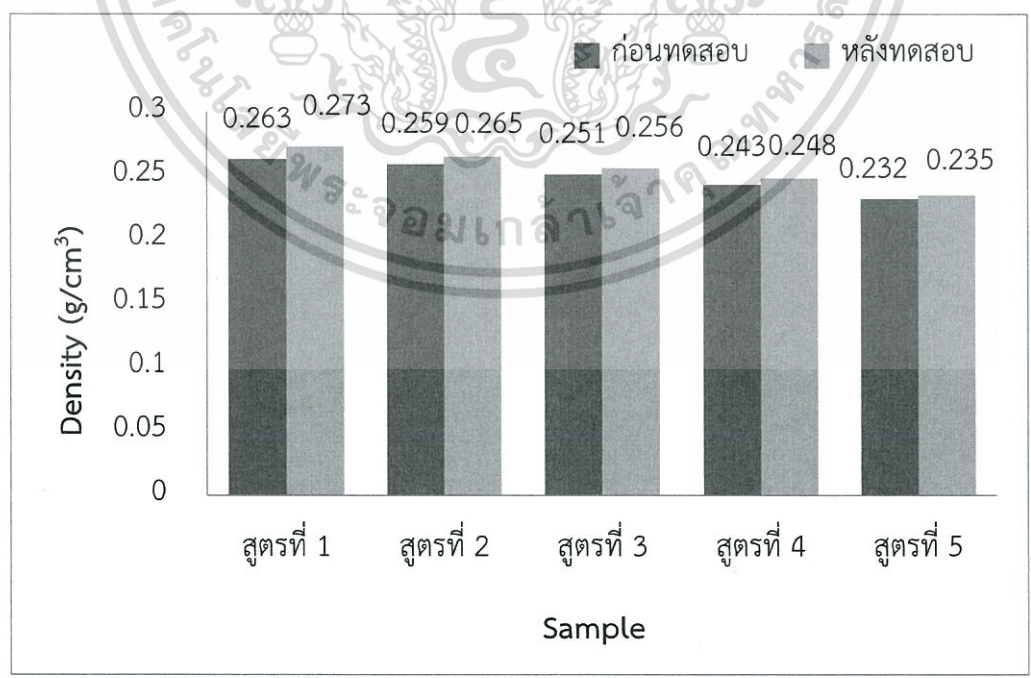
รูปที่ 4.11 ความหนาแน่นของแผ่นโพลีเอทิลีนเอก่อนนำไปทดสอบการหดตัว

เมื่อนำแผ่นโพลีเอทิลีนเอไปผ่านการอบที่อุณหภูมิ 80°C เพื่อทดสอบการหดตัว พบว่าค่าความหนาแน่นของแผ่นโพลีเอทิลีนเอมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย พิจารณาจากรูปที่ 4.12-4.13

จะเห็นได้ว่าทุกสูตรมีความหนาแน่นที่เพิ่มสูงขึ้น เกิดจากมีการหดตัวของแผ่นโพนยางอีวีเอที่สูงมากขึ้น



รูปที่ 4.12 ความหนาแน่นของแผ่นโพนยางอีวีเอหลังจากนำไปทดสอบการหดตัว



รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นของแผ่นโพนยางอีวีเอก่อนและหลังนำไปทดสอบการหดตัว

