

การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ
อีพอกซีไดซ์/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF
EPOXIDIZED NATURAL RUBBER/ ETHYLENE VINYL
ACETATE COPOLYMER BLEND FILM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ
อีพอกซีไดซ์/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF
EPOXIDIZED NATURAL RUBBER/ ETHYLENE VINYL
ACETATE COPOLYMER BLEND FILM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF
EPOXIDIZED NATURAL RUBBER/ ETHYLENE VINYL
ACETATE COPOLYMER BLEND FILM



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

ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติอีพอกซี
 ไตซ์/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์
 Preparation and Characterization of Epoxidized Natural Rubber
 /Ethylene Vinyl Acetate Copolymer Blend Film

ชื่อนักศึกษา นางสาวศศิวิมล คิตแสวง รหัสนักศึกษา 57050516
 นางสาวศรินทิพย์ ณรงค์พรหม รหัสนักศึกษา 57050519
 นางสาวสิรินธร ณรงค์พรหม รหัสนักศึกษา 57050530

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)





ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2560

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
 (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ประธานกรรมการ	
ดร.การุณย์ สาดอ่อน กรรมการ	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์/เอทีลินไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศศิวิมล คิตแสวง	รหัสนักศึกษา 57050516
	นางสาวศิรินทิพย์ ณรงค์พรหม	รหัสนักศึกษา 57050519
	นางสาวสิรินธร ณรงค์พรหม	รหัสนักศึกษา 57050530
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์-50 (ENR-50)/เอทีลินไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) โดยศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ENR-50/EVA เป็น 100/0, 70/30, 50/50, 30/70 และ 0/100 โดยใช้ปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ตั้งแต่ 0 - 3.5 phr ทำการผสมสูตรโดยใช้เครื่องผสมระบบปิดที่ 100°C ความเร็วรอบ 100 rpm เป็นเวลา 12 นาที โดยขั้นตอนการผสมเริ่มจาก ENR-50, DCP และ EVA ตามลำดับ จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นซีทและฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด นำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมที่ได้นำไปพิสูจน์เอกลักษณ์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ พบว่าปริมาณ DCP ที่เหมาะสมคือ 2.1 phr เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ DCP 2.1 phr มีค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด ความเป็นผลึกของ EVA ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีปริมาณ EVA ในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงของยางและ EVA ในสูตร 100/0 และ 0/100 (R10p2.1 และ V10p2.1) มีค่าสูงที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่า DCP สามารถเชื่อมโยงพอลิเมอร์ในระบบเดี่ยวดีกว่าระบบผสม สูตร R3V7p2.1 (ENR-50/EVA เป็น 30/70 มี DCP 2.1 phr) มีค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด ในขณะที่ค่าการดึงยึด ณ จุดขาดทุกสูตรผสมที่มี DCP 2.1 phr มีค่าใกล้เคียงกัน ค่ามุมสัมผัสของฟิล์ม ENR-50/EVA มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณ EVA มากขึ้น แสดงถึงสภาพผิวที่เพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งคงเหลือและค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านไอน้ำและการบวมตัวในน้ำกลั่นและ PBS มีแนวโน้มลดลง
เมื่อมีปริมาณของ EVA มากขึ้น

คำสำคัญ : การซึมผ่านก๊าซออกซิเจน การซึมผ่านไอน้ำ ไตควมิลเปอร์ออกไซด์ ยางธรรมชาติอิพอก
ซีไคซ์-50 เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Preparation and Characterization of Epoxidized Natural Rubber /Ethylene Vinyl Acetate Copolymer Blend Film		
Students	Miss Sasiwimon Kidsawang	Student ID 57050516	
	Miss Sirinthip Narongprom	Student ID 57050519	
	Miss Sirinthorn Narongprom	Student ID 57050530	
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2017		
Advisor	Assist. Prof. Dr. Suparat Ruckchontee		
Co-advisor	Assist. Prof. Dr. Pathavuth Monvisade		

Abstract

This research studied preparation and property characterization of epoxidized natural rubber (ENR-50)/ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) blend film. The blend ratios of ENR-50/EVA studied were varied from 100/0, 70/30, 50/50, 30/70 and 0/100 by weight of polymer blend and dicumyl peroxide (DCP) crosslinker was varied from 0 to 3.5 phr. All compounds were prepared using an internal mixer at 100°C, 100 rpm rotor speed for 12 minutes. The compounding step was carried out by mixing ENR-50 and DCP and then adding EVA, respectively. Sheets and films for testing were prepared using a compression process. The results revealed that the ENR/EVA blend sheet with 2.1 phr DCP gave the greatest tensile strength. The crystallinity of EVA was unchanged when EVA loading was increased. The percentage of crosslink was high when using either ENR or EVA with 2.1 phr DCP (R10p2.1 or V10p2.1, respectively). This implied that DCP could crosslink better in one polymer system than in blend system. For all the blend samples having 2.1 phr DCP, formula R3V7p2.1 (having ENR-50/EVA at 30/70) showed maximum tensile strength while the percentage of elongation at break of all the blends was similar. Contact angle of ENR-50/EVA films decreased with increasing EVA loading, indicating an increase in film polarity. Oxygen permeability and solid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

remain in samples were likely to increase but the water vapor permeability and swelling in distilled water and PBS were decreased when EVA loading was increased.

Keywords : Oxygen permeability, Water vapor permeability, Dicumyl peroxide, Epoxidized natural rubber, Ethylene vinyl acetate



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ และ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษา
โครงการพิเศษ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำเกี่ยวกับความรู้ อบรมให้ทำงานอย่างมีระเบียบรอบคอบ พร้อม
ทั้งให้ความช่วยเหลือและตรวจทานการดำเนินโครงการพิเศษนี้ ทำให้การจัดทำโครงการพิเศษเล่มนี้
สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ และ ดร.การุณย์ สาดอ่อน อาจารย์คณะกรรมการ
ตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจทานและเสนอแนะข้อคิดเห็นต่าง ๆ เพื่อ
แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในโครงการพิเศษนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณพี่ ๆ ปริญญาโทและปริญญาเอกทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน
และคำแนะนำต่าง ๆ ในการจัดทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี และเจ้าหน้าที่ของศูนย์เครื่องมือฯ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก
ในการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์งานต่าง ๆ จนโครงการพิเศษนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัวและเพื่อนๆ ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ
เป็นกำลังใจและช่วยเหลือให้คำปรึกษาในการดำเนินโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้การศึกษา
ตลอดระยะเวลา 4 ปี จนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ประโยชน์และความรู้อันพึงมีจากโครงการพิเศษฉบับนี้ขอมอบแต่บิดา มารดา
ครอบครัว ผู้มีพระคุณ และคณาจารย์ทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้วิจัยขอน้อมรับและ
ขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ศศิวิมล คิตแสวง

ศิรินทิพย์ ณรงค์พรหม

สิรินธร ณรงค์พรหม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อและสัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 พอลิเมอร์ผสม.....	7
2.1.1 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend).....	7
2.1.2 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสม.....	9
2.1.3 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเมอร์ผสม.....	9
2.2 ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized natural rubber, ENR)	10
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของ ENR.....	10
2.2.2 สมบัติโดยทั่วไปของ ENR.....	11
2.2.3 การประยุกต์ใช้งาน.....	11
2.3 เอทิลีนไวนิลอะซิเตดโคพอลิเมอร์ (EVA).....	11
2.3.1 ลักษณะทั่วไปของ EVA.....	11
2.3.2 สมบัติโดยทั่วไปของ EVA.....	13
2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน.....	14
2.4 ไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP).....	14
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของ DCP.....	14
2.4.2 สมบัติโดยทั่วไปของ DCP.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน.....	15
2.5 วัสดุปิดแผล.....	15
2.5.1 การเลือกวัสดุปิดแผลที่เหมาะสม.....	16
2.5.1.1 การทำความสะอาดแผล (Wound cleansing).....	16
2.5.1.2 การเลือกใช้วัสดุปิดแผล (Wound dressing).....	16
2.6 วัสดุฟิล์มและวัสดุฟิล์มที่ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ปิดแผลชั้นนอก.....	17
2.7 การซึมผ่าน.....	19
2.7.1 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ.....	19
2.7.2 อัตราการซึมผ่านของก๊าซ.....	20
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	25
3.1 สารเคมี.....	25
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.3 พอลิเมอร์ผสม.....	27
3.4 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างด้วยวิธีการกดอัด.....	28
3.5 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง.....	28
3.6 การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง.....	29
3.7 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึกและปริมาณผลึก.....	30
3.8 การทดสอบมุมสัมผัส.....	30
3.9 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มด้วยเทคนิค FT-IR.....	30
3.10 การทดสอบพฤติกรรมกรรมการบวมตัวของแผ่นฟิล์มและปริมาณของแข็ง คงเหลือ.....	30
3.11 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ.....	31
3.12 การทดสอบการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน.....	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	33
4.1 การหาปริมาณ DCP ที่เหมาะสม.....	33
4.2 การหาอัตราส่วน ENR-50/EVA ที่เหมาะสม.....	36
4.2.1 การศึกษาผลการเชื่อมโยงในพอลิเมอร์ผสม.....	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม ENR-50/EVA.....	36
4.2.2 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิตกผลึกและปริมาณผลึก....	38
4.2.3 การหาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง.....	38
4.2.4 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง.....	39
4.2.5 การทดสอบวัตมมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม.....	41
4.2.6 การทดสอบการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน.....	42
4.2.7 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ.....	43
4.2.8 การทดสอบพฤติกรรมความบวมตัวและปริมาณของแข็งคงเหลือ.....	44
4.2.8.1 การบวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลาย PBS.....	44
4.2.8.2 ปริมาณของแข็งคงเหลือ.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
เอกสารอ้างอิง.....	47
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก.....	53
ภาคผนวก ข.....	56
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ.....	57

สารบัญตาราง

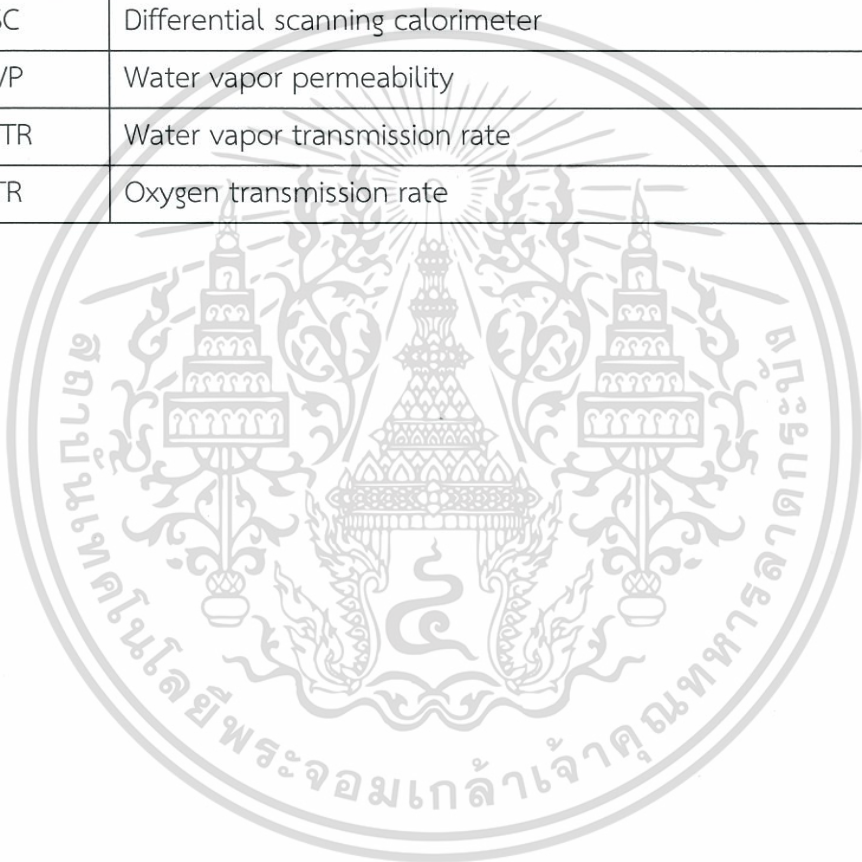
ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มปริมาณของไวนิลอะซิเตตโมเลกุล.....	12
2.2 ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มชนิดต่าง ๆ.....	19
2.3 ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ.....	20
2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ.....	20
3.1 สมบัติบางประการของ ENR-50.....	25
3.2 สมบัติบางประการของ EVA.....	25
3.3 สมบัติบางประการของ DCP.....	26
3.4 พอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมดโดยน้ำหนัก.....	27
4.1 อักษรย่อแทนพอลิเมอร์ผสมทั้งหมด.....	36
4.2 T_m , T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ในฟิล์มสูตรต่าง ๆ.....	38
4.3 ค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์สูตรผสมต่าง ๆ.....	41
4.4 อัตราการซึมผ่านและค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	43
4.5 ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ.....	43
4.6 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานในน้ำกลั่นเวลา 1 และ 24 ชั่วโมง.....	44
4.7 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานในสารละลาย PBS เวลา 1 และ 24 ชั่วโมง.....	44
4.8 ปริมาณของแข็งที่เหลือในน้ำกลั่น.....	45
4.9 ปริมาณของแข็งที่เหลือในสารละลาย PBS.....	45

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ความแข็งแรงดึงของ EVA/ENR-50 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	3
1.2 มอดุลัสที่ 100% การดึงยืด.....	3
1.3 ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด.....	3
1.4 กราฟความเค้น-ความเครียดของ 10% ENR ที่ระบบการเชื่อมโยงแตกต่างกัน.....	4
1.5 สมบัติความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม EVA/ENR ด้วยระบบเชื่อมโยงแตกต่างกัน (a) มอดุลัสของยัง, (b) ความเค้น ณ จุดขาด และ (c) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด.....	5
2.1 ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ชนิด Miscible blend.....	8
2.2 ความสามารถในการเข้ากันไม่ได้ของพอลิเมอร์ชนิด Immiscible blend.....	8
2.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน.....	9
2.4 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน.....	10
2.5 สูตรโครงสร้างของยาง ENR.....	10
2.6 สูตรโครงสร้างของ EVA.....	12
2.7 สูตรโครงสร้างของ DCP.....	14
2.8 การทำงานของแผ่นปิดแผลชนิด Hydrocolloid.....	17
3.1 ลักษณะของชิ้นงานตัวอย่าง.....	29
4.1 สมบัติการรับแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตร 70/30 ที่มีปริมาณ DCP แตกต่างกัน.....	34
4.2 แผนภาพแสดงตัวอย่างปฏิกิริยาการเชื่อมโยงภายในพอลิเมอร์ผสม.....	35
4.3 แผนภาพแสดงการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition) ของ DCP.....	35
4.4 FT-IR สเปกตรัมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ.....	37
4.5 เปรอเซ็นต์การเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	39
4.6 สมบัติการรับแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่มีการเติมและไม่มี การเติม DCP.....	40
4.7 การซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	42

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
ENR-50	ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (อีพอกซีเดชัน ร้อยละ 50)
EVA	เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์
DCP	ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์
phr	Parts per hundred of rubber
FT-IR	Fourier transform infrared spectroscopy
DSC	Differential scanning calorimeter
WVP	Water vapor permeability
WVTR	Water vapor transmission rate
OTR	Oxygen transmission rate



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เป็นการผสมพอลิเมอร์หรือโคพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยมีปริมาณของส่วนประกอบมากกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเฉพาะตามที่ต้องการและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานทางด้านวิศวกรรม [1] การทำพอลิเมอร์ผสมนั้นเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายและคุ้มค่าในการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถใช้งานได้หลากหลายสำหรับการประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ ในปัจจุบันตลาดมีความต้องการบริโภคพลาสติกจำนวนมาก ดังนั้นผู้ผลิตจึงต้องจัดหาวัสดุที่มีสมบัติต้นทุนต่ำเพื่อทดแทนการใช้โลหะและพอลิเมอร์บริสุทธิ์ นอกจากนี้พอลิเมอร์ผสมยังทนต่อการกัดกร่อน น้ำหนักเบา มีความเหนียวดีและใช้ผลิตสินค้าได้หลากหลายประเภท เช่น ผลิตภัณฑ์พลาสติกในครัวเรือน ยานยนต์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ การบินและอวกาศ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์ผสมมีหลายชนิด เช่น เทอร์โมพลาสติก-เทอร์โมพลาสติก, เทอร์โมพลาสติก-ยาง, เทอร์โมพลาสติก-เทอร์โมเซต และยาง-เทอร์โมเซต ซึ่งสมบัติของสารผสมนั้นสามารถกำหนดได้ตามการใช้งานโดยการเลือกส่วนประกอบของพอลิเมอร์ที่ถูกต้องและเหมาะสม ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือพอลิเมอร์ที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend) เช่น Poly(styrene) (PS)-poly(phenylene oxide) (PPO) และพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) พอลิเมอร์แยกออกเป็น 2 ภูมิภาคโดยชัดเจน เช่น Poly(propylene) (PP)-poly(ethylene) (PE) [2]

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer, TPEs) ประกอบด้วยพอลิเมอร์สองภูมิภาคหรือมากกว่าสองภูมิภาคขึ้นไป เป็นการนำเอาสมบัติความยืดหยุ่นที่ดีของยางวัลคาไนซ์และความสามารถในการขึ้นรูปในการรีไซเคิลได้ของพลาสติกเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งการแทนที่ยางวัลคาไนซ์ด้วยเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์นั้นสามารถช่วยเพิ่มสมบัติของวัสดุให้มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูงขึ้น ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองสำหรับการใช้งานทางการแพทย์ ขึ้นรูปง่ายและใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งเป็นส่วนสนับสนุนและเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุให้สูงยิ่งขึ้น [3-4] โดยหนึ่งในชนิดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่นักวิจัยหลายคนได้ให้ความสำคัญและถูกพัฒนาในอุตสาหกรรม คือ ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ผสมเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์

ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized natural rubber, ENR) เป็นยางที่ได้จากการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติโดยการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูงชันกว่าร้อยละ 20 ปัจจุบันยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ในเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสมิกมีอยู่ 2 แบบคือ ENR-25 (อีพอกซีเดชัน ร้อยละ 25 โดยโมล) และ ENR-50 (อีพอกซีเดชัน ร้อยละ 50 โดยโมล) การเพิ่มระดับของอีพอกซีเดชันจะทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของยางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ยาง ENR มีความยืดหยุ่น การซึมผ่านของอากาศลดลง ยีสเตอร์ซิสสูงและการยึดเกาะบนพื้นผิวเปียกดีขึ้น นอกจากนี้การเกิดอีพอกซีเดชันยังเพิ่มความมีขั้วของยาง ทำให้ยาง ENR มีความทนทานต่อน้ำมัน สารไฮโดรคาร์บอนและมีสมบัติการทนแรงดึงสูง โดยการใช้งานจะนิยมทำเป็นสารยึดติด ยางรถยนต์และพื้นรองเท้า [5-6]

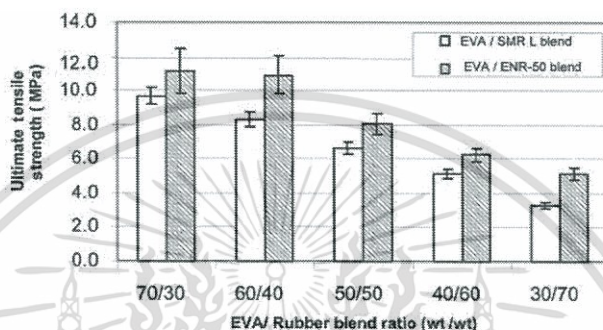
เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) เป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดกึ่งผลึก (Semi-crystalline) มีลักษณะโปร่งใส ได้จากการสังเคราะห์มอนอเมอร์เอทิลีน (Ethylene monomer) และมอนอเมอร์ของไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate monomer, VA) ซึ่งปริมาณของไวนิลอะซิเตตอยู่ระหว่าง 1 ถึง 40% ของน้ำหนัก มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว -35 ถึง -25 องศาเซลเซียส ดังนั้น EVA จึงยังคงความยืดหยุ่นแม้ในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสมบัติต่าง ๆ ของ EVA นั้นขึ้นกับปริมาณของไวนิลอะซิเตต เช่น ความเป็นผลึก จุดหลอมเหลว ความแข็งและความมีขั้ว เป็นต้น [7] ปริมาณของไวนิลอะซิเตตที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ EVA และความหนาแน่นสูงขึ้น [8] EVA มีสมบัติทนทานต่อน้ำมัน ต้านทานต่อโอโซนและทนต่อสภาพอากาศได้ดี จึงเป็นพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในงานฟิล์ม บรรจุภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ [9]

การใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) มีวัตถุประสงค์เพื่อการเชื่อมโยงภายในเมทริกซ์ ช่วยปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์หรือเพิ่มเสถียรภาพของเมทริกซ์ และระหว่างเมทริกซ์กับส่วนเสริมแรง ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความยืดหยุ่นและปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ [10] หนึ่งในสารเชื่อมโยงชนิดเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้ คือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) ซึ่งเป็นสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ พันธะระหว่างออกซิเจนและออกซิเจนสามารถแตกได้ง่าย ใช้เป็นตัวริเริ่มของการเกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เพื่อช่วยให้เกิดการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์หรือยาง แต่ต้องเพิ่มความระมัดระวังในการใช้งานอย่างมาก เนื่องจาก DCP ส่งผลทางด้านลบต่อสุขภาพร่างกายของมนุษย์ [11]

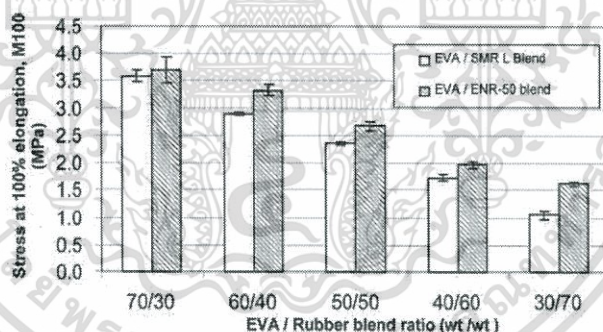
จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Yong M.K. และคณะ [9] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม EVA/SMRL (Standard Malaysian Rubber) โคพอลิเมอร์ และ EVA/ENR-50 โคพอลิเมอร์ ขึ้นรูปซีทด้วยวิธีการกดอัด ผลการทดลองพบว่าสมบัติของ EVA/ENR-50 ที่ดีกว่า เป็นผลมาจากประสิทธิภาพในการผสมที่ดีกว่า EVA/SMRL ซึ่งเป็นผลมาจากความมีขั้วที่เหมือนกันของ ENR และ EVA ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าค่าความแข็งแรงดึง (ดังรูปที่ 1.1) ค่ามอดุลัสที่ 100% การดึงยืด (ดังรูปที่ 1.2) และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (ดังรูปที่ 1.3) สูงขึ้นเมื่อมีปริมาณของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

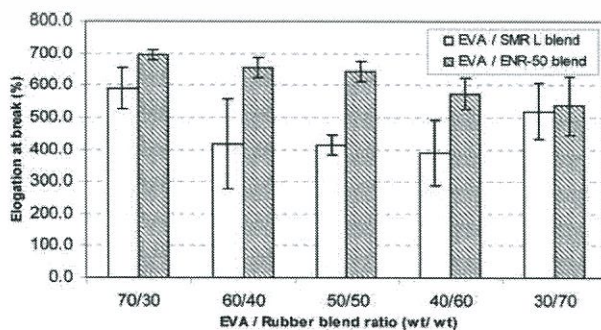
EVA เพิ่มขึ้น โดย EVA/ENR-50 มีสมบัติเชิงกล ความทนทานต่อน้ำมัน เปอร์เซ็นต์การบวมตัวและการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ EVA/SMRL และผลของรอยแตกหักบริเวณพื้นผิวจากการทดสอบแรงดึง พบว่าพื้นผิวบริเวณรอยแตกหักของ EVA/ENR-50 มีความขรุขระมากกว่า เนื่องจากมีพันธะระหว่างภูมิภาคที่แข็งแรงกว่า และการสกัดภูมิภาคของยางด้วย MEK (Methyl ethyl ketone) พบว่ามีการกระจายตัวของรูพรุนและขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้นเมื่อมีองค์ประกอบของยางเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1.1 ความแข็งแรงดึงของ EVA/ENR-50 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ [9]



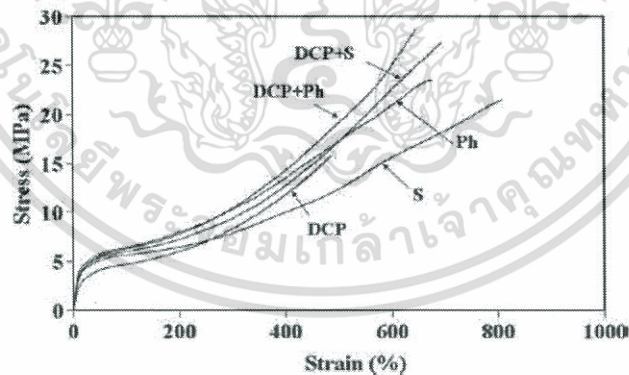
รูปที่ 1.2 มอดุลัสที่ 100% การดึงยืด [9]



รูปที่ 1.3 ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด [9]

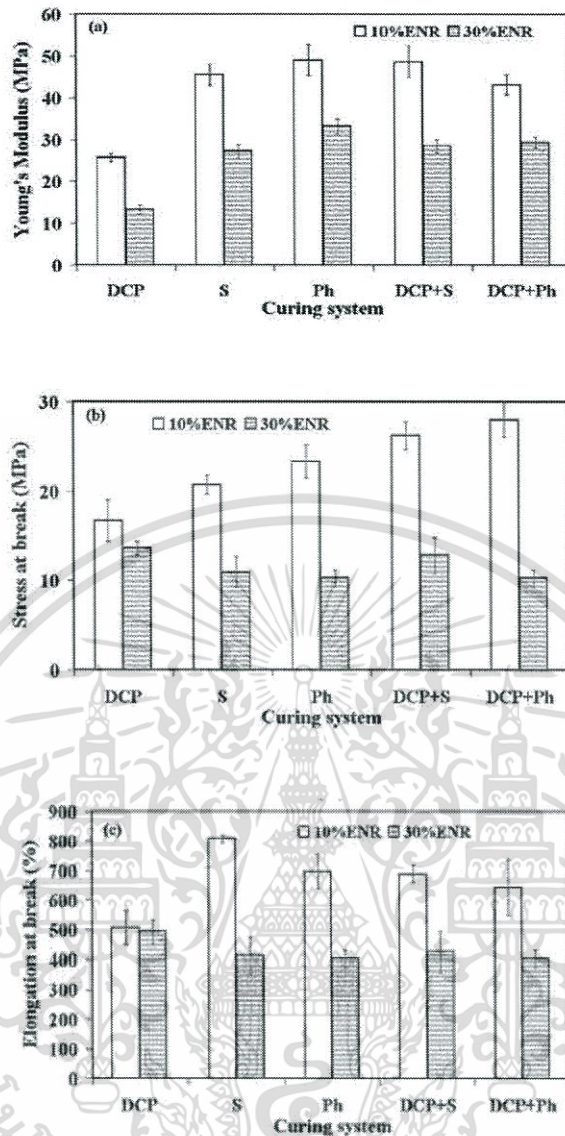
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tanrattanukul V. และคณะ [12] ได้ศึกษาระบบการเชื่อมโยงที่ส่งผลต่อความสามารถในการหดตัวทางความร้อนและศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม EVA/ENR-50 ที่มีปริมาณของ ENR-50 เท่ากับ 10 และ 30% โดยน้ำหนัก โดยทำการศึกษาระบบการเชื่อมโยงทั้งหมด 5 ระบบ คือ DCP (Dicumyl peroxide), S (Sulfur), Ph (Phenolic resin), DCP+S และ DCP+Ph ผลการทดลองพบว่า ระบบการเชื่อมโยงด้วย DCP+S และ DCP+Ph ดีกว่าระบบ DCP, S และ Ph ซึ่งระบบ DCP+Ph เป็นระบบการเชื่อมโยงที่ดีที่สุด (ดังรูปที่ 1.4) เนื่องจากสามารถเชื่อมโยง EVA ให้ทนต่อการหดตัวทางร้อนสูงและวัลคาไนซ์ ENR-50 ให้มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นได้ ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า DCP สามารถเชื่อมโยงได้ทั้ง EVA และ ENR-50 ซึ่งระบบการเชื่อมโยงด้วย DCP ส่งผลให้สมบัติความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดต่ำลง เนื่องจากการเชื่อมโยงในวัฏภาคของยางต่ำ ส่วนระบบการเชื่อมโยงด้วย S หรือ Ph ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเชื่อมโยงในวัฏภาคของยางที่ดีกว่า โดยสมบัติเชิงกลมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ ENR-50 เพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 1.5) เนื่องจากอนุภาคของยางมีขนาดใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ ENR-50 ในพอลิเมอร์ผสม พบว่าที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก เป็นผลมาจากอนุภาคของยางมีการกระจายตัวสม่ำเสมอใน EVA และผลการศึกษากการหดตัวทางความร้อนพบว่าปริมาณ ขนาดอนุภาค และองค์การเชื่อมโยงของยางไม่มีผลต่อความสามารถในการหดตัวทางความร้อนของ EVA แต่การหดตัวทางความร้อนของผสมเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อมีปริมาณ ENR เพิ่มขึ้น



รูปที่ 1.4 กราฟความเค้น-ความเครียดของ 10% ENR ที่ระบบการเชื่อมโยงแตกต่างกัน [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.5 สมบัติความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม EVA/ENR ด้วยระบบเชื่อมโยงแตกต่างกัน (a) โมดูลัสของยัง, (b) ความเค้น ณ จุดขาด และ (c) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด [12]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าพอลิเมอร์ผสม EVA/ENR-50 มีความสามารถในการเข้ากันได้ ทำให้มีสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงสูง [9] ซึ่งระบบที่สามารถเชื่อมโยงได้ทั้งยาง ENR-50 และ EVA คือ ระบบการเชื่อมโยงด้วย DCP ถึงแม้ว่าจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดต่ำกว่าระบบอื่น ๆ [12] ในโครงการพิเศษนี้จึงมุ่งเน้นการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR-50 และ EVA ในรูปแบบฟิล์มบางด้วยวิธีการกดอัดขึ้นรูป โดยใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง และศึกษาสมบัติด้านความแข็งแรงและการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เพื่อความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาผลของอัตราส่วน ENR-50 ต่อ EVA และปริมาณสารเชื่อมโยง DCP ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการซึมผ่านไอน้ำและสมบัติการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR-50 (Epoxidized 50% โดยน้ำหนัก) และ EVA (VA 27.5% โดยน้ำหนัก) ในอัตราส่วน 100/0, 70/30 50/50 30/70 และ 0/100 โดยน้ำหนัก
2. ศึกษาผลของปริมาณ DCP ตั้งแต่ 0 – 3.5 phr
3. ขึ้นรูปชิ้นงานสูตรต่าง ๆ ด้วยกระบวนการกดอัด
4. ศึกษาสมบัติการรับแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)
5. ทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง
6. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)
7. ศึกษาสมบัติพื้นผิวด้วยการทดสอบมุมสัมผัส
8. ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ผสม ENR-50/EVA ในน้ำกลั่นและสารละลาย PBS
9. ทดสอบหาปริมาณของแข็งคงเหลือ
10. ศึกษาสมบัติการดูดความชื้นและซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม
11. ศึกษาสมบัติการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มด้วยเครื่อง Gas permeability analyzer

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR-50/EVA ที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำที่เหมาะสม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์ผสม

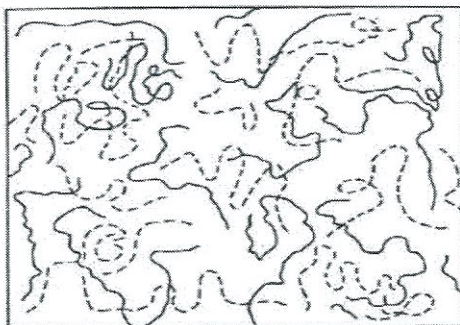
2.1.1 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend)

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เป็นการผสมพอลิเมอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป หรือพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการที่ไม่สามารถได้จากพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว การเตรียมพอลิเมอร์ส่วนใหญ่มักใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงวิศวกรรมที่มีความทนทานต่อแรงเชิงกลและอุณหภูมิ ซึ่งมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ดังนั้นจึงทำให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติเด่นและเฉพาะมากยิ่งขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนมากกว่าการผสม ถือว่าเป็นการผสมที่สะดวก ง่าย และราคาไม่สูงมาก [13-14]

โดยการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันตามธรรมชาติแล้วเป็นไปได้ยาก ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงไม่เป็นสารละลายของแข็งที่แท้จริงหรือเกิดการแยกวัฏภาคของพอลิเมอร์แต่ละชนิดกันอย่างชัดเจน พบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งกระจายอยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (Continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้นจะทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่อง (Defects) ของผลิตภัณฑ์และส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าของพอลิเมอร์เดิมที่นำมาผสม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน [16]

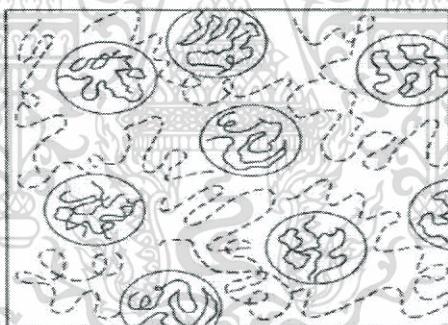
พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ [13-15]

1. พอลิเมอร์ที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend) หมายถึง พอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีความบ่งชี้ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ (Solubility parameter, δ) ในระดับโมเลกุลในทางเทอร์โมไดนามิกใกล้เคียงกัน เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวมีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์สองชนิด



รูปที่ 2.1 ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ชนิด Miscible blend [17]

2. พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) หมายถึง พอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลายต่างกันมาก ทำให้พอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันและสามารถแยกออกเป็น 2 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคหลัก (Matrix phase) และภูมิภาคกระจาย (Dispersed phase) โดยระหว่างภูมิภาคอาจจะมีการติดต่อดูระหว่างกันเล็กน้อย ทำให้เกิดบริเวณที่อ่อนแอ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สมบัติต่าง ๆ นั้นต่ำลง เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนหรือทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสามารถในการเข้ากันไม่ได้ของพอลิเมอร์ชนิด Immiscible blend [17]

วัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสม

1. เพื่อพัฒนาสมบัติให้ได้ตามต้องการสมบัติที่ดีขึ้นและราคาถูกลง
2. เพื่อปรับปรุงส่วนประกอบของการผสมตามที่ต้องการและทำให้สมบัติเด่นของพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น
3. เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ในทางกระบวนการอุตสาหกรรมเช่น การนำเศษพลาสติกหลายชนิดมารีไซเคิล

ในการเลือกใช้พอลิเมอร์ที่จะนำมาผสม ต้องคำนึงถึงความสามารถในความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดและข้อดี-ข้อเสีย เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงและพัฒนาสมบัติให้ได้ตามที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการ เนื่องจากการทำพอลิเมอร์ผสมนั้น พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะต้องทำหน้าที่ขัดเซยข้อเสยหรือข้อค้อยของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

2.1.2 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมมีหลากหลายวิธี ดังนี้

1. การผสมด้วยแรงเชิงกล (Mechanical mixing) เป็นกระบวนการหลอมเหลวพอลิเมอร์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Melting temperature, T_m) ด้วยแรงเชิงกล

2. การผสมด้วยการละลาย (Solution casting) เป็นการผสมด้วยการละลายพอลิเมอร์สองชนิดในตัวทำละลายเดียวกัน โดยจะเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมกับค่าบ่งชี้การละลาย ข้อเสยคือจะต้องทำการระเหยตัวทำละลายออก เมื่อได้พอลิเมอร์ผสมแล้ว

3. การผสมในสถานะของเหลว (Latex blending) เป็นการผสมที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization reaction)

4. การผสมในสถานะผง (Fine powder mixing) เป็นการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิดในสถานะผง

5. การผสมแบบสอดประสาน (IPNs) เป็นการผสมโดยการเติมมอนอเมอร์ที่ทำหน้าที่เหมือนตัวทำละลายลงไปในพอลิเมอร์อีกตัวหนึ่ง แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

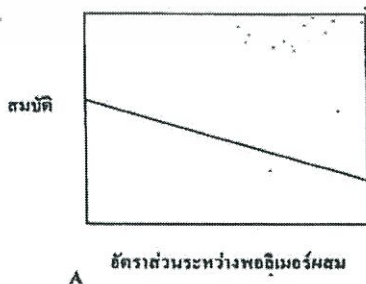
โดยวิธีที่นิยมในการผสม คือ การผสมด้วยแรงเชิงกล เนื่องจากความสะดวกรวดเร็วและความง่ายในการผสม ต้นทุนการผสม รวมถึงการส่งผลต่อระยะเวลาในการผสมด้วย

2.1.3 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเมอร์ผสม

เมื่อนำพอลิเมอร์ชนิด A และ B มาผสมกันในอัตราส่วน 100/0 ถึง 0/100 และทำการพลอตกราฟระหว่างสมบัติกับอัตราส่วน A/B ซึ่งสมบัติที่ได้แบ่งเป็น 2 แบบ ดังนี้

- แบบที่ 1 ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible)

ถ้าพอลิเมอร์ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน สมบัติที่ได้ขึ้นกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดในพอลิเมอร์ผสม ทำให้กราฟที่ได้เป็นเส้นตรงหรือเป็นเส้นโค้งอย่างสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 2.3

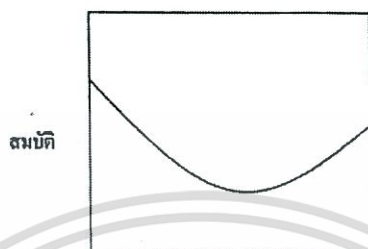


รูปที่ 2.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบที่ 2 ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible)

ถ้าพอลิเมอร์ 2 ชนิดไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันและมีการแยกออกเป็นวัฏภาค (Interphase) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างวัฏภาคน้อยมาก จึงทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมต่ำลงมากกว่าเดิม ดังนั้นกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงายขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.4



A อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ผสม B

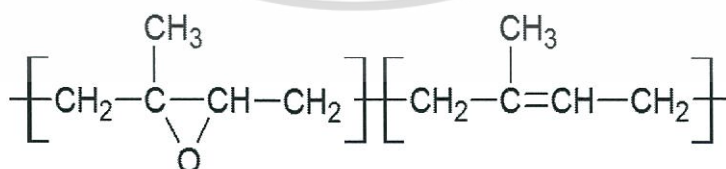
รูปที่ 2.4 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน [14]

2.2 ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized natural rubber, ENR)

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของ ENR [18]

ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์เป็นยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโครงสร้างทางเคมี โดยการเติมกลุ่มอีพอกไซด์เข้าไปในตำแหน่งพันธะคู่ของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxydation reaction) ทำให้ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ที่ได้มีความเป็นขั้วสูงกว่ายางธรรมชาติทั่วไป ทำให้ทนทานต่อน้ำมันและมีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซลดลง

เกรดของยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ในเชิงพาณิชย์ แบ่งได้ 2 เกรด ได้แก่ ENR-25 และ ENR-50 ซึ่งแบ่งตามระดับการเกิดอีพอกซิเดชันร้อยละ 25 และร้อยละ 50 ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของยาง ENR [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สมบัติโดยทั่วไปของ ENR

1. การทนทานต่อสารไฮโดรคาร์บอนของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เพิ่มขึ้นตามระดับการเกิดอีพอกซีเดชัน

2. สภาพความเป็นขั้วเพิ่มขึ้นตามปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ในโมเลกุลของยางและความสามารถในการละลายจะขึ้นอยู่กับระดับการเกิดอีพอกซีเดชันและธรรมชาติของตัวทำละลาย จึงส่งผลให้ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์มีความทนทานต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว แต่ไม่ทนทานต่อสารละลายที่มีขั้ว

3. สำหรับการเกิดอีพอกซีเดชันทุก ๆ ร้อยละ 1 โดยโมล จะมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้นประมาณ 1°C โดยพบว่า ENR-25 มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว -47°C และ ENR-50 มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว -22°C

4. สามารถเกิดการตกผลึกได้เมื่อมีการให้แรงดึงยึดกระทำกับโมเลกุลของยาง แต่ปริมาณของผลึกจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อการเกิดอีพอกซีเดชันเกินร้อยละ 50 โดยโมล เนื่องจากหมู่อีพอกไซด์เข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของยาง จึงทำให้การตกผลึกเกิดได้ยากขึ้น

นอกจากนี้การปรากฏของกลุ่ม Oxirane ในโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ ยังพบว่ามีความมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเฉพาะกับพอลิเมอร์ตัวต่อไปด้วย

2.2.3 การประยุกต์ใช้งาน

ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เป็นยางที่ถูกปรับปรุงให้มีสมบัติความเป็นขั้วมากขึ้น สามารถทนทานต่อน้ำมันและสารละลายที่ไม่มีขั้วได้ดีขึ้น ทนต่อโอโซนและความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่ำ จึงมีการใช้ประโยชน์ในงานประเภทพวกสารยึดติด สี รองเท้า พื้นยาง ยางรถยนต์ และงานผลิตพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) กับพอลิเมอร์ที่มีขั้ว อย่างเช่น พีวีซี (PVC)

