

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE  
ด้วย EVA, EVOH และซีโอไลต์เอ

IMPROVEMENT OF MECHANICAL AND WATER VAPOR  
PERMEABILITY PROPERTIES OF LDPE FILMS WITH EVA, EVOH  
AND ZEOLITE A

นายธัญวิทย์      ช่อแก้ว  
นางสาวศิวรร      ตีเสมอ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา ๒๕๕๐

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE

ด้วย EVA, EVOH และซีโอไลต์เอ

IMPROVEMENT OF MECHANICAL AND WATER VAPOR  
PERMEABILITY PROPERTIES OF LDPE FILMS WITH EVA, EVOH  
AND ZEOLITE A

นายชัยวิทย์

ช่อนภู

นางสาวศิริธร

ดีเสมอ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556





**IMPROVEMENT OF MECHANICAL AND WATER VAPOR  
PERMEABILITY PROPERTIES OF LDPE FILMS WITH EVA, EVOH  
AND ZEOLITE A**

**Mr.Tanyawit                  Sonpoo**  
**Miss Sirithorn              Deesamer**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVA, EVOH และซีโอไลต์เอ	
	Improvement of mechanical and water vapor permeability properties of LDPE films with EVA, EVOH and zeolite A	
ชื่อนักศึกษา	นายธัญวิทย์	ช่อนภู
	นางสาวศิริธร	ศิเสมอ
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุภารัตน์	รักชลธิ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร. ตะวัน	สุขน้อย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. อธิพิพล แจ่มชัด	
ผศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ	
ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ	
รศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVA, EVOH และซีโอไลต์เอ	
	Improvement of mechanical and water vapor permeability properties of LDPE films with EVA, EVOH and zeolite A	
ชื่อนักศึกษา	นายธัญวิทย์	ช่อนภู
	นางสาวศิริธร	ดีเสมอ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศศ.ดร. สุภารัตน์	รักษลธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร. ตะวัน	สูงน้อย

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ด้วยเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์(EVA)/เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (EVOH) และซีโอไลต์เอ เพื่องานบรรจุภัณฑ์ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA/EVOH ที่ 80/20/0, 80/15/5, 80/10/10, 80/0/15 และ 80/0/20 โดยน้ำหนัก และศึกษาผลของการใช้ซีโอไลต์เอ (20% โดยน้ำหนัก) การผสมสูตรทำได้โดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และนำไปขึ้นรูปฟิล์มโดยกระบวนการกดอัด จากการศึกษาพบว่า EVA และ/หรือ EVOH มีการกระจายตัวดีระดับหนึ่งในทุกสูตรฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ EVOH มากขึ้น เนื่องจาก EVOH มีหมู่ไฮดรอกซิลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนทำให้มีโครงสร้างที่แข็ง โดยมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด มีค่าใกล้เคียงกันกับฟิล์ม LDPE แต่ค่า Young's modulus สูงกว่าฟิล์ม LDPE การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH ทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน โดยฟิล์มที่มีผลึกมากนั้นมีขั้วมาก ส่วนฟิล์มที่มีอสัณฐานมาก มีขั้วน้อย ทำให้เกิดการแข่งขันกันระหว่างอสัณฐานวิทยาและความมีขั้ว ค่าการซึมผ่านไอน้ำสามารถเพิ่มได้โดยการเติมซีโอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก เพราะความมีรูพรุนและมีขั้วสูงของซีโอไลต์เอ

คำสำคัญ: สมบัติเชิงกล, ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ, ฟิล์มแอลดีพีอี, ซีโอไลต์เอ

<b>Title</b>	Improvement of mechanical and water vapor permeability properties of LDPE films with EVA, EVOH and zeolite A
<b>Students</b>	Mr. Tanyawit Sonpoo Miss Sirithorn Deesamer
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Industrial Chemistry
<b>Academic Year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Assist.Prof. Dr. Suparat Rukchonlatee
<b>Co-Advisor</b>	Assoc.Prof. Dr. Tawan Sooknoi

## **ABSTRACT**

This research studied on improvement of mechanical and water vapor permeability (WVP) of low density polyethylene (LDPE) films by mixing with ethylene vinyl acetate copolymer (EVA), ethylene vinyl alcohol copolymer (EVOH) and zeolite A for a longer shelf-life packaging of fresh produces. The LDPE/EVA/EVOH compounds were mixed for the blend ratios of 80/20/0, 80/15/5, 80/10/10, 80/5/15 and 80/0/20 and the zeolite A filler at a 20%wt loading was employed. All compounds were prepared using an internal mixer and the films were shaped using a compression molding process. The results revealed that EVA and/or EVOH could be well dispersed in all films. The crystallinity was increased when EVOH loading was increased. The LDPE/EVA/EVOH films with higher EVOH loading shows similar tensile strength at yield and tensile strength at break but greater Young's modulus, as compared with LDPE films. This was due to semi-crystalline structure of EVOH induced by internal hydrogen bonding. WVP of all LDPE/EVA/EVOH films were in the same range. The film with high crystallinity has higher polarity but that with high amorphous has lower polarity. Hence WVP is governed by morphology and polarity of the film. Additionally, WVP of the LDPE/EVA/EVOH was markedly increased when 20%wt of zeolite A was added. This is due to high polarity and porosity of the incorporated zeolites.

**Keywords:** Mechanical Properties, Water Vapor Permeability, LDPE Film, Zeolite A

# กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือ ดูแลเอาใจใส่ เป็นอย่างดีจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ และ รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ให้ความรู้ สอนทักษะในการทำงาน ให้คำแนะนำ คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดและเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้โครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และ ผศ.ดร.ภัทธราช มนต์วิเศษ ที่ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำในประเด็นต่างๆ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาเป็นอย่างดีในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นางสาวเมธาวิ อุตตสุรดี และนายฐิตินันท์ ศิริจันทนันท์ นักศึกษาปริญญาโท ที่ให้คำแนะนำในการทดลอง คำปรึกษาที่ดีเป็นความรู้แก่ผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมืออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี เพื่อทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่หน่วยวิจัยและบริการเครื่องมือกลาง วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูลและเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้บริการในการตรวจวิเคราะห์

ขอขอบพระคุณบริษัทพีคิวเคมิกอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี

ขอขอบพระคุณ ครอบครัว และเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุน ความช่วยเหลือและคอยเป็นกำลังใจตลอดในการทำโครงการพิเศษ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายชญวิทย์ ช่อนภู

นางสาวศิริธร ดีเสมอ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	7
2.1 การรักษาคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว	7
2.1.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของพืช	9
2.1.1.1 การหายใจ	9
2.1.1.2 การคายน้ำ	12
2.1.1.3 การสุก	13
2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้	13
2.2.1 อัตราการซึมผ่านไอน้ำ	13
2.2.2 อัตราการซึมผ่านของก๊าซ	14
2.2.3 การออกแบบภาชนะบรรจุภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค	14
2.2.4 ฟิล์มที่ใช้สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์	15
2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	16
2.3.1 ลักษณะทั่วไปของ LDPE	16
2.3.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LDPE	17
2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน	17
2.4 เอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ (EVA)	18
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของ EVA	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 สมบัติโดยทั่วไปของ EVA	18
2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน	19
2.5 เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (EVOH)	19
2.5.1 ลักษณะทั่วไปของ EVOH	19
2.5.2 สมบัติโดยทั่วไปของ EVOH	20
2.5.3 การประยุกต์ใช้งาน	21
2.6 ซีโอไลต์เอ	22
2.6.1 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ	22
2.6.2 สมบัติของซีโอไลต์เอ	23
2.6.3 การประยุกต์ใช้งาน	23
2.7 พอลิเมอร์ผสม	24
2.8 กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด	25
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>30</b>
3.1 สารเคมี	30
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	31
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	33
3.3.1 การสังเคราะห์ EVOH จาก EVA	33
3.3.2 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม	34
3.3.3 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ	35
3.3.4 การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีกดอัด	35
3.3.5 ความหนาของฟิล์ม	35
3.3.6 การวิเคราะห์ฟิล์มด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทสโกปี	36
3.3.6.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ EVOH ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส EVA	36
3.3.6.2 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มตัวอย่างและซีโอไลต์เอ	36
3.3.7 การวิเคราะห์ปริมาณซีโอไลต์เอในสูตรพอลิเมอร์ผสม	36
3.3.8 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึกและปริมาณผลึก	37

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.9 การศึกษาสัณฐานวิทยา	37
3.3.9.1 การกระจายตัวของซีโอดีเอ	37
3.3.9.2 การกระจายตัวของ EVA และ/หรือ EVOH	37
3.3.10 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง	38
3.3.11 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ	39
3.3.12 การทดสอบมัมส์	40
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	41
4.1 การสังเคราะห์ EVOH และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ	41
4.2 การศึกษาผลของอัตราส่วน EVA/EVOH ในฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH	43
4.2.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน	43
4.2.1.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ EVOH	43
4.2.1.2 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH	44
4.2.2 ความหนาของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH	46
4.2.3 การศึกษาผลของตัวทำละลายในฟิล์มตัวอย่าง	46
4.2.4 การศึกษาการกระจายตัวของ EVA และ/หรือ EVOH ในฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH	47
4.2.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH	48
4.2.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH	49
4.2.7 การทดสอบวัดมัมส์ของพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA/EVOH	52
4.2.8 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH	53
4.3 การศึกษาผลของการมีซีโอดีเอ 20% โดยน้ำหนัก ในฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH	54
4.3.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A	54
4.3.2 ความหนาของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A	56
4.3.3 การตรวจสอบปริมาณของซีโอดีเอในสูตรพอลิเมอร์ผสม	56
4.3.4 การศึกษาการกระจายตัวของซีโอดีเอในฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A	56
4.3.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A	58
4.3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A	59

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.7 การทดสอบวัดมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ	61
4.3.8 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A	62
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	63
5.1 สรุปผลงานวิจัย	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	64
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	65
<b>ภาคผนวก ก</b>	70
<b>ภาคผนวก ข</b>	76

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม และระยะเวลาในการเก็บรักษาผัก	8
ตารางที่ 2.2 ชนิดของผลไม้จำแนกตามลักษณะการหายใจขณะผลแก่หรือสุก	11
ตารางที่ 2.3 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Climacteric	12
ตารางที่ 2.4 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Non-climacteric	12
ตารางที่ 2.5 ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ	13
ตารางที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอน ไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ	14
ตารางที่ 2.7 สมบัติบางประการของ EVOH	21
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LDPE	30
ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ EVA	31
ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ Zeolite A	31
ตารางที่ 3.4 พอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมดโดยน้ำหนัก	34
ตารางที่ 3.5 สูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ (โดยน้ำหนัก)	35
ตารางที่ 4.1 อักษรย่อแทนสูตรและสูตรผสมทั้งหมด	42
ตารางที่ 4.2 ค่าดัชนีคาร์บอนิลและไฮดรอกซิลของ EVA และ EVOH	44
ตารางที่ 4.3 ความหนาของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH	46
ตารางที่ 4.4 $T_m$ , $T_c$ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์	48
ตารางที่ 4.5 $T_m$ , $T_c$ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ในฟิล์มสูตรต่างๆ	49
ตารางที่ 4.6 ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	53
ตารางที่ 4.7 ความหนาของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/ Zeolite A	56
ตารางที่ 4.8 ปริมาณของซีโอไลต์เอในสูตรพอลิเมอร์ผสม	56
ตารางที่ 4.9 $T_m$ , $T_c$ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ในฟิล์มสูตรต่างๆที่มีซีโอไลต์เอ	58
ตารางที่ 4.10 ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ที่มีซีโอไลต์เอ	61

# สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ของฟิล์ม LDPE/EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ	2
รูปที่ 1.2 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ	3
รูปที่ 1.3 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE, LE(80/20) และ LE(80/20)25	3
รูปที่ 1.4 ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ของฟิล์มตัวอย่าง จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชัน	4
รูปที่ 1.5 การดึงยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มตัวอย่าง จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชัน	4
รูปที่ 1.6 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชัน	4
รูปที่ 1.7 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVOH จากการศึกษาผลการเติมซีโอไลต์เอ	5
รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน	10
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจและอายุการเก็บรักษา เมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 60°F	10
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ LDPE	16
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของ EVA	18
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ EVOH	20
รูปที่ 2.6 Frame work ของซีโอไลต์เอ	22
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ	23
รูปที่ 2.8 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเข้ากันได้ (Miscible)	24
รูปที่ 2.9 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีไม่ผสมเข้ากันได้ (Immiscible)	25
รูปที่ 3.1 ลักษณะของชิ้นงานตัวอย่าง	38
รูปที่ 4.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเครื่อง FT-IR	43
รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของฟิล์ม LDPE, EVA, EVOH และฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH	45
รูปที่ 4.3 ภาพ SEM ของพื้นผิวที่แตกหัก ของฟิล์ม LDPE ก่อนสกัดและหลังสกัด (กำลังขยาย 3500 เท่า)	46
รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ของพื้นผิวที่แตกหักของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH ที่อัตราส่วนต่างๆ (กำลังขยาย 3500 เท่า) ที่มีการสกัดวัฏภาคของ EVA และ/หรือ EVOH ออก	48
รูปที่ 4.5 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH ที่อัตราส่วนต่างๆ	52
รูปที่ 4.6 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง จากการศึกษาผลของอัตราส่วน EVA/EVOH	54
รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของซีโอไลต์เอและฟิล์ม LDPE, EVA, EVOH และฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ของพื้นผิวที่แตกหักของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A (กำลังขยาย 3500 เท่า)	57
รูปที่ 4.9 ภาพเปรียบเทียบขนาดของรูพรุนในฟิล์ม L80EO20Z20 กับ L80EO20 หลังสกัด (กำลังขยาย 3500 เท่า)	58
รูปที่ 4.10 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A	61
รูปที่ 4.11 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง จากการศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอ	62

# บทที่ 1

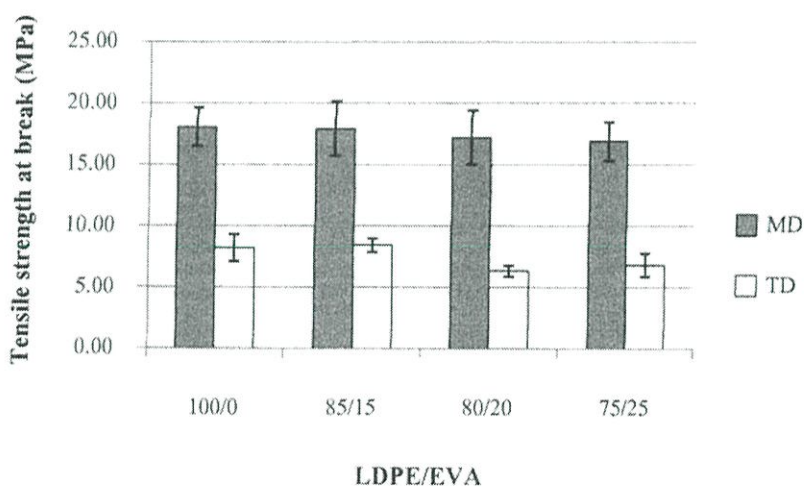
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

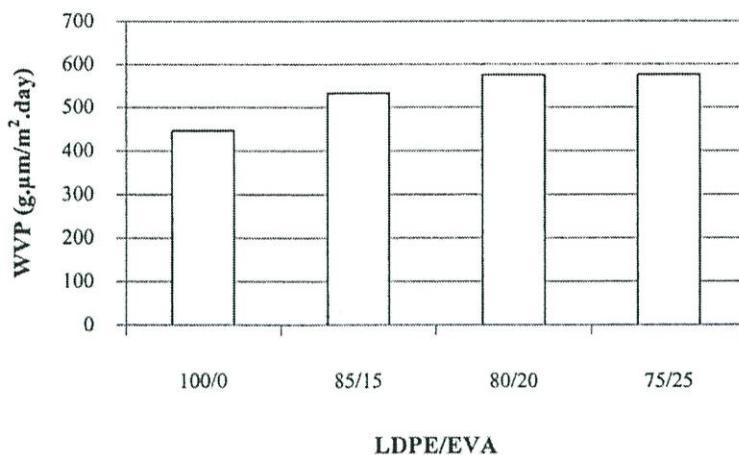
บรรจุภัณฑ์ที่พบทั่วไปมีมากมาย เพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งานของผู้บริโภค เช่น ผลิตภัณฑ์บรรจุผัก ผลไม้ ในโครงการพิเศษนี้สนใจศึกษาบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ใส่ผักและผลไม้ โดยปรับปรุงสมบัติของบรรจุภัณฑ์ ซึ่งคุณภาพและอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดหลังการเก็บเกี่ยวจะขึ้นกับชนิด สายพันธุ์ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ สิ่งแวดล้อมในระหว่างการเก็บรักษา หรือระหว่างการขนส่ง เนื่องจากภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้จากต้นมาแล้วยังคงมีชีวิตอยู่ ดังนั้นกระบวนการหายใจและเมตาบอลิซึม (Metabolism) ต่างๆ ที่นำไปสู่ความแก่ ความสุก และความเน่าเสีย ตามลำดับ ยังเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลา โดยทั่วไปผักและผลไม้สด มีน้ำประมาณร้อยละ 80-95 ปริมาณน้ำบางส่วนจะสูญเสียไประหว่างการเก็บรักษา ทำให้น้ำหนักลดลง ความกรอบลดลงและเหี่ยวเฉา เมื่อสูญเสียน้ำมากขึ้นจะทำให้คุณภาพของผักและผลไม้ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค จึงจำเป็นต้องมีการใช้บรรจุภัณฑ์เพื่อป้องกันความเสียหายของผลิตภัณฑ์ ขณะขนส่ง รวมทั้งควบคุมการหายใจเพื่อชะลอการสุกและการเก็บรักษาที่ถูกต้อง โดยเลือกบรรจุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพจะต้องป้องกันการสูญเสียน้ำเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ไม่สูญเสียน้ำหนักมากเกินไป ต้องมีการถ่ายเทไอน้ำและอากาศเพียงพอเพื่อคงความสดให้อยู่ได้นานขึ้น [1]