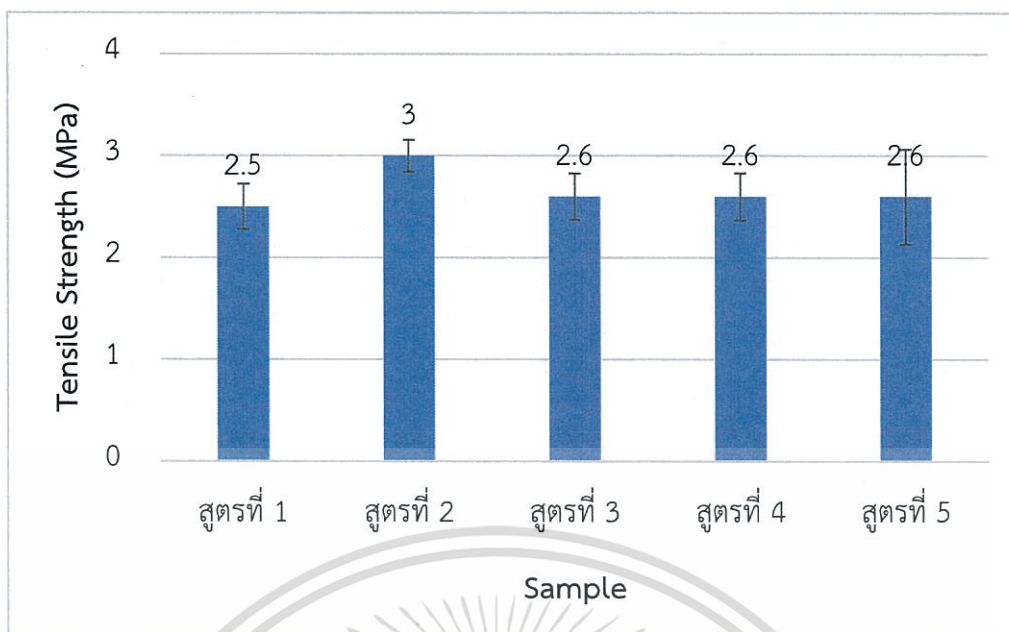
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลและกายภาพของแผ่นโฟมยางอีวีเอ

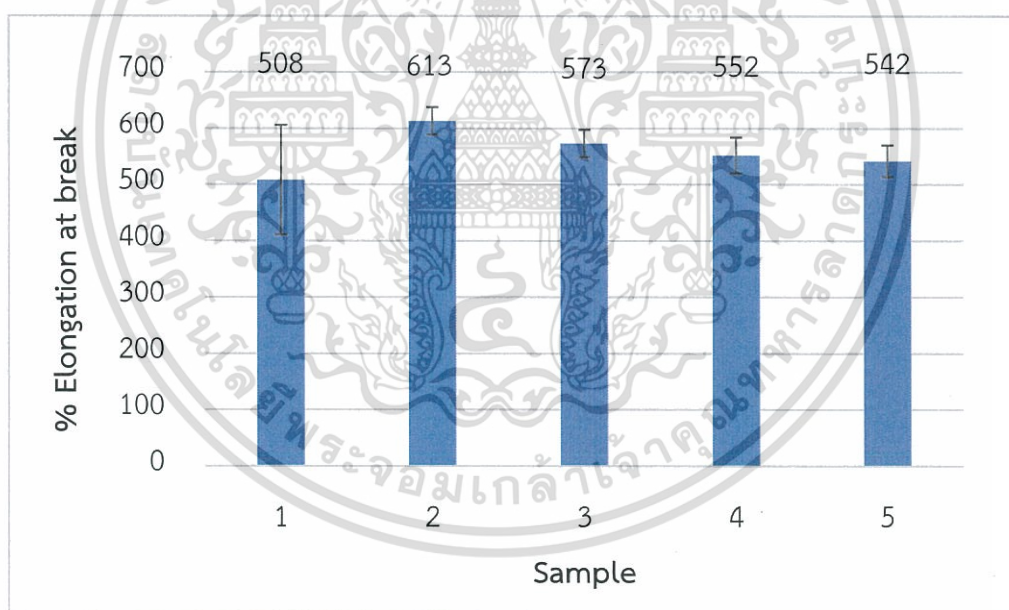
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลเรื่องความต้านทานแรงดึง (Tensile Test) และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของแผ่นโฟมยางอีวีเอ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.14 พบว่า สูตรที่ 2 มีค่าความต้านทานแรงดึงและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดที่สูงกว่าสูตรที่ 1 เนื่องจากเมื่อปริมาณของปริมาณของส่วนอีลาสโตเมอร์สูง ซึ่งมีสมบัติคล้ายยาง ที่อาจเกิดจากยางเกิดการเชื่อมโยงบางส่วน ไม่เป็นร่างแหสามมิติ เมื่อให้แรงกับวัสดุยาง สายโซ่โมเลกุลยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันและหลุดออกจากกันได้ โดยไม่เกิดการขาดของพันธะหรือสายโซ่โมเลกุล แต่เมื่อยางเชื่อมโยงมากขึ้น เกิดจุดเชื่อมโยงกลายเป็นโครงสร้างสามมิติ ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่หลุดออกจากกันยากขึ้นเมื่อได้รับแรง เป็นผลให้ความแข็งแรงดึงของยางสูงขึ้น ทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า นอกจากนี้สูตรที่ 3 และ 4 พบว่าผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากมี เมทริกซ์ส่วนที่เป็นพลาสติก และส่วนที่เป็นอีลาสโตเมอร์มีปริมาณใกล้เคียงกัน และสูตรที่ 5 พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงพอกับสูตรที่ 3 และสูตรที่ 4 ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณในส่วนของยางที่น้อยกว่า มีปริมาณการเชื่อมโยงลดลง ซึ่งอาจเกิดจากเมื่อเพิ่ม LD2426K ซึ่งมีความเป็นผลึกสูง ทำให้แผ่นโฟมยางอีวีเอแข็งทนต่อแรงดึง