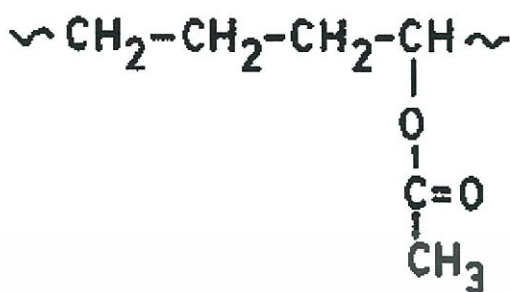
2.3 เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) [9, 20-21]

2.3.1 ลักษณะทั่วไปของ EVA

เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน เนื่องจากเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate, VA) มีเอทิลีนเป็นเนื้อหลักประมาณ 75 - 90% และไวนิลอะซิเตตเป็นตัวเสริมแต่งทำให้เกิดความยืดหยุ่น โดยลดการเกิดผลึก (Crystallinity) พบว่า ถ้ามีปริมาณเอทิลีนมากกว่า 75% จะทำให้ได้โคพอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็ง

EVA เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ภายใต้อุณหภูมิสูงระหว่างเอทิลีนมอนอเมอร์ (Ethylene monomer) และสารไวนิลอะซิเตตมอนอเมอร์ (Vinyl acetate monomer, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VA) โดยอุณหภูมิและความดันที่ใช้ต่ำกว่ากรณีปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนตัวเดียว สารก่ออนุมูลอิสระที่นิยมใช้คือ Azo-bis-isobutyronitrile, Organic peroxides และ Persulphates [20]



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของ EVA [18]

เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ มีลักษณะโมเลกุลเป็นสายยาวของเอทิลีน โดยมีไวนิลอะซิเตตเกาะกระจายเป็นหย่อมบนสายโซ่โมเลกุล ในลักษณะโครงสร้างโคพอลิเมอร์แบบไม่เป็นระเบียบ (Random copolymer) และเนื่องจากสารชนิดนี้เกิดจากการรวมมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือเอทิลีนมอนอเมอร์กับไวนิลอะซิเตตมอนอเมอร์ ดังนั้นสมบัติของ EVA จึงเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของไวนิลอะซิเตตในโมเลกุล [21] หากปริมาณของสารไวนิลอะซิเตตเพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ ดังตารางที่ 2.1 [9]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มปริมาณของไวนิลอะซิเตตในโมเลกุล [9]

สมบัติทางกายภาพของเอทิลีนไวนิลอะซิเตต	
ความเป็นผลึก (Crystallinity)	ลดลง
ความแข็งมอดูลัส (Stiffness modulus)	ลดลง
ความแข็งบริเวณพื้นผิว (Surface hardness)	ลดลง
จุดหลอมเหลวผลึก (Crystalline melting point / softening point)	ลดลง
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile yield strength)	ลดลง
ความทนทานต่อสารเคมี (Chemical resistance)	ลดลง
ความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength (especially at low temperatures))	เพิ่มขึ้น
ความมีขั้ว (Polarity)	เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมบัติของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มปริมาณของไวนิลอะซิเตตในโมเลกุล [9] (ต่อ)

สมบัติทางกายภาพของเอทิลีนไวนิลอะซิเตต	
ความใส (Optical clarity)	เพิ่มขึ้น
ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability)	เพิ่มขึ้น
ความทนทานต่อแรงเค้นจากสิ่งแวดล้อม (Environmental stress crack resistance)	เพิ่มขึ้น
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction)	เพิ่มขึ้น
ปัจจัยในการสูญเสียค่าไดอิเล็กทริก (Dielectric loss factor ($\tan \delta$))	เพิ่มขึ้น
ความแข็งแรงเชิงกลเมื่อมีการเติมเส้นใย (Retention of mechanical strength at high fibre loadings)	เพิ่มขึ้น
ความสามารถในการเข้ากันได้กับเรซินและพลาสติกไซเซอร์ที่มีขั้ว (Compatibility with polar resins and plasticizers)	เพิ่มขึ้น
ความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ชนิดอื่น (Compatibility with other polymers)	หลากหลาย

2.3.2 สมบัติโดยทั่วไปของ EVA

- เป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดใสจนถึงขุ่น
- มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณ 0.926 - 0.950
- สามารถละลายได้ในสารละลายอะโรมาติก (Aromatic) และคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbon) ที่อุณหภูมิสูง
- จุดเปราะ (Brittle point) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -70°C
- จุดอ่อนตัว (Softening point) อยู่ระหว่าง $60 - 80^{\circ}\text{C}$
- มีค่า T_g ตั้งแต่ -20°C (ของโฮโมพอลิเมอร์) จนถึง 20°C
- 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%
- มีความโค้งงอดีที่อุณหภูมิสูง
- มีความสามารถในการสปริงตัวได้ดี โดยไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์
- ทนต่อสภาวะการใช้งาน การซักล้าง และมีอายุการใช้งานสูง
- ทนแสง UV ได้ (UV, Ultraviolet resistance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถให้สีได้ง่ายและสวยงาม
- ขึ้นรูปได้ง่าย
- มีความยืดหยุ่นและโค้งงอได้ดีโดยไม่ต้องใช้พลาสติกไซเซอร์

2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน

EVA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและจุดอ่อนตัวต่ำ มักใช้เป็น Wax additive ในงานเคลือบกระดาษ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารยึดติดและพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)

EVA ที่มีสมบัติคล้ายยาง มักใช้งานบรรจุภัณฑ์ประเภทอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ ใช้ในการผลิตรองเท้าและเบาะรองนั่ง

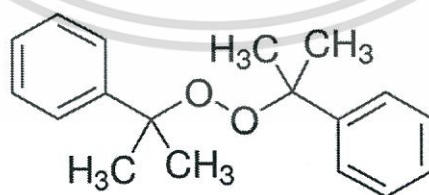
หากปริมาณไวโนลอะซิเตตน้อยกว่า 7% จะได้ฟิล์มที่มีความเหนียว ใสและมีความมันวาว

2.4 ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP)

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของ DCP [22]

สารประกอบเปอร์ออกไซด์เป็นสารที่ประกอบไปด้วยกลุ่มเปอร์ออกไซด์ (O-O) ซึ่งโครงสร้างมีออกซิเจนสองอะตอมจับพันธะกันด้วยอนุมูลอิสระ โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารเริ่มต้นที่ใช้เตรียมเปอร์ออกไซด์อินทรีย์และอนินทรีย์ในเชิงพาณิชย์ เป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพ สมบัติที่เด่นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือสามารถแตกตัวกลายเป็นน้ำและออกซิเจนได้โดยไม่เกิดสารตกค้างที่เป็นพิษ มักจะใช้ในกระบวนการออกซิเดชัน ออกซิเตชัน ไฮโดรอกซิเลชันและรีดักชัน และใช้เป็นตัวริเริ่มหรือตัวเร่งปฏิกิริยาและสารเชื่อมโยงในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก

ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์เป็นแหล่งที่ให้อนุมูลอิสระที่รุนแรง ใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารเชื่อมโยงสำหรับพอลิโอสเตน



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของ DCP [23]

2.4.2 สมบัติโดยทั่วไปของ DCP

1. มีอุณหภูมิครึ่งชีวิต 61°C (10 ชั่วโมง) 80°C (1 ชั่วโมง) และ 120°C (1 นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เกิดการสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดอันตรายจากไฟไหม้และการระเบิดได้เมื่อเกิดความร้อนและอยู่ภายใต้อิทธิพลของแสง

3. ทำปฏิกิริยารุนแรงกับสารที่เข้ากันไม่ได้ จำพวกกรด เบส ตัวรีดิวซ์และโลหะหนัก

4. เก็บในที่แห้งและเย็น (น้อยกว่า 27°C หรือสูงสุด 39°C)

2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน

ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ส่วนใหญ่จะใช้เป็นสารเชื่อมโยงสำหรับพอลิเมอร์และอีลาสโตเมอร์ พอลิเมอร์ที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์อินทรีย์จะถูกใช้ในการผลิตท่อสายยาง ยางรถยนต์ ยางขอบซีล ฯลฯ และสามารถใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟในพอลิสไตรีนชนิดขยายตัว (Expanded polystyrene, EPS) ในกรณีนี้เปอร์ออกไซด์จะเข้าไปอยู่ใน EPS ในปริมาณที่น้อยและจะกระตุ้นการทำงานของสารหน่วงการติดไฟเมื่อเกิดความร้อนและยังใช้ในการเตรียมวัสดุประกอบพอลิเอทิลีน

2.5 วัสดุปิดแผล

วัสดุปิดแผล คือ ผลิตภัณฑ์ทำแผลสำเร็จรูปสำหรับปฐมพยาบาลบาดแผล มีหน้าที่ช่วยรักษาบาดแผล ป้องกันบาดแผลจากเชื้อโรค ความชื้น สิ่งสกปรกต่างๆ และยังช่วยในการห้ามเลือดและสมานแผลของผู้ป่วยให้หายเร็วยิ่งขึ้น วัสดุปิดแผลที่ดีต้องป้องกันเชื้อโรค รักษาความชื้น ระบายอากาศได้ เพื่อรักษาสภาพที่เหมาะสมกับเซลล์เนื้อเยื่อ วัสดุปิดแผลที่รู้จักกันดีคือ ผ้าโปร่งปิดแผล ทำจากฝ้าย แต่มีข้อเสียคือติดแผลและลอกออกยาก วัสดุปิดแผลที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมักทำจากวัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น แผ่นปิดจากพอลิยูรีเทน แผ่นปิดเจลน้ำ แผ่นปิดจากเรซิน แต่วัสดุปิดแผลที่ผลิตจากวัสดุชีวภาพ กำลังมาแทนที่เพราะสามารถช่วยให้แผลสมานกันได้เร็วกว่า วัสดุชีวภาพที่นิยมนำมาใช้ เช่น คอลลาเจน ไคโตซาน อีลาสติก อัลจินต และวุ้นหางจระเข้ แต่วัสดุชีวภาพเหล่านี้ก็มีข้อด้อยในเรื่องของสมบัติทางกายภาพ เมื่อสัมผัสกับความชื้น [24]

วัสดุปิดแผลแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

1. Passive products เป็นวัสดุปิดแผลแบบดั้งเดิมใช้ปิดบริเวณบาดแผลภายนอก ได้แก่ ผ้าก๊อชหรือผ้าใยสังเคราะห์ เป็นต้น
2. Interactive products เป็นวัสดุปิดแผลที่ทำจากพอลิเมอร์ มีลักษณะใสหรือโปร่งแสงยอมให้ไอน้ำและออกซิเจนผ่านเข้าออกได้และป้องกันไม่ให้แบคทีเรียผ่านเข้ามาได้ เช่น ไฮโดรเจล ไฮโดรคอลลอยด์ แผ่นปิดแผลพลาสติก เป็นต้น
3. Bioactive products เป็นวัสดุปิดแผลที่ทำจากวัสดุทางธรรมชาติสามารถช่วยรักษาบาดแผลด้วย เช่น คอลลาเจน อัลจินต ไคโตซาน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การเลือกวัสดุปิดแผลที่เหมาะสม

ก่อนการเลือกวัสดุปิดแผลที่เหมาะสมต้องเข้าใจและประเมินบาดแผลอย่างถูกต้อง รวมถึงการล้างทำความสะอาดบาดแผลอย่างถูกวิธี โดยพิจารณาเลือกใช้น้ำยาล้างแผลที่เหมาะสมและต้องทำการกำจัดอุปสรรคสิ่งกีดขวางการหายใจของบาดแผล เช่น การตัดเนื้อตาย การจัดการสาเหตุของการติดเชื้อ เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องติดตามประเมินการเปลี่ยนแปลงของแผลเป็นระยะด้วยเช่นกัน [25]

2.5.1.1 การทำความสะอาดแผล (Wound cleansing)

การทำความสะอาดบาดแผลเพื่อการกำจัดแบคทีเรียและสิ่งปนเปื้อนออกจากบาดแผล เช่น เนื้อตายที่หลุดออกมา สิ่งแปลกปลอมและสารคัดหลั่ง การทำความสะอาดแผลนั้นต้องคำนึงถึงการปกป้องเพราะอาจมีแผลบางส่วนที่ใกล้หาย ดังนั้นขั้นตอนและวิธีที่ใช้ในการทำความสะอาดบาดแผลนั้นอาจแตกต่างกัน

2.5.1.2 การเลือกใช้วัสดุปิดแผล (Wound dressing)

การเลือกใช้วัสดุปิดแผลที่เหมาะสมจะช่วยให้การหายของแผลเร็วขึ้น รวมถึงคุณลักษณะที่ส่งเสริมต่อนั้นประกอบด้วยการไม่รบกวนกระบวนการหายของแผล ไม่ติดแผลหรือทำให้แผลแห้ง เป็นต้น ซึ่งลักษณะการเลือกใช้วัสดุปิดแผลที่เหมาะสมมีดังนี้

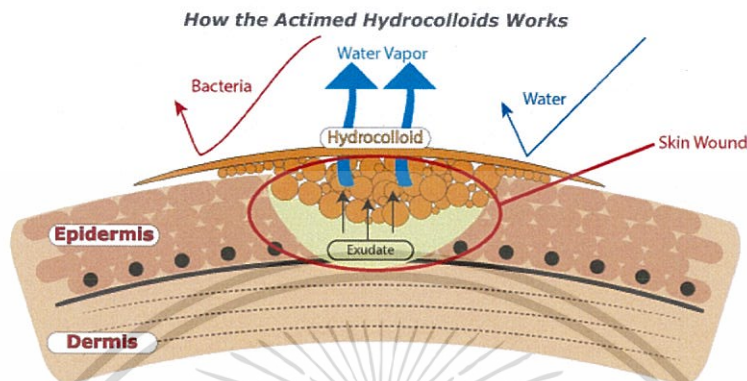
1. สามารถแลกเปลี่ยนก๊าซผ่านวัสดุได้ หากปริมาณของออกซิเจนต่ำจะทำให้การหายของแผลช้าลง
2. รักษาความชุ่มชื้นของบาดแผล
3. รักษาอุณหภูมิของบาดแผลให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิในร่างกาย โดยการป้องกันการระเหยของน้ำและสิ่งคัดหลั่งที่อยู่บนบาดแผล
4. ไม่ยอมให้เชื้อโรคจากภายนอกเข้าสู่บาดแผลและเชื้อโรคในบาดแผลไม่สามารถแพร่กระจายออกภายนอกได้
5. มีความสามารถดูดซับสิ่งคัดหลั่งได้ดี ราคาไม่แพง
6. ควรมองเห็นแผล เพื่อการประเมินการเปลี่ยนแปลงของแผลได้

โดยวัสดุปิดแผลสามารถแบ่งเป็น 2 ชั้น ดังนี้

1. วัสดุปิดแผลชั้นใน (Primary dressing) คือ วัสดุปิดแผลชั้นที่ต้องสัมผัสกับพื้นผิวของแผล อาจเรียกว่า Contact layer
2. วัสดุปิดแผลชั้นนอก (Secondary dressing) คือ วัสดุปิดแผลชั้นที่ปิดทับชั้นของ Primary dressing อีกชั้นหนึ่ง ป้องกันสิ่งปนเปื้อนต่างๆ และช่วยในการดูดซับปริมาณสิ่งที่ขับหลั่งออกมา เช่น ความชื้น เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในวัสดุปิดแผลบางชนิดที่เป็นชั้น Primary dressing สามารถติดกับผิวหนังรอบแผลได้ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุปิดแผลชั้น Secondary dressing เช่น แผ่นปิดแผล Hydrocolloid [26]



รูปที่ 2.8 การทำงานของแผ่นปิดแผลชนิด Hydrocolloid [27]

สมบัติของแผ่นฟิล์มสำหรับปิดแผลที่ดีมีลักษณะต่อไปนี้ [28]

- รักษาความชื้นบริเวณผิวหนังของบาดแผลและดูดซับกลิ่นได้ดี
- สามารถดูดซับของเหลวที่ได้จากบาดแผลและมีการแลกเปลี่ยนก๊าซและของเหลวได้ดี
- มีลักษณะเป็นฉนวนป้องกันความร้อน
- ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้บนผิวหนังหรือไม่มีความเป็นพิษกับเนื้อเยื่อบริเวณผิวหนัง
- ป้องกันจุลินทรีย์หรือการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ได้ดี
- แผ่นปิดบาดแผลสามารถดึงออกได้ง่าย ไม่ติดกับบาดแผลและมีการยึดหยุ่นไม่มี

2.6 วัสดุฟิล์มและวัสดุฟิล์มที่ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ปิดแผลชั้นนอก

วัสดุฟิล์มเป็นวัสดุที่มีความหนาไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร และมีสมบัติหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผลิตเป็นฟิล์ม โดยพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่นิยมนำมาผลิตจัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline) ส่วนสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบเป็นส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) ซึ่งจัดเป็นส่วนที่ไม่ยอมให้อิออน้ำหรือก๊าซซึมผ่าน และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) สายโซ่พอลิเมอร์จะอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว การเคลื่อนที่ของสายโซ่จะถูกจำกัดและทำให้ปริมาตรอิสระ (Free volume) ลดลง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว สายโซ่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอิสระ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้มีความสำคัญต่อความสามารถในการแพร่ผ่านวัสดุของโมเลกุล

วัสดุฟิล์มปิดแผลชั้นนอก หรือ Secondary dressing เป็นวัสดุฟิล์มที่ใช้เพื่อปกปิดฟิล์มชั้นใน ซึ่งเป็นชั้นที่มีการสัมผัสกับผิวหนังรอบบริเวณบาดแผล ลักษณะของวัสดุฟิล์มชั้นนอกค่อนข้างบางและมีการซึมผ่านของก๊าซและความชื้นที่ดี รวมถึงช่วยป้องกันบาดแผลไม่ให้ปนเปื้อนจากสิ่งแปลกปลอมภายนอกที่สามารถเข้าสู่บาดแผลได้ ซึ่งวัสดุปิดแผลชั้นนอกนั้นมีหน้าที่สำคัญหลายประการนอกเหนือจากการช่วยป้องกันบาดแผล ดังนี้ [29]

- ยึดวัสดุปิดแผลชั้นในให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ หากวัสดุปิดแผลชั้นในเกิดการเคลื่อนที่หรือหลุดลอกออกจากแผล อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของชั้นนอกลดลง
- รองรับบริเวณบาดแผล หากมีการฝังรากเทียมหรือการปลูกถ่ายอวัยวะ ควรหลีกเลี่ยงการเคลื่อนไหว ซึ่งวัสดุปิดแผลชั้นนอกอาจช่วยป้องกันรวมทั้งรองรับบาดแผลและอุปกรณ์ต่าง ๆ
- ช่วยป้องกันบาดแผลและอาการบาดเจ็บเพิ่มเติม จากแรงเสียดทานหรือการเคลื่อนไหว รวมถึงปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้นหรืออุณหภูมิ เป็นต้น
- ใช้อำนวยความสะดวกให้เหมาะสำหรับการรักษาบาดแผล ซึ่งต้องเป็นสภาพแวดล้อมแบบปิดสำหรับการทำงานของวัสดุปิดแผลชั้นใน
- ช่วยอำพรางบาดแผลที่ไม่สามารถแสดงให้เห็นได้
- ช่วยให้การรักษาแผลมีประสิทธิภาพดีขึ้น จากการทำงานร่วมกันระหว่างวัสดุปิดแผลชั้นในและชั้นนอก

ลักษณะของวัสดุปิดแผลชั้นนอกที่ต้องการ มีดังนี้

1. ไม่ก่อให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อการรักษาที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ (ระบายอากาศได้)
2. ให้การดูดซึมของเหลวที่ดี เพื่อกำจัดของเหลวที่เป็นอันตรายออกจากแผล
3. ลดโอกาสเสี่ยงในการติดเชื้อ
4. ชั้นกาวไม่ควรทำให้ผิวหนังโดยรอบบาดแผลเกิดการระคายเคือง
5. สะดวกทั้งการใช้งานและการกำจัด
6. ไม่ยึดติดกับเนื้อเยื่อ เส้นขน หรือบาดแผลที่อยู่ชั้นใน และสามารถป้องกันบาดแผลจากแรงกระทำภายนอกได้
7. ไม่ปล่อยให้มิวัตถุแปลกปลอมเข้าไปในบาดแผลหรือขัดขวางการทำงานของวัสดุปิดแผลชั้นใน
8. มีความสอดคล้องหรือเข้ากันได้กับลักษณะของบาดแผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทนทานต่อการฉีกขาด ไม่ติดไฟ มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน
10. คุณสมบัติคงที่ เมื่อมีการเปียก แห้ง หรือมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
11. มีพื้นที่ในการจัดเก็บและใช้พื้นที่จัดเก็บน้อยที่สุด
12. สามารถล้างและนำมาใช้ใหม่ได้ หรืออาจมีการฆ่าเชื้อได้ถ้าจำเป็น
13. ลดปริมาณขยะที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย
14. ไม่หดตัวจนทำให้เกิดความเสียหายต่อบาดแผล
15. อาจนำมาใช้ร่วมกับวัสดุปิดแผลชั้นในได้ ทำให้ได้วัสดุปิดแผลที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.7 การซึมผ่าน