บรรจุภัณฑ์ที่นำมาใช้ควรมีความแข็งแรงและมีความเหนียวพอสมควร เพื่อสะดวกในการเคลื่อนย้ายและการเก็บรักษา อีกทั้งต้องปลอดสารปนเปื้อนเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการเก็บรักษาผักและผลไม้สด นิยมใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เนื่องจาก LDPE มีข้อดีคือ ราคาถูก ใ้เยื่อต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง แต่มีข้อเสียคือมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำต่ำ เมื่อพืชคายไอน้ำออกมาจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในภาชนะบรรจุเพิ่มขึ้น แต่ถ้าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มมากเกินไปจนถึงจุดอิ่มตัวไอน้ำจะควบแน่นเป็นหยดน้ำ อาจทำให้พืชเน่าเสียได้ง่ายขึ้น ดังนั้นฟิล์มที่นำมาใช้กับผักผลไม้ที่คายน้ำมากจึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติ เช่น การเจาะรูเล็ก (Perforation) ซึ่งการเจาะรูที่บรรจุภัณฑ์เพื่อให้ผักและผลไม้ที่บรรจุอยู่ภายในสามารถระบายน้ำที่ได้จากการหายใจและการคายน้ำ แต่การเจาะรูทำให้บรรจุภัณฑ์ขาดความสวยงาม อาจทำให้เกิดการฉีกขาดของบรรจุภัณฑ์ได้ง่ายและทำให้ออกซิเจนในอากาศเข้าไปสู่ผักและผลไม้ได้ [2] ดังนั้นจึงมีโครงการพิเศษเพื่อออกแบบปรับปรุงบรรจุภัณฑ์ให้มีสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านไอน้ำได้ดีโดยไม่ต้องเจาะรู

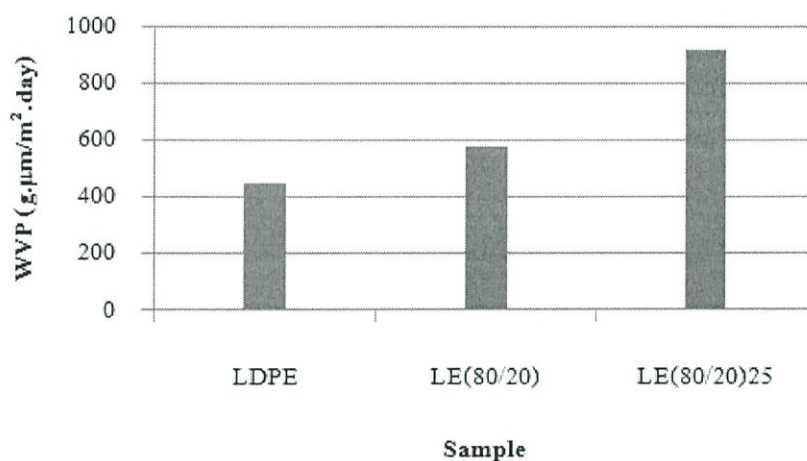
จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ นันทวรรณ ม่วงมี [3] ได้ศึกษาทำการทดลองเตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์จาก LDPE โดยมีการเติมซีโอไลต์เอ (Zeolite A) ที่มีรูพรุน มีขั้วสูง และมีสมบัติการดูดซึมน้ำได้ดี เพื่อเพิ่มสมบัติการซึมผ่านไอน้ำ แต่เนื่องจากซีโอไลต์เอ เป็นสารที่มีขั้วสูง ผสมกับ LDPE ที่ไม่มีขั้ว มีความแตกต่างของขั้วมาก ทำให้เกิดปัญหาการแตกและกระจายตัวของซีโอไลต์เอไม่ดี จึงได้มีการนำเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) ซึ่งมีความเป็นขั้วมาผสมเพื่อเพิ่มการแตกและกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์ม LDPE เนื่องจาก EVA มีส่วนของเอทิลีนที่สามารถผสมเข้ากับ LDPE และยังมีส่วนที่เป็นขั้วของไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate, VA) ซึ่งสามารถผสมเข้ากับซีโอไลต์เอได้ ขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการเป่า ผลการทดลองพบว่าฟิล์ม LDPE/EVA มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (ดังรูปที่ 1.1) และค่ายังมอดุลัสน้อยกว่าฟิล์ม LDPE และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ EVA มากขึ้น ในขณะที่การมีปริมาณ EVA มากขึ้น ทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ฟิล์มสูตร LE(80/20) กับ LE(75/25) มีค่าไม่แตกต่าง (ดังรูปที่ 1.2) จึงเลือกสูตรฟิล์ม LDPE/EVA อัตราส่วนเท่ากับ 80/20 โดยน้ำหนัก ที่มีปริมาณส่วนของ EVA มาก ใส่ซีโอไลต์เอเพื่อเพิ่มการซึมผ่านของไอน้ำ พบว่าฟิล์ม LE(80/20) ที่มีซีโอไลต์เอ 25% (LE(80/20)25) มีค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์ม LE(80/20) และฟิล์ม LDPE เนื่องจากสมบัติที่มีขั้ว, ความเป็นอสัณฐานของ EVA และซีโอไลต์เอที่ดูดซับไอน้ำได้ดี จึงช่วยปรับปรุงฟิล์มให้มีสมบัติการซึมผ่านไอน้ำได้ดีอย่างมาก แสดงดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.1 ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ของฟิล์ม LDPE/EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ [3]

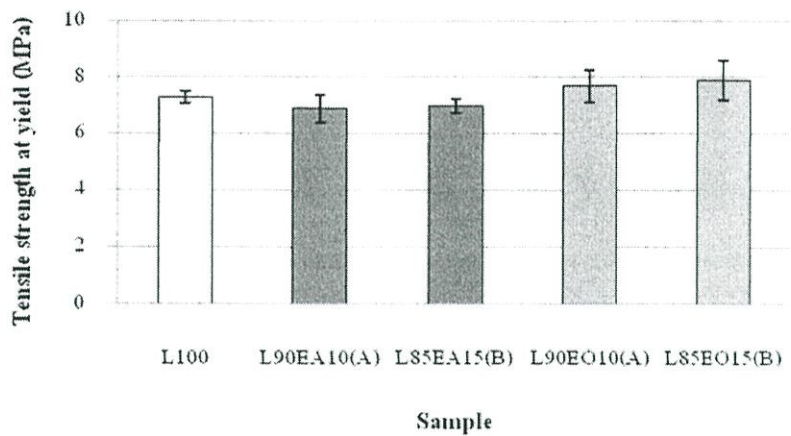


รูปที่ 1.2 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ [3]

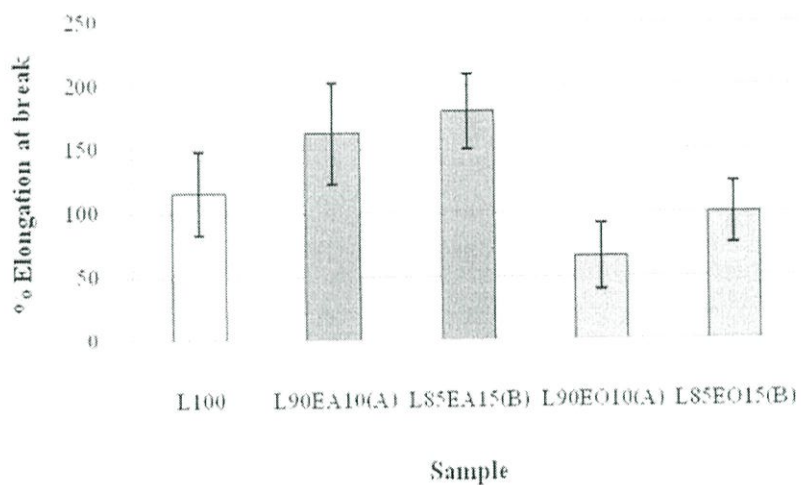


รูปที่ 1.3 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE, LE(80/20) และ LE(80/20)25 [3]

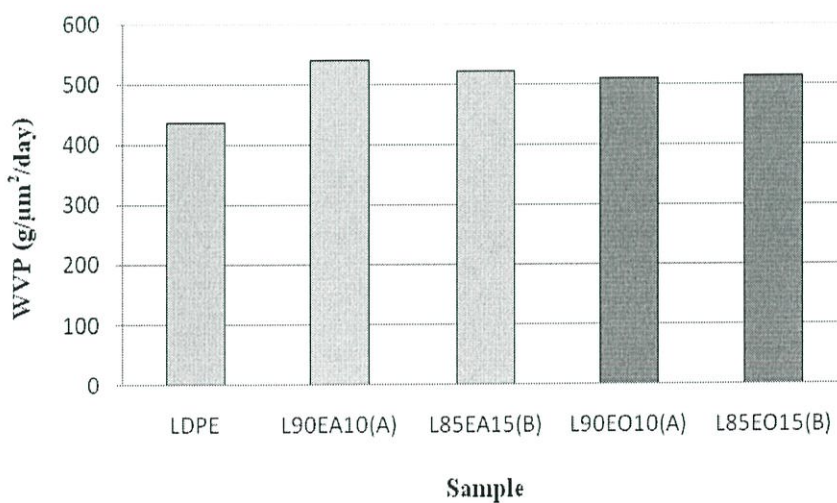
ต่อมา จิตรา ศักดาพิสุทธิ์ และคณะ[4] ได้ศึกษาการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่เตรียมจาก LDPE/EVOH (Ethylene vinyl alcohol copolymer) เปรียบเทียบกับฟิล์ม LDPE/EVA และมีการเติมซีโอไลต์ 20% โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด ผลการทดลองพบว่าฟิล์ม LDPE/EVOH มีความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (ดังรูปที่ 1.4) ส่วนค่าการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง (ดังรูปที่ 1.5) และค่าข้มอดุลีสูงกว่าฟิล์ม LDPE/EVA เมื่อเพิ่มปริมาณ EVOH ในฟิล์ม LDPE/EVOH ค่าข้มอดุลีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก EVOH มีหมู่ไฮดรอกซิลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนทำให้มีโครงสร้างที่แข็ง และ EVOH ในฟิล์ม LDPE/EVOH สามารถเกิดผลึกได้ในขณะที่ EVA ในฟิล์ม LDPE/EVA แสดงความเป็นอสัณฐาน ฟิล์ม LDPE/EVOH และ LDPE/EVA ที่มีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกันมีค่าการซึมผ่านไอน้ำไม่แตกต่างกันเนื่องจากเกิดการแข่งขันระหว่างสัณฐานวิทยาและความมีขั้ว แสดงดังรูปที่ 1.6 อย่างไรก็ตาม การมีขั้วเพิ่มขึ้นของฟิล์มโดยใช้ EVOH เพิ่มขึ้น ไม่ได้ช่วยให้การซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้นอย่างชัดเจน ค่าการซึมผ่านไอน้ำสามารถเพิ่มได้โดยการเติมซีโอไลต์ 20% แสดงดังรูปที่ 1.7



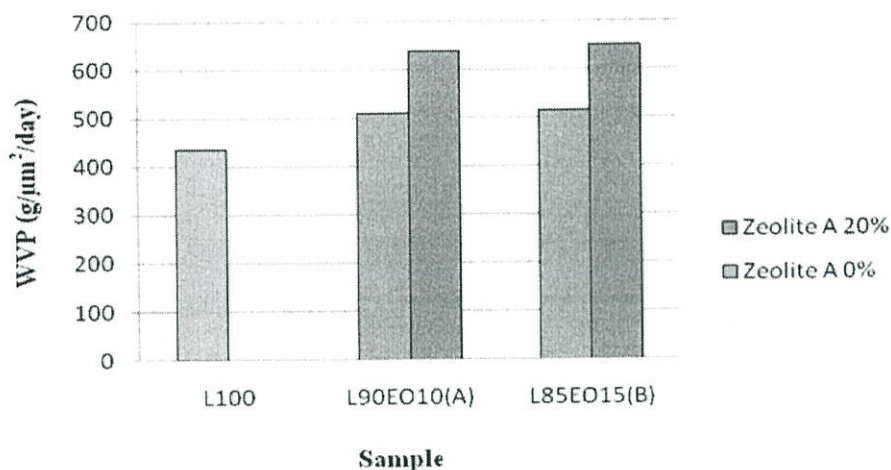
รูปที่ 1.4 ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ของฟิล์มตัวอย่าง จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชัน [4]



รูปที่ 1.5 การดัดยัด ณ จุดขาด ของฟิล์มตัวอย่าง จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชัน [4]



รูปที่ 1.6 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชัน [4]



รูปที่ 1.7 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVOH จากการศึกษาผลการเติมซีโอไลต์เอ [4]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา เมื่อเปรียบเทียบฟิล์ม LDPE/EVA และฟิล์ม LDPE/EVOH พบว่าฟิล์ม LDPE/EVA มีสมบัติการซึมผ่านไอน้ำดีแต่สมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงลดลง [3] ซึ่งค่ามาตรฐานของฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร เลขที่ มอก. 1027-2553 ค่า Tensile Strength ไม่ต่ำกว่า 7 MPa ในขณะที่ฟิล์ม LDPE/EVOH มีสมบัติการซึมผ่านไอน้ำใกล้เคียงกับฟิล์ม LDPE/EVA และมีสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงดี แต่ค่าการดึงยืดต่ำลง [4] ในโครงการพิเศษนี้จึงมุ่งเน้นการเตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์ให้มีสมบัติเชิงกลทั้งความแข็งแรงและการดึงยืด และการซึมผ่านไอน้ำได้ดีขึ้น โดยการเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมหลายชนิดด้วยกัน คือ LDPE ผสมกับโคพอลิเมอร์ (ได้แก่ EVA และ/หรือ EVOH) ในอัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาในเชิงเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ เนื่องจากการมีโคพอลิเมอร์ ช่วยลดความแตกต่างระหว่างข้อของ LDPE กับซีโอไลต์เอ เพื่อให้ได้ซีโอไลต์เอได้มาก ซึ่ง EVA จะสามารถเพิ่มความมีขี้และความเปราะบางเพื่อให้มีการซึมผ่านไอน้ำที่ดี ส่วน EVOH สามารถเพิ่มความมีขี้และความแข็งแรงให้กับฟิล์ม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/EVA/EVOH เพื่อทำความเข้าใจผลของหมู่ฟังก์ชันในโคพอลิเมอร์ ศึกษาสมบัติเชิงกลและปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำด้วยการใช้ซีโอไลต์เอ

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังเคราะห์ EVOH โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ EVA ที่มีปริมาณ VA ใน EVA เท่ากับ 27.5 % โดยน้ำหนัก
2. ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ EVOH ที่ได้จากการสังเคราะห์ และหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)
3. เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ โคลพอลิเมอร์ ในอัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก ซึ่งใน 20 ส่วนของโคลพอลิเมอร์จะทำการผสมระหว่าง EVA/EVOH ในอัตราส่วน 20/0, 15/5, 10/10, 5/15 และ 0/20 โดยน้ำหนัก
4. เลือกพอลิเมอร์ LDPE/EVA/EVOH มาเติมซีโอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก
5. ขึ้นรูปฟิล์มสูตรต่างๆ จากกระบวนการกดอัด
6. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)
7. ศึกษาสมบัติการรับแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)
8. ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
9. ศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มด้วยเครื่อง Water vapor permeability analyzer
10. ศึกษาสมบัติพื้นผิวด้วยการทดสอบมุมสัมผัส

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE โคลพอลิเมอร์และซีโอไลต์เอ มาใช้ในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม เพื่อผลิตเป็นฟิล์มที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านไอน้ำได้ดีขึ้น เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สด เพื่อการเก็บรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาได้นานยิ่งขึ้นและนำความรู้ที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว

ผักและผลไม้แม้ว่าจะเก็บเกี่ยวออกจากต้นแล้วยังคงเป็นสิ่งมีชีวิต กระบวนการเมตาบอลิซึมต่างๆ ยังคงเกิดขึ้นตลอดเวลา ได้แก่ การหายใจ การคายน้ำ การสุก ดังนั้นการเก็บรักษาให้ผลิตผลอยู่ได้นานจึงเป็นการปฏิบัติด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อชะลอเมตาบอลิซึมของผลิตผล ซึ่งได้แก่ การควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ องค์ประกอบของบรรยากาศ และปัจจัยอื่นๆ รอบๆ ผลิตผลให้เหมาะสมนั่นเอง

ในการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรนั้นจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานเพียงใดเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้ [5]

- อุณหภูมิ มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับความชื้นและการสูญเสียน้ำ ทั้งนี้เพราะสารทุกอย่างมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะพวกของเหลวและก๊าซจะเห็นได้ชัด ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น การเคลื่อนไหวของโมเลกุลจะมีมาก โอกาสที่โมเลกุลของน้ำหลุดออกจากผักและผลไม้จึงมีค่าสูงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามความดันไอน้ำของอากาศที่อยู่รอบๆ ไม่ได้สูงตามไปด้วยเพราะมีปริมาณโมเลกุลของน้ำอยู่เท่าเดิมแต่ไม่ได้ถูกกำจัดปริมาณเหมือนในผลไม้ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำระหว่างภายในผลิตผลกับภายนอกจึงเพิ่มสูงมากขึ้น โอกาสที่ไอน้ำจะออกจากผลิตผลสู่ภายนอกจึงมีมากขึ้น อุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษานอกจากจะต้องควบคุมให้ต่ำแล้วยังต้องควบคุมให้สม่ำเสมออยู่ตลอดเวลาด้วย เพราะถ้าหากอุณหภูมิขึ้นลงอยู่เสมอผลิตผลจะสูญเสียน้ำออกไปเมื่ออุณหภูมิสูงจนกระทั่งอากาศรอบๆ อิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ไอน้ำจะควบแน่นเป็นหยดน้ำอยู่ตามภาชนะบรรจุหรือผนังห้องเก็บรักษา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีกอากาศจะรับไอน้ำจากผลิตผลได้อีกเรื่อยๆ ทำให้ผลิตผลสูญเสียน้ำไปมาก สภาพในที่เก็บรักษาจะชื้นและทำให้ผลิตผลเน่าเสียได้ง่าย

- ความชื้นในบรรยากาศ ความชื้นหรือความดันไอน้ำในบรรยากาศโดยปกติจะมีอยู่ในระดับต่ำกว่าความชื้นอิ่มตัว นั่นคือ ความสัมพันธ์น้อยกว่า 100% จึงมีโอกาที่บรรยากาศจะรับน้ำได้อีกมาก ส่วนผักและผลไม้มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่า 70% และส่วนใหญ่มีน้ำอยู่ถึง 90% ความดันไอน้ำในผลไม้ก่อนข้างสูงเพราะผลไม้เปรียบเสมือนภาชนะปิด ไอน้ำรอบๆ เซลล์จะอยู่ในสมดุลกับน้ำภายในเซลล์ ซึ่งเราอาจถือได้ว่าความดันไอน้ำภายในผลิตผลจะมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว เพราะฉะนั้นจะมีการสูญเสียน้ำออกจากผลิตผลตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับว่าบรรยากาศภายนอกมีความชื้นมากน้อยเพียงใด ในกรณีที่ความชื้นของบรรยากาศรอบๆ อิ่มตัวด้วยน้ำหรือความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100% น้ำยังมีโอกาสสูญเสียจากผลิตผลให้กับบรรยากาศได้ เนื่องจาก