ผลการทดสอบร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.15 พบว่า สูตรที่ 2 มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด สูงกว่าสูตรที่ 1 เนื่องจากมีปริมาณส่วนของอีลาสโตเมอร์มากกว่า มีสมบัติความยืดหยุ่น ส่งผลให้มีค่า Elongation ที่สูงกว่า นอกจากนี้สูตรที่ 3, 4 และ 5 จะเห็นได้ว่ามีค่า Elongation ลดลงตามลำดับ เนื่องจากเมื่อลดปริมาณเมทริกซ์ส่วนที่เป็นอีลาสโตเมอร์ และเพิ่มส่วนของ LD2426K ทำให้ความเป็นยางลดลง ส่งผลให้ค่า Elongation มีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลเรื่องความแข็งแรงฉีกขาด จากภาพที่ 4.16 พบว่า สูตรที่ 1 และสูตรที่ 5 มีค่าความแข็งแรงฉีกขาดต่ำ เนื่องจากมีปริมาณการเชื่อมโยงต่ำ ความแข็งแรงฉีกขาดจึงต่ำ นอกจากนี้จะพบว่าสูตรที่ 2 มีค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณของ อีลาสโตเมอร์มากที่สุด สูตรที่ 3 และ 4 มีค่าความแข็งแรงฉีกขาดที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีปริมาณส่วนที่เป็นพลาสติก และปริมาณในส่วนของอีลาสโตเมอร์มีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน มีปริมาณการเชื่อมโยงใกล้เคียงกันส่วนที่เป็นอีลาสโตเมอร์ และเพิ่มส่วนของพลาสติก ทำให้ความเป็นยางลดลง ส่งผลให้ค่า Elongation มีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย

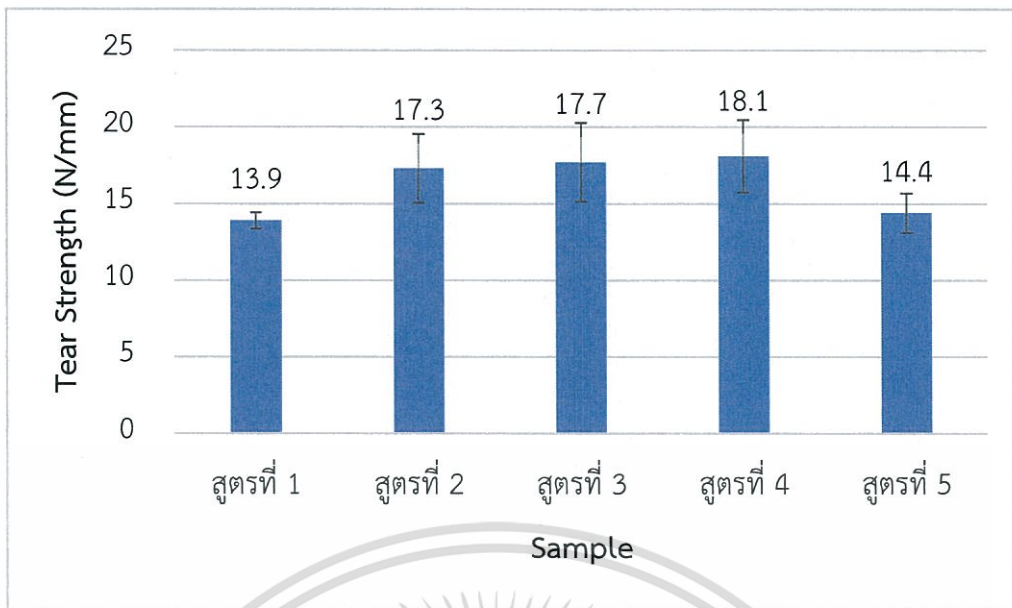


รูปที่ 4.14 ค่าความของแรงดึง (Tensile Strength) ของแผ่นโพนยางอีวีเอ



รูปที่ 4.15 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของแผ่นโพนยางอีวีเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ค่าความของแข็งแรงฉีกขาด (Tear Strength) ของแผ่นโฟมยางอีวีเอ

4.2.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งของแผ่นโฟมยางอีวีเอ

การบ่มเร่งการเสื่อมอายุ ตามมอก.แผ่นยางบุพื้น 2377-2559 โดยทำการอบชิ้นงานตัวอย่างในตู้อบที่ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ค่าความแข็งแรงฉีกขาดและความแข็ง พบว่าผลการทดสอบก่อนและหลังค่าการบ่มเร่งเสื่อมอายุมีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) เนื่องจากมีการใช้ EPDM ที่โมเลกุลของยางชนิดนี้เป็นยางที่อึดตัว ดังนั้นจึงมีสมบัติเด่นในด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากความร้อน แสงแดดและสารเคมี นอกจากนี้โครงสร้างที่ไม่อึดตัวไม่ได้อยู่ในโครงสร้างหลักแต่อยู่ที่หุ้มข้างเคียง ดังนั้นยางชนิดนี้จึงยังคงมีความทนทานต่อโอโซน ดินฟ้าอากาศ นอกและในกระบวนการผลิตแผ่นโฟมยางอีวีเอยังเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ทำหน้าที่ต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันจากออกซิเจน ทำให้ทนอุณหภูมิได้สูงขึ้น เพิ่มอายุการใช้งาน ไม่เกิดการเสื่อมสภาพและสมบัติของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในตารางที่ 4.11-4.13

ตารางที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงดึงก่อนและหลังทดสอบการบ่มแรงของแผ่นโพนยางอีวีเอและค่าการเปลี่ยนแปลง

สูตร	Tensile Strength (MPa)		ค่าการเปลี่ยนแปลง
	ชิ้นงานก่อนทดสอบบ่มแรง	ชิ้นงานหลังทดสอบบ่มแรง	
1	2.5	2.6	4
2	3	2.8	-6.67
3	2.6	2.8	7.69
4	2.6	2.8	7.69
5	2.6	2.5	-3.85

ตารางที่ 4.12 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการบ่มแรงของแผ่นโพนยางอีวีเอและค่าการเปลี่ยนแปลง