การซึมผ่าน (Permeation) หมายถึงกระบวนการแพร่ของโมเลกุลของก๊าซ ไอ หรือ ของเหลว ผ่านเมมเบรน (Membrane) ทั้งนี้ไม่รวมการแพร่ผ่านรูรั่วหรือรอยปริแตกของเมมเบรนนั้น ๆ โมเลกุลที่แพร่ผ่านเมมเบรนนั้น เรียกว่า Permeant และค่าที่แสดงอัตราการแพร่ผ่านเมมเบรน หรืออัตราการซึมผ่านเมมเบรนนี้ เรียกว่า Permeability [30]

การซึมผ่านเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อฟิล์มที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์พลาสติกและงานทางการแพทย์ เช่น วัสดุปิดแผล เป็นต้น ซึ่งการเลือกใช้วัสดุปิดแผลที่เหมาะสมช่วยให้การหายของแผลเร็วขึ้น ดังนั้นสมบัติของฟิล์มสำหรับปิดแผลที่ดีมีควรรักษาความชื้นบริเวณผิวหนังของบาดแผล และดูดซับกลิ่นได้ดี รวมถึงต้องมีความสามารถแลกเปลี่ยนไอน้ำและก๊าซผ่านวัสดุได้ดีด้วย [28]

2.7.1 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

การเลือกชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผลิตเป็นฟิล์มจากค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTP) ฟิล์มที่มีการซึมผ่านของไอน้ำสูงที่ใช้ในงานทางการแพทย์ เช่น วัสดุปิดแผล ทำให้ผิวหนังบริเวณบาดแผลแห้งตัวและไม่เกิดการอักเสบ ส่งผลให้บาดแผลหายเร็วขึ้น หรือฟิล์มที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์จะทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้นานขึ้น ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มชนิดต่าง ๆ [31]

ฟิล์มที่ศึกษา	WVP (g·m/day·m ² ·Pa)
Chitosan film	$14.6 \times 10^{-7} \pm 2.8 \times 10^{-8}$
Poly(vinyl alcohol) film	$4.4 \times 10^{-7} \pm 2.2 \times 10^{-8}$
Polypropylene film	$1.1 \times 10^{-7} \pm 0.6 \times 10^{-8}$

ตารางที่ 2.3 ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ [32-33]

ชนิดของพลาสติก	ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (g.mm/m ² .day ที่ 40°C, 90%RH)
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)	0.80 - 1.60
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	1.20
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	0.15
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	0.40
พอลิพรอพิลีน (PP)	0.27
พอลิสไตรีน (PS)	1.20
เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA), VA 12%	4.50
เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (EVOH), เอทิลีน 32/44 mole%	2.40/0.80

2.7.2 อัตราการซึมผ่านของก๊าซ

การกำหนดค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซ เพื่อเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้ขึ้นรูปฟิล์มขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะของผลิตภัณฑ์หรือสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยทั่วไปเมื่อต้องการใช้ฟิล์มที่ก๊าซสามารถซึมผ่านได้ ควรเลือกใช้ฟิล์มที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนมากกว่า 2 cc/m².atm.day ค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ [32]

ชนิดของพลาสติก	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจน (cm ³ .mm/m ² .atm.day)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (cm ³ .mm/m ² .atm.day)
PET	2.0 - 3.9	4.7 - 7.9
PVC	2.0 - 7.9	7.9 - 19.7
LDPE	247.0	959.0
PP	68.5	208.0
PS	101.0	527.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติก ชนิดต่าง ๆ [32] (ต่อ)

ชนิดของพลาสติก	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (cm ³ .mm/m ² .atm.day)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (cm ³ .mm/m ² .atm.day)
EVA, VA 12 %	180.0	1,100.0
EVOH, เอทิลีน 32/44 mole %	1.02/0.03	0.01/0.08

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yong M.K. และคณะ [9] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม EVA/SMRL โคพอลิเมอร์และ EVA/ENR-50 โคพอลิเมอร์ โดยเตรียมแผ่นซีทด้วยวิธีการกดอัด ผลการศึกษาพบว่าแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีองค์ประกอบของยางมากขึ้น เนื่องจากความหนืดและการกระจายตัวในการผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าแรงบิดในการผสมและค่าเสถียรภาพของแรงบิดใน EVA/ENR-50 มีค่าต่ำกว่า EVA/SMRL เนื่องจากความหนืดของการผสมต่ำและเป็นผลมาจากความมีขั้วที่เหมือนกันของ EVA และ ENR ซึ่งพอลิเมอร์ผสม EVA/ENR-50 ส่งผลให้กระบวนการการผสมมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ EVA/SMRL โดยผลจากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าค่าความแข็งแรงดึงมอดุลัสที่ 100% การดึงยืดและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของ EVA เพิ่มขึ้น โดยการผสม EVA/ENR-50 มีผลทำให้ค่าของสมบัติเชิงกล ความทนทานต่อน้ำมันและเปอร์เซ็นต์การบวมตัวดีกว่าการผสม EVA/SMRL และเมื่อศึกษาสัญญาณวิทยาโดยใช้ SEM พบว่าอนุภาคของยาง ENR-50 กระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันดีกว่า EVA/SMRL และผลของรอยแตกหักบริเวณพื้นผิวจากการทดสอบการดึงจากการผสม EVA/ENR-50 พบว่ามีลักษณะขรุขระบริเวณพื้นผิวมากกว่า เนื่องจากการมีพันธะระหว่างภูมิภาคที่แข็งแรงกว่า รวมถึงผลจากการสกัดภูมิภาคยางด้วย MEK (Methyl ethyl ketone) พบว่ามีการกระจายตัวของรูพรุนและขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้นเมื่อมีองค์ประกอบของยางเพิ่มขึ้น

Nouparvar H. และคณะ [34] ได้ศึกษาเกี่ยวกับนาโนคอมโพสิตระหว่าง ENR-50 กับ PA6 (Polyamide 6) โดยมีการปรับปรุงด้วย OMMT (Organoclay-modified montmorillonite) ปริมาณ 4 phr เพื่อศึกษาผลของปริมาณ ENR-50 ใน PA6 จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางสัญญาณวิทยา สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ ENR-50 ที่แตกต่างกันคือ 0, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก พบว่าความแข็งแรงดึง ความต้านทานต่อการโค้งงอและมอดุลัสลดลงเมื่อมีปริมาณ ENR-50 เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของภูมิภาคยางที่มีความยืดหยุ่น (Soft elastomeric phase) ที่ใส่เข้าไปทำให้ภูมิภาคหลักของ PA6 มีความสามารถในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งแรงของการกระแทกเพิ่มขึ้นและสูงสุดที่ 10% โดยน้ำหนัก ENR-50 และร้อยละ

การดัดยัด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ENR-50 ส่วนผลจากการวิเคราะห์ DSC พบว่าปริมาณ ENR-50 เพียงเล็กน้อยทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และองศาความเป็นผลึก (X_c) เปลี่ยนแปลงไป และผลจากการวิเคราะห์ TGA พบว่าการใส่ ENR-50 ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนลดลง เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้ SEM พบว่าขนาดวัฏภาคของ ENR-50 ใหญ่ขึ้น เมื่อมีการใส่ ENR-50 เพิ่มขึ้นและวัฏภาคมีการกระจายตัวอย่างอิสระใน PA6 และผลจาก XRD พบว่า OMMT มีการกระจายตัวได้ดีหากปริมาณที่ใช้้น้อยกว่า 4 phr ใน PA6/ENR-50/OMMT นาโนคอมโพสิต โดยมีการยืนยันผลจาก TEM

Ahmad H.S. และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึงและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR-50/NBRr (Recycled acrylonitrile-butadiene rubber) ที่มีอัตราส่วนผสม ENR-50/NBRr แตกต่างกันคือ 95/5, 90/10, 85/15, 75/25 และ 65/35 โดยเปรียบเทียบกับ NR/NBRr เตรียมแผ่นซีทด้วยวิธีการกดอัด พบว่าการผสม ENR-50 กับ NBRr ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง, ร้อยละการดัดยัด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ NR/NBRr โดยค่าความแข็งแรงดึงลดลงเมื่อมีปริมาณ NBRr เพิ่มขึ้นใน ENR-50/NBRr และ NR/NBRr เนื่องจากความไม่เข้ากันของการผสมและการกระจายตัวที่ไม่ดีของ NBRr ในเมทริกซ์ของ NR และ ENR-50 ซึ่งเกิดจากการเชื่อมโยงในวัฏภาคยาง ส่วนค่าร้อยละการดัดยัด ณ จุดขาดลดลงเมื่อมีปริมาณ NBRr เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีสารเสริมแรงใน NBRr ซึ่งเป็นข้อจำกัดความสามารถในการเคลื่อนที่ของเมทริกซ์ยางและสายโซ่ของยางรีไซเคิลจึงเป็นผลทำให้ค่าดังกล่าวลดลง และค่ามอดุลัสที่ 100 และ 300% การดัดยัดเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ NBRr เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น และผลจากการศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้ SEM พบว่ารอยแตกหักบริเวณพื้นผิวจากการทดสอบการดึงมีแรงยึดติดที่พื้นผิวระหว่าง ENR-50 และ NBRr ดีขึ้น เนื่องจากมีความสามารถในการเข้ากันได้เพิ่มขึ้นของการผสม ENR-50/NBRr

Tanrattanakul V. และคณะ [12] ได้ศึกษากระบวนการเชื่อมโยงที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อความสามารถในการหดตัวทางความร้อนและศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม EVA/ENR ที่มีปริมาณของ ENR แตกต่างกันคือ 10 และ 30% โดยน้ำหนัก โดยศึกษากระบวนการเชื่อมโยงทั้งหมด 5 ระบบ คือ DCP (Dicumyl peroxide), S (Sulfur), Ph (Phenolic resin), DCP+S และ DCP+Ph พบว่าระบบการเชื่อมโยงด้วย DCP+S และ DCP+Ph ดีกว่าระบบ DCP S และ Ph ซึ่งระบบ DCP+Ph เป็นระบบการเชื่อมโยงที่ดีที่สุด เนื่องจากสามารถเชื่อมโยง EVA ให้ทนต่อการหดตัวทางร้อนได้สูงและวัลคาไนซ์ ENR ให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า DCP สามารถเชื่อมโยงได้ทั้ง EVA และ ENR ในขณะที่ S และ Ph สามารถเชื่อมโยงได้เพียง ENR ซึ่งระบบการเชื่อมโยงด้วย DCP ส่งผลให้สมบัติความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดมีค่าต่ำลง เนื่องจากมีการเชื่อมโยงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวัฏภาคของยาง ส่วนระบบการเชื่อมโยงด้วย S หรือ Ph ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเชื่อมโยงในวัฏภาคของยางที่ดีกว่า โดยสมบัติเชิงกลมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ ENR เพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคของยางมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ ENR-50 ในพอลิเมอร์ผสมพบว่าที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก เป็นผลมาจากอนุภาคของยางมีการกระจายตัวสม่ำเสมอใน EVA และเมื่อวัฏภาคของยางมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติม S และ Ph และผลการศึกษาการหดตัวทางความร้อนพบว่าปริมาณยาง ขนาดวัฏภาคของยาง และองค์การเชื่อมโยงไม่มีผลต่อความสามารถในการหดตัวทางความร้อนของ EVA แต่การหดตัวทางความร้อนของผสมเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อมีปริมาณ ENR เพิ่มขึ้น

Hashim F. และคณะ [36] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์คอมโพสิตระหว่าง EVA/NR/MLF (Mengkuang leaf fibre) และ EVA/ENR-50/MLF โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ MLF คือ 0, 10, 20, 30 และ 40 phr เตรียมซีทคอมโพสิตด้วยวิธีการกดอัดพบว่า EVA/ENR-50/MLF คอมโพสิตมีสมบัติที่ดีกว่า EVA/NR/MLF คอมโพสิต เนื่องจากปริมาณการเกิดอิพอกซิเดชัน โดยผลการศึกษาสัณฐานวิทยาจาก SEM พบว่าส่วนของ MLF สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวที่มีขี้ใน EVA และ ENR-50 ได้ ส่วนผลของการศึกษาเสถียรภาพของแรงบิดพบว่าเสถียรภาพของแรงบิดของคอมโพสิตทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่ MLF เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใส่ MLF เพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นซึ่งช่วยลดปริมาตรอิสระระหว่างเมทริกซ์และเส้นใย โดย EVA/ENR-50/MLF คอมโพสิตมีเสถียรภาพของแรงบิดที่ต่ำกว่า EVA/NR/MLF เนื่องจากมีความหนืดในระหว่างการผสมต่ำเป็นเหตุส่งผลทำให้ EVA/ENR-50/MLF คอมโพสิตมีการขึ้นรูปง่ายกว่า EVA/NR/MLF คอมโพสิต และจากการเปรียบเทียบทำให้ทราบได้ว่า EVA/ENR-50/MLF คอมโพสิต มีสมบัติความแข็งแรงดึงและสมบัติทางความร้อนสูงกว่า EVA/NR/MLF คอมโพสิต

Ismail H. และคณะ [37] ศึกษาการเตรียมและพิสจุน์เอกลักษณ์ของ EVA/Natural rubber (SMR L)/Organoclay นาโนคอมโพสิต เพื่อดูลำดับการผสมและการใส่ Organoclay ปริมาณ 2 - 10 phr โดยการเตรียมซีทด้วยวิธีการกดอัด พบว่าลำดับการผสมเพื่อเตรียมนาโนคอมโพสิตแบบ B3 คือ การนำเอา EVA ผสมกับ Organoclay ก่อนแล้วใส่ SMR L ลงไปที่หลังนั้นดีที่สุด แสดงให้เห็นว่ามีสมบัติที่ดีขึ้น เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างวัฏภาค Organoclay และวัฏภาค EVA การใส่ Organoclay ที่ 2 phr เหมาะสมที่สุด ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง, ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นและการซึมผ่านของน้ำลดลง เนื่องจากอนุภาคของ Organoclay ที่ใส่ลงไปน้อยทำให้เกิด Intercalation/Exfoliation ที่ดี ในขณะที่เมื่อทำการใส่ในปริมาณที่มากขึ้น Organoclay มีแนวโน้มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเกิดเป็นกลุ่มก้อนแอกโกลเมอเรต (Agglomerates) นอกจากนี้การใส่ Organoclay ในสัดส่วน ปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้มอดูลัสที่ 100% การดึงยืด (M100) เสถียรภาพทางความร้อนและการหน่วง การติดไฟเพิ่มขึ้น

Mohamad Z. และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสมเพื่อดูผลของ อัตราส่วนการผสมระหว่าง ENR-50 และ EVA ในอัตราส่วนผสม ENR-50/EVA เท่ากับ 0/100, 20/80, 40/60, 50/50, 60/40, 80/20 และ 100/0 โดยการเตรียมแผ่นซีทด้วยวิธีการกดอัด ผลการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR-50/EVA มีค่าความแข็งแรงดึง, มอดูลัสและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น ในขณะที่การมีปริมาณ ENR-50 เพิ่มขึ้น ทำให้ เสถียรภาพของแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้ SEM พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR-50/EVA ในอัตราส่วน 20/80 และ 40/60 วัฏภาค ENR-50 กระจายตัวอยู่ในวัฏภาค EVA ในขณะที่อัตราส่วน 50/50, 60/40 และ 80/20 ทั้งสองวัฏภาคเป็นวัฏภาคต่อเนื่องทำให้เกิดสัณฐาน วิทยาต่อเนื่องร่วมกัน ผลของสมบัติเชิงกลพบว่าส่วนผสมมีความเข้ากัน เนื่องจากเกิดฟิสิกอลอโนมี่ เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) เพียงฟิสิกเดียว ส่วนค่าเสถียรภาพทางความร้อนพบว่าส่วนผสม ENR-50/EVA ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนการผสม 50/50 เป็นอัตราส่วน การผสมที่คงที่มากที่สุด

Johnson T. และคณะ [39] ได้ศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซไนโตรเจนและ ก๊าซออกซิเจนของยาง NR, ENR และ NR/ENR ผลของการศึกษา พบว่าความสามารถในการซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนลดลงเมื่อมีปริมาณของ ENR และเปอร์เซ็นต์โมลการเกิด อีพอกซิเดชัน (Mol% epoxidation) เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ทำให้การซึมผ่านลดลง โดยความสามารถในการซึมผ่านและความจำเพาะของยาง NR, ENR และ NR/ENR พบว่าเมมเบรนที่ มีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนสูงส่งผลให้มีความจำเพาะต่ำ ซึ่งเมมเบรน ENR-50 มี ความจำเพาะของก๊าซออกซิเจน/ก๊าซไนโตรเจนสูงสุด และผลความจำเพาะของก๊าซออกซิเจน/ ก๊าซไนโตรเจนและความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนกับเปอร์เซ็นต์ โมลการเกิดอีพอกซิเดชัน พบว่ามีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ส่วนแบบจำลองของ Maxwell และ Bruggeman ที่ถูกใช้เพื่อทำนายความสามารถในการซึมผ่านของส่วนผสม เมื่อเปรียบเทียบค่า ความสามารถในการซึมผ่านของส่วนผสมที่คาดการณ์ไว้ในแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลอง พบว่า แบบจำลองของ Maxwell ทำนายความสามารถในการซึมผ่านของส่วนผสมต่ำกว่าแบบจำลองของ Bruggeman เมื่อ ENR เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และเมื่อปริมาณของ ENR ในการผสมเพิ่มขึ้น ผลของการ ซึมผ่านแสดงให้เห็นถึงการผกผันของวัฏภาคในช่วง 30 - 70% โดยน้ำหนัก ENR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (ENR) เกรด Epoxyrene 50 (ENR-50) จาก Muang Mai Guthrie Public Company Limited (ตารางที่ 3.1)
2. เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) มีไวนิลอะซิเตต (VA) 27.5% เกรด UL00728CC จาก ExxonMobil Chemical Limited (ตารางที่ 3.2)
3. ไดคิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) มีเปอร์ออกไซด์ 98% เกรด MFCD00036227 จาก Aldrich Chemical Company, Inc. (ตารางที่ 3.3)
4. เอทานอล (Absolute ethanol) เกรดวิเคราะห์
5. โทลูอีน (Toluene) เกรดการค้า
6. เททระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran, THF) เกรดวิเคราะห์
7. ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลีน (Phosphate buffer saline, PBS) เกรดวิเคราะห์
8. แคลเซียมคลอไรด์ที่ปราศจากน้ำ (Anhydrous calcium chloride, CaCl₂) เกรดวิเคราะห์

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ ENR-50

สมบัติ	ENR-50
% Epoxidation	50±2
Ash content (Max. % Weight)	0.50
Mooney viscosity ML (1' + 4') 100°C (range Min-Max)	70 - 100

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ EVA

สมบัติ	UL00728CC	หน่วย
ไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate, VA)	27.5	wt %
ดัชนีการไหล (Melt flow rate, 190°C/2.16 kg)	7.0	g/10 min
ความหนาแน่น (Density)	0.951	g/cm ³
การดึงยืด ณ จุดขาด (Tensile elongation at break)	100	%

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ DCP

สมบัติ	Peroxide 98%
ความหนาแน่น (Density)	1.56 g/mL ที่อุณหภูมิ 25 °C
ความหนาแน่นของไอ (Vapor density)	9.3 (vs air)
ความดันไอ (Vapor pressure)	15.4 mmHg (38 °C)
อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature)	88 °C