ผลิตผลเป็นลิ่งมีชีวิต มีการหายใจทำให้มีพลังงานความร้อนออกสู่บรรยากาศรอบๆทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นและทำให้อากาศรับน้ำได้มากขึ้นกว่าเดิม

- องค์ประกอบของบรรยากาศ ในบรรยากาศปกติมีก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) อยู่ประมาณ 21% ซึ่งจำเป็นสำหรับการหายใจของผลิตผลในการเก็บรักษา ถ้ามีปริมาณก๊าซออกซิเจนต่ำจะช่วยลดอัตราการหายใจและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดได้ แต่ถ้าก๊าซออกซิเจนน้อยเกินไปอาจทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจน ทำให้ผลิตผลเสียหายได้ ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการหายใจ หากมีการสะสมในการเก็บรักษามากเกินไป อาจทำให้เกิดการผิดปกติในการหายใจและทำให้ผลิตผลเสียหายได้ นอกจากนี้ยังมีก๊าซเอทิลีน ซึ่งอาจเกิดจากการผลิตของผลิตผลเองจะกระตุ้นให้เกิดการสุกหรือการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ได้ ฉะนั้นสภาพของการเก็บรักษาที่ดีจะต้องมีการถ่ายเทของอากาศที่ดี

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม และระยะเวลาในการเก็บรักษาผัก [6]

ชนิดของผลิตผล	อุณหภูมิ		ความชื้นสัมพัทธ์	ระยะเวลาที่เก็บรักษาได้
	F°	C°		
หน่อไม้ฝรั่ง	32	0	85-90	3-4 สัปดาห์
บรอกโคลี	32	0	90-95	7-10 วัน
กะหล่ำปม	32	0	90-95	3-4 สัปดาห์
กะหล่ำปลี				
พินธุ์เบา	32	0	90-95	3-6 สัปดาห์
พินธุ์หนัก	32	0	90-95	3-4 เดือน
ดอกกะหล่ำ	32	0	85-97	2-3 สัปดาห์
ข้าวโพดหวาน	31-32	0	85-95	4-8 วัน
แตงกวา	45-50	11	85-95	2-3 สัปดาห์
มะเขือ	45-50	11	85-90	10 วัน
ฮันนี่คิว	45-50	11	85-90	2-3 สัปดาห์
เห็ด	32	0	85-90	3-5 สัปดาห์
กระเจียบฝัก	50	11	85-95	2 สัปดาห์
หอมหัวใหญ่	32	0	70-75	6-8 เดือน
มันเทศ	55-60	13-16	85-90	4-6 เดือน
มะเขือเทศสุก	50	11	85-90	8-12 วัน
แก่-ดิบ	50-70	13-21	85-90	2-6 สัปดาห์

### 2.1.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของพืช

ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังมีชีวิตอยู่ กระบวนการต่างๆ นั้นทั้งทางกายภาพและชีวเคมียังคงดำเนินอยู่เช่นเดียวกับที่ยังไม่ได้เก็บเกี่ยว ดังนั้นผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังคงหายใจต่อไป โดยดูดก๊าซ  $O_2$  เข้าไป และคายก๊าซ  $CO_2$  และความร้อนออกมา มีการคายน้ำและสูญเสียน้ำหนัก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในพืชหลังการเก็บเกี่ยว ได้แก่

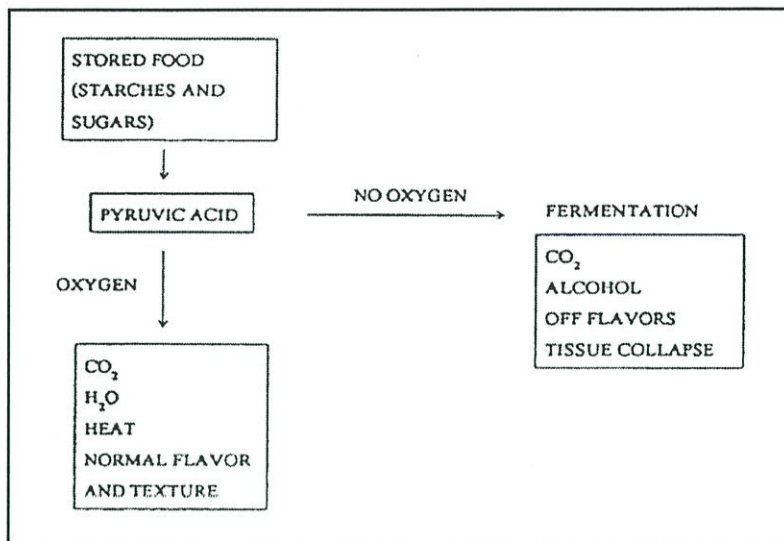
#### 2.1.1.1 การหายใจ [7]

ผลิตผลสดทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวจะมีการหายใจอย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลาที่ยังมีชีวิตอยู่ เนื่องจากสิ่งมีชีวิตต้องการพลังงานในการดำเนินปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ พลังงานที่ได้มานั้นมาจากการหายใจ ซึ่งอัตราการหายใจของผักและผลไม้แต่ละชนิดนั้นแตกต่างกันไปตามระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวและสภาพแวดล้อม โดยทั่วไปผักและผลไม้จะถูกเก็บเกี่ยวในระยะเวลาที่เหมาะสมกับความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งผักและผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูงหลังการเก็บเกี่ยวมักจะเสียเร็วกว่าผักและผลไม้ที่มีอัตราการหายใจต่ำ ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีแล้ว จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพ และอายุการเก็บรักษา จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงการปฏิบัติต่อผลิตผลภายหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อให้ผลิตผลมีความสมดุลในการรักษาสภาพหรือลดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีให้น้อยที่สุดอันที่จะทำให้ผลิตผลมีคุณภาพการเก็บรักษาได้นานที่สุด ผลิตผลสดที่ยังมีชีวิตอยู่จะมีการหายใจตลอดเวลา ซึ่งการหายใจของผลิตผลสดมี 3 ขั้นตอนดังนี้

- การย่อยคาร์โบไฮเดรตพวกที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายๆ โมเลกุลให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว
- ขั้นตอนการเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นให้เป็นกรดไพรูวิก
- ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไพรูวิกและกรดอินทรีย์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นให้กลายเป็นก๊าซ  $CO_2$  น้ำ และพลังงานซึ่งเกิดในการหายใจของผลิตผลหรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ สรุปได้เป็นสมการอย่างง่ายคือ

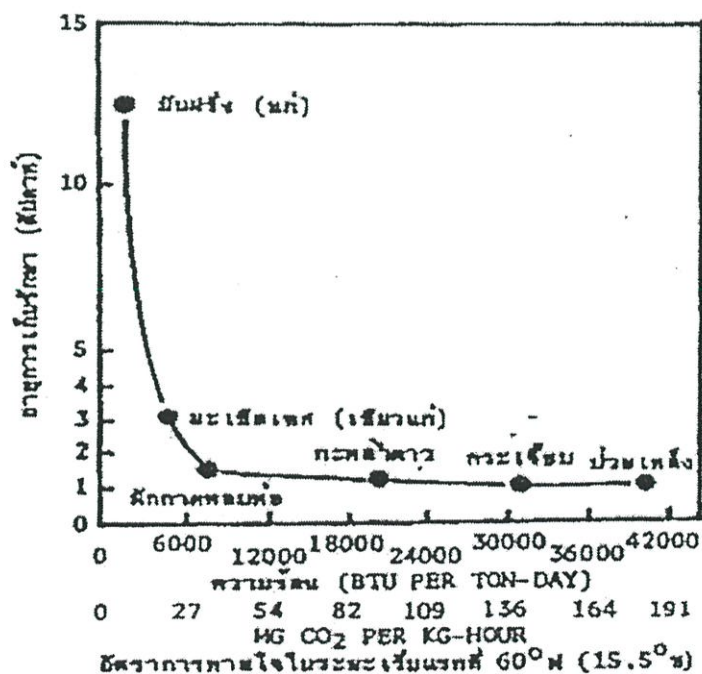


โดยที่การหายใจในสภาพที่มีออกซิเจนสมบูรณ์จะได้ปริมาณ ATP ต่อโมเลกุลน้ำตาลมากกว่าการหายใจในสภาพที่มีออกซิเจนน้อยหรือไม่มีออกซิเจน



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน [7]

อัตราการหายใจของพืชหลังการเก็บเกี่ยวเป็นสิ่งที่แสดงถึงอายุหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปพืชที่มีอัตราการหายใจสูงจะมีอายุการเก็บรักษาสั้น ส่วนพืชที่อัตราการหายใจต่ำจะมีอายุการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวได้นาน [5]



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจและอายุการเก็บรักษา เมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 60°F [8]

รูปแบบการหายใจของพืชแต่ละชนิดจะมีอัตราการหายใจที่ไม่เท่ากัน ซึ่งแบ่งตามชนิดของพืช [9] ดังต่อไปนี้

1. Climacteric fruit คือ ผลไม้ที่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากที่ถูกแก่จัดจะมีอัตราการหายใจต่ำลงมาก เมื่อเริ่มเข้าสู่กระบวนการสุกอัตราการหายใจจะสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งการเพิ่มอัตราการหายใจนี้จะเพิ่มอย่างรวดเร็วและสูงมากด้วย เมื่อสุกเต็มที่แล้วอัตราการหายใจจะค่อยๆ ลดต่ำลงจนเข้าสู่ระยะเสื่อมสลาย ฉะนั้นผลไม้พวกนี้สามารถเก็บแล้วนำมาบ่มให้สุกได้ภายหลังการเก็บเกี่ยว เช่น มะเขือเทศ มังคุด ละมุด กัลย ทุเรียน

2. Non-climacteric fruit คือ ผลไม้ที่ไม่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากที่ถูกแก่จัดจะมีอัตราการหายใจต่ำลงในระยะเก็บเกี่ยว หลังการเก็บเกี่ยวแล้วผลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก คืออัตราการหายใจค่อนข้างจะคงที่ตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนถึงระยะเสื่อมสลาย รสชาติคงที่ อายุการเก็บรักษาค่อนข้างยาว ฉะนั้นถ้าเก็บเกี่ยวผลที่ยังไม่แก่เต็มที่ ก็จะได้ผลไม้ที่มีรสชาติเหมือนเดิมตลอดไป จึงต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลแก่จัด เช่น ส้ม สับปะรด มะนาว เงาะ ลำไย แดงกวา ถีนจี่

## ตารางที่ 2.2 ชนิดของผลไม้จำแนกตามลักษณะการหายใจขณะผลแก่หรือสุก [10]

ประเภท Climacteric	ประเภท Non-climacteric
แอปเปิ้ล	สตอเบอรี่
สาลี่	องุ่น
ท้อ	ส้มชนิดต่างๆ
กัลย	มะพร้าว
กีวี	สับปะรด
อโวคาโด	เงาะ
น้อยหน่า	มังคุด
มะละกอ	ถีนจี่
มะม่วง	ลำไย
ทุเรียน	มะไฟ
แดงเทศ	ลองกอง
แดงโม	มะเฟือง
มะเขือเทศ	แดงกวา
ขนุน	มะเขือเทศพันธุ์ Rin และ Nor
ฝรั่ง	เชอร์รี่

ตารางที่ 2.3 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Climacteric [11]

ผลไม้	พันธุ์	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการหายใจ (mg.CO <sub>2</sub> /kg.hr)	
			ต่ำสุด	สูงสุด
แอปเปิ้ล	Barnley seeding	23	10	16
อโวคาโด	Fuerte	20	35	155
กล้วย	Gros michel	20	20	60
มะเดื่อ	Mission	20	22	40
มะม่วง	Kent	20	15	22
ท้อ	Alberta	20	25	35
สาลี่	Bartlett	20	8	23
มะเขือเทศ	Grand rapids	18	8	20

ตารางที่ 2.4 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Non-climacteric [11]

ผลไม้	พันธุ์	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการหายใจ (mg.CO <sub>2</sub> /kg.hr)
			Non-climacteric ตลอดเวลาการแก่และสุก
องุ่น	Vi 5061	20	15
มะนาว	Eureka	20	5
ส้ม	Valencia	21	13
สับปะรด	Cayne	15	21

#### 2.1.1.2 การคายน้ำ [11]

การคายน้ำ เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของผักผลไม้ อัตราการคายน้ำหรือสูญเสียน้ำจะขึ้นกับพื้นที่ผิวและลักษณะโครงสร้างผิว ผักที่มีใบมากจะมีอัตราการคายน้ำหรือสูญเสียน้ำรวดเร็วและมีค่าสูงเนื่องจากพื้นที่ผิวสูง และโครงสร้างของใบมีช่องเปิดทำให้สูญเสียน้ำได้ง่าย ส่วนแอปเปิ้ลจะมีการสูญเสียน้ำน้อย เนื่องจากมีรูปร่างกลมซึ่งมีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ และยังมีไขเคลือบผิวช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำด้วย อัตราการสูญเสียน้ำจากเนื้อเยื่อจะขึ้นกับความดันไอที่แตกต่างระหว่างภายนอกและภายในเนื้อเยื่อ ถ้าความแตกต่างมีมากอัตราการสูญเสียน้ำจะเพิ่มขึ้น ซึ่งปกติความดันไอน้ำภายในเนื้อเยื่อจะมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำภายนอก

### 2.1.1.3 การสุก [11]

การสุกเป็นการพัฒนาขั้นสุดท้ายของผลไม้ก่อนเข้าสู่ระยะร่วงโรย การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับไม่ได้ และเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนหลายขั้นตอน การเปลี่ยนแปลงของผลไม้สุกที่อาจพบได้คือ เมล็ดแก่เต็มที่ สีเปลี่ยนแปลง ผลหลุดจากขั้ว อัตราการหายใจเปลี่ยนแปลง เนื้อนุ่มลงและมีการสร้างสารให้กลิ่นรส

## 2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้

ปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยทำให้ก๊าซต่างๆ ที่ล้อมรอบผลิตภัณฑ์เป็นไปตามที่ต้องการตลอดเวลาที่เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ คือ ภาชนะบรรจุ สมบัติที่สำคัญของวัสดุบรรจุหรือภาชนะบรรจุที่ต้องพิจารณามีดังนี้

### 2.2.1 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ [11]

การเลือกวัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์จากค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate, WVTR) ต้องระมัดระวังปัญหาที่เกิดจากหยดน้ำภายในภาชนะบรรจุภัณฑ์และปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันไอน้ำได้จะช่วยลดปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่มักเกิดปัญหาหยดน้ำในภาชนะ และในทางกลับกันวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้ไอน้ำผ่านได้มักจะเกิดปัญหาผลิตภัณฑ์แห้งเพราะสูญเสียความชื้น การแก้ไขปัญหาอาจทำได้โดยการเติมสารป้องกันการเกิดหยดน้ำ (Antifogging agent) ในฟิล์มพลาสติกหรือการเจาะรูเล็กๆ เพื่อช่วยระบายไอน้ำบางส่วนออกจากภาชนะ

### ตารางที่ 2.5 ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [12, 13]

ชนิดของพลาสติก	ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (g.mm/m <sup>2</sup> .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
เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โคพอลิเมอร์ (EVA), VA 12%	4.50
เอทิลีน ไวนิลแอลกอฮอล์ โคพอลิเมอร์ (EVOH), เอทิลีน 32/44 mole%	2.40/0.80

### 2.2.2 อัตราการซึมผ่านของก๊าซ [11]

การกำหนดค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซ (Gas permeability) เพื่อเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ ชนิดของผลิตภัณฑ์ อายุการเก็บรักษาและสภาวะการเก็บรักษา โดยทั่วไปเมื่อต้องการใช้วัสดุที่ป้องกันก๊าซได้ดีมาก ควรเลือกวัสดุที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ  $O_2$  ไม่เกิน  $2 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$  ส่วนวัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซดีพอควรจะมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซ  $O_2$  ประมาณ  $20\text{-}30 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$  สำหรับผักและผลไม้สดต้องใช้วัสดุที่ยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ดี โดยทั่วไปค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ  $O_2$  จะมีค่าตั้งแต่  $2000 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$  ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซ  $O_2$  และก๊าซ  $CO_2$  ในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [12]

ชนิดของพลาสติก	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ก๊าซออกซิเจน ( $\text{cm}^3 \cdot \text{mm/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ )	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{mm/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ )
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
EVA, VA 12%	180.0	1,100.0
EVOH, เอทิลีน 32/44 mole%	1.02/0.03	0.01/0.08

### 2.2.3 การออกแบบภาชนะบรรจุภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค [14]

การออกแบบภาชนะบรรจุหรือหีบห่อสำหรับผู้บริโภค อาศัยปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

- การระบายอากาศ การใช้แผ่นฟิล์มพลาสติกห่อผลิตภัณฑ์นั้น พลาสติกแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการยอมให้ก๊าซผ่านเข้าออกได้ต่างกัน ตามปกติฟิล์มจะยอมให้ก๊าซ  $CO_2$  ซึมผ่านเข้าออกได้มากกว่าก๊าซ  $O_2$  ดังนั้นอัตราการสะสมของก๊าซ  $CO_2$  จากการหายใจจึงน้อยกว่าอัตราการหายไปของก๊าซ  $O_2$  และถ้าก๊าซ  $O_2$  ถูกใช้ไปหมดจากบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุ จะทำให้มีการหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซ  $O_2$  เกิดการสะสมของแอลกอฮอล์และก๊าซ  $CO_2$  อาจทำให้เซลล์ของพืชตาย ผักและผลไม้จะส่งกลิ่นที่ผิดปกติ รสชาติเปลี่ยน และเกิดการเน่าเสีย

แผ่นพลาสติกหรือถุงพลาสติกที่ใช้นั้นควรมีรูระบายอากาศ การบรรจุในถุงควรมีรูอย่างน้อย 2-4 รู ขนาด 1/4-1/8 นิ้ว เพื่อระบายอากาศผลิตผลจะไม่ขาดก๊าซ  $O_2$  และไม่เกิดการสะสมของแอลกอฮอล์ และก๊าซ  $CO_2$  ขณะที่วางขายในสภาพที่อุณหภูมิสูง ในบางครั้งการเก็บรักษาในสภาพถุงที่ไม่มีรูอาจเกิดผลดี เพราะเกิดสภาพบรรยากาศที่มีอัตราส่วนก๊าซชนิดต่างๆ แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติ (Modified atmosphere) ขึ้นมาได้ แต่ควรระมัดระวังการเกิดกลิ่นที่ผิดปกติหรือมีรสชาติแอลกอฮอล์เกิดขึ้น