สูตร	% Elongation at Break		ค่าการเปลี่ยนแปลง
	ชิ้นงานก่อนทดสอบบ่มแรง	ชิ้นงานหลังทดสอบบ่มแรง	
1	508	480	-5.83
2	613	602	-1.83
3	573	553	-3.49
4	552	563	1.99
5	542	535	-1.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มแรงของแผ่นโพลีเอทิลีนและค่าการเปลี่ยนแปลง

สูตร	Tear Strength (N/mm)		ค่าการเปลี่ยนแปลง
	ชิ้นงานก่อนทดสอบบ่มแรง	ชิ้นงานหลังทดสอบบ่มแรง	
1	13.9	14.4	3.59
2	17.3	18.1	4.62
3	17.7	18.5	4.52
4	18.1	18.3	1.1
5	14.4	15.9	10.42

ผลการทดสอบการบ่มแรงการเสื่อมสภาพของแผ่นโพลีเอทิลีนเรื่องความแข็งแรงโดยใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา 9 mm ทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงแบบ Shore C ให้หักดงข้างข้างไว้ 5 วินาทีแล้วอ่านค่า แสดงดังตารางที่ 4.14 พบว่า สูตรที่ 1, 2, 3 และสูตรที่ 4 มีค่าความแข็งแรงก่อนอบและหลังอบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากในกระบวนการผลิตใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นโพลีเอทิลีนที่ 160°C ซึ่งการเชื่อมโยงด้วย DCP พบว่ามีอุณหภูมิในการแตกตัวที่ค่าครึ่งชีวิต 6 นาที อยู่ที่อุณหภูมิ 155°C และอุณหภูมิในการเกิดพันธะเชื่อมโยงอยู่ที่ 170°C จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการขึ้นรูปแผ่นโพลีเอทิลีนใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเชื่อมโยง อาจทำให้เกิดเปอร์ออกไซด์ตกค้าง (Peroxide residual) เป็น Methyl radical จัดเป็น Primary peroxide ซึ่งมีครึ่งชีวิตที่สั้น มีการแตกตัวได้เร็วที่อุณหภูมิ 40-90°C เมื่อนำมาทดสอบการบ่มแรงที่ 70°C ทำให้เกิดการแตกตัวและเกิดการเชื่อมโยงอีกครั้งจากอนุมูลอิสระที่ตกค้างของเปอร์ออกไซด์ ทำให้ค่าความแข็งแรงหลังอบมีค่าสูงขึ้น และสูตรที่ 5 ค่าความแข็งแรงก่อนอบและหลังอบไม่มีการเปลี่ยนแปลง เกิดจากเมื่อนำไปอบไม่เกิดการเชื่อมโยงอีกครั้ง ทำให้ค่าความแข็งแรงก่อนอบและหลังอบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยทุกสูตรมีค่าความแข็งแรง จากค่าก่อนการบ่มแรงการเสื่อมอายุผ่านมาตรฐาน มอก.

ตารางที่ 4.14 ความแข็งแรงก่อนและหลังทดสอบการบ่มแรงของแผ่นโพลีเอทิลีนและค่าการเปลี่ยนแปลง

สูตร	Hardness (Shore C)		ค่าการเปลี่ยนแปลง
	ชิ้นงานก่อนทดสอบบ่มแรง	ชิ้นงานหลังทดสอบบ่มแรง	
1	66	69	3
2	64	65	1
3	67	68	1
4	64	65	1
5	60	60	0

จากการทดสอบผลของมีผลศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ LD2426K:เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ Engage™ 8100 : เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ Engage™ 8450 ต่อ ต่อสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงแผ่นโพลีเอทิลีน ผลการทดสอบในส่วนนี้จะแสดงสมบัติที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับก่อนบ่มแรง โดยพบว่าทุกสมบัติเชิงกลที่ทำการทดสอบ จากตารางที่ 4.2-4.6 ผ่านตามมาตรฐาน มอก. แผ่นยางปูพื้น 2377-2559