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer, รุ่น MX500-D75L90 ; Chareon tut Co., Ltd.)
2. เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding, รุ่น LP 20 ; Lab tech engineering Co., Ltd.)
3. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM รุ่น LR QC-536M1 ; Comyech testing machines Co., Ltd.)
4. เครื่องวัดการผ่านของก๊าซออกซิเจน OX-TRAN รุ่น 2/21 Module MT
5. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR รุ่น NICOLET 6700 ; Becthai Bangkok Equipment & Chemical Co., Ltd.)
6. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC รุ่น DSC 204 F1 Phoenix® ASC ; NETZSCH Co., Ltd.)
7. เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle system, รุ่น OCA20 ; Dataphysics Co., Ltd.)
8. เครื่องปั๊มลม (รุ่น BEBICON 400 ; Hitachi Co., Ltd.)
9. แม่พิมพ์ตัดตัวตัดรูปดัมเบล (Die cut) ขนาด 10 × 65 mm
10. เครื่องชั่ง
11. เครื่องชั่งแบบละเอียด
12. เครื่องอัลตราโซนิก
13. เดซิเคเตอร์ (Desiccator)
14. ตู้อบลมร้อน
15. ตู้ดูดควัน
16. กระจบอกใส่ไนโตรเจนเหลว
17. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว
18. ไมโครมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19. เวอร์เนีย
20. แผ่นใสชนิดถ่ายเอกสาร
21. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
22. ชุดอุปกรณ์รีฟลักซ์

3.3 พอลิเมอร์ผสม

การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม สามารถทำการผสมตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมดโดยน้ำหนัก

สูตร	อัตราส่วนระหว่าง ENR-50/EVA	น้ำหนักของ ENR-50 (กรัม)	น้ำหนักของ EVA (กรัม)	ปริมาณของ DCP (phr)
R10	100/0	45.0	-	0.0
R10p2.1	100/0	45.0	-	2.1
R7V3	70/30	31.5	13.5	0.0
R7V3p1.0	70/30	31.5	13.5	1.0
R7V3p2.1	70/30	31.5	13.5	2.1
R7V3p2.5	70/30	31.5	13.5	2.5
R7V3p3.0	70/30	31.5	13.5	3.0
R7V3p3.5	70/30	31.5	13.5	3.5
R5V5	50/50	22.5	22.5	0.0
R5V5p2.1	50/50	22.5	22.5	2.1
R3V7	30/70	13.5	31.5	0.0
R3V7p2.1	30/70	13.5	31.5	2.1
V10	0/100	-	45.0	0.0
V10p2.1	0/100	-	45.0	2.1

หมายเหตุ R = ENR-50, V = EVA และ p = DCP

ซึ่งส่วนผสมระหว่าง ENR-50 และ EVA ตามตารางที่ 3.4 ในการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณพอลิเมอร์ผสมรวม 45 กรัม จากนั้นนำมาใส่ในเครื่องผสมระบบปิด ซึ่งแยกชนิดพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการใส่ โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม

100°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความเร็วรอบ (Rotor speed) 100 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 12 นาที

นำพอลิเมอร์ที่ผสมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมไปอัดขึ้นรูปฟิล์มและซีทต่อไป

3.4 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างด้วยวิธีการกดอัด

นำพอลิเมอร์ผสมสูตรที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3.3 ไปขึ้นรูปฟิล์มและซีทด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป โดยตั้งสภาวะของเครื่องกดอัดดังนี้

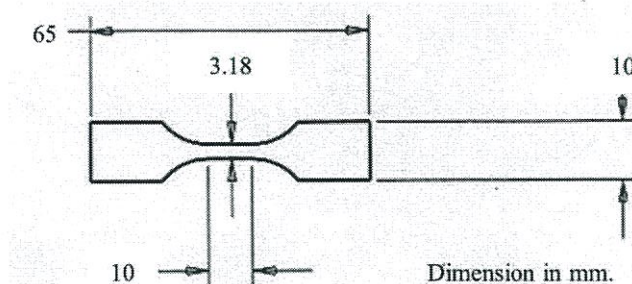
- อุณหภูมิในการกดอัด 150°C
- ความดันในการกดอัด 1500 psi
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์ 1 นาที
- เวลาในการกดอัดร้อน 6 นาที
- อุณหภูมิในการกดอัดเย็น 15°C
- เวลาในการกดอัดเย็น 6 นาที
- แม่พิมพ์ประกบขนาด 20 × 20 × 2 mm² 2 ชั้น

ในการเตรียมฟิล์มบาง ชั่งน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมในแต่ละครั้ง 2 กรัม ในการเตรียมซีทหนาประมาณ 1 mm ชั่งน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมในแต่ละครั้ง 20 กรัม

3.5 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

การทดสอบการรับแรงดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่ามอดุลัส (Modulus) ตามมาตรฐาน ASTM D412 [40] ด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ โดยใช้สภาวะที่ทดสอบดังนี้

- Load cell 500 N
- ความเร็วในการดึง (Test speed) 500 mm/min
- ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) 10 mm



รูปที่ 3.1 ลักษณะของชิ้นงานตัวอย่าง

ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength), } \sigma = F_{at \max} / A \quad (3.1)$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)} = \frac{(l_{at \text{ break}} \cdot l_0)}{l_0} \times 100 \quad (3.2)$$

และค่ามอดุลัสของยาง (Rubber modulus) สามารถหาได้จากค่าความเค้นแรงดึงเมื่อดึงยืดยางได้ 100% (M100) และ 300% (M300) ตามลำดับ

3.6 การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง

1. ตัดซีทตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$
2. ชั่งน้ำหนักซีทและบันทึกน้ำหนัก (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
3. รีฟลักซ์ซีทตัวอย่างใน Toluene 2.5 ชั่วโมงและทำต่อใน THF 8 ชั่วโมง
4. นำตัวอย่างที่เหลือไปอบจนแห้ง
5. ชั่งน้ำหนักซีทตัวอย่างที่เหลือและบันทึกน้ำหนัก (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
6. หา % การเชื่อมโยง จากการหาปริมาณ Gel content จากสมการที่ 3.3 [41]

$$\text{Gel content (\%)} = \frac{W_1}{W_0} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ W_0 = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (g)

W_1 = น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)

7. ทำซ้ำ 3 ชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึกและปริมาณผลึก

นำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง DSC ทำการชั่งน้ำหนักฟิล์ม ประมาณ 5 - 10 มิลลิกรัม นำมาให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min จากอุณหภูมิห้อง จนถึงอุณหภูมิ 100°C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 10°C/min จนถึงอุณหภูมิห้อง นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และ ความเป็นผลึกตามมาตรฐาน ASTM E794 [42]

$$\text{Heat of fusion, } \Delta H_f \text{ (J/g)} = \frac{\text{พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก (ที่ตำแหน่ง } T_m) \text{ (mJ)}}{\text{น้ำหนักฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (mg)}} \quad (3.4)$$

$$\text{ความเป็นผลึก (\%)} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^0} \quad (3.5)$$

เมื่อ ΔH_f = พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก (ที่ตำแหน่ง T_m)
 ΔH_f^0 = พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่าเท่ากับ 293 J/g [43]

3.8 การทดสอบมุมสัมผัส

ทำการตัดซีท ขนาด 3 x 3 cm² เพื่อทดสอบบริเวณพื้นผิว ใช้ปริมาตรหยดน้ำ 10 μ L ทำการบันทึกค่ามุมสัมผัสเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที วัดมุมที่หยดน้ำกระทำกับผิววัสดุด้วยเครื่อง Contact angle ตามมาตรฐาน ASTM D5946 [42]

3.9 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มด้วยเทคนิค FT-IR

นำฟิล์ม ENR-50, EVA และ ENR-50/EVA มาตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FT-IR แบบ Attenuated total reflectance (ATR) ในช่วงเลขคลื่น 700 cm⁻¹ ถึง 4000 cm⁻¹ เพื่อดูการเกิดอันตรกิริยาของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

3.10 การทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวของแผ่นฟิล์มและปริมาณของแข็งคงเหลือ

1. ตัดซีทพอลิเมอร์ผสม ENR-50/EVA เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2x3 cm²
2. ชั่งน้ำหนักซีทพอลิเมอร์ผสม ENR-50/EVA (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
3. แช่ซีทพอลิเมอร์ผสม ENR-50/EVA ใน :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- น้ำกลั่น 50 ml ที่อุณหภูมิ 37°C
 - สารละลาย PBS 50 ml ที่อุณหภูมิ 37°C
4. นำชิ้นตัวอย่างขึ้นมาที่เวลา 1 และ 24 ชั่วโมง แล้วซับน้ำออกก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก
 5. คำนวณการบวมตัวจากสมการที่ 3.6

$$\text{เปอร์เซ็นต์การบวมตัว} = \frac{(\text{น้ำหนักซีทที่บวมตัว} - \text{น้ำหนักของซีทแห่งก่อนการบวมตัว}) \times 100}{\text{น้ำหนักของเจลแห่งก่อนการบวมตัว}} \quad (3.6)$$

6. ทำซ้ำ 3 ซินงาน
7. นำชิ้นงานตัวอย่างหลังการแช่น้ำกลั่นหรือ PBS ที่ 24 ชั่วโมง ไปอบจนกระทั่งน้ำหนักคงที่
8. คำนวณหา % ของแข็งคงเหลือ จากสมการที่ 3.7

$$\% \text{ ของแข็งคงเหลือ} = \frac{\text{น้ำหนักของซีทตัวอย่างหลังการอบ} \times 100}{\text{น้ำหนักของซีทตัวอย่างเริ่มต้น}} \quad (3.7)$$

3.11 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

1. นำแคลเซียมคลอไรด์ที่ปราศจากน้ำ ประมาณ 10 กรัม มาอบที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บในเดซิเคเตอร์
2. นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ENR-50/EVA ไปคลุมด้านบนปากภาชนะรัศมี 2.85 cm โดยภายในภาชนะบรรจุด้วยแคลเซียมคลอไรด์ประมาณ 10 กรัม (ความชื้นสัมพัทธ์ 5±5%) จากนั้นเก็บในเดซิเคเตอร์ (ความชื้นสัมพัทธ์ 70±5%)
3. นำชุดตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน แล้วบันทึกผลและทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งสำหรับฟิล์มแต่ละสูตร
4. นำผลการทดสอบมาพลอตกราฟเป็นฟังก์ชันของเวลาและหาความชันจากกราฟ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.8

$$\text{WVTR} = \frac{G}{tA} \quad (3.8)$$

เมื่อ WVTR = อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (g·m/day·m²)

G = น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (g)

t = เวลา (day)

Gt = ความชันของกราฟ (g/day)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \text{พื้นที่ปากภาชนะ (m}^2\text{)}$$

5. นำอัตราการซึมผ่านไอน้ำไปแทนค่า เพื่อคำนวณหาค่าการซึมผ่านไอน้ำ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.9

$$\text{Water vapor permeability} = \frac{WVTR}{S(R_1 - R_2)} \times L \quad (3.9)$$

เมื่อ	WVP	= ค่าการซึมผ่านไอน้ำ (g·m/day·m ² ·Pa)
	WVTR	= อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (g·m/day·m ²)
	S	= ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิในเดซิเกเคเตอร์ (Pa)
	R ₁	= ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในเดซิเกเคเตอร์ที่ 70±5%
	R ₂	= ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในภาชนะที่ 5±5%
	L	= ความหนาเฉลี่ยแผ่นฟิล์ม (m)

3.12 การทดสอบการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน [44]

ส่งตัวอย่างทดสอบศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ทำการวัดค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (Oxygen transmission rate, OTR) ซึ่งมีหน่วยเป็น cm³/m².day ที่อุณหภูมิ 23°C ความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ 0% โดยใช้เครื่องวัดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน OX-TRAN รุ่น 2/21 Module MT ตามมาตรฐาน ASTM D1434 (1988)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

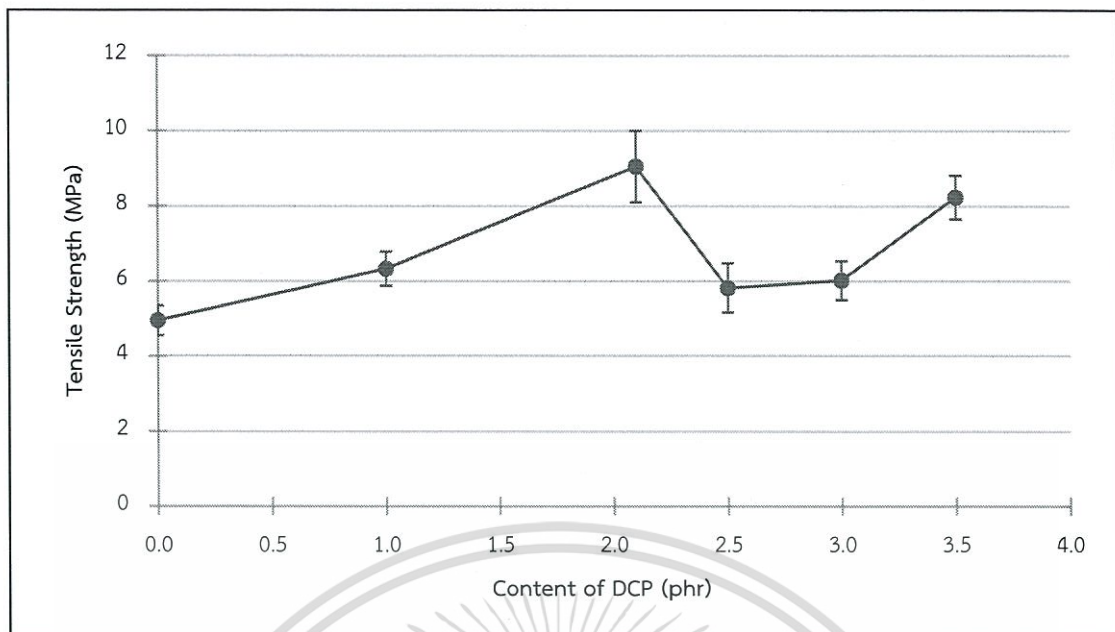
งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมพอลิเมอร์ผสม ENR-50/EVA เพื่อเตรียมเป็นฟิล์มและซีท โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ ENR-50 ต่อ EVA ในสัดส่วนต่าง ๆ โดยมีการใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยงเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำ โดยผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

4.1 การหาปริมาณ DCP ที่เหมาะสม

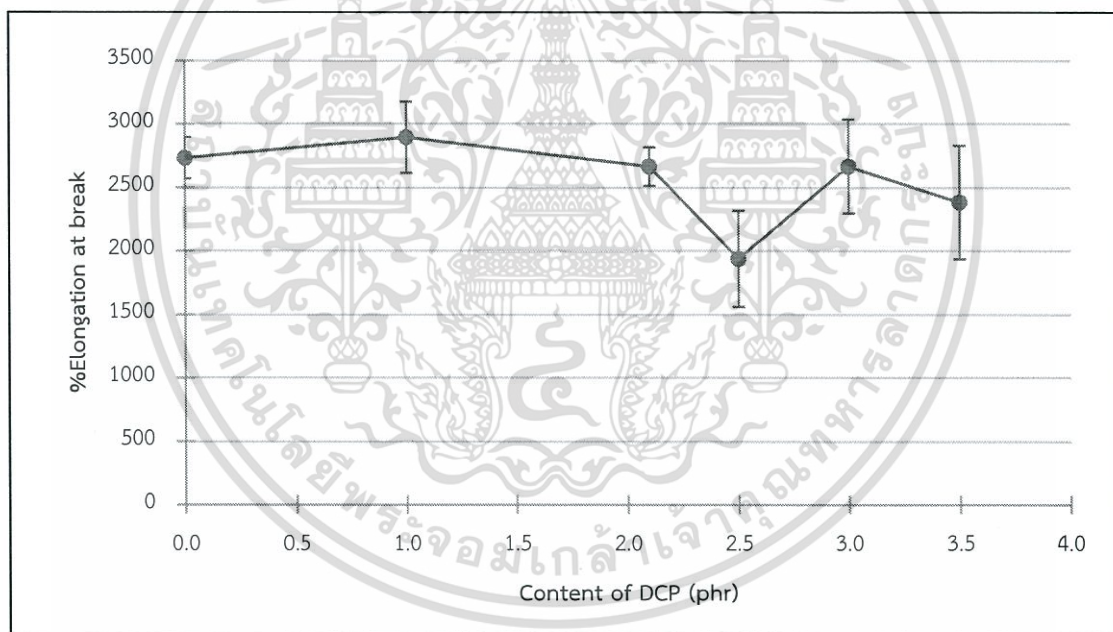
การทดสอบและวิเคราะห์หาปริมาณ DCP ที่เหมาะสม ทำโดยเลือกฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR-50/EVA ที่อัตราส่วน 70/30 และใช้ DCP ในช่วง 0 – 3.5 phr โดยคำนวณเปรียบเทียบกับน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมทั้งหมดจากพอลิเมอร์ผสม โดยฟิล์มสูตร ENR-50/EVA ที่อัตราส่วน 70/30 มีความเหนียวติดที่บริเวณผิวสัมผัสดี เพราะมี ENR มาก มีสมบัติความยืดหยุ่นดี

การทดสอบหาปริมาณ DCP ที่เหมาะสม วิเคราะห์จากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมในปริมาณ DCP ที่แตกต่างกัน ผลแสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นตามปริมาณของ DCP ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ 2.1 phr คาดว่า DCP สามารถกระจายตัวได้ดีทั้งในวัฏภาค ENR-50 และ EVA ส่งผลให้ DCP มีประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงพอลิเมอร์ทั้งสองได้ดีที่สุด ซึ่งสามารถแสดงปฏิกิริยาการเชื่อมโยงได้ดังรูปที่ 4.2 แต่เมื่อปริมาณ DCP เท่ากับ 2.5 และ 3.0 phr ค่าความแข็งแรงดึงกลับลดลง คาดว่า DCP เกิดการเกาะกลุ่มก้อนทำให้ชิ้นงานเกิดจุดบกพร่องโดย DCP ที่เกาะกลุ่มกันนั้น บางส่วนจะไม่สามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ได้และเกิดการสลายตัวหรือการรวมตัวเป็นสารในรูปแบบอื่น ตัวอย่างดังรูปที่ 4.3 สมการที่ 3 ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงของ DCP ต่ำลง และเมื่อปริมาณ DCP เท่ากับ 3.5 phr พบว่า มีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นซึ่งคาดว่า DCP เกิดการเกาะกลุ่มเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากมีปริมาณ DCP มากขึ้น ทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่มากขึ้น ในขณะที่คาร์บอนการดึงยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้น 2.5 phr ที่มีค่าต่ำสุดและมีค่าความคลาดเคลื่อนกว้างเมื่อปริมาณ DCP มากขึ้น ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ DCP เท่ากับ 2.1 phr จึงเหมาะสมในการนำมาใช้งานมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



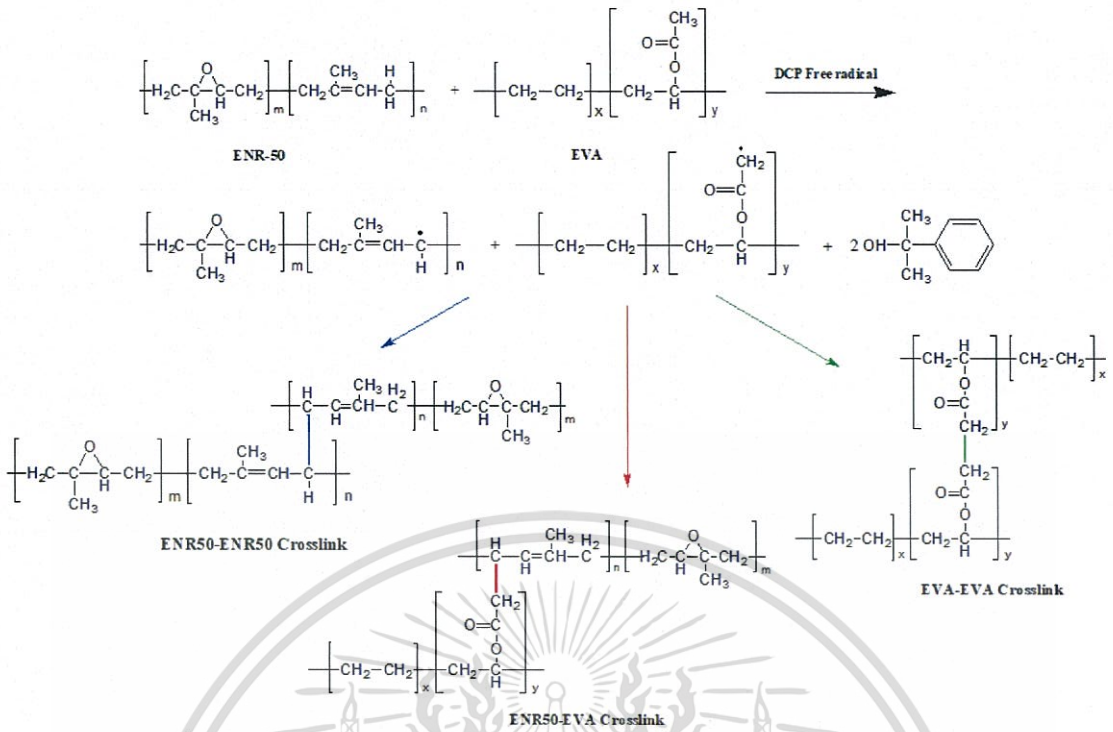
(a) ความแข็งแรงดึง



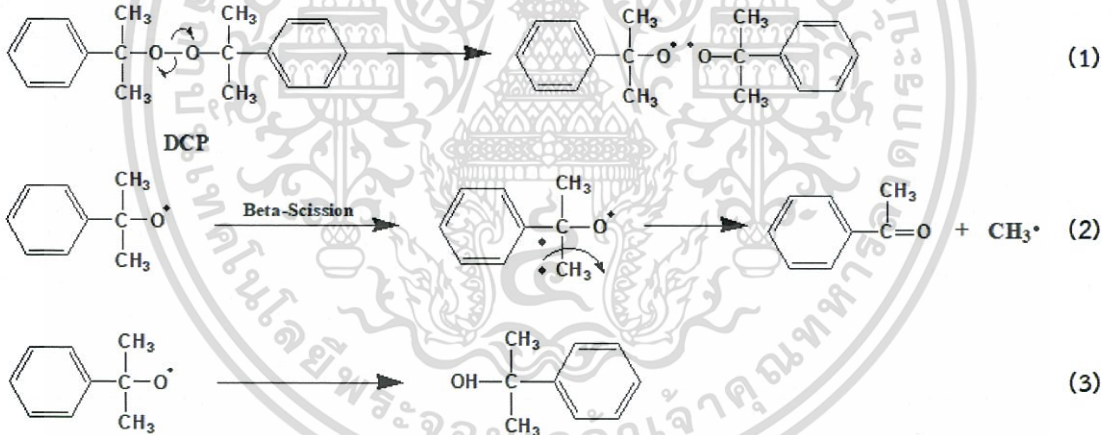
(b) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