- ความชื้น ผักและผลไม้ที่มีน้ำหรือมีความชื้นอยู่สูงถึง 75-95% และอยู่ในลักษณะสมดุลกับบรรยากาศได้เมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์สูงถึง 95% ขึ้นไป โดยปกติผักและผลไม้ที่เก็บเกี่ยวแล้วจะเหี่ยวอย่างรวดเร็ว เพราะในบรรยากาศทั่วไปมีความชื้นค่อนข้างต่ำ ทำให้เซลล์เกิดการเสีรูปร่างและการหดตัว การเก็บผักและผลไม้ไว้ในภาชนะที่เหมาะสมจะยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้นาน พลาสติกที่ใช้ห่อผักและผลไม้สด จะทำให้ความชื้นข้างในรอบๆ ผักและผลไม้สูงและอาจสูงถึง 100% ดังนั้นจึงต้องเจาะรูพลาสติก เพื่อให้ไอน้ำภายในถุงพลาสติกได้ออกไปข้างนอกเป็นการช่วยปรับความชื้นภายในถุงพลาสติกให้เหมาะสมเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้นาน

## 2.2.4 พิล์มที่ใช้สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์ [15]

ฟิล์มเป็นวัสดุที่มีความหนาไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร และยังมีสมบัติหลากหลายขึ้นกับพอลิเมอร์ที่นำมาผลิตเป็นฟิล์ม พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่นิยมนำมาผลิตจัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline) ในส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) จะเป็นส่วนที่ไม่ยอมให้ก๊าซหรือไอน้ำซึมผ่าน ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) สายโซ่พอลิเมอร์จะอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) การเคลื่อนที่ของสายโซ่จะถูกจำกัด ปริมาตรอิสระ (Free volume) จะถูกจำกัดเช่นกัน แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว สายโซ่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระมากขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรอิสระ การเปลี่ยนแปลงนี้จะมีผลสำคัญมากต่อความสามารถของโมเลกุลที่จะแพร่ผ่านวัสดุ

ความแตกต่างของความสามารถในการซึมผ่านของฟิล์ม ขึ้นอยู่กับ

- ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการซึมผ่านของก๊าซ
- ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
- อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ต่อการละลายของก๊าซในส่วนที่เป็นอสัณฐาน

การซึมผ่านของก๊าซสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเชื่อมโยงซึ่งเป็นการจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ความสามารถในการซึมผ่านจะลดลง และการดึงยึดฟิล์มเป็นการเพิ่ม



### 2.3.2 สมบัติโดยทั่วไป [18]

- เป็นเทอร์โมพลาสติก
- ความถ่วงจำเพาะ 0.9-9.925
- ความเป็นผลึก 50-70%
- อุณหภูมิหลอมเหลว 98.0-120.0°C
- ความแข็งแรงดึง 4.1-16.0 MPa
- ค่า Young's modulus 0.10-0.26 GPa
- การดึงยืด ณ จุดขาด 90-800%
- อุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน 38.0-49.0°C
- มีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
- มีการไหลตัวที่ดี มีค่า Melt flow index อยู่ในช่วง 0.1-10.9g/10min
- มีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ดีพอสมควร
- फिल्मที่ได้จาก LDPE จะมีความมันเงาดี (High gloss) และมีความเป็นฝ้าต่ำ (Low haze)
- เป็นฉนวนไฟฟ้าค่อนข้างดี (Good dielectric property)
- ดูดซึมน้ำได้ต่ำมาก
- ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้
- มีความปลอดภัย สามารถใช้กับอาหารและยา

### 2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน

LDPE มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เพราะราคาไม่แพง ทนต่อสารเคมีทั้งกรดและด่าง อีกทั้งยังขึ้นรูปได้ง่าย มีความยืดหยุ่นและไม่มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ จึงสามารถนำมาใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารและยา

1. งานแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ถุงขนาดต่างๆ ตั้งแต่ขนาดที่บรรจุสินค้าทั่วไป ตลอดจนถึงขนาดใหญ่ที่ต้องแบกรับน้ำหนักมากๆ ได้แก่

- ถุงบรรจุอาหาร เช่น ผัก ผลไม้สด ขนมปัง ลูกกวาด อาหารแช่แข็ง อาหารแห้ง
- ถุงบรรจุสินค้าหนัก เช่น ผลิตภัณฑ์เกษตร ข้าวสาร ปุ๋ย ชิ้นส่วนเครื่องจักร
- ถุงชั้นในของถุงกระดาษหรือกระสอบพลาสติกซึ่งใช้บรรจุอาหารสัตว์ ปุ๋ย
- ถุงบรรจุสินค้าอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น ถุงเสื้อผ้าสำเร็จรูป สิ่งทอ กระดาษชำระ
- फिल्मหด (Shrink film) และฟิล์มยืด (Stretch film) ที่ต้องการความเหนียวสูง เช่น ใช้รัด

สินค้าที่วางเรียงบนแท่นรองรับสินค้า (Pallet) เพื่อการขนส่งเป็นหน่วยใหญ่

2.งานฉีดเข้าแบบ ได้แก่ ภาชนะ ของเล่นที่ต้องการลักษณะชิ้นงานที่นูนเล็กน้อย งานจัดของสวยงาม เช่น ดอกไม้พลาสติก ใบไม้พลาสติก รวมทั้งเครื่องใช้ในครัวเรือน เช่น ตะกร้า ถัง ขาม อ่าง

3.งานเป่าเข้าแบบ ได้แก่ การเป่าทำขวดต่างๆ เช่น ขวดน้ำเกลือ ขวดยาหยอดตา ขวดน้ำดื่ม และเป่าเพื่อทำกระป๋องและกล่อง

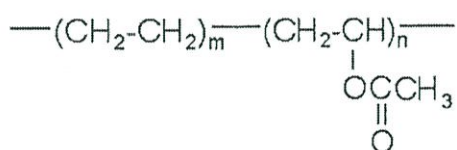
4.งานแผ่นเคลือบหรือแผ่นประกบ ได้แก่ งานเคลือบบนผิวฟิล์ม บนแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ เช่น ซองบรรจุอาหารแห้งประเภทหะหมี่กึ่งสำเร็จรูป อาหารเสริมเด็กอ่อน ขนมอบเคี้ยว ซึ่งต้องการสมบัติป้องกันความชื้นและการซึมผ่านของก๊าซต่างๆ

5.งานเคลือบผิวโลหะ ได้แก่ การเคลือบลดเอนกประสงค์ เช่น ตะแกรงวางสินค้า ชั้นวางของ ตะกร้า รถจักรยานยนต์ ตลอดจนงานเคลือบพิเศษ เช่น สายเคเบิล สายโทรศัพท์ สายไฟฟ้า

## 2.4 เอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ (EVA) [19]

### 2.4.1 ลักษณะทั่วไป

เอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymers, EVA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน โดยเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ภายใต้อุณหภูมิสูงระหว่างเอทิลีนโมโนเมอร์ (Ethylene monomer) กับสารไวนิลอะซิเตทโมโนเมอร์ (Vinyl acetate monomer-VAM) ซึ่งอุณหภูมิและความดันที่ใช้ต่ำกว่าของกรณีปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของเอทิลีนตัวเดียว สารก่ออนุมูลอิสระที่นิยมใช้คือ Azo-bis-isobutyronitrile, Organic peroxides และ Persulphates มีเอทิลีนเป็นเนื้อหลักประมาณ 75-90% และไวนิลอะซิเตทเป็นหมู่ฟังก์ชัน ทำให้เกิดความยืดหยุ่นโดยลดการเกิดผลึก (Crystallinity) พบว่าถ้ามีปริมาณเอทิลีนมากกว่า 75% จะทำให้ได้โคพอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็ง



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของ EVA [19]

### 2.4.2 สมบัติทั่วไป

- เป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดใสจนถึงขุ่น
- มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณ 0.926-0.950

- สามารถละลายได้ในสารละลายอะโรมาติก (Aromatic) และคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbon) ที่อุณหภูมิสูง
- จุดเปราะ (Brittle point) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-70^{\circ}\text{C}$
- จุดอ่อนตัว (softening point) อยู่ระหว่าง  $60-80^{\circ}\text{C}$
- มีค่า  $T_g$  ตั้งแต่  $-20^{\circ}\text{C}$  (ของไฮโมพอลิเมอร์) จนถึง  $20^{\circ}\text{C}$
- 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 การชะล้าง และมีอายุการใช้งานสูง
- ทนแสง UV ได้ (UV, ultraviolet resistance)
- สามารถให้สีได้ง่ายและสวยงาม
- ขึ้นรูปได้ง่าย
- มีความยืดหยุ่นและโค้งงอได้ดีโดยไม่ต้องใช้พลาสติกไซเซอร์

### 2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน

EVA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและจุดอ่อนตัวต่ำ มักใช้เป็น Wax additive ในงานเคลือบกระดาษ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารยึดติด และพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)

EVA ที่มีสมบัติคล้ายยาง มักใช้งานบรรจุภัณฑ์ประเภทอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์

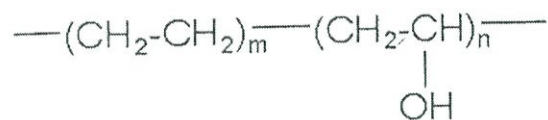
ใช้ในงานการผลิตรองเท้าและเบาะรองนั่ง

ปริมาณไวนิลอะซิเตตน้อยกว่า 7% จะได้ฟิล์มที่มีความเหนียวใส และมีความมันวาว

## 2.5 เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (EVOH) [20]

### 2.5.1 ลักษณะทั่วไป

เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl alcohol copolymers, EVOH) เป็น โคพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับไวนิลแอลกอฮอล์ สัดส่วนของมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนด การป้องกันการซึมผ่านเข้าออกของก๊าซ ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น สภาพขั้วจะสูงขึ้น ส่งผลให้การซึมผ่านของไอน้ำมีมากขึ้น การป้องกันการซึมผ่านของก๊าซต่างๆ จะทำได้ดีมากในสภาพแห้งหรือสภาวะที่มีความชื้นต่ำๆ แต่มีความไวต่อความชื้น เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้การป้องกันการซึมผ่านก๊าซลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ EVOH [20]

### 2.5.2 สมบัติทั่วไป

- ปริมาณเอทิลีน 32-44% โมล
- จุดหลอมเหลว (Melting point) อยู่ระหว่าง 164-181°C
- มีค่า  $T_g$  ตั้งแต่ 55-69°C
- ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับ 8,520-11,220 psi
- ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) เท่ากับ 7,385-10,365 psi
- ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) เท่ากับ 230-280%
- ค่าข้มมอดูลัส เท่ากับ 298,000-385,000 psi
- มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดีเยี่ยมในสถานะที่มีความชื้นต่ำ
- ป้องกันสารเคมีได้ดีเยี่ยม รวมไปถึงน้ำมัน กรด หรือตัวทำละลาย
- มีสมบัติการป้องกันกลิ่นได้ดี ช่วยถนอมกลิ่นหอมและความสดของสินค้าไว้ภายใน
- มีความใสมาก (Very good clarity)
- สามารถอัดรีดร่วมกับพอลิเมอร์อื่นได้หลายชนิดในกระบวนการอัดรีดร่วม
- มีความไวต่อความชื้น
- ทนทานต่อความร้อน

## ตารางที่ 2.7 สมบัติบางประการของ EVOH [21]

สมบัติพื้นฐานของ EVOH สำหรับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Co-extrusion coating และ Laminating

ปริมาณเอทิลีน	% โมลของเอทิลีน	27	32	35	44	48	
ความหนาแน่น	g/cc (ASTM D 1505)	1.20	1.19	1.18	1.14	1.12	
ค่าดัชนีการ หลอมเหลว	g/10min	190°C	N/A	4.4	8	5.5	6.4
		210°C	9.0	10.5	16	13	14.7
		240°C	20.0	24	40	34	36
จุดหลอมเหลว	°C	DSC	191	183	179	165	158
ค่าการซึมผ่านของ ก๊าซออกซิเจน	cc.20µm/m <sup>2</sup> .atm.day		0.2	0.4	0.6	1.5	1.2

### 2.5.3 การประยุกต์ใช้งาน

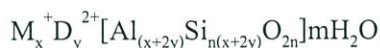
เนื่องจากเม็ดพลาสติก EVOH มีราคาแพงจึงไม่นิยมนำมาทำบรรจุภัณฑ์ทั้งหมด แต่นำมาใช้ร่วมกับพลาสติกชนิดอื่น โดยการนำ EVOH ทำให้เป็นแผ่นแล้วประกบด้วยกาวหรือวิธีการรีดร่วมหรือการเคลือบบางเพียงบางๆ ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ได้แก่ หลอดลามิเนตซึ่งประกอบด้วยชั้นของพลาสติกหลายชั้น แผ่นลามิเนตหนาประมาณ 0.33 มิลลิเมตร ทำโดยการประกอบแบบอัดรีด (Extrusion lamination) โดยใช้ EVOH ซึ่งเป็นพลาสติกใสและมีสมบัติในการเป็นตัวสกัดกั้นที่ดีแทนแผ่นเปลวอะลูมิเนียม โดยใช้วิธีการรีดร่วม (Co-extrusion) หรือโดยการอัดรีด ซึ่งจะทำให้หลอดเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีรอยต่อเชื่อมที่ทำให้มีการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำต่ำ

นิยมใช้สำหรับทำบรรจุภัณฑ์คือ EVOH ที่มีเอทิลีน 32% และ EVOH ที่มีเอทิลีน 44%

หากต้องการใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสความชื้น เช่น Retort pouch ภาชนะบรรจุอาหารพร้อมรับประทาน (Ready to eat) ต้องลามิเนต 2 ด้านของ EVOH ด้วยพลาสติกที่กันน้ำได้ดี โครงสร้างที่นิยมใช้เช่น PP/EVOH/PP

## 2.6 ซีโอไลต์เอ [22]

ซีโอไลต์ เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต มีโครงสร้างเป็นรูพรุนสามมิติ และมีลักษณะเป็น tetrahedral (Tetrahedral) ที่มีออกซิเจน 4 ตัวล้อมรอบ การแทนที่ Si ด้วย Al ทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุ จึงต้องมีประจุบวกเพื่อทำให้เกิดความสมดุลของประจุ สูตรทางเคมีของซีโอไลต์ เป็นดังนี้



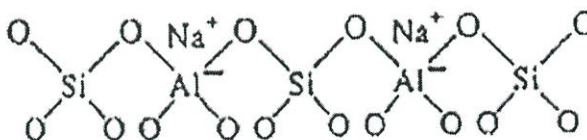
โดยที่  $M_x^+ D_y^{2+}$  คือ ประจุบวกสมดุล (Charge balance cation)

ซีโอไลต์เป็นสารที่มีรูพรุนจึงมีพื้นที่ผิวมาก คือ ประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม ในโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์จะมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกันซึ่งมีไอออนประจุบวกและโมเลกุลของน้ำอยู่ในโพรงช่องว่างนี้ ลักษณะของช่องว่างและโพรงที่เชื่อมต่อกันของซีโอไลต์จะเป็นตัวการสำคัญในการกำหนดสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของซีโอไลต์ในการแลกเปลี่ยนไอออนและดูดซับสาร

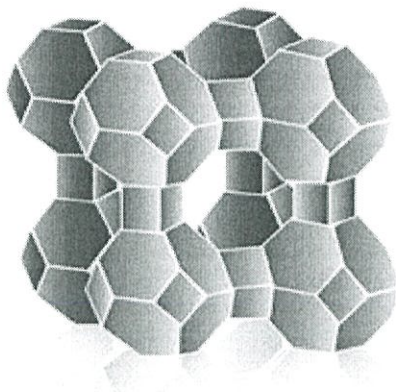
### 2.6.1 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ

ซีโอไลต์เอ มีสูตรทางเคมี คือ  $Na_{12}[(AlO_2)_{12}(SiO_2)] \cdot 27H_2O$  โดยมีอัตราส่วนระหว่างช่องว่างต่อปริมาตร เท่ากับ 0.47 อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม เท่ากับ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน เท่ากับ 4.2 อังสตรอม

การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ ทำโดยใช้กระบวนการทำให้เป็นเจลคล้ายซีโอไลต์อื่นๆทั่วไป โดยใช้อะลูมินา (นิยมใช้โซเดียมอะลูมิเนต) และซิลิกา (นิยมใช้โซเดียมซิลิกา) ผสมกันในสารละลายที่ทำให้เป็นเจล ซึ่งสารละลายเหล่านั้น ได้แก่ สารละลายของอัลคาไล เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายเกลือแอมโมเนียม ( $NH_4^+$ ) เอมีน หรือสารละลายอินทรีย์ที่มีขั้ว เมื่อผ่านกระบวนการที่ทำให้เป็นเจลแล้ว จะนำเจลที่ได้มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 70-300°C จะได้ผลึกของซีโอไลต์เอที่อยู่ในรูปแบบของโซเดียมไอออน ( $Na^+$ )



รูปที่ 2.6 Frame work ของซีโอไลต์เอ [23]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ [24]

### 2.6.2 สมบัติของซีโอไลต์เอ [22]

- สารดูดน้ำ (Desiccants) เนื่องจากซีโอไลต์เอ มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง จึงสามารถดูดซับสารที่มีขั้วได้ดี เช่น น้ำ และเมื่อดูดซับน้ำแล้วจะเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้เป็นอย่างดี

- การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchangers) เนื่องจากซีโอไลต์เอมีขั้วจึงทำให้ดูดซับน้ำได้ดี น้ำที่อยู่ในซีโอไลต์เอจึงเปรียบเสมือนไอออนบวกที่ถูกละลายในโครงสร้างของซีโอไลต์เอ โดยน้ำที่อยู่ในซีโอไลต์เอนั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ตลอดเวลา ดังสมการ



ไฮโดรเนียมไอออนนี้จะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกชนิดอื่นๆที่ต้องการแลกเปลี่ยน ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดเฉพาะกับซีโอไลต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบสูง ซึ่งดูดซับน้ำได้ดี เช่น ซีโอไลต์เอ

- สมบัติการคัดแยกโมเลกุล (Molecular sieves) เมื่อทำให้ซีโอไลต์แห้งโดยการไล่น้ำออกแล้ว ซีโอไลต์ดังกล่าวจะมีความสามารถในการดูดซับสารชนิดต่างๆได้ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมระหว่างความเป็นขั้วของซีโอไลต์ และสารหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เช่น ซีโอไลต์ที่มีขั้วสูง (มีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ) สามารถดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วสูง ด้วยเหตุนี้ ซีโอไลต์จึงมีสมบัติในการคัดแยกโมเลกุล

### 2.6.3 การประยุกต์ใช้งาน

ซีโอไลต์เอ เป็นซีโอไลต์ที่น่าสนใจ เนื่องจากมีโครงสร้างแบบซูเปอร์เคจ (Supercage) เหมาะกับการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Specio-specific catalysis) พื้นที่ภายในของโครงสร้างที่