ตารางที่ 4.15 ตารางสรุปเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลเทียบกับมาตรฐาน มอก. แผ่นยางปูพื้น 2377-2559

สมบัติเชิงกล	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง	มาตรฐานการเปลี่ยนแปลงที่ยอมรับได้
ความแข็งแรงดึง	-6.67-7.69	ลดลงได้ไม่เกิน 25%
ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด	-5.83-1.99	ลดลงได้ไม่เกิน 50%
ความแข็ง	0.00-4.55	ไม่เกิน 5 shore
ความแข็งแรงฉีกขาด	1.10-10.42	ไม่มีการระบุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาเพื่อแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนสีและการเสื่อมสภาพของแผ่นโพลีเอทิลีน และ การแก้ไขปัญหาการหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีน สามารถสรุปได้ดังนี้

การแก้ไขปัญหาการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสงยูวี

1. ศึกษาสมบัติความทนทานต่อแสงยูวีของแผ่นโพลีเอทิลีน

แผ่นโพลีเอทิลีนทุกสูตรที่ศึกษามีอัตราส่วนของสารป้องกันยูวี: สารแอนติออกซิแดนต์: ซิงค์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน พบว่าสีของแผ่นโพลีเอทิลีนทุกสูตรที่ทำการศึกษามีความทนทานต่อแสงยูวี เป็นเวลา 400 ชั่วโมง โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและการเสื่อมสภาพ

2. การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพ

แผ่นโพลีเอทิลีนทุกสูตรที่ศึกษาพบว่ามีค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงฉีกขาดใกล้เคียงกัน แต่จะพบว่าสูตรที่เติมซิงค์ออกไซด์ 4 phr มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดและความหนาแน่นต่ำกว่าสูตรอื่น ๆ

3. การศึกษาสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งของแผ่นโพลีเอทิลีน พบว่าสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งทุกสูตรผ่านมาตรฐาน มอก. แผ่นยางปูพื้น 2377-2559

การแก้ไขปัญหาการหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีน

1. ศึกษาชนิดและอัตราส่วนของเนื้อพอลิเมอร์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวและความแข็งแรงของแผ่นโพลีเอทิลีน

- แผ่นโพลีเอทิลีนในสูตรที่ 5 ที่มีอัตราส่วนของ LD2426K:Engage™ 8100:Engage™ 8450:CaCO₃ เท่ากับ 55.0:5.0:10.0:30.0 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดและมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวคือ ด้าน TD เท่ากับ 1.40 และด้าน MD เท่ากับ 1.35 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวน้อยที่สุดและมีค่าความแข็งแรงที่ดีที่สุด คือ 45 อยู่ในช่วงความต้องการของบริษัท

- ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการหดตัวของแผ่นโพลีเอทิลีนคือ ปริมาณของอิลาสโตเมอร์ และ ปริมาณการเชื่อมโยงในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นโพลีเอทิลีน

- แผ่นโพลีเอทิลีนทุกสูตรมีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกันทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพ

3. ศึกษาสมบัติการเร่งการเสื่อมสภาพของแผ่นโพลีเอทิลีน

- สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งทุกสูตรผ่านมาตรฐาน มอก. แผ่นยางปูพื้น 2377-2559

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาสมบัติความทนทานต่อแสงยูวีและการหดตัวของแผ่นยางปูพื้น สามารถสรุปข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่น่าสนใจที่อาจเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไป ดังนี้