รูปที่ 4.1 สมบัติการรับแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตร 70/30 ที่มีปริมาณ DCP ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงตัวอย่างปฏิกิริยาการเชื่อมโยงภายในพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition) ของ DCP

จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม โดยเติมปริมาณ DCP เท่ากับ 2.1 phr ซึ่งสามารถนำเสนอโดยใช้อักษรย่อ เพื่อแสดงแทนสูตรต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 แล้วทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อแทนพอลิเมอร์ผสมทั้งหมด

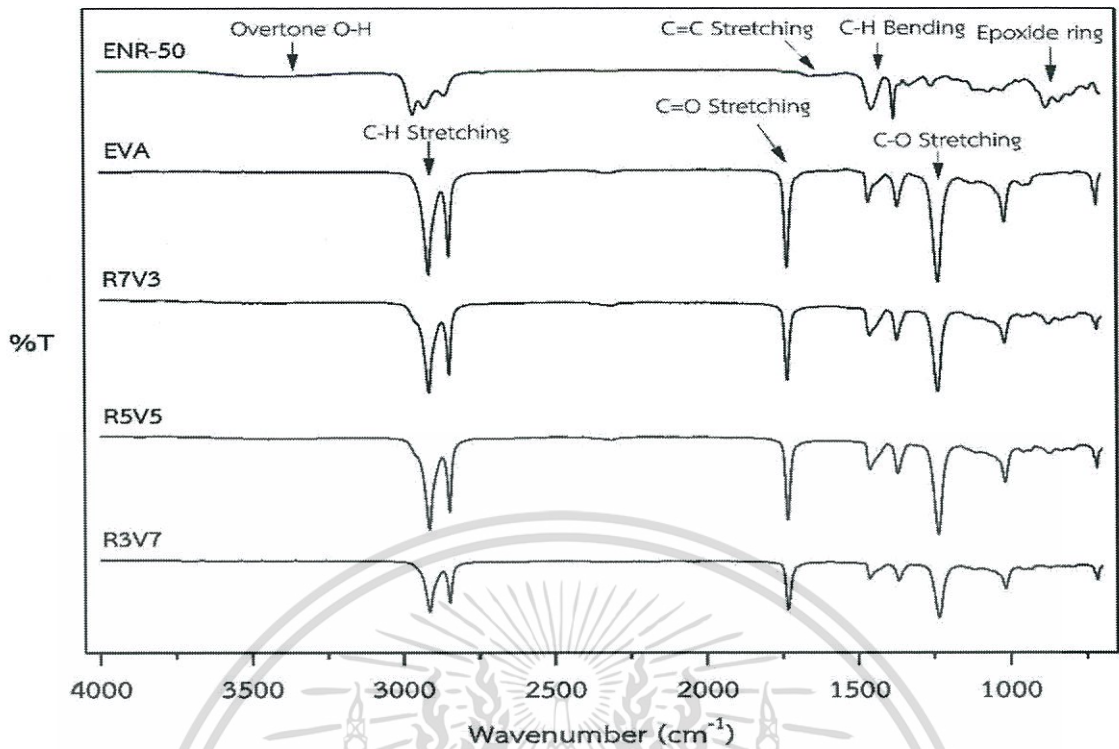
ลำดับ	สูตร	อัตราส่วนระหว่าง ENR-50/EVA	ปริมาณ DCP (phr)
1	R10p2.1	100/0	2.1
2	R7V3p2.1	70/30	2.1
3	R5V5p2.1	50/50	2.1
4	R3V7p2.1	30/70	2.1
5	V10p2.1	0/100	2.1

4.2 การหาอัตราส่วน ENR-50/EVA ที่เหมาะสม

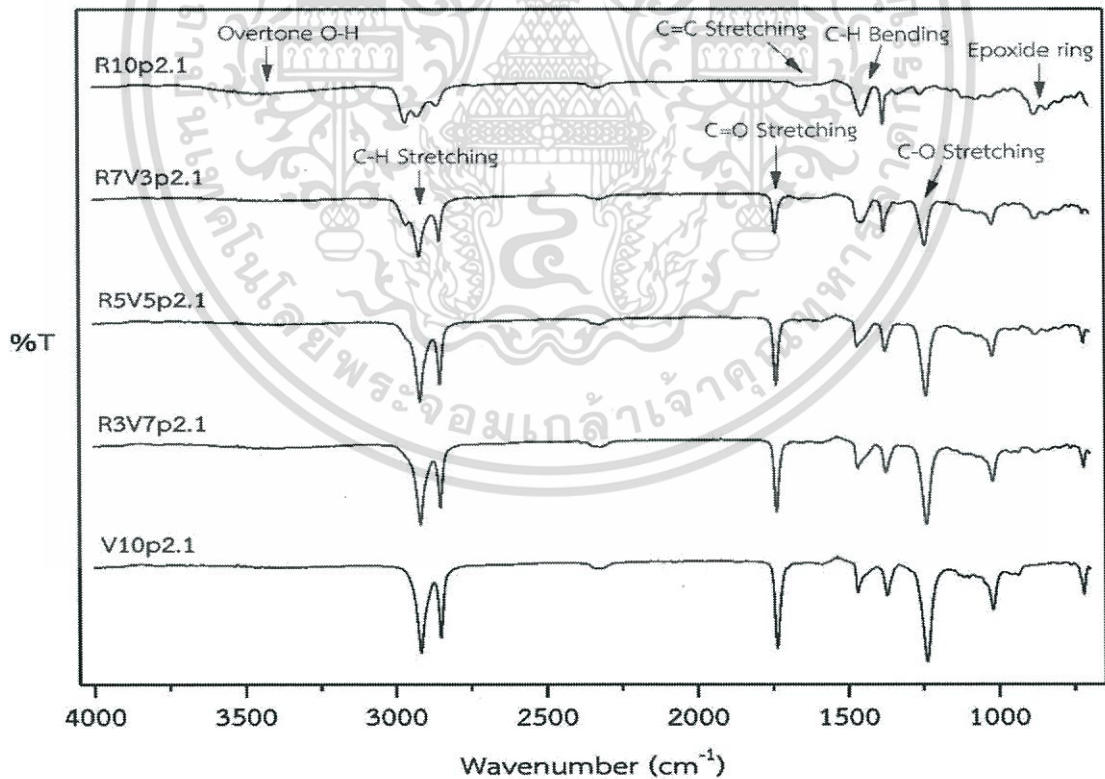
4.2.1 การศึกษาผลการเชื่อมโยงในพอลิเมอร์ผสม

4.2.1.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม ENR-50/EVA

จากการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม ENR-50/EVA ที่มีการใส่ DCP 5 สูตรตามตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม DCP เพื่อยืนยันการมีอยู่ขององค์ประกอบต่าง ๆ ในฟิล์ม แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 พบสเปกตรัมที่แสดงสัญญาณหมู่ O-H Stretching ในช่วง $3600-3300\text{ cm}^{-1}$ แสดงสัญญาณ Epoxide ring ที่ประมาณ 874 cm^{-1} ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ ENR-50 แสดงสัญญาณหมู่ C-H Stretching ของหมู่ CH_3 ในช่วง $2850-2670\text{ cm}^{-1}$ และหมู่ C-H Bending ของ CH_2 ในช่วง $1460-1380\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ ENR-50 และ EVA นอกจากนี้ยังพบสเปกตรัมที่แสดงสัญญาณหมู่ C=O Stretching ที่ประมาณ 1780 cm^{-1} และสัญญาณหมู่ C-O Stretching ที่ประมาณ 1238 cm^{-1} ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ EVA แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ตามทฤษฎี โดยสเปกตรัมการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของ ENR-50 และ EVA นั้นสูงขึ้นตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นในพอลิเมอร์ผสมเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติม DCP ไม่พบสัญญาณของสเปกตรัมที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันใด ๆ



(a) FT-IR สเปกตรัมของฟิล์ม ENR-50, EVA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม DCP



(b) FT-IR สเปกตรัมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม DCP

รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิตกผลึกและปริมาณผลึก

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR-50 และ EVA ที่มีสารเชื่อมโยง DCP 2.1 phr ทั้ง 5 สูตร มีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของ EVA ไม่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.2 โดยพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมี T_m และ T_c อยู่ในช่วงอุณหภูมิใกล้เคียงกันกับฟิล์ม EVA ที่ไม่มีการเติม DCP แสดงว่าโครงสร้างหรือปริมาณของ ENR-50 ที่ผสมกับ EVA ไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเกิดผลึกของ PE ภายในโครงสร้างของ EVA ซึ่งข้อมูลทางทฤษฎี T_m ของ EVA มีค่าประมาณ 80°C แต่ผลการทดสอบปรากฏว่า T_m อยู่ในช่วง $47 - 74^\circ\text{C}$ คาดว่าเป็นเพราะขั้นตอนการหล่อเย็นฟิล์มใช้อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้ฟิล์มเย็นตัวเร็วและเกิดผลึกขนาดเล็กขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ T_m ต่ำลง เนื่องจากผลึกขนาดเล็กใช้พลังงานในการหลอมเหลวผลึกต่ำกว่าผลึกขนาดใหญ่ และจากงานวิจัยที่ผ่านมา [12] กล่าวว่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสม ENR-50/EVA เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมทั้ง 5 สูตร พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของ EVA มากขึ้น ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ยกเว้นสูตร R10p2.1 ที่ไม่มี T_m , T_c และความเป็นผลึกได้ เนื่องจาก ENR-50 เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน

ตารางที่ 4.2 T_m , T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ในฟิล์มสูตรต่าง ๆ

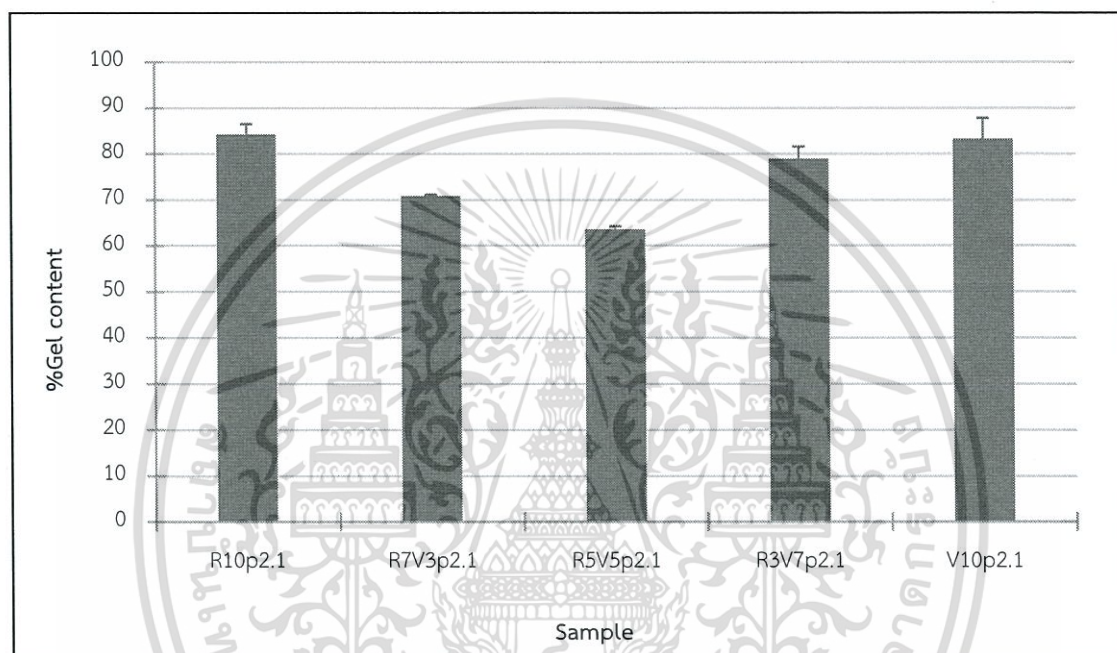
สูตร	พอลิเมอร์ที่เกิดผลึก	T_m ($^\circ\text{C}$)	T_c ($^\circ\text{C}$)	ความเป็นผลึก (%)
R10p2.1	-	-	-	-
R7V3p2.1	EVA (VA = 27.5%)	47.5 – 71.6	50.7	3.5%
R5V5p2.1		48.4 – 71.6	48.7	4.6%
R3V7p2.1		50.8 – 68.2	50.0	5.2%
V10p2.1		51.7 – 73.7	47.0	4.2%
EVA film		47.2 – 73.1	53.2	6.3%

4.2.3 การหาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง

การหาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงจากการทดสอบ %Gel content ซึ่งตัวอย่างที่มี %Gel content สูง แสดงว่ามีเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงสูง จากรูปที่ 4.5 พบว่าพอลิเมอร์ผสมทั้งสูตร R10p2.1 และ V10p2.1 มีเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงมากกว่าสูตร R3V7p2.1, R5V5p2.1 และ R3V7p2.1 แสดงว่า DCP สามารถเชื่อมโยงพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งได้ดีกว่าการเชื่อมโยงในระบบพอลิเมอร์ผสม หากสังเกตพอลิเมอร์ผสมสูตร R3V7p2.1 ที่มีเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมสูตร R7V3p2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ R5V5p2.1 เนื่องจาก DCP มีความชอบในการเชื่อมโยงวิภาคของ EVA ดีกว่าการเชื่อมโยงวิภาคของ ENR-50 ดังงานวิจัยที่ผ่านมา [12] จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ EVA มาก มีเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงสูง ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมสูตร R5V5p2.1 ที่มีปริมาณของ ENR-50 และ EVA เท่ากัน พบว่า มี %Gel content ต่ำที่สุด คาดว่าพอลิเมอร์ผสมอาจเกิดการแยกวิภาคของ ENR-50 และ EVA จึงส่งผลให้ DCP เกิดการเชื่อมโยงระหว่าง ENR-50 และ EVA ได้น้อยลง ทำให้เปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงต่ำที่สุด

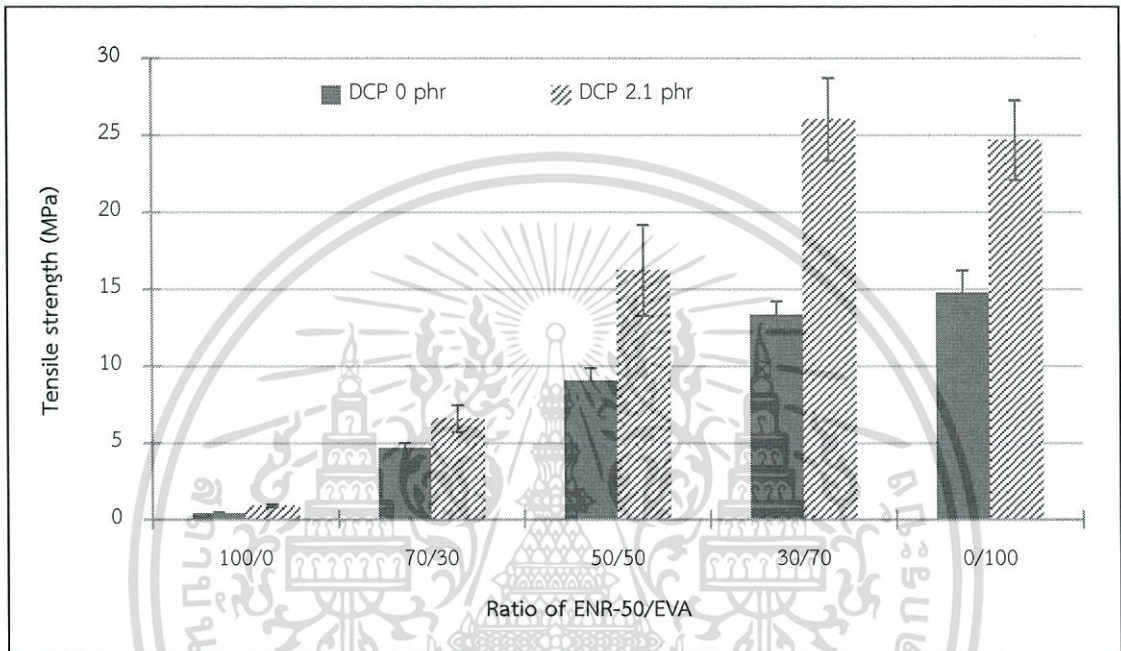


รูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ

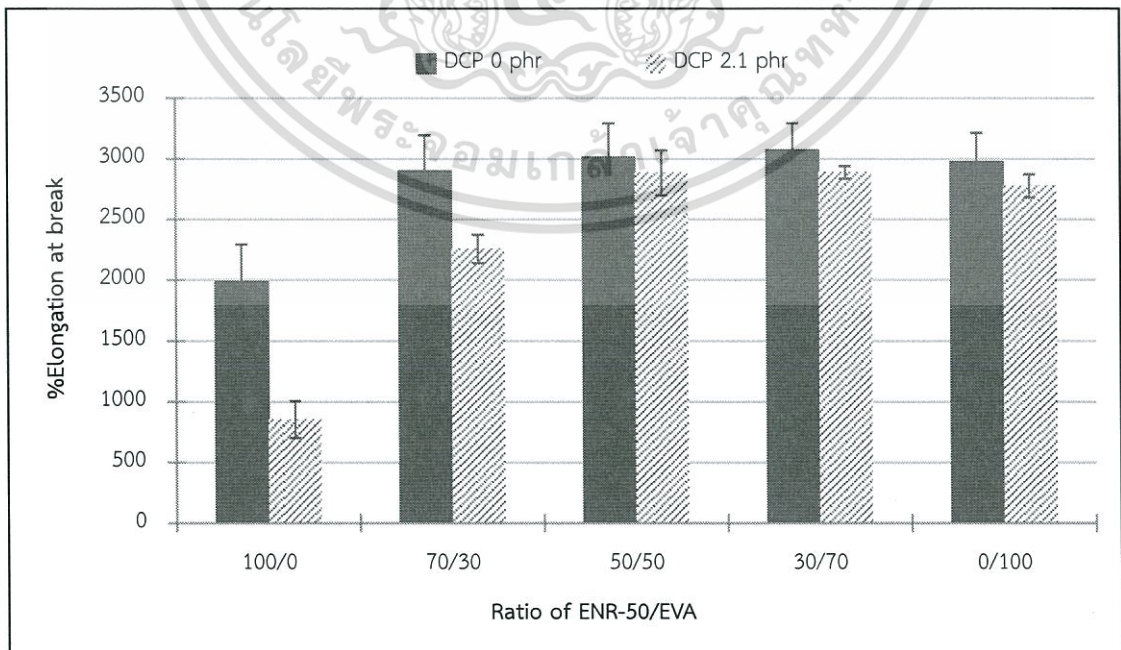
4.2.4 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

ผลการทดสอบการรับแรงดึงของตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมดังรูปที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างระหว่างสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม DCP และไม่มีการเติม DCP พบว่าพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรที่มีการเติม DCP มีค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสที่ 100 และ 300% การดึงยืด (M100 และ M300 ตามลำดับ) สูงกว่า ในขณะที่ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าต่ำกว่าสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มี การเติม DCP เนื่องจาก DCP เป็นสารเชื่อมโยงที่สามารถเชื่อมโยงได้ทั้ง ENR-50 และ EVA ดังนั้น DCP จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR-50 กับ EVA มีการเชื่อมโยงระหว่างกันและยึดโยงโครงสร้างไว้ ทำให้เมื่อมีแรงกระทำสายโซ่พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดจะเคลื่อนที่ออกจากกันได้ยาก ชิ้นงานตัวอย่างมีความแข็งแรงและทนต่อแรงดึงได้มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติม DCP 2.1 phr พบว่าเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึงยิ่งสูงขึ้นจนถึงอัตราส่วน 30/70 และมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วน 0/100 เนื่องจาก DCP มีความชอบที่จะเชื่อมโยงในวิภาคของ EVA

มากกว่า ENR-50 ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น เนื่องจาก EVA เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกและมีสมบัติคล้ายยาง โครงสร้างมีความยืดหยุ่น ทำให้ความสามารถในการยืดหยุ่นดีขึ้น และพบว่ามอดุลัสของยางที่ 100 และ 300% การดึงยืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ EVA เนื่องจาก EVA มีความแข็งภายในโครงสร้าง ซึ่งการมีวัฏภาคที่มีความแข็งเพิ่มขึ้นทำให้มอดุลัสมีค่าสูงขึ้น

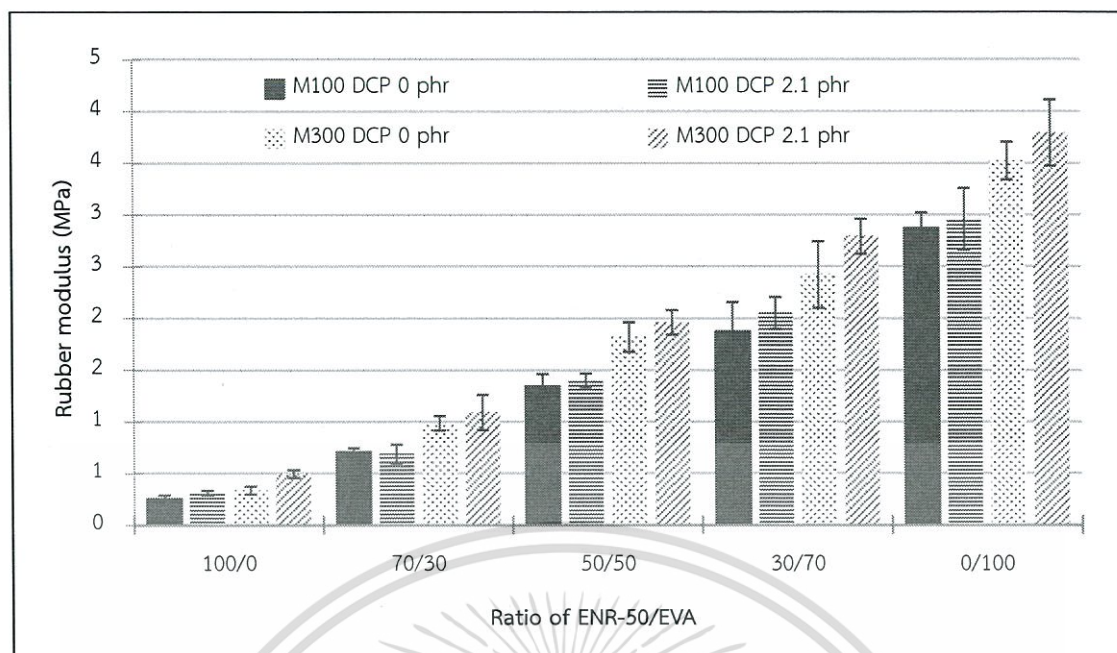


(a) ความแข็งแรงดึง



(b) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(C) มอดุลัสของยางที่ 100 และ 300% การดึงยืด

รูปที่ 4.6 สมบัติการรับแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่มีการเติมและไม่มีการเติม DCP

4.2.5 การทดสอบวัดมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม

เนื่องจากการทดลองไม่สามารถวัดความมีขี้ของ ENR-50/EVA ได้โดยตรง ดังนั้นจึงทำการวัดความมีขี้ทางอ้อมโดยการวัดมุมสัมผัสของตัวอย่าง ซึ่งเป็นการวัดความสามารถในการเปียกตัว (Wettability) ของพื้นผิวตัวอย่าง ตัวอย่างที่มีมุมสัมผัสกับน้ำน้อยกว่า แสดงว่ามีความสามารถในการเปียกตัวที่พื้นผิวได้ดีกว่าตัวอย่างที่มีมุมสัมผัสกับน้ำมาก

ตารางที่ 4.3 ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์สูตรผสมต่าง ๆ

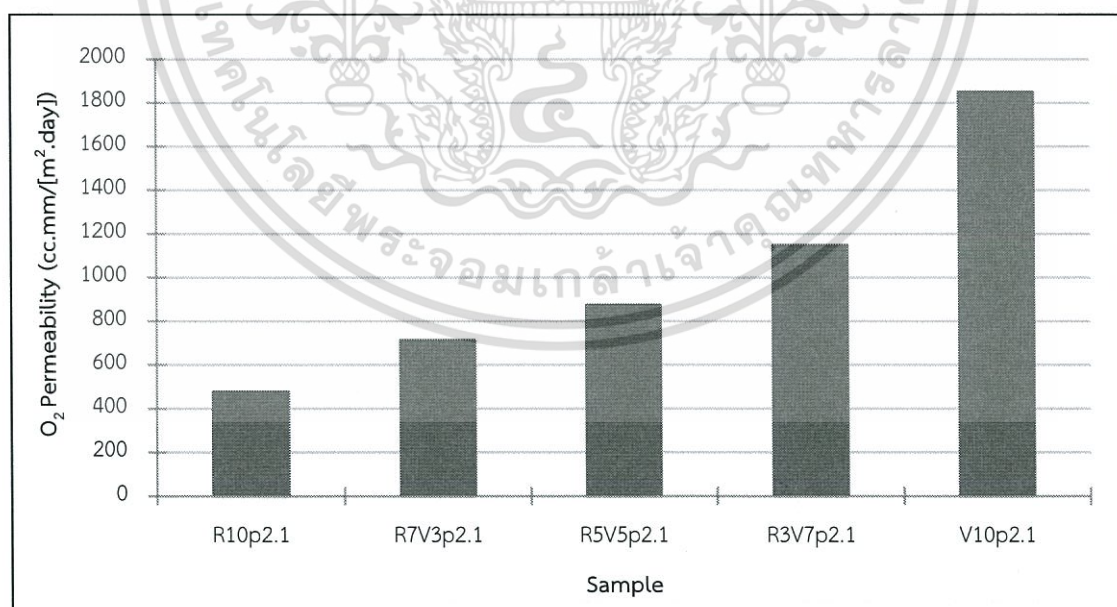
สูตร	มุมสัมผัส (องศา)
R10p2.1	98.0±11.50
R7V3p2.1	92.80±8.00
R5V5p2.1	91.20±5.90
R3V3p2.1	86.90±5.50
V10p2.1	86.60±4.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวัดมัมสัมผัสของน้ำบนพื้นที่ผิวของตัวอย่างสูตรต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า EVA มีค่ามัมสัมผัสน้อยกว่า ENR-50 เนื่องจาก EVA มีความเป็นขี้สูงสูงกว่า ENR-50 เพราะ EVA นั้นมีหมู่คาร์บอนิลในโครงสร้าง ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรพอลิเมอร์ผสม ENR-50/EVA ทั้ง 5 สูตร พบว่าเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น ค่ามัมสัมผัสมีแนวโน้มลดลง เพราะ EVA มีความเป็นขี้สูงสูงกว่า ENR-50 ตามคำอธิบายข้างต้น

4.2.6 การทดสอบการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน

จากผลการทดสอบการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.7 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสามารถซึมผ่านก๊าซออกซิเจนได้ โดยปริมาณ EVA ที่เพิ่มขึ้นในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ค่าอัตราการซึมผ่านและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก EVA เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก โครงสร้างมีปริมาตรอิสระและเป็นพอลิเมอร์ชนิดที่มีขี้และสภาพความเป็นขี้มากกว่า ENR-50 ทำให้โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนสามารถซึมผ่านได้ ทั้งนี้ ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีผลต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน โดยเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.4 ฟิล์มสูตร R10p2.1 มีความหนามากกว่าสูตร V10p2.1 จึงคาดว่าความหนาเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่ำกว่าสูตร V10p2.1



รูปที่ 4.7 การซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 อัตราการซึมผ่านและค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

สูตร	ความหนา (mm)	OTR (cc/[m ² ·day])	O ₂ Permeability (cc.mm/[m ² ·day])
R10p2.1	0.343	1,392.6	477.7
R7V3p2.1	0.192	3,706.6	711.7
R5V5p2.1	0.163	5,360.8	873.8
R3V7p2.1	0.132	8,683.4	1,146.2
V10p2.1	0.126	14,663.1	1,847.6

4.2.7 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

การเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ กับฟิล์ม PE, PP ซึ่งเป็นตัวแทนของฟิล์มพอลิเมอร์กึ่งผลึก ที่มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำต่ำ และ Chitosan ซึ่งเป็นตัวแทนของฟิล์มพอลิเมอร์อสัณฐาน ที่มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูง จากตารางที่ 4.5 พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมลดลง เมื่อปริมาณของ EVA มากขึ้น ซึ่งคาดว่าด้วยสภาพชื้นของ EVA มากกว่า ENR-50 จึงทำให้ EVA มีความชอบน้ำและยึดโยงน้ำไว้ในโครงสร้าง เกิด Bound water ทำให้ไอน้ำซึมผ่านฟิล์มที่มี EVA เป็นส่วนผสมได้น้อยลง

ตารางที่ 4.5 ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ

ฟิล์มที่ศึกษา	WVP (g·m/day·m ² ·Pa)
PE	$3.65 \times 10^{-14} \pm 9.85 \times 10^{-16}$
PP	$5.52 \times 10^{-14} \pm 2.67 \times 10^{-15}$
Chitosan	$14.60 \times 10^{-7} \pm 2.80 \times 10^{-8}$
R10p2.1	$4.76 \times 10^{-12} \pm 1.65 \times 10^{-12}$
R7V3p2.1	$2.39 \times 10^{-12} \pm 5.42 \times 10^{-13}$
R5V5p2.1	$2.13 \times 10^{-12} \pm 3.58 \times 10^{-13}$
R3V7p2.1	$1.64 \times 10^{-12} \pm 1.01 \times 10^{-13}$
V10p2.1	$1.68 \times 10^{-12} \pm 1.50 \times 10^{-13}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 การทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวและปริมาณของแข็งคงเหลือ

4.2.8.1 การบวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลาย PBS

จากการทดสอบการบวมตัวของตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมในน้ำกลั่นและสารละลาย PBS ที่เวลา 1 และ 24 ชั่วโมง แสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 พบว่า ENR-50 มีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลาย PBS มากกว่า EVA เนื่องจาก ENR-50 เป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้ว โครงสร้างเป็นอสัณฐาน มีปริมาตรอิสระมาก โดยโมเลกุลของน้ำสามารถผ่านเข้าไปภายในโครงสร้างได้มากกว่า EVA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วและมีโครงสร้างเป็นผลึก เมื่อเปรียบเทียบสูตรพอลิเมอร์ผสม ENR-50/EVA พบว่าเมื่อปริมาณของ EVA เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลาย PBS มีแนวโน้มลดลง และเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง พบว่าตัวอย่างมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ค่าการบวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลาย PBS ของฟิล์มทุกสูตรมีค่าค่อนข้างต่ำ แสดงถึงความไม่ชอบน้ำของฟิล์ม

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานในน้ำกลั่นเวลา 1 และ 24 ชั่วโมง

สูตร	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว	
	1 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
R10p2.1	0.25±0.09	1.16±0.57
R7V3p2.1	0.60±0.36	1.60±0.22
R5V5p2.1	0.42±0.09	1.22±0.15
R3V7p2.1	0.19±0.04	0.57±0.01
V10p2.1	0.03±0.04	0.05±0.05

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานในสารละลาย PBS เวลา 1 และ 24 ชั่วโมง

สูตร	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว	
	1 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
R10p2.1	0.25±0.08	1.37±0.14
R7V3p2.1	0.43±0.18	0.98±0.23
R5V5p2.1	0.28±0.13	0.58±0.08
R3V7p2.1	0.03±0.02	0.25±0.05
V10p2.1	0.01±0.02	0.04±0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8.2 ปริมาณของแข็งคงเหลือ

จากการนำตัวอย่างจากการบวมตัวไปอบจนกระทั่งน้ำหนักคงที่และนำมาคำนวณหาปริมาณของแข็งคงเหลือ แสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มี EVA มากกว่าจะมีปริมาณของแข็งคงเหลือมากกว่าฟิล์มที่มี ENR-50 มาก และเมื่อปริมาณ EVA มากขึ้น ค่าปริมาณของแข็งคงเหลือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการบวมตัว อย่างไรก็ตาม ค่าปริมาณของแข็งคงเหลือมีค่าใกล้เคียง 100% แสดงถึงฟิล์มทุกสูตรมีสมบัติการต้านทานน้ำที่ดี

ตารางที่ 4.8 ปริมาณของแข็งคงเหลือในน้ำกลั่น

สูตร	ปริมาณของแข็งคงเหลือ	
	1 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
R10p2.1	97.84±0.13	96.96±0.39
R7V3p2.1	98.74±0.39	97.77±0.21
R5V5p2.1	99.29±0.10	98.50±0.03
R3V7p2.1	99.22±0.02	98.84±0.02
V10p2.1	99.57±0.02	99.56±0.05

ตารางที่ 4.9 ปริมาณของแข็งคงเหลือในสารละลาย PBS

สูตร	ปริมาณของแข็งคงเหลือ	
	1 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
R10p2.1	98.26±0.14	97.17±0.11
R7V3p2.1	98.48±0.19	97.94±0.25
R5V5p2.1	98.96±0.13	98.66±0.10
R3V7p2.1	99.21±0.02	98.99±0.05
V10p2.1	99.61±0.03	99.57±0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มและซีทจากพอลิเมอร์ผสม ENR-50/EVA ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยมีการใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยงเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมและศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำ โดยผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

การศึกษากลของอัตราส่วน ENR-50/EVA ที่มีและไม่มี DCP พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม DCP มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่า เนื่องจาก DCP สามารถเชื่อมโยงได้ทั้งภูมิภาคของ ENR-50 และ EVA โดยที่ปริมาณ DCP 2.1 phr มีค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด แสดงว่า DCP เกิดการกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์ผสม

การศึกษากลของอัตราส่วน ENR-50/EVA ที่เหมาะสม พบว่าเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง, ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสที่ 100 และ 300% การดึงยืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ผลของเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงพบว่า DCP สามารถเชื่อมโยงพอลิเมอร์ผสมได้ ผลจาก DSC พบว่าปริมาณความเป็นผลึกของ EVA ในพอลิเมอร์ผสมไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ค่ามอดุลัสมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น ส่วนความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณของ EVA เพิ่มขึ้น เนื่องจากความมีขั้วของ EVA อาจเหนียวน้ำให้เกิดอันตรกิริยากับน้ำและไม่ยอมให้น้ำบางส่วนผ่านไปได้ ในขณะที่การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น เนื่องจากความมีขั้วของ EVA สูงกว่า ENR-50 จึงทำให้โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนสามารถแทรกผ่านฟิล์มได้ดีกว่า โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR-50/EVA ที่มี DCP เป็นสารเชื่อมโยงสามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกด้านฟิล์มทางการแพทย์ได้ เช่นฟิล์มปิดแผล เนื่องจากการคงสภาพไม่เกิดการบวมตัวและมีความต้านทานน้ำที่ดี จากผลการทดสอบโดยการแช่ในน้ำกลั่นและสารละลาย PBS ที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับเปลี่ยนเทคนิคการขึ้นรูปเป็น Blown film extrusion หรือ Melt casting เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาสม่ำเสมอ
2. การสกัด ENR-50 ด้วยตัวทำละลาย THF ใช้เวลาในการสกัดนานกว่า EVA ดังนั้นควรใช้ตัวทำละลายที่ดีกว่า THF เพื่อประหยัดเวลาในการสกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Utracki, L.A. 2002. *Polymer Blends Handbook*. Vol 1. Dordrecht : Springer.
- [2] Parameswaranpillai, J. Thomas, S. and Grohens, Y., editor. 2015. *Characterization of Polymer Blends: Miscibility, Morphology, and Interfaces*. Vol. 1. Weinheim : Wiley-VCH.
- [3] Ning, N. Li, S. Wu, H. Tian, H. Yao, P. HU, G.H. Tian, M. Zhang, L. 2017. "Preparation, Microstructure, and Microstructure-Properties Relationship of Thermoplastic Vulcanizates (TPVs): A Review." *Progress in Polymer Science*. (Available Online 20 November 2017).
- [4] Plastics Institute of Thailand and Research and Development Centre for Thai Rubber Industry. 2018. **General Situation of Natural Rubber and Rubber Product Industries of Thailand in 2013**. [online]. Available : www.thaiplastics.org/content_attachment/attach/plastics_fore sight_vol.10_.pdf.
- [5] Akiba, M. and Hashim, A.S. 1997. "Vulcanization and Crosslinking in Elastomers." *Progress Polymer Science*. Vol 22(3) : 475-521.
- [6] San-Thap International Co.,Ltd. 2018. **Epoxidized Natural Rubber**. [online]. Availble : <https://epoxidizednaturalrubber.weebly.com/>
- [7] Schneidera, C. Langerb,c, R. Lovedayd, D. and Haire, D. 2017. "Applications of Ethylene Vinyl Acetate Copolymers (EVA) in Drug Delivery Systems." *Journal of Controlled Release*. Vol.262 : 284-295.
- [8] Henderson, A.M. 1993. "Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) Copolymers: A General Review." *IEEE Electrical Insulation Magazine*. Vol.9(1) : 30-38.
- [9] Yong, M.K. Ismail, H. and Ariff, Z.M. 2007. "Comparison Properties of Natural Rubber (SMRL)/Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Copolymer Blends and Epoxidized Natural Rubber (ENR-50)/Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Copolymer Blends." *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. Vol.46(4) : 361-366.
- [10] González-Sánchez, C. Martínez-Aguirre, A. Pérez-García, B. Acosta, J. Fonseca-Valero, C. de la Orden, M.U. Sánchez, C. and Martínez Urreaga, J. 2016. "Enhancement of Mechanical Properties of Waste-Sourced Biocomposites

- through Peroxide Induced Crosslinking.” *Composites: Part A*. Vol.80 : 285-291.
- [11] Spetz, A. Svanstrom, M. and Ramas, O. 2002. “Determination of Dicumyl Peroxide in Workplace Air.” *Ann. Occup. Hyg.* Vol.46(7) : 637-641.
- [12] Tanrattanakul, V. Kaewprakob, T. 2011. “Effect of Different Curing Systems on Heat Shrinkability and Mechanical Properties of Ethylene Vinyl Acetate/ Epoxidized Natural Rubber Blends.” *Journal of Applied Polymer Science*. Vol.119(1) : 38-46.
- [13] ธัญวิทย์ ช่อนภู และศิริธร ดีเสมอ. 2556. “การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVA, EVOH และซีโอไลต์เอ.” โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [14] กนกวรรณ หงษ์ทอง, กฤษณา มรรคผล และชนาพร รุ่งเรือง. 2556. “การศึกษาพอลิเมอร์ผสมของแอลดีพีอี/เอสบีอีเอส/ซีโอไลต์ ZSM-5 เพื่อเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์.” โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [15] ชลลดา ฤตวิรุฬห์. 2543. “พอลิเมอร์ผสม”. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 10(1) : 14-17.
- [16] สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา. 2548. **พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend)**. [online]. Available : http://www.dss.go.th/images/starticle/cp_5_2548_polymer_blend.pdf.
- [17] Jacqueline. I and Kroschwitzs. 1995. *High performance Polymer and Composite*. New York.
- [18] Mohamad, Z.B. 2007. “Characterization and Properties of Epoxidised Natural Rubber (ENR-50) / Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Blends.” Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
- [19] Anonymous. 2017. ENR – EPOXYRENES EPOXIDIZED NATURAL RUBBER. [online]. Available : <http://polymerdatabase.com/Elastomers/ENR.html>.
- [20] ธนาคม ไวยติดต่อ, ศิริวรรณ ปิ่นสกุล และสรชา สมบัติภัทรโชค. 2554. “การพัฒนาสีพลาสติก-ชอลจาก EVA สำหรับงานพิมพ์สกรีน.” โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [21] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2560. **สารละลาย: เอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคโพลิเมอร์**. [online]. Available : <https://mtec.or.th/academic-services/mtec->

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

knowledge/82.

- [22] Barry, R. 2016. **Substance Name: Dicumyl Peroxide.** [online]. Available : <https://www.arkema.com.pdf>.
- [23] SIGMA ALDRICH. 2017. **Dicumyl peroxide.** [online]. Available : <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/329541?lang=en®ion=TH>.
- [24] กอบศักดิ์ กาญจนวงศ์กุล. 2558. **วัสดุปิดแผลเส้นใยนาโนผสมว่านหางจระเข้.** [online]. Available : <http://www3.rdi.ku.ac.th/?p=21972>.
- [25] ชีรนุช อินทร์ทองน้อย. 2561. **How to select approach wound dressing.** [online]. Available : <http://acmrrama.com/download/pdf/Burn/Dressing.pdf>.
- [26] ดาววรรณ คุณยศยิ่ง. 2561. **Wound Care & Wound Dressing.** [online]. Available : <http://www.rihes.cmu.ac.th>.
- [27] DJscrcasm. 2017. **How to use hydrocolloid bandages to treat active breakouts.** [online]. Available : <https://www.reddit.com>.
- [28] นवलพรรณ ณ ระนอง. 2548. “การผลิตแผ่นฟิล์มโคโตนสำหรับปิดแผล.” รายงานวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [29] TAPEless Medical. 2011. **WHAT ARE SECONDARY WOUND DRESSINGS?.** [online]. Available : <http://tapelessmedical.blogspot.com>.
- [30] ศิริขวัญ บุญสุข ศุภชัย มั่นน้อม และสุทธิกานต์ วงษ์จันทร์เพ็ญ. 2559. “การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเอชดีพีอีเพื่อให้เกิดการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น.” โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [31] ประภัสสร จันทรรนาร่า ประภรณ์ พันธุ์ไพโรจน์ และพิชชาภา เดชวรรณณีย์. 2559. “การพัฒนาวัสดุปิดแผลไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีส่วนผสมของขมิ้นชัน.” โครงการพิเศษภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [32] Plastic Design Library. 1996. *Permeability And Other Film Properties Of Plastic And Elastomers.* William Andrew Inc.
- [33] Paine F.A and Paine H.Y. 1992. *A Handbook of Food Packaging.* USA. : Chapman & Hall.
- [34] Nouparvar, H. Hassan, A. Mohamad, Z. and Wahit, M.U. 2014. “Epoxidized

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Natural Rubber-50 toughened Polyamide 6 Nanocomposites: The Effect of Epoxidized Natural Rubber-50 Contents on Morphological Characterization, Mechanical and Thermal Properties.” *Journal of Elastomer & Plastics*. Vol.46(3) : 269-283.

- [35] Ahmad, H.S. Ismail, H. and Rashid, A.A. 2016. “Tensile Properties and Morphology Of Epoxidized Natural Rubber/Recycled Acrylonitrile-Butadiene Rubber (ENR50/NBRr) Blend.” *Procedia Chemistry*. Vol.19 : 359-365.
- [36] Hashim, F. Ismail, H. and Rusli A. 2017. “Comparison of Properties of Ethylene Vinyl Acetate/Natural Rubber/Mengkayang Leaf Fibre (EVA/NR/MLF) and Ethylene Vinyl Acetate/Epoxidized Natural Rubber/Mengkayang Leaf Fibre (EVA/ENR-50/MLF) Thermoplastics Elastomer Composite.” *Polymer Testing*. Vol.61 : 1-7.
- [37] Ismail, H. Munusamy, Y. Jaafar, M. and Ratnam C.T. 2008. “Preparation and Characterization of Ethylene Vinyl Acetate (EVA)/Natural Rubber (SMRL)/ Organoclay Nanocomposites: Effect of Blending Sequences and Organoclay Loading.” *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. Vol.47(8) : 752-761.
- [38] Mohamad, Z. Ismail, H. and Chantara Theyy, R. 2006. “Characterization of Epoxidized Natural Rubber/Ethylene Vinyl Acetate (ENR-50/EVA) Blend: Effect of Blend Ratio.” *Journal of Applied Polymer Science*. Vol.99(4) : 1504-1515.
- [39] Johnson, T. and Thomas, S. 1999. “Nitrogen/Oxygen Permeability of Natural Rubber, Epoxidised Natural Rubber and Natural Rubber/Epoxidised Natural Rubber Blends.” *Polymer*. Vol.40(11) : 3223-3228.
- [40] ASTM International. 2017. **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. [online]. Available : <https://compass.astm.org>.
- [41] Mehdi, E. Mir, K.R.A. and Mehdi, G. 2017. “Electron Beam Irradiation Induced Compatibilization of Immiscible Polyethylene/Ethyl Vinyl Acetate (PE/EVA) Blends: Mechanical Properties and Morphology Stability.” *Radiation Physics and Chemistry*. Vol. 131 : 22-27.
- [42] Fazio, P.C. Gorman, M. Gutman, E.L. Hsia, C.T. Johns, G. and Kramer, J., editor. 2003. **Annual Book of ASTM Standard**. Vol. 14.02. Philadelphia : Easton,

MD, U.S.A.

[43] Billmeyer, F.W. 1984. *Text Book of Polymer Science*. New York : John Wiley and Sons.

[44] ASTM International. 2017. *Standard Test Method for Determining Gas Permeability Characteristics of Plastic Film and Sheeting*. [online]. Available : <https://compass.astm.org>.



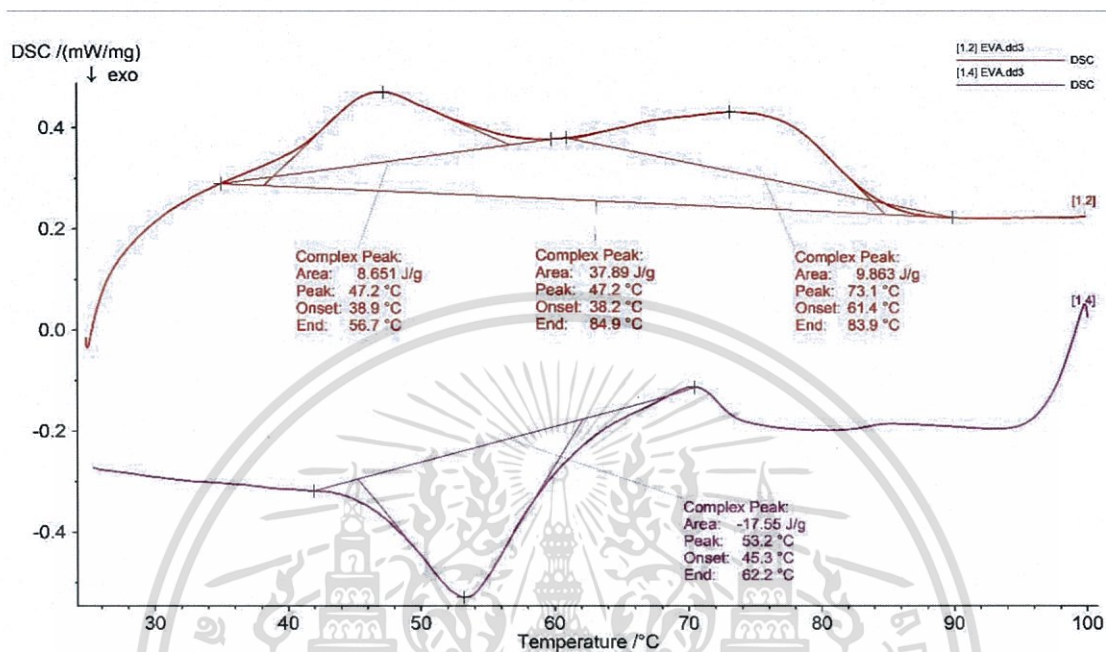
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



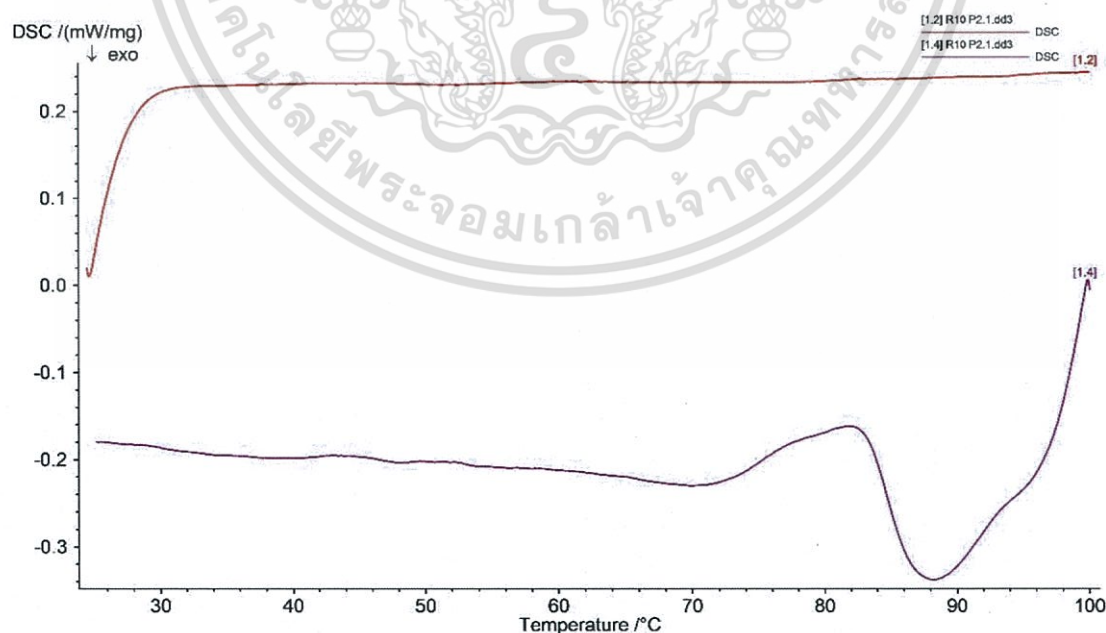
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC)

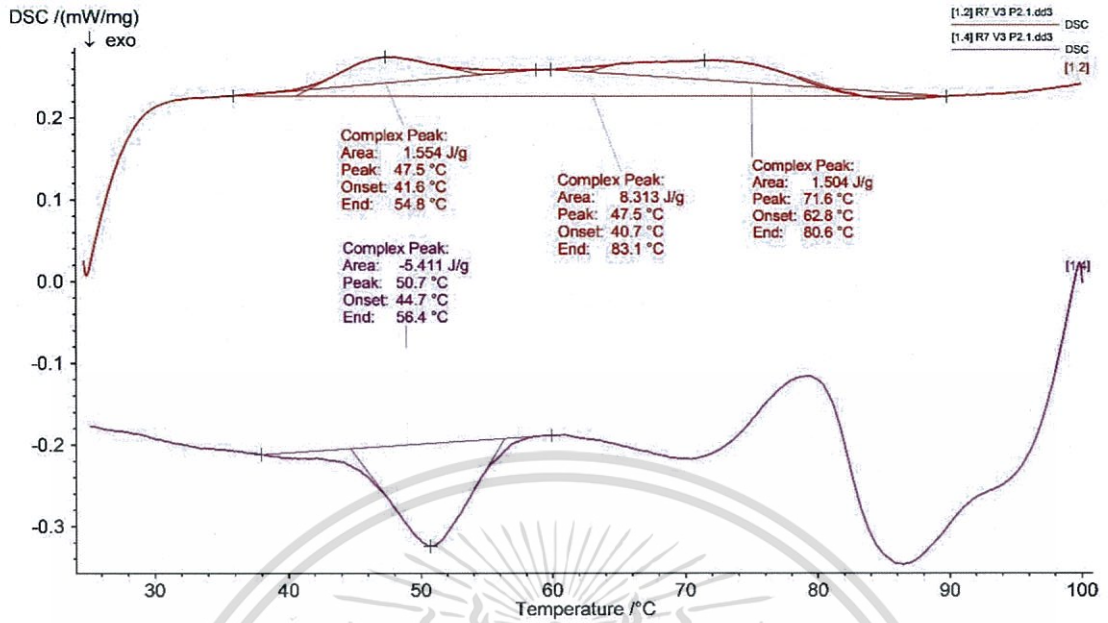


รูปที่ ก-1 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม EVA

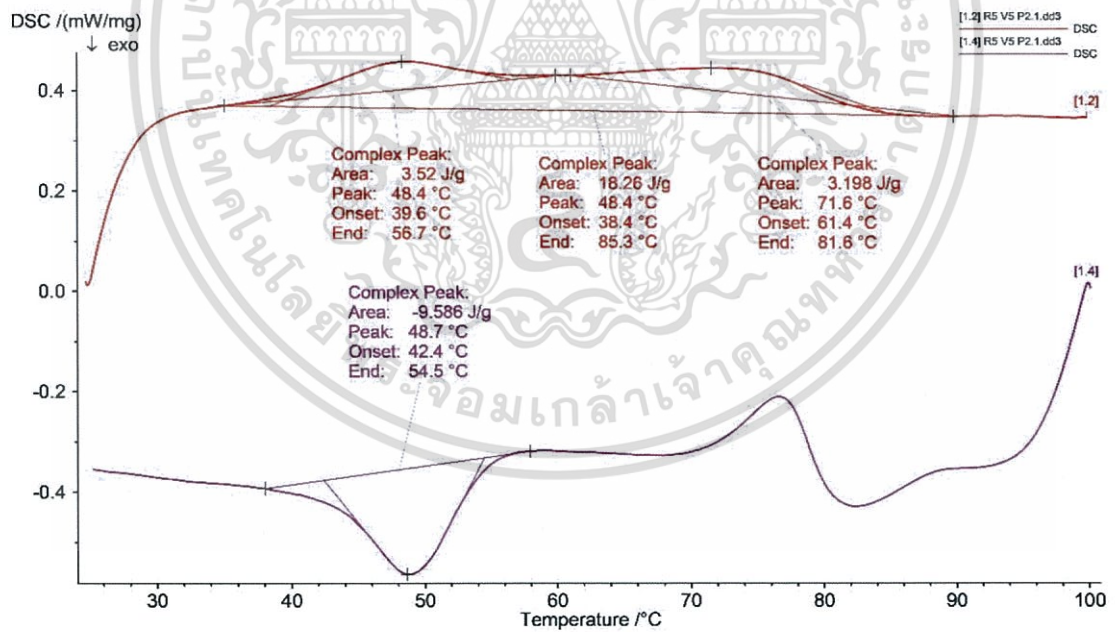


รูปที่ ก-2 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม R10p2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

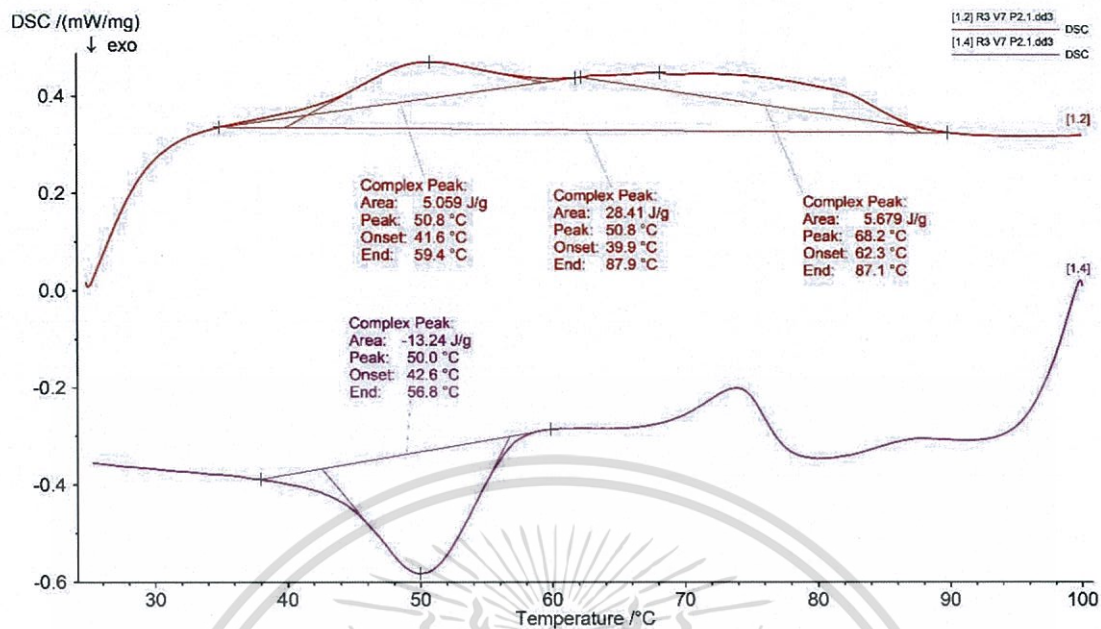


รูปที่ ก-3 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม R7V3p2.1

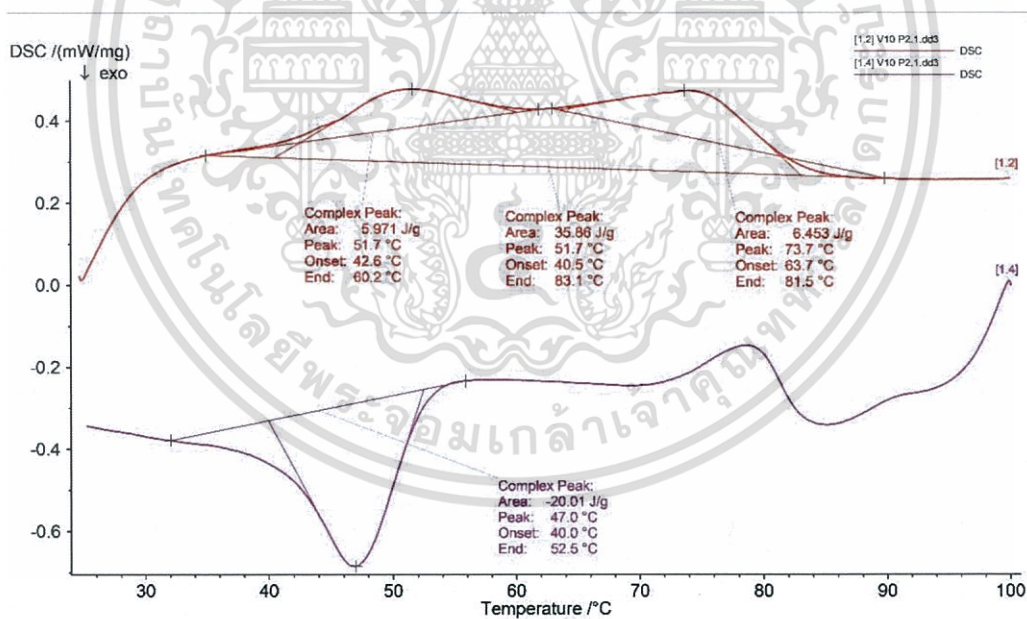


รูปที่ ก-4 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม R5V5p2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-5 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม R3V7p2.1



รูปที่ ก-6 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม V10p2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การทดสอบการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มตัวอย่าง

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มตัวอย่าง

สูตร	ความหนา (mm)	OTR (cc/[m ² ·day])	O ₂ Permeability (cc.mm/[m ² ·day])
R10p2.1	0.395	1,109.0	438.0
	0.343	1,392.6	477.7
R7V3p2.1	0.192	3,706.0	711.7
	0.320	1,671.5	534.9
R5V5p2.1	0.163	5,360.8	873.8
	0.154	4,277.6	658.8
R3V7p2.1	0.204	8,340.2	1,701.4
	0.132	8,683.4	1,146.2
V10p2.1	0.126	14,663.1	1,847.6
	0.156	7,433.6	1,159.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 11 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2561

ข้าพเจ้า	นางสาวศศิวิมล	คิดแสวง	รหัสนักศึกษา 57050516
	นางสาวศิรินทิพย์	ณรงค์พรหม	รหัสนักศึกษา 57050519
	นางสาวสิรินธร	ณรงค์พรหม	รหัสนักศึกษา 57050530

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/เอทิลีนไวนิลอะซิเตดโคพอลิเมอร์

ชื่อภาษาอังกฤษ Preparation and Characterization of Epoxidized Natural Rubber/ Ethylene Vinyl Acetate Copolymer Blend Film

ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักษรวิสุทธิ 2.39 %

ลงชื่อ..... ศศิวิมล คิดแสวง..... ลงชื่อ..... ศิรินทิพย์ ณรงค์พรหม..... ลงชื่อ..... สิรินธร ณรงค์พรหม.....

(นางสาวศศิวิมล คิดแสวง)

(นางสาวศิรินทิพย์ ณรงค์พรหม)

(นางสาวสิรินธร ณรงค์พรหม)

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธี และ ผศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของนักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....

(ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธี)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงชื่อ.....

(ผศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้