เป็นรูปพุนมีมากในการที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสาร ขนาดของรูปพุนที่มีขนาดเล็กจะมีความเฉพาะเจาะจง (Selectivity) ในการจำกัดขนาดของโมเลกุลที่จะเข้าออก

- ใช้งานอย่างกว้างขวางในการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสารและแลกเปลี่ยนไอออนได้
- มีความเป็นขั้วสูงและมีรูปพุนขนาดเล็กจึงสามารถนำไปใช้เป็นตัวดูดซับน้ำได้ดี

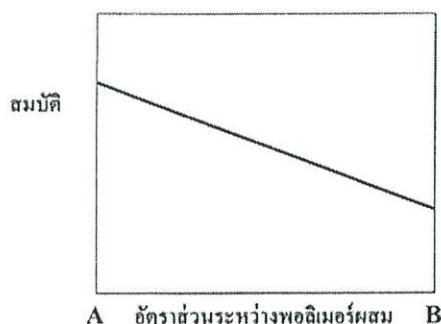
## 2.7 พอลิเมอร์ผสม [25-26]

พอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend) เป็นการผสมพอลิเมอร์เพื่อเตรียมวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติเฉพาะ ซึ่งได้จากการนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมเข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงสมบัติซึ่งไม่สามารถได้จากพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว ดังนั้นจึงได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นโดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่าการผสม

โดยการเตรียมพอลิเมอร์ผสมจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ (Compatibility) ของการผสมเป็นหลัก ซึ่งการผสมพอลิเมอร์ที่เข้ากันได้ไม่ดี จะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคของพอลิเมอร์แต่ละชนิดกันอย่างชัดเจน โดยแต่ละวัฏภาคจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ที่ด้อยกว่าพอลิเมอร์เดิมที่นำมาผสม

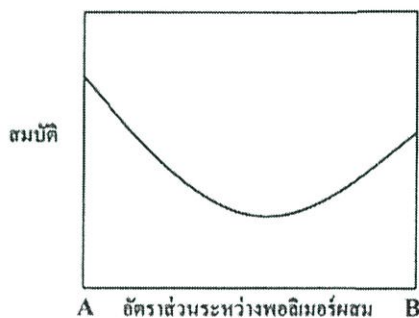
พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. พอลิเมอร์ที่ผสมเข้ากันได้ (Miscible blend) หมายถึง พอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter,  $\delta$ ) ใกล้เคียงกันเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นวัฏภาคเดียวกัน โดยทั่วไปสมบัติที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรงหรืออย่างน้อยที่สุดเป็นเส้นโค้งสม่ำเสมอ แสดงดังรูป



รูปที่ 2.8 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเข้ากันได้ (Miscible) [25]

2. พอลิเมอร์ที่ไม่ผสมเข้ากัน (Immiscible blend) หมายถึงพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลายต่างกันมาก ทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิดไม่ผสมเข้ากันได้ และแยกออกเป็นแต่ละวัฏภาค โดยระหว่างวัฏภาคอาจจะมีการดึงดูดระหว่างกันเพียงเล็กน้อย ทำให้เกิดบริเวณที่อ่อนแอด้วยเหตุนี้จึงเกิดการเสียหายได้แม้ในกรณีที่มีความเค้นต่ำมากๆ ทั้งทางกล ทางความร้อน หรือทางเคมี จากนั้นสมบัติของพอลิเมอร์ผสมอาจจะลดต่ำลงมากกว่าพอลิเมอร์แต่ละตัวที่มีอยู่ พอลิเมอร์ดังกล่าวแสดงในรูป



รูปที่ 2.9 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีไม่ผสมเข้ากันได้ (Immiscible) [25]

## 2.8 กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด [27]

เทคนิคการกดอัด (Compression molding) เป็นเทคนิคการขึ้นรูปพอลิเมอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ในปัจจุบันยังมีการใช้เทคนิคการอัดพลาสติกกลุ่มเทอร์โมเซตและยาง นอกจากนี้ยังเป็นที่ยอมรับใช้กับเทอร์โมพลาสติกที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคอื่นยาก

วิธีการขึ้นรูปทำได้โดยนำวัสดุผสมเข้าไปในแม่พิมพ์ และให้ความร้อนขณะทำการกดอัด จากนั้นใช้ระบบหล่อเย็นโดยใช้น้ำไหลหมุนเวียนเข้าสู่ระบบท่อใกล้ช่องว่างของแม่พิมพ์ ความดันที่ใช้ในการอัดเบ้าต้องใช้น้อยที่สุดแต่มากพอที่ทำให้พลาสติกไหลเต็มช่องว่างแม่พิมพ์ แต่ไม่สูงจนทำให้พลาสติกรั่วไหลออกจากรอยแยกของแม่พิมพ์ ระดับความดันที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูป

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mouasavi S. A. และคณะ [28] ศึกษาเกี่ยวกับผลของการเตรียมที่มีต่อสัณฐานวิทยา (Morphology) และสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeation properties) ของฟิล์ม PE และ EVA พบว่าความหนาของฟิล์ม PE และฟิล์ม EVA เพิ่มขึ้น มีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซลดน้อยลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ  $\text{CO}_2$  และ  $\text{O}_2$  ในฟิล์มทั้งสอง พบว่าก๊าซ  $\text{CO}_2$  มีความสามารถในการซึมผ่านมากกว่าก๊าซ  $\text{O}_2$  เนื่องจากก๊าซ  $\text{CO}_2$

มีขนาดเล็กกว่าก๊าซ  $O_2$  และมีความหนาแน่นของโมเลกุลสูงกว่า จึงส่งผลให้มีความสามารถในการซึมผ่านที่มากกว่า ในทางเดียวกันฟิล์ม EVA มีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ  $CO_2$  สูงกว่าฟิล์ม PE อย่างมาก เนื่องจากการมีหมู่ไวนิลอะซิเตต (VA group) ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้วจึงเกิดการดูดซับและส่งผ่านก๊าซ  $CO_2$  ที่มีขั้วได้ดียิ่งขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของ VA ไม่ส่งผลกับความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ  $O_2$  ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

Faker M. และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาสมบัติการไหล, สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PE/EVA กับพฤติกรรมทางความร้อน จากการศึกษาการไหลของ PE และ EVA (VA 9%) ที่มีอันตรกิริยาบริเวณผิวสัมผัส พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PE สูงจะมีอันตรกิริยาสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ EVA สูง ซึ่งนำไปสู่การกระจายตัวที่ดีในโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสม มีความหนืดและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น โดยในการทดลองใช้เครื่อง Rheometric mechanical spectrometer (RMS) วัดสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสม PE/EVA ในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อศึกษาสันฐานวิทยาโดยใช้ SEM พบว่าพอลิเมอร์ผสมของ PE/EVA เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วน EVA จะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของบริเวณ EVA เพิ่มขึ้นด้วย การกระจายขององค์ประกอบในสันฐานวิทยา สังเกตได้จากพอลิเมอร์ผสมที่มี EVA จะมีการกระจายของขนาดอนุภาคมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PE สูง ดังนั้นการศึกษาสันฐานวิทยา จะมีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์ผสมที่มี PE สูง และเมื่อทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนพอลิเมอร์ผสม พบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) ของ PE ลดลง เนื่องจากผลการละลายของ EVA หรือการเกิดผลึกร่วมของ PE กับ EVA การเกิดผลึกร่วมสูงขึ้นในพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตรา 90/10 ทำให้ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น และการดึงยึด ณ จุดขาด ลดลง เพราะการเกิดผลึกร่วมทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างภูมิภาคเพิ่มขึ้น และความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่จะลดลง

Marais S. และคณะ [30] ได้ศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำ, ก๊าซ  $CO_2$  และ  $O_2$  ของแผ่นฟิล์ม EVA ที่มีปริมาณ VA ต่างกัน โดยใช้วิธีการหล่อแบบสารละลาย (Casting solution) ในการเตรียมฟิล์ม พบว่าเมื่อปริมาณ VA เพิ่มมากขึ้น สัมประสิทธิ์การละลาย (Solubility coefficients) ของฟิล์มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเป็นผลึกของ EVA ลดลง และการดูดซึมน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้น นำไปสู่ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่ดีขึ้น เนื่องจากมีหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้นทำให้ความมีขั้วเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการผสมพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ลงไปใน EVA ด้วย เพื่อศึกษาสมบัติในด้านเดียวกันของพอลิเมอร์ผสม พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อปริมาณ PVC เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีหมู่ VA ที่มีขั้วเข้าไปสร้างพันธะกับ PVC ซึ่งไปลดจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วที่จะไปเกิดอันตรกิริยากับน้ำ สำหรับ

ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ  $\text{CO}_2$  และก๊าซ  $\text{O}_2$  พบว่าเมื่อปริมาณ VA ที่เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวแปรสำคัญที่ช่วยในการเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ กล่าวคือเมื่อปริมาณ VA เพิ่มขึ้นทำให้องศาความเป็นผลึกของแผ่นฟิล์มลดลง ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซจะเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของ EVA จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากมีโอกาสดังกล่าวที่เพิ่มระหว่างหมู่ที่มีขั้วสูงขึ้น

Sadeghi M. และคณะ [31] ได้ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  และ  $\text{CO}_2$  ผ่านฟิล์ม EVA (VA 28%) ผสมกับซิลิกา โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของซิลิกาที่แตกต่างกัน คือ Si 5%, 6% และ 10% เตรียมฟิล์มด้วยวิธีการหล่อแบบสารละลาย พบว่าเมื่อฟิล์ม EVA/Si มีปริมาณอนุภาคซิลิกามาก จะทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  และ  $\text{CO}_2$  ผ่านฟิล์มได้ดี เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานมากขึ้น ความเป็นผลึกลดลง จึงมีช่องว่างให้ก๊าซผ่านฟิล์มได้มากขึ้น

นันทวรรณ ม่วงมี [3] ได้ศึกษาเตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์จาก LDPE โดยมีการเติมซีโอไลต์เอเพื่อเพิ่มสมบัติการซึมผ่านไอน้ำ และนำ EVA มาผสมเพิ่มการกระจายตัวได้ดีของซีโอไลต์เอในฟิล์ม LDPE ผลการทดลองพบว่าฟิล์ม LDPE/EVA มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่าขึงมอดูลน้อยกว่าฟิล์ม LDPE และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ EVA มากขึ้น ในขณะที่การมีปริมาณ EVA มากขึ้น ทำให้การซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ฟิล์มสูตร LE(80/20) กับ LE(75/25) มีค่าไม่แตกต่างกัน จึงเลือกสูตรฟิล์ม LDPE/EVA อัตราส่วนเท่ากับ 80/20 โดยน้ำหนัก ที่มีปริมาณส่วนของ EVA มากมาใส่ซีโอไลต์เอเพื่อเพิ่มการซึมผ่านของไอน้ำ พบว่าฟิล์ม LE(80/20) ที่มีซีโอไลต์เอ 25% โดยน้ำหนัก (LE(80/20)25) มีค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์ม LE(80/20) และฟิล์ม LDPE เนื่องจากสมบัติที่มีขั้ว, ความเป็นอสัณฐานของ EVA และซีโอไลต์เอที่ดูดซับไอน้ำได้ดี จึงช่วยปรับปรุงฟิล์มให้มีสมบัติการซึมผ่านไอน้ำได้ดีอย่างมาก

Lasagaba'ster A. และคณะ [32] ได้ศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP และ EVOH (มีปริมาณเอทิลีน 32.9% โมล) ในอัตราส่วนผสม PP/EVOH เท่ากับ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 โดยการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีกดอัด พบว่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ EVOH เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการรวมตัวของน้ำรอบๆ หมู่ไฮดรอกซิลของ EVOH ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้วที่สร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงกับโมเลกุลของน้ำ และผลจากการศึกษาฐานวิทยาศาสตร์พบว่าบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง PP และ EVOH มีรูพรุนขนาดเล็กอยู่ ซึ่งรูพรุนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อสัดส่วนของ EVOH เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากความเป็นผลึกที่แตกต่างกันของ PP และ EVOH โดยที่ความเป็นผลึกของ PP เพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสม EVOH ตั้งแต่ 20% แต่การ

ตกผลึกของ EVOH ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ความเป็นรูพรุนนี้ทำให้มีการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกัน แต่การเพิ่มขึ้นของไอน้ำเนื่องจากความมีขั้วของ EVOH เป็นกลไกที่เกิดขึ้นได้มากกว่า

Muriel-Galet V. และคณะ [33] ได้ศึกษาฟิล์ม PP ที่เคลือบชั้นด้วย EVOH (มีปริมาณเอทิลีน 29% โมล) ผสมกับน้ำมันหอมระเหยออริกานอล (OEO) โดยใช้การพิมพ์แบบเซาะร่อง ทำการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซพบว่าในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 0% การซึมผ่านของก๊าซ CO<sub>2</sub> และก๊าซ O<sub>2</sub> ลดลงมากกว่า 100 เท่า ซึ่งคาดว่าเป็นเพราะสมบัติการป้องกันของ EVOH แต่ในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 90% การซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ในฟิล์ม PP ที่เคลือบด้วยชั้น EVOH ทำให้ฟิล์มมีปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น ก๊าซจึงสามารถซึมผ่านไปได้ง่าย ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว EVOH มีสมบัติการป้องกันก๊าซได้ดีเมื่ออยู่ในที่แห้ง อย่างไรก็ตาม เมื่อสัมผัสกับผักสดชั้น EVOH จะมีความชื้นทำให้สมบัติการป้องกันนั้นลดลงอย่างมาก การเคลือบชั้น EVOH บนฟิล์ม PP ทำให้ฟิล์ม PP มีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่มีค่าการดึงยืด ณ จุดขาดลดลง สามารถอธิบายได้จากความแตกต่างของสถานะของ EVOH และ PP ซึ่ง PP มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าอุณหภูมิห้องทำให้อยู่ในสถานะคล้ายยาง ในขณะที่ EVOH มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงกว่าอุณหภูมิห้องทำให้อยู่ในสถานะคล้ายแก้ว EVOH จึงแข็งกว่า PP

Ayvaz H. และคณะ [34] ได้ศึกษาสมบัติของบรรจุภัณฑ์ในการเก็บรักษาแครอทให้มีคุณภาพ โดยการใช้ความดันและความร้อนเข้าไปช่วยในกระบวนการ (PATP) ที่ 600 MPa และ 110°C ซึ่งตัวอย่างถูกบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ฟิล์ม Nylon/EVOH/EVA, Nylon/EVA และ MetPET (Metalized Polyethylene terephthalate)/PE โดยวิเคราะห์สี, สาร  $\beta$ -carotene และจุลินทรีย์ต่างๆ ของแครอท ใน 12 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 25 และ 37°C พบว่าเมื่อใช้ความดันเข้าไปช่วยและให้ความร้อนก่อนในกระบวนการขึ้นรูป ทำให้ฟิล์ม Nylon/EVOH/EVA และ Nylon/EVA เกิดเปลี่ยนแปลงของอัตราการซึมผ่านของก๊าซ O<sub>2</sub> เล็กน้อย แต่ฟิล์ม Nylon/EVA จะมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ O<sub>2</sub> มากกว่าฟิล์ม Nylon/EVOH/EVA จึงไม่สามารถจัดเก็บรักษาสีและสาร  $\beta$ -carotene ไว้ได้ จึงทำให้ฟิล์ม Nylon/EVOH/EVA เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ดีที่สุดในการเก็บรักษาแครอทให้มีคุณภาพได้ดี ซึ่งสังเกตจากสีและสาร  $\beta$ -carotene ที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในขณะที่ฟิล์ม MetPET/PE เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อให้ความดันและความร้อนเข้าไปช่วยในกระบวนการขึ้นรูปจึงมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ O<sub>2</sub> เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สีและสาร  $\beta$ -carotene ของแครอทมีคุณภาพเสื่อมลงในระหว่างการจัดเก็บ

จิตรา ศักดาพิสุทธิ และคณะ[4] ได้ศึกษาการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่เตรียมจาก LDPE/EVOH เปรียบเทียบกับฟิล์มจาก LDPE/EVA และมีการเติมซีโอโลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าฟิล์ม LDPE/EVOH มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและค่า Young's Modulus สูงกว่าฟิล์ม LDPE/EVA เนื่องจาก EVOH มีหมู่ไฮดรอกซิลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนทำให้มีโครงสร้างที่แข็ง สามารถเกิดผลึกได้ ในขณะที่ EVA ในฟิล์ม LDPE/EVA แสดงความเป็นอสัณฐาน ฟิล์ม LDPE/EVOH และ LDPE/EVA ที่มีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกันมีค่าการซึมผ่านไอน้ำใกล้เคียงกันเนื่องจากเกิดการแข่งขันระหว่างสัณฐานวิทยาและความมีขั้ว เมื่อเพิ่มปริมาณ EVOH ในฟิล์ม LDPE/EVOH ค่าออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการดึงยึด ณ จุดขาดมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม การมีขั้วเพิ่มขึ้นของฟิล์มโดยใช้ EVOH เพิ่มขึ้น ไม่ได้ช่วยให้การซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้นอย่างชัดเจน ค่าการซึมผ่านไอน้ำสามารถเพิ่มได้โดยการเติมซีโอโลต์เอ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [3-4] เมื่อเปรียบเทียบฟิล์ม LDPE กับฟิล์ม LDPE/EVA และฟิล์ม LDPE/EVOH พบว่าฟิล์ม LDPE/EVA มีสมบัติการซึมผ่านไอน้ำดีแต่สมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงลดลง ในขณะที่ฟิล์ม LDPE/EVOH มีสมบัติการซึมผ่านไอน้ำใกล้เคียงกับฟิล์ม LDPE/EVA แต่มีสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงดี แต่ค่าการดึงยึดต่ำลง ในโครงการพิเศษนี้จึงทำการเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมหลายชนิดด้วยกัน คือ LDPE ผสมกับโคพอลิเมอร์ (ได้แก่ EVA และ/หรือ EVOH) ในอัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาในเชิงเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่ง EVA จะสามารถเพิ่มความมีขั้วและความเป็นอสัณฐานเพื่อให้มีการซึมผ่านไอน้ำดี ส่วน EVOH สามารถเพิ่มความมีขั้วและความแข็งแรงให้กับฟิล์ม และศึกษาผลของการมีและไม่มีซีโอโลต์เอเพื่อช่วยให้สมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มดีขึ้น

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 สารเคมี

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เกรด LD1905F จากบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด
2. เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) มีไวนิลอะซิเตต (VA) 27.5% เกรด UL00728CC จากบริษัท Exxon Mobile Chemical จำกัด
3. ซีโอไลต์เอ (Zeolite A) เกรดการค้า จากบริษัท พีคิวเคมิคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด
4. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N<sub>2</sub>)
5. เอทานอล (Absolute ethanol) เกรดวิเคราะห์
6. เมทานอล (Methanol) เกรดการค้า
7. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, KHP)
8. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH)
9. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) เข้มข้น 0.1 M
10. ไซลีน (Xylene)
11. เทตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran, THF)

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LDPE\*

สมบัติ	LD1905F	หน่วย
ดัชนีการไหล (Melt flow rate, 190°C/2.16 kg)	5	g/10min
ความหนาแน่น (Density)	0.919	g/cm <sup>3</sup>
ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)	TD:9.81*	MPa
การดึงยืด ณ จุดขาด (Tensile elongation at break)	MD:400*, TD:700*	%
จุดหลอมเหลว (Melting point)	108	°C

\*\*ฟิล์มหนา 40  $\mu\text{m}$  MD : ทดสอบตามแนวเครื่องจักร, TD : ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

\*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	g/10min
ความหนาแน่น (Density)	0.951	g/cm <sup>3</sup>
การดึงยืด ณ จุดขาด (Tensile elongation at break)	100	%

\*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

### ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ Zeolite A\*

สมบัติ	Zeolite A	หน่วย
ลักษณะ	ผงละเอียด	-
สี	ขาว	-
% ความเป็นผลึก	99%	-
ความหนาแน่น (Bulk density)	366	g/cm <sup>3</sup>
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	2-5 และ < 10 (90%)	µm
ความแข็ง	4-5	Mohs

\*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

## 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal Mixer, รุ่น MX500-D75L90 ; Chareon Tut Co.,Ltd.)
2. เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding, รุ่น MGLP-20AT ; Mach Group (1992) Co.,Ltd.)
3. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder, รุ่น Bosco A600 ; Bosco Engineering Co.,Ltd.)
4. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM รุ่น LR 5K ; LLOYD Instrument Co.,Ltd.)
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM รุ่น JSM-5410LV ; JEOL Co.,Ltd.)
6. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR. รุ่น NICOLET 6700 ; Becthai Bangkok Equipment & Chemical Co.,Ltd.)
7. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC, รุ่น DSC 204 F1 Phoenix® ASC ; NETZSCH Co.,Ltd.)

8. เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeation analyzer, รุ่น Inc 7002 ; Illinois Instrument Co.,Ltd.)
9. เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle system, รุ่น OCA20 ; Dataphysics Co.,Ltd.)
10. เครื่องปั่นลม (รุ่น BEBICON 400 ; Hitachi Co.,Ltd.)
11. คีม
12. ครุฑชิลิต
13. ตู้อบลมร้อน
14. เครื่องชั่งละเอียด
15. ไมโครมิเตอร์
16. กระจกใสไนโตรเจน
17. บริษัทเครื่องแก้ว
18. แผ่นใสชนิดถ่ายเอกสาร
19. เตาลูมให้ความร้อน (Heating mantle)
20. เครื่องปั่นกวน (Stirrer)
21. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
22. ตู้ดูดควัน
23. กระจกน้ำกลั่น
24. ช้อนตักสาร (Spatula)
25. คอนเดนเซอร์ (Condenser)
26. สายยาง
27. จุกยาง
28. เครื่องกรองสุญญากาศ
29. กระจกกรองเบอร์ 2
30. กระจกลิตมัส
31. เดซิเคเตอร์ (Desiccator)
32. เครื่องอัลตราโซนิก

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.3.1 การสังเคราะห์ EVOH จาก EVA

ก. การเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP) เข้มข้น 0.35 M

1. ชั่งสาร KHP ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 ml จำนวน 7.1480 g จากนั้นนำมาละลายด้วยน้ำกลั่น ใช้แท่งแก้วคนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
2. เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

ข. การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เข้มข้น 1.8 M

1. ชั่งสาร KOH จำนวน 15.1200 g
2. ตวงเอทานอลจำนวน 150 ml ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml จากนั้นนำ KOH ใส่ลงไป ในบีกเกอร์ที่มีเอทานอลอยู่ พร้อมทั้งปั่นกวนอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

ค. การไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย KOH โดยใช้สารละลาย KHP เป็นสารละลายมาตรฐาน

1. เจือจางสารละลาย KOH จากข้อ ข. เป็น 0.36 M เพื่อใช้ในการไทเทรต โดยปิเปตสารละลาย KOH จำนวน 20 ml ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอลจนถึงขีดบอกปริมาตร
2. ปิเปตสารละลายมาตรฐาน KHP จำนวน 25 ml ลงในขวดรูปชมพู่ 250 ml
3. หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน จำนวน 2-3 หยด
4. นำไปไทเทรตกับสารละลาย KOH ที่อยู่ในบิวเรต จนกระทั่งถึงจุดยุติ คือสารละลายเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีชมพูอ่อน
5. จดบันทึกปริมาตรของสารละลาย KOH ที่ใช้ แล้วทำซ้ำอีกครั้ง หาค่าเฉลี่ย
6. คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย KOH

ง. การสังเคราะห์ EVOH จากการไฮโดรไลซิส EVA

1. ละลายเม็ดพลาสติก EVA จำนวน 30 g ใน Xylene 300 ml ทำในขวดก้นกลมขนาด 500 ml โดยใช้อุณหภูมิ 100°C จนกระทั่งสารละลายที่ได้เป็นเนื้อเดียวกัน
2. ใส่สารละลาย KOH ที่เตรียมได้โดยควบคุมให้จำนวนโมลของ KOH ใกล้เคียงกับ VA ทั้งนี้ให้เพื่อปริมาณ KOH มากกว่าประมาณ 20% โดยปริมาตร

3. คัดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการรีฟลักซ์ ใส่เศษกระเบื้องในขวดปฏิกิริยา 2-3 ชิ้นก่อนนำไปทำการรีฟลักซ์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

4. ทำการตกตะกอน EVOH ในเมทานอล โดยเมทานอลอยู่ในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร ค่อยๆ หยด EVOH ลงไป พร้อมทั้งปั่นกวนอย่างรวดเร็ว

5. ตั้งทิ้งไว้ 1 คืนในตู้ดูดควัน เพื่อระเหยตัวทำละลายออก จากนั้น ล้างตะกอนที่ได้ด้วยเมทานอล แล้วกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ทำการล้างตะกอนซ้ำจนตะกอนที่ได้มีฤทธิ์เป็นกลาง

6. นำตะกอนไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

### 3.3.2 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ โดยทำการผสมตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมดโดยน้ำหนัก

สูตร	สูตร	ปริมาณสาร (%)		
		LDPE	EVA	EVOH
1	L100	100	-	-
2	L80EA20	80	20	-
3	L80EA15EO5	80	15	5
4	L80EA10EO10	80	10	10
5	L80EA5EO15	80	5	15
6	L80EO20	80	-	20

ซึ่งส่วนผสม LDPE, EVA และ EVOH ให้ได้ตามตาราง ในการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณพอลิเมอร์ผสมรวม 300 g เขย่าเพื่อให้ผสมกัน จากนั้นนำมาเทใส่ในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 160°C
- ความเร็วรอบ (Screw speed) 60 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 30 min

นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดเป็นเม็ดละเอียด เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมสำหรับการอัดขึ้นรูปฟิล์มต่อไป

### 3.3.3 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ

เตรียมโดยนำซีโอไลต์เอไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาผสมกับ LDPE, EVA และ EVOH ให้มีปริมาณซีโอไลต์เอ เป็น 20% โดยน้ำหนัก ในการผสมใช้ปริมาณสารผสมรวม 300 g โดยนำเม็ดพอลิเมอร์ใส่ลงไปเครื่องผสมระบบปิด โดยตั้งสถานะของเครื่องดังข้อ 3.3.2

นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดเป็นเม็ดละเอียด เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมสำหรับการอัดขึ้นรูปฟิล์มต่อไป

ตารางที่ 3.5 สูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ (โดยน้ำหนัก)

สูตร	ปริมาณสารพอลิเมอร์ (%)			ปริมาณซีโอไลต์เอ (%)
	LDPE	EVA	EVOH	
L80EA20Z20	64	16	-	20
L80EA10EO10Z20	64	8	8	20
L80EO20Z20	64	-	16	20

### 3.3.4 การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการอัด

นำพอลิเมอร์ผสมสูตรที่บดแล้วไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นขึ้นรูปฟิล์ม โดยตั้งสถานะของเครื่องกดอัดดังนี้ เพื่อควบคุมความหนาให้ได้ 50-60  $\mu\text{m}$  โดยชั่งน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมในแต่ละครั้งประมาณ 1 g ใช้แม่พิมพ์ประกบขนาด 20×20×1  $\text{cm}^3$

- อุณหภูมิในการกดอัด 200°C
- ความดันในการกดอัด 1800 psi
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์ 5 min
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์ 5 min
- เวลาในการกดอัดร้อน 5 min
- อุณหภูมิในการกดอัดเย็น 15°C
- เวลาในการกดอัดเย็น 5 min

### 3.3.5 ความหนาของฟิล์ม

วัดความหนาของฟิล์มทุกชนิดที่ผลิตขึ้นมา โดยใช้ไมโครมิเตอร์ ประมาณ 50 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

### 3.3.6 การวิเคราะห์ฟิล์มด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

#### 3.3.6.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ EVOH ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส EVA

นำผง EVOH ที่สังเคราะห์ได้มาตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) แบบ Attenuated Total Reflectance (ATR) ในช่วงเลขคลื่น  $370\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $4000\text{ cm}^{-1}$  จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนระหว่าง Absorbance ของพีค C=O Stretching ที่  $1714\text{ cm}^{-1}$  กับ Absorbance ของพีค C-H Rocking ที่  $720\text{ cm}^{-1}$  และ อัตราส่วนระหว่าง Absorbance ของพีค O-H Stretching ที่  $3400\text{ cm}^{-1}$  กับ Absorbance ของพีค C-H Rocking ที่  $720\text{ cm}^{-1}$  เพื่อหาปริมาณของหมู่ C=O Stretching และหมู่ O-H Stretching ในตัวอย่าง ตามลำดับ

#### 3.3.6.2 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มตัวอย่าง และซีโอไลต์เอ

นำพอลิเมอร์ผสมสูตรและพอลิเมอร์สูตรที่มีซีโอไลต์เอมาอัดขึ้นรูปตามขั้นตอน 3.3.4 แล้วนำตัวอย่างที่ได้มาตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR แบบ ATR ในช่วงเลขคลื่น  $370\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $4000\text{ cm}^{-1}$

### 3.3.7 การวิเคราะห์ปริมาณซีโอไลต์เอในสูตรพอลิเมอร์ผสม

ทำการหาปริมาณซีโอไลต์เอที่มีอยู่ในสูตรพอลิเมอร์ผสม ด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูง โดยมีวิธีการดังนี้

- นำครุชชีเบิ้ลแบบถ้วยมาเผาด้วยเตาเผา (Furnace) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำครุชชีเบิ้ลที่ผ่านการเผาแล้วมาชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่งพร้อมทั้งจดบันทึกค่า โดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนักของครุชชีเบิ้ล

- นำครุชชีเบิ้ลที่ผ่านการเผาแล้วมาใส่สูตรตัวอย่างโดยให้มีปริมาณ 2 ใน 3 ของความสูงครุชชีเบิ้ล จากนั้นมาชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่งพร้อมทั้งจดบันทึกค่าโดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนักของครุชชีเบิ้ลก่อนเผา

- นำครุชชีเบิ้ลที่มีตัวอย่างที่ผ่านการชั่งแล้วมาเผาด้วยตะเกียงแอลกอฮอล์จนกระทั่งไม่เห็นเปลวไฟในครุชชีเบิ้ล จากนั้นทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1 ค่าโดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนักของครุชชีเบิ้ลหลังเผา โดยปริมาณของซีโอไลต์เอในสูตรพอลิเมอร์ผสม สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$\text{น้ำหนักสารที่เหลือ} = \text{น้ำหนักของครุชชีเบิ้ลหลังเผา} - \text{น้ำหนักของครุชชีเบิ้ล}$$

$$\text{น้ำหนักสารทั้งหมด} = \text{น้ำหนักของครุชชีเบิ้ลก่อนเผา} - \text{น้ำหนักของครุชชีเบิ้ล}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของซีโอดีเอ} = \frac{\text{น้ำหนักสารที่เหลือ} \times 100}{\text{น้ำหนักสารทั้งหมด}}$$

### 3.3.8 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก

นำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง DSC ซึ่งน้ำหนักฟิล์มประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อน ด้วยอัตราการให้ความร้อน  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ  $160^{\circ}\text{C}$  และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จนถึงอุณหภูมิห้อง นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) อุณหภูมิการตกผลึก ( $T_c$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกตามมาตรฐาน ASTM E794 [35]

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

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

เมื่อ  $\Delta H_f$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก (ที่ตำแหน่ง  $T_m$ )

$\Delta H_f^{\circ}$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่าเท่ากับ  $293 \text{ J/g}$  [36]

### 3.3.9 การศึกษาสัณฐานวิทยา

#### 3.3.9.1 การกระจายตัวของซีโอดีเอ

นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาตัดให้มีขนาด  $1 \times 3 \text{ cm}^2$  แล้วนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ นำชิ้นงานส่วนพื้นที่ภาคตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของซีโอดีเอด้วยเครื่อง SEM

#### 3.3.9.2 การกระจายตัวของ EVA และ/หรือ EVOH

นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาตัดให้มีขนาด  $1 \times 3 \text{ cm}^2$  แล้วนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ แล้วนำชิ้นงานที่หักไปแช่ในตัวทำละลายที่บรรจุในหลอดทดลอง 15 ml เพื่อทำการโซนิคเคตด้วยเครื่องอัลตราโซนิคที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดย

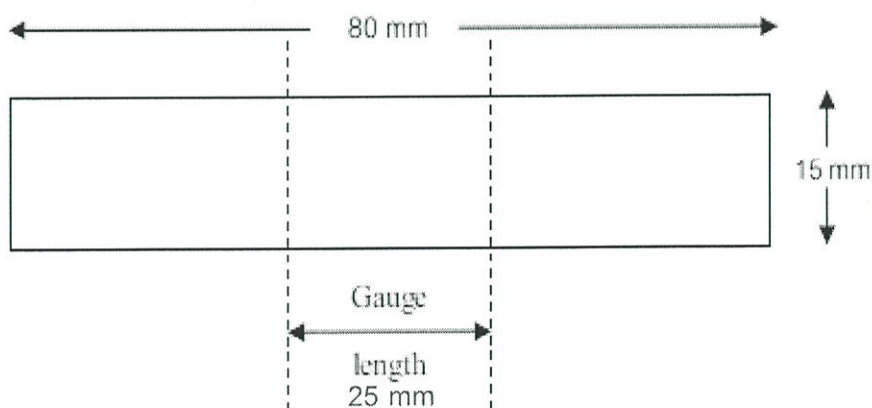
- กรณีฟิล์ม LDPE/EVA ใช้ Xylene เป็นตัวทำละลาย เพื่อสกัด EVA ออกจากชิ้นงาน
- กรณีฟิล์ม LDPE/EVOH ใช้ THF ผสมกับ Xylene ในอัตราส่วน THF/Xylene เท่ากับ 90/10 โดยปริมาตร เป็นตัวทำละลายสำหรับ EVOH เพื่อสกัดเอา EVOH ออกจากชิ้นงาน
- กรณีฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH ใช้ THF ผสมกับ Xylene สกัด EVOH ออกก่อนแล้ว ใช้ Xylene เป็นตัวทำละลาย สกัด EVA ออกจากชิ้นงาน ตามลำดับ

จากนั้นนำชิ้นงานที่ถูกสกัดไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เคลือบพื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานด้วยทองคำ แล้วนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของ EVA และ/หรือ EVOH ด้วยเครื่อง SEM

### 3.3.10 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

การทดสอบการรับแรงดึงเพื่อหา ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break) ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (% Elongation at yield) ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่า Young's modulus (Young's modulus) ตามมาตรฐาน ASTM D882 [37] โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ใช้สภาวะที่ทดสอบดังนี้

- |                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| - โหลดเซลล์ (Load cell)               | 100 N      |
| - ความเร็วในการดึง (Test speed)       | 100 mm/min |
| - ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) | 25 mm      |



รูปที่ 3.1 ลักษณะของชิ้นงานตัวอย่าง

ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก, ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด, ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก, ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดและค่า Young's modulus สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)} = F_{\text{at yield}} / A$$

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)} = F_{\text{at break}} / A$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (\% Elongation at yield)} = \frac{(l_{\text{at yield}} - l_0) \times 100}{l_0}$$

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

$$\text{ค่า Young's modulus (Young's modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}}$$

เมื่อ  $F_{\text{at yield}}$  = แรงดึงยืดขึ้นงาน ณ จุดคราก

$F_{\text{at break}}$  = แรงดึงยืดขึ้นงาน ณ จุดขาด

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

$l_{\text{at yield}}$  = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดคราก

$l_{\text{at break}}$  = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด

$l_0$  = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length)

เท่ากับ 25 mm

หมายเหตุ ค่า Young's modulus คำนวณจากค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 1 และ 3% การดึงยืด)

### 3.3.11 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

ส่งตัวอย่างทดสอบที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ทำการหาปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มพลาสติก ในระยะเวลาที่กำหนดและภายใต้สภาวะที่คงที่มีหน่วยเป็น  $\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$  ที่อุณหภูมิ  $38^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ 90% โดยวิธี Transfer time method โดยใช้เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ ตัดชิ้นงานฟิล์มให้มีขนาด  $6 \times 6 \text{ cm}^2$  ตามมาตรฐาน ASTM F1249 [38]

### 3.3.12 การทดสอบมุมสัมผัส

นำพอลิเมอร์ผสมมาทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดตามข้อ 3.3.4 โดยใช้แม่พิมพ์ขนาด  $40 \times 40 \times 6 \text{ mm}^3$  ใช้เวลาในการให้ความร้อนและเวลาในการเย็นตัว 10 นาที ทำการตัดชิ้นงานตามขวางเพื่อทดสอบบริเวณพื้นผิวของพื้นที่ภาคตัดขวาง ใช้ปริมาตรหยดน้ำ  $2 \mu\text{L}$  ทำการบันทึกค่ามุมสัมผัสเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที วัดมุมที่หยดน้ำกระทำกับผิววัสดุด้วยเครื่อง Contact angle system ตามมาตรฐาน ASTM D5946 [39]