1. ปรับปรุงการทดสอบความทนทานต่อแสงยูวี โดยการเปลี่ยนสีของตัวอย่างที่จะนำไปการทดสอบให้ใช้สีที่อ่อน เพิ่มชนิดของหลอดอัลตราไวโอเล็ต และเพิ่มจำนวนชั่วโมงในการทดสอบ เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนมากขึ้น
2. ศึกษาการนำไปใช้งานจริงกับแผ่นพื้นเจ็ดสีกีและแผ่นยางปูพื้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lewis, K.J. and Megerle, C.A. 2009 “Encapsulation Materials Requirement for Photovoltaic Modules.” *Polymer in Solar Energy Utilization*. 23(220) : 387-406.
- [2] Pern, F.J. 1996. “Factor that Affect the EVA Encapsulant Discoloration Rate Upon Accelerated Exposure.” *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 96(41) : 587-615.
- [3] วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา. 2549 “การศึกษาทางทฤษฎีรังสีUV แสงแดดสำหรับผลิตภัณฑ์ใช้ภายนอกอาคาร” *วิจัยทางพาราเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน*. 49(1) : 261-268.
- [4] นิธิยา รัตนานนท์ และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2559. Ethylene Vinyl Acetate (EVA). [Online]. Available : www.Foodnetworksolution.com/Wiki/word/1590/eva-ethylene-vinyl-acetate.
- [5] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2557. สารละลาย : เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์. [Online]. Available : <https://mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/82->.
- [6] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ และ สิริอร อิศรางกูร ณ อยุธยา. 2550. “Investigation of the Behavioursof an Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer Solar Cell Encapsulant and Effect of Antioxidants on the Photostability of the Material.” *Division of Materials Technology*. 07(1) : 3853- 3863.
- [7] บริษัท สยาม เมทัลลิก โซน จำกัด. 2559. พอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE) คืออะไร ?. [Online]. Available : www.Siammetalliczone.com/พอลิเอทิลีน-polyethylene-pe-คืออะไร.
- [8] Kru Aor Chemistry tutor. 2561. รีไซเคิลพลาสติก...ช่วยลดโลกร้อนกันดีกว่า [Online]. Available : http://www.kru-aor.com/Chem_Tips/recycle_plastic.html
- [9] บริษัท พันธวนิช จำกัด. 2552. เจาะลึก! อุตสาหกรรมถุงพลาสติก ตอนที่ 1/2. [Online]. Available : <http://pantavanij.blogspot.com/2009/08/13.html>.
- [10] Arrighi,V. 2560. Polymer Structure and Achitecture. [online]. Available : http://www.che.hw.uk/Teacher/B11MS1/Material/week204/lecture_11PolymStructureureandArchitecture.htm.
- [11] Ok Nation Blog. 2550. ยางเอทิลีนโพรพิลีน (Ethylene-Propylene Rubber; EPM and EPDM). [Online]. Available : <http://oknation.nationtv.tv/blog/obbie-tt/2010/08/22/entry-1>.
- [12] มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2554. โครงสร้างยาง EPDM. [Online]. Available : <http://www.p2s.psu.ac.th/index.php/psu-research/2014-09-09-02-01-15/48-2015-07-09-02-47-20>.

- [13] ภาสรี เล้ากิจเจริญ. 2556. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomer, TPEs). [Online]. Available : <http://www.rubber.ole.go.th/book/Article/29538.pdf>
- [14] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2555. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomer, TPEs). [Online]. Available <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/1002->
- [15] อธิพิล แจ้งชัด. 2542. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [16] Kruželák, J., Sýkora, R. and Hudec, I. 2014. “Peroxide vulcanization of natural rubber.Part I: Effect of temperature and peroxide concentration” *Polymer engineering*. 34(7) : 617–624.
- [17] อธิพิล แจ้งชัด. 2558. Polymer Additives : UV & Antioxidants. [slide]. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18] แสวง เกิดประทุม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2558. รังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือรังสียูวี. [online]. Available : <http://www.tistr.or.th/ed/>
- [19] ทีมงาน siamchemi. 2559. รังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือรังสียูวี. [online]. Available : <http://www.siamchemi.com/%E0%B8%A3%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%B5%E0%B8%AD%E0%B8%B1%E0%B8%A5%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B9%84%E0%B8%A7%E0%B9%82%E0%B8%AD%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%95/>
- [20] อธิพิล แจ้งชัด. 2558. Blowing Agents. [slide]. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [21] สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 2553. พอลิเมอร์ผสมหดตัวด้วยความร้อนจากพลาสติกผสมด้วยยางธรรมชาติ. สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [22] ประชิต สระโมหี. 2548. “ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวของพอลิเมอร์ ผสมของยางธรรมชาติและอีพีดีเอ็ม.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [23] Lewis, K.J. and Megerle, C.A. 2009 “Encapsulant Materials Requirement for Photovoltaic Modules.” *Polymer in Solar Energy Utilization*. 9(220) : 387-406.
- [24] Rani, M., Shim, W.J., Han, G.M., Song, Y.K., Hong, S.H. 2016. “Benzotriazole-type ultraviolet stabilizers and antioxidants in plastic marine debris and their new