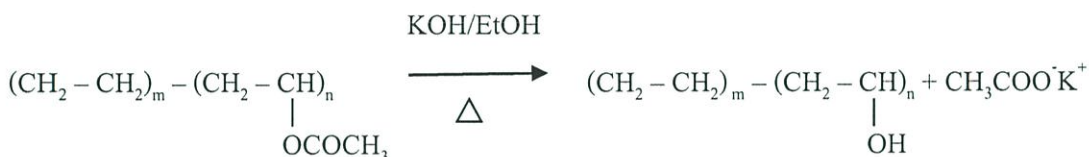
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการนำ EVA และ/หรือ EVOH ซึ่งเป็นสารที่มีขั้ว มาเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ ผสม LDPE/EVA/EVOH เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ และมีการใช้ซีโอไลต์เอที่มีความมีขั้วสูงเพื่อเพิ่มสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำให้แก่ฟิล์ม โดยผลการทดลอง แสดงดังต่อไปนี้

#### 4.1 การสังเคราะห์ EVOH และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

การสังเคราะห์ EVOH จากปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิส EVA แสดงดังสมการ



การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหมู่ไวนิลแอลกอฮอล์ (VOH) ใน EVOH ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส EVA ที่ปริมาณไวนิลอะซิเตต (VA) เท่ากับ 27.5%

โดย มวลโมเลกุลของ VA = 86 g/mol

มวลโมเลกุลของ VOH = 44 g/mol

EVA 100 g มี VA เท่ากับ 27.5 g และมีเอทิลีน เท่ากับ 72.5g

$$\text{VA } 27.5 \text{ g คิดเป็น VA} = \frac{27.5 \text{ g}}{86 \text{ g/mol}} = 0.3197 \text{ mol}$$

จากสมการ จำนวนโมลของ VA = จำนวนโมลของ VOH = 0.3197 mol

จะได้ น้ำหนักของ VOH = 0.3197 mol  $\times$  44 g/mol = 14.0668 g

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักรวมของ EVOH ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสสมบูรณ์} &= \text{น้ำหนักรวมของเอทิลีน} + \text{น้ำหนักรวมของ VOH} \\ &= 72.5 \text{ g} + 14.0668 \text{ g} \\ &= 86.5668 \text{ g} \end{aligned}$$

สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ VOH ใน EVOH ได้จาก

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ VOH} &= \frac{\text{น้ำหนักของ VOH}}{\text{น้ำหนักของ EVOH}} \times 100 \\ &= \frac{14.0668}{86.5668} \times 100 \\ &= 16.2\% \end{aligned}$$

การกำหนดชื่อย่อ EA คือ EVA ที่มีปริมาณ VA เท่ากับ 27.5%

EO คือ EVOH ที่มีปริมาณ VOH เท่ากับ 16.2%

ในการเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/EVA/EVOH และมีการเติมซีโอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก นำเสนอโดยใช้ตัวย่อเพื่อแสดงแทนสูตรต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตัวย่อแทนสูตรและสูตรผสมทั้งหมด

ลำดับ	ตัวย่อแทนสูตร	อัตราส่วนของ LDPE/EVA/EVOH (โดยน้ำหนัก)	Zeolite A (% โดยน้ำหนักสูตรผสม)
1	L100	100/0/0	-
2	L80EA20	80/20/0	-
3	L80EA15EO5	80/15/5	-
4	L80EA10EO10	80/10/10	-
5	L80EA5EO15	80/5/15	-
6	L80EO20	80/0/20	-
7	L80EA20Z20	80/20/0	20
8	L80EA10EO10Z20	80/10/10	20
9	L80EO20Z20	80/0/20	20

#### หมายเหตุ

สูตรที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ผลิตจากอัตราส่วน LDPE/EVA/EVOH

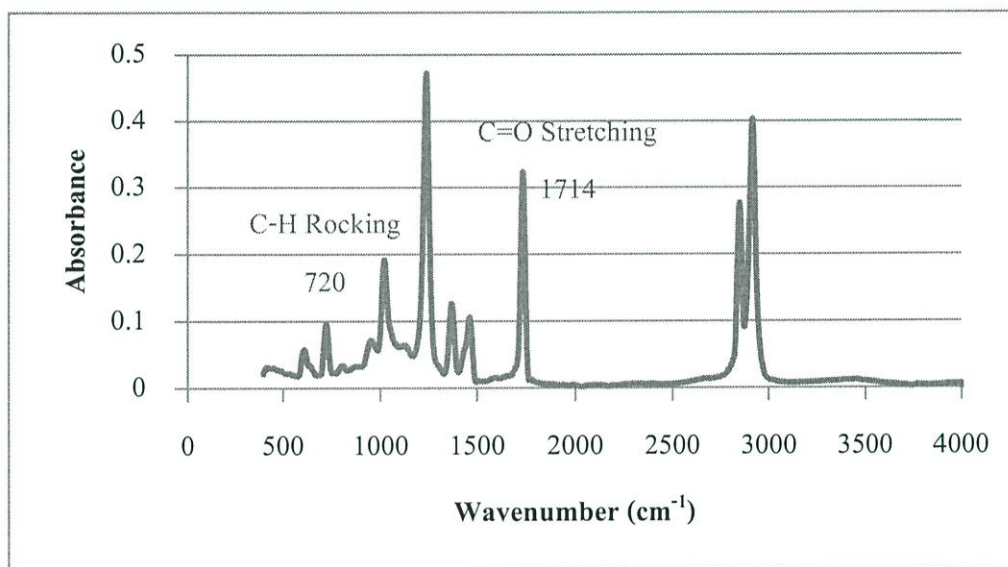
สูตรที่ 7, 8 และ 9 ผลิตจากการใช้ซีโอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก

## 4.2 การศึกษาผลของอัตราส่วน EVA/EVOH ในฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH

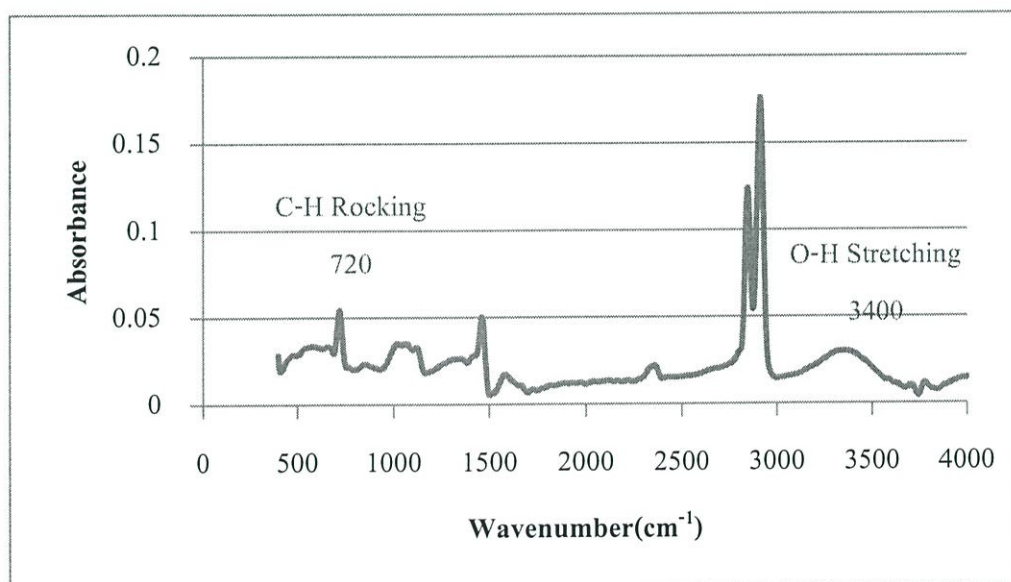
### 4.2.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน

#### 4.2.1.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ EVOH

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ EVOH ที่ได้จากปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิส EVA ด้วยการศึกษาคงจาก FT-IR จากรูปที่ 4.1 (a) โดย EVA จะมีหมู่ฟังก์ชันของ C=O Stretching ที่  $1714\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเมื่อทำการไฮโดรไลซิส EVA จะได้ EVOH สังเกตพบหมู่ฟังก์ชันของ O-H Stretching ที่ประมาณ  $3600\text{-}3300\text{ cm}^{-1}$  และการหายไปของหมู่ C=O Stretching ที่ตำแหน่ง  $1714\text{ cm}^{-1}$  ในรูปที่ 4.1 (b)



(a) EVA



(b) EVOH

รูปที่ 4.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเครื่อง FT-IR

จากรูปที่ 4.1 สามารถคำนวณหาค่าดัชนีคาร์บอนิล (CI) ซึ่งใช้แสดงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชัน C=O ใน EVA จากอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของหมู่ C=O Stretching ที่  $1714\text{ cm}^{-1}$  ต่อค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C-H Rocking ที่  $720\text{ cm}^{-1}$  และคำนวณหาค่าดัชนีไฮดรอกซิล (OHI) ซึ่งใช้แสดงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชัน O-H ใน EVOH ได้จากอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ O-H Stretching ที่  $3400\text{ cm}^{-1}$  ต่อค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C-H Rocking ที่  $720\text{ cm}^{-1}$  แสดงค่าดังตารางที่ 4.2

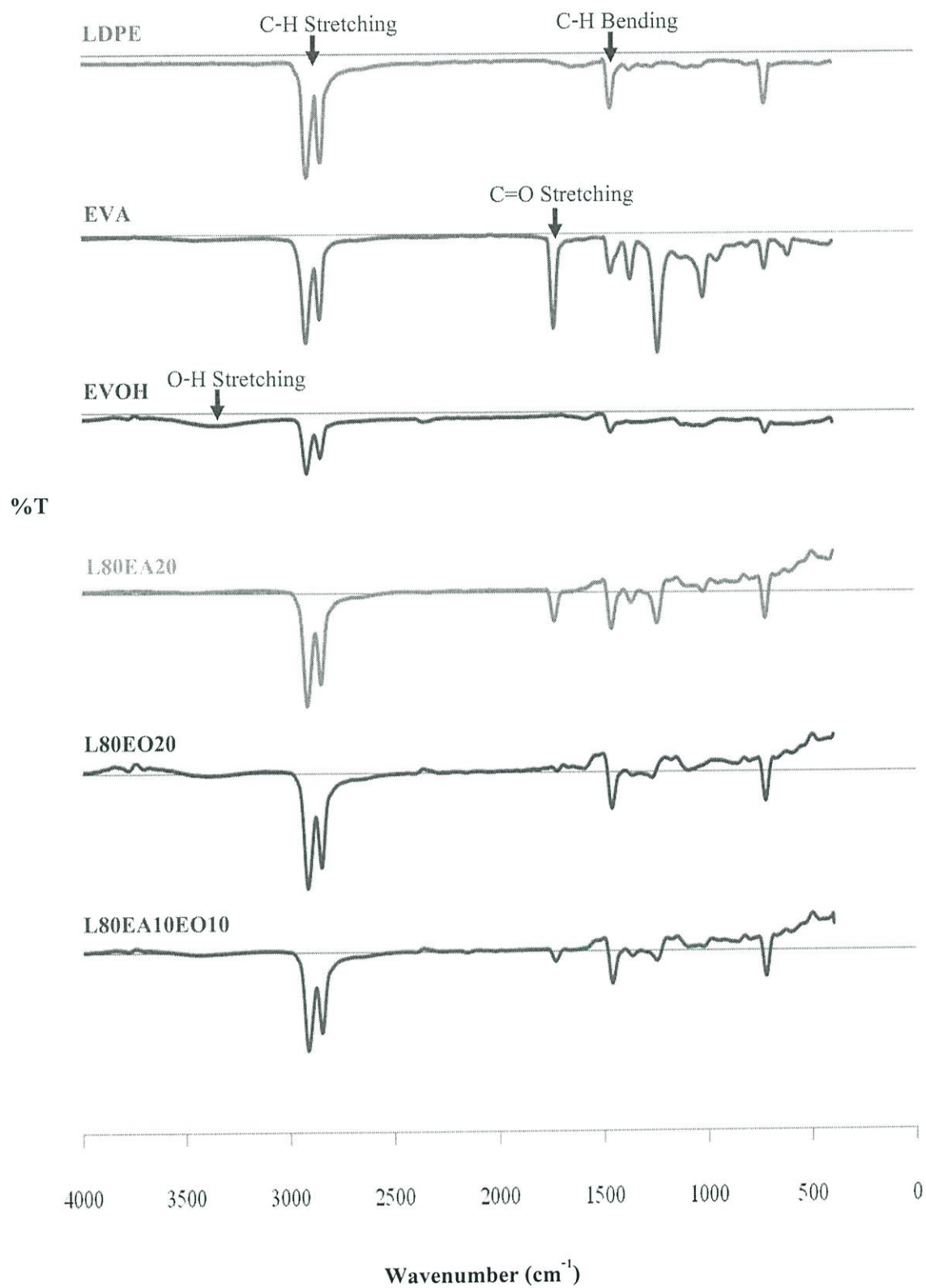
ตารางที่ 4.2 ค่าดัชนีคาร์บอนิลและไฮดรอกซิลของ EVA และ EVOH

ตัวอย่าง	ปริมาณ VA ใน EVA (%wt)	ปริมาณ VOH ใน EVOH (%wt)	ค่าดัชนีคาร์บอนิล	ค่าดัชนีไฮดรอกซิล
EVA	27.5%	-	3.39	0
EVOH	-	16.2%	0	0.58

EVA ได้ถูกสังเคราะห์ไปเป็น EVOH เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้สมบูรณ์ แสดงได้จาก EVOH ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่มีค่าดัชนีคาร์บอนิลเท่ากับศูนย์ แสดงว่าหมู่ VA ได้เปลี่ยนไปเป็นหมู่ VOH ได้หมด

#### 4.2.1.2 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH

จากการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH โดยเลือกตัวอย่างฟิล์มสูตร L80EA20, L80EO20 และ L80EA10EO10 เพื่อยืนยันการมีอยู่ขององค์ประกอบต่างๆ ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าสเปกตรัมที่ได้แสดงสัญญาณหมู่ C-H Stretching ของหมู่  $\text{CH}_3$  ในช่วง  $2960\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ C-H Bending ของ  $\text{CH}_2$  ในช่วง  $1470\text{--}1350\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ LDPE, EVA และ EVOH นอกจากนี้ยังพบสเปกตรัมที่แสดงสัญญาณหมู่ C=O Stretching ที่ประมาณ  $1714\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ EVA และ หมู่ O-H Stretching ที่ประมาณ  $3400\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ EVOH ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ตามต้องการ นอกจากนี้ในสูตร L80EO20 พบว่าเมื่อผสม EVOH เข้าไป อาจมีหมู่ฟังก์ชันบางส่วนเปลี่ยนแปลง จากหมู่ O-H Stretching ของ EVOH ไปเป็นหมู่ C=O Stretching เกิดขึ้นที่ประมาณ  $1700\text{ cm}^{-1}$  แสดงว่าโครงสร้างของ EVOH อาจเกิดการเสียสภาพทางความร้อน [40] จากกระบวนการผสมและการขึ้นรูปในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของฟิล์ม LDPE, EVA, EVOH และฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH

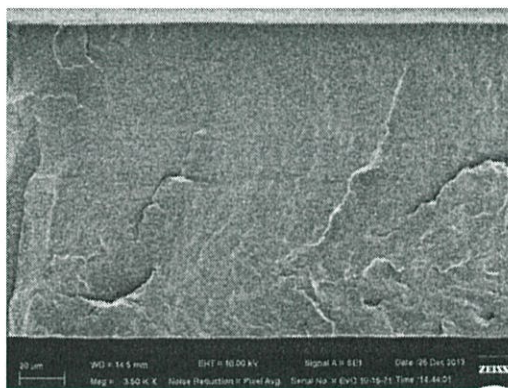
#### 4.2.2 ความหนาของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH

จากการวัดความหนาของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH พบว่ามีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 52-63  $\mu\text{m}$

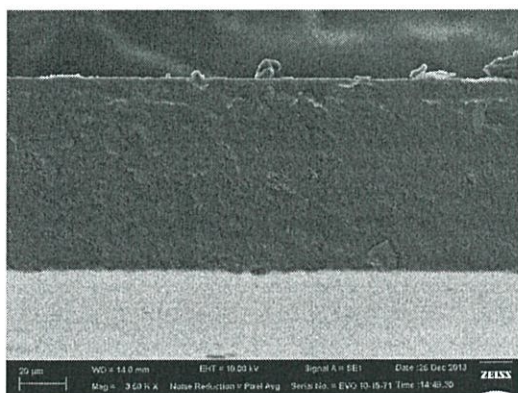
#### ตารางที่ 4.3 ความหนาของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH

สูตร	ความหนาเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
L100	$55 \pm 1$
L80EA20	$57 \pm 3$
L80EA15EO5	$60 \pm 3$
L80EA10EO10	$56 \pm 4$
L80EA5EO15	$56 \pm 3$
L80EO20	$56 \pm 4$

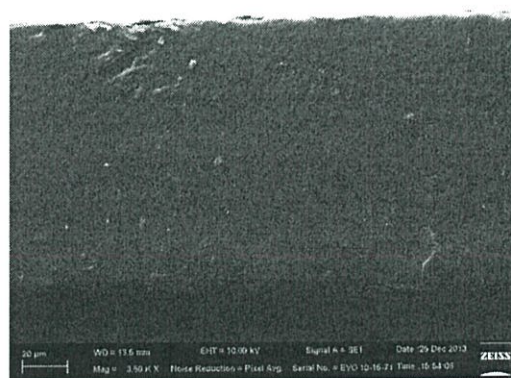
#### 4.2.3 การศึกษาผลของตัวทำละลายในฟิล์มตัวอย่าง



(a) L100 ก่อนสกัด



(b) L100 หลังสกัด โดยใช้ Xylene

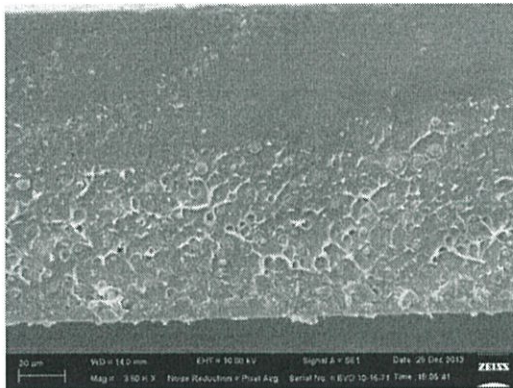


(c) L100 หลังสกัด โดยใช้ THF/Xylene

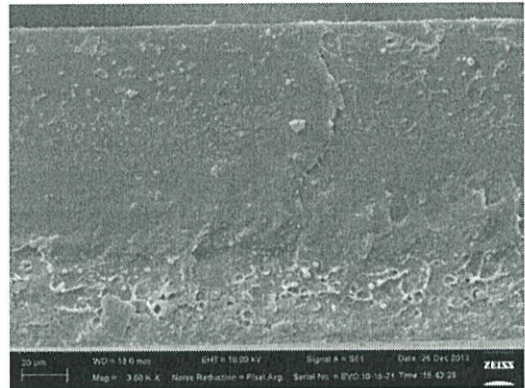
รูปที่ 4.3 ภาพ SEM ของพื้นผิวที่แตกหักของฟิล์ม LDPE ก่อนและหลังสกัด (กำลังขยาย 3500 เท่า)

จากรูปที่ 4.3 พิล์มสูตร L100 พบว่ามีลักษณะเป็นฟิล์มเนื้อแน่น ก่อนสกัดและหลังสกัด ด้วยตัวทำละลาย Xylene และ THF/Xylene ไม่แตกต่างกัน แสดงว่าตัวทำละลายในสภาวะที่ใช้ ไม่สามารถละลาย LDPE ได้

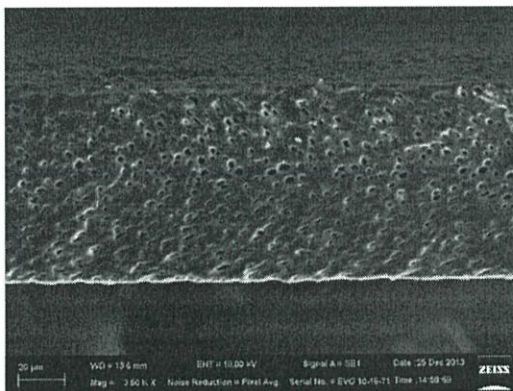
#### 4.2.4 การศึกษาการกระจายตัวของ EVA และ/หรือ EVOH ในฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH



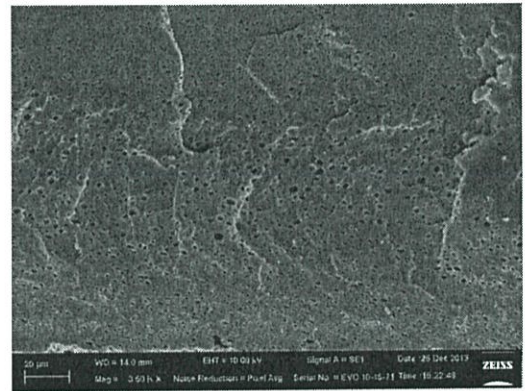
(a) ตัวอย่างฟิล์ม L80EA20 ก่อนสกัด



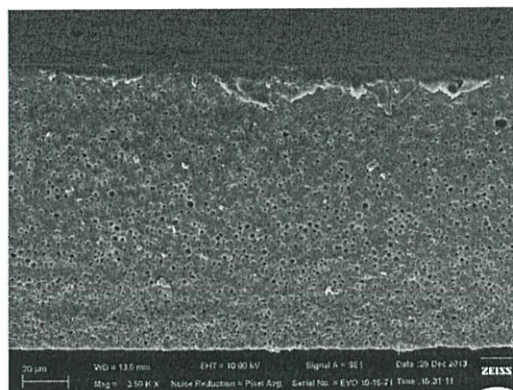
(b) ตัวอย่างฟิล์ม L80EO20 ก่อนสกัด



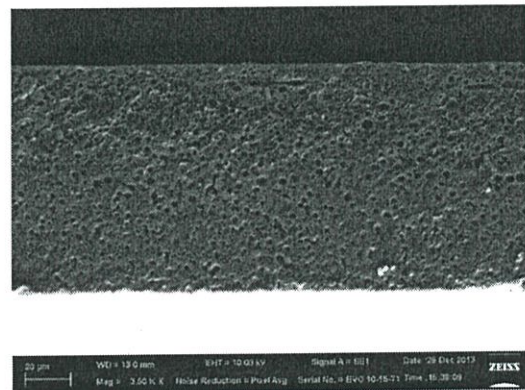
(c) L80EA20 หลังสกัด



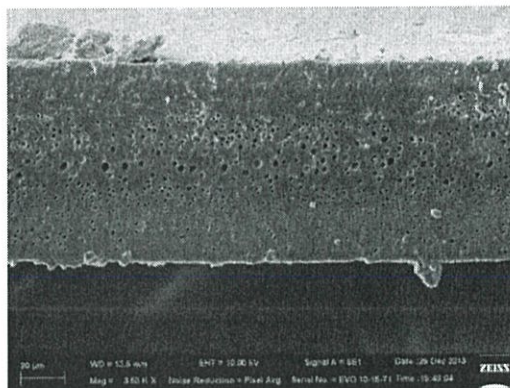
(d) L80EA15EO5 หลังสกัด



(e) L80EA10EO10 หลังสกัด



(f) L80EA5EO15 หลังสกัด



(g) L80EO20 หลังสกัด

**รูปที่ 4.4** ภาพ SEM ของพื้นผิวที่แตกหักของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH ที่อัตราส่วนต่างๆ (กำลังขยาย 3500 เท่า) ที่มีการสกัดวัฏภาคของ EVA และ/หรือ EVOH ออก

จากรูปที่ 4.4 ศึกษาการกระจายตัวของ EVA และ/หรือ EVOH ในฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยแสดงพื้นที่ตัดขวางของตัวอย่างฟิล์ม L80EA20 และ L80EO20 ก่อนสกัด จะเห็นว่าตัวอย่างฟิล์ม L80EA20 และ L80EO20 รูปที่ 4.4 (a) และ (b) ไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น ไม่มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคกระจายและวัฏภาคต่อเนื่องให้เห็น การสกัดเพื่อดูการกระจายตัวของวัฏภาคกระจาย คือ EVA และ/หรือ EVOH ในฟิล์ม ทำให้เกิดช่องว่างที่แสดงในรูปที่ 4.4 (c), (d), (e), (f) และ (g) ซึ่งบริเวณที่เคยมีวัฏภาคของ EVA และ/หรือ EVOH อยู่ พบว่าทุกสูตรมีการกระจายตัวของ EVA และ/หรือ EVOH ดีระดับหนึ่ง เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มแบบกดอัด บริเวณที่ขอบฟิล์มด้านบนกับด้านล่างจะมีอัตราการเย็นเร็วกว่าจึงทำให้ที่ผิวฟิล์มเกิดผลึกก่อนตรงกลางของเนื้อฟิล์ม และพบว่า LDPE กับ EVA และ/หรือ EVOH เป็น Immissible blend (ไม่ผสมเข้ากันได้) เพราะ EVA และ/หรือ EVOH มีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ส่วนที่ไม่มีขั้วของ EVA และ/หรือ EVOH ทำให้ EVA และ/หรือ EVOH กระจายตัวใน LDPE ที่ไม่มีขั้วได้ดี

#### 4.2.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH

**ตารางที่ 4.4**  $T_m$ ,  $T_c$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ [4]

สารตัวอย่าง	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	ความเป็นผลึก (%)
LDPE	112.5	94.6	32%
EVA	58.0	48.0	20%
EVOH	111.7	92.8	30%

ตารางที่ 4.5  $T_m$ ,  $T_c$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ในฟิล์มสูตรต่างๆ

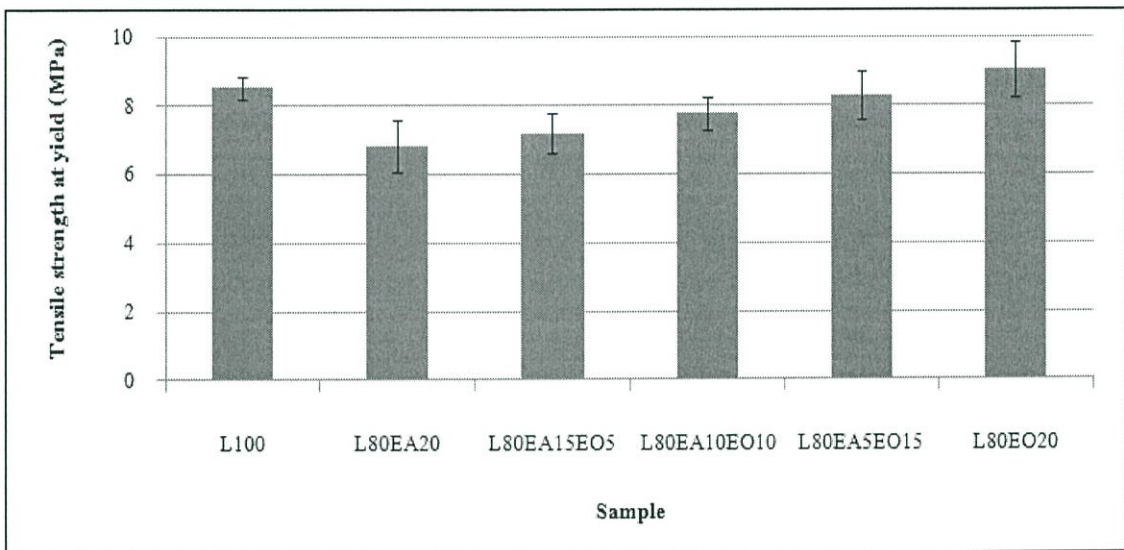
สูตร	พอลิเมอร์ที่เกิดผลึก	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	ความเป็นผลึก (%)
L100	LDPE	113.1	94.9	34%
L80EA20		111.3	95.5	25%
L80EA15EO5	LDPE และ EVOH	110.3	96.4	24%
L80EA10EO10		110.6	96.4	33%
L80EA5EO15		110.6	96.3	37%
L80EO20		113.2	95.3	42%

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA/EVOH มีอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) และอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ของ LDPE มีค่าไม่แตกต่างกัน โดยพบ  $T_m$  ของ LDPE และ EVOH ทั้งนี้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา [4] ผล DSC ตารางที่ 4.4 พบว่า LDPE มี  $T_m$  ที่ 112.5°C และมีความเป็นผลึก 32%, EVA มี  $T_m$  ที่ 58°C และมีความเป็นผลึก 20% ส่วน EVOH มี  $T_m$  ที่ 111.7°C และมีความเป็นผลึก 30% แต่ผล DSC ในงานวิจัยนี้ไม่พบ  $T_m$  ของ EVA ในทุกสูตรของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม แสดงว่า EVA เมื่ออยู่ในพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA/EVOH ไม่สามารถเกิดผลึกได้ แสดงความเป็นพอลิเมอร์อสัณฐานในฟิล์ม ในกรณีฟิล์มสูตร L100 กับ L80EA20 มีความเป็นผลึกลดลง เพราะ LDPE กับ EVA เป็น Immiscible blend ทั้งนี้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา [3] ไม่พบการเกิดผลึกร่วมของ LDPE กับ EVA โดยคาดว่าเป็นเพราะ EVA ที่ใช้มีปริมาณ VA 27.5% ซึ่ง %VA ที่ค่อนข้างสูง ทำให้การละลายเข้ากันระหว่าง LDPE และ EVA ไม่ดีนัก ในกรณีฟิล์มสูตร L100 กับ L80EO20 พบว่าฟิล์มสูตร L80EO20 มีความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์มสูตร L100 แสดงว่าผลึกที่เกิดขึ้นมาจากผลึกของทั้ง LDPE และ EVOH เนื่องจาก EVOH มีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ ในกรณีฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA/EVOH พบว่าเมื่อมีปริมาณ EVOH มากขึ้น ค่าความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก EVOH สามารถเกิดผลึกได้

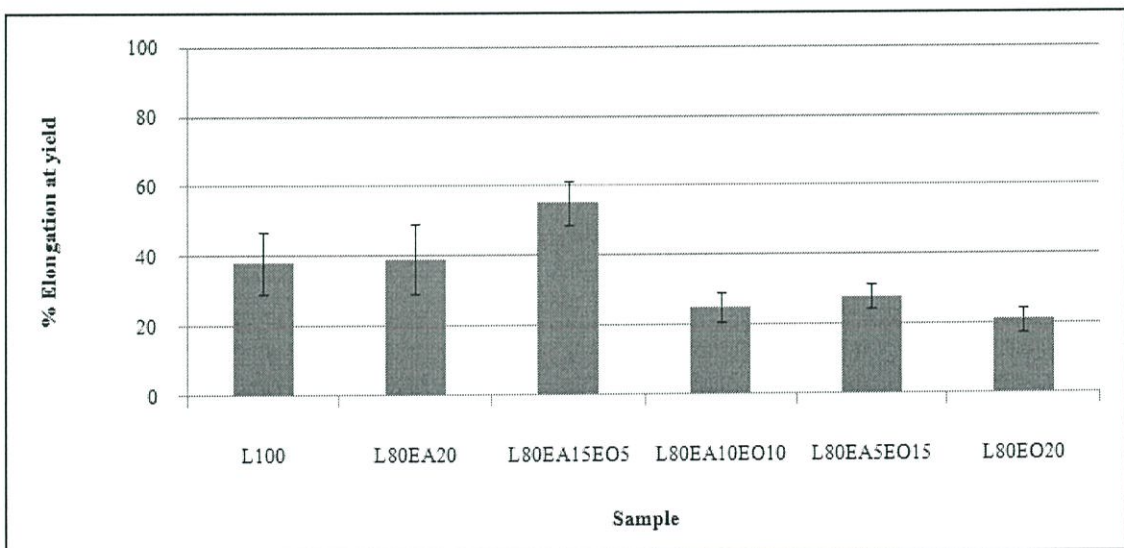
#### 4.2.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม ดังรูปที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มสูตร L100, L80EA20 และ L80EO20 พบว่าฟิล์มสูตร L80EA20 มีค่าการดึงยืด ณ จุดคราก และการดึงยืด ณ จุดขาดมากกว่าฟิล์มสูตร L80EO20 เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยาง มีความยืดหยุ่นทำให้เกิดการเสียรูปได้ง่าย และนอกจากนี้ EVA ยังแสดงความเป็นอสัณฐานใน L80EA20 ซึ่งยืนยันได้จากผล DSC สูตร L80EA20 จึงมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก, ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่ายัง

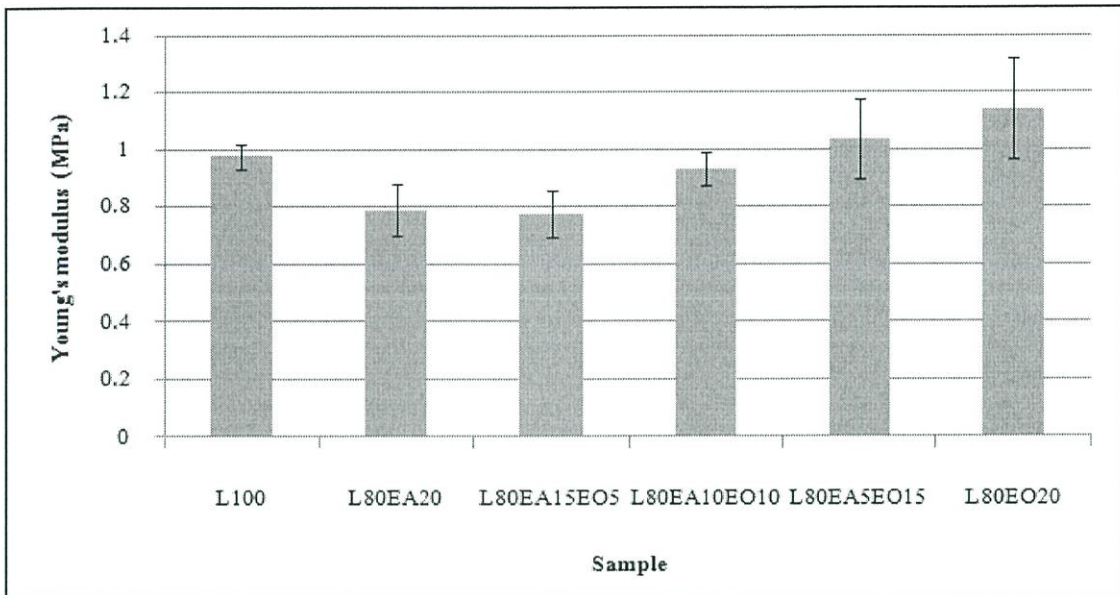
มอดูลัสต่ำกว่าฟิล์มสูตร L100 และ L80EO20 ส่วนฟิล์มสูตร L80EO20 พบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด มีค่าใกล้เคียงกับสูตร L100 แต่ค่ายังมอดูลัสสูงกว่า เนื่องจาก EVOH มี VOH ในโครงสร้างซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ และสูตร L80EO20 สามารถเกิดผลึกได้ทั้งในส่วนของ LDPE และ EVOH ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น ฟิล์มเสียรูปได้ยากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดึงยืด ณ จุดคราก และการดึงยืด ณ จุดขาดลดลง และเมื่อเปรียบเทียบฟิล์มสูตร L80EA15EO5, L80EA10EO10 และ L80EA5EO15 ซึ่งเป็นการใช้ปริมาณ EVA และ EVOH ที่แตกต่างกันโดยควบคุมปริมาณโคพอลิเมอร์ 20% โดยน้ำหนัก พบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก, ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่ายังมอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าการดึงยืด ณ จุดคราก และการดึงยืด ณ จุดขาดลดลงเมื่อปริมาณ EVOH เพิ่มขึ้น เนื่องจากการมี EVOH ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากกว่า EVA ตามคำอธิบายข้างต้น



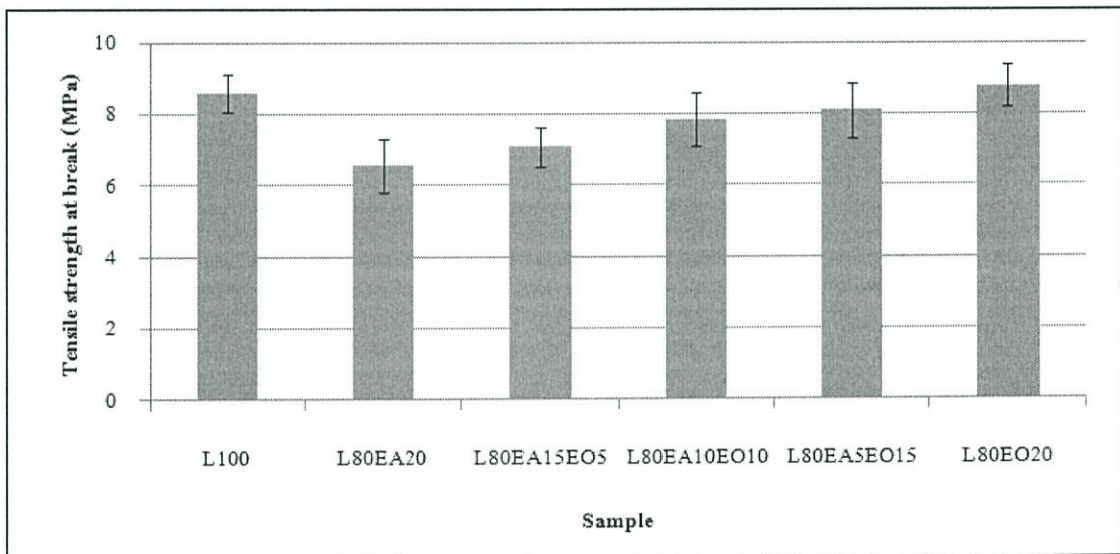
(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก