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- products” *Science of the Total Environment*. 16(579) : 745-754.
- [25] Badiie, A., Ashcroft, I.A. and Wildman, R.D. 2016. “The Thermo-Mechanical Degradation of Ethylene Vinyl Acetate Used as a Solar Panel Adhesive and Encapsulant.” *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 68(1) : 212-218.
- [26] Jentsch, A., Eichhorn, K.J. And Voit, B. 2015. “Influence of Typical Stabilizers on the Aging Behavior of EVA Foils For Photovoltaic Applications During Artificial UV-Weathering.” *Polymer Testing*. 44(1) : 1-6.
- [27] Chweet, K.H., Muslim, Z.R. and Jaafer, H.I. 2014. “Effect of UV-light on Tensile Strength of EVA and EVA/ PVF Blends.” *International Journal of Basic and Applied Science*. 3(1) : 57-61.
- [28] National Institute of Standards and Technology. 2014. **Evaluation of Oxygen and Wavelength Effect on Photo-Degradation of Ethyl Vinyl Acetate Encapsulant**. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology.
- [29] พรพจน์ ต้นเส็ง และ พลอนันต์ สดโคกกรวด. 2557. **อิทธิพลของปูนขาวต่อการหดตัวของดินเหนียวรวมตัวที่พบในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [30] Plenco Plastics Engineering Company. 2015. **Philosophy of Troubleshooting Compression Molding Problems**. Lakeshore Road : Plastics Engineering Company.
- [31] Yu, Y. and Zhu, H. 2016. “Influence of Rubber Size on Properties of Crumb Rubber Mortars.” *Materials*. 9(7) : 1-12.



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 27 เดือน มิถุนายน พ.ศ.2561

ข้าพเจ้า นางสาวศิริลักษณ์	วันนา	รหัสประจำตัว	57050521
นางสาวสิริภัทร	นิยมชื่น	รหัสประจำตัว	57050528
นางสาวอัปสรรัชย์	ผดุงพจน์	รหัสประจำตัว	57050561

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี

ขอรับรองว่าสหกิจศึกษา เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การศึกษาสมบัติความทนทานต่อแสงยูวีและการหดตัวของแผ่นโฟมยางอีวีเอ

ชื่อภาษาอังกฤษ Study of UV Resistance and Shrinkage Properties of Foam EVA Sheets

ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อน

เรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่ม

สหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 0.11%

ลงชื่อ ศิริลักษณ์ วันนา

(นางสาวศิริลักษณ์ วันนา)

นักศึกษา

ลงชื่อ สิริภัทร นิยมชื่น

(นางสาวสิริภัทร นิยมชื่น)

นักศึกษา

ลงชื่อ อัปสรรัชย์ ผดุงพจน์

(นางสาวอัปสรรัชย์ ผดุงพจน์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาสหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบสหกิจศึกษาของ

นักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงขอลงชื่อไว้

เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ Amur

(ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงชื่อ [Signature]

(รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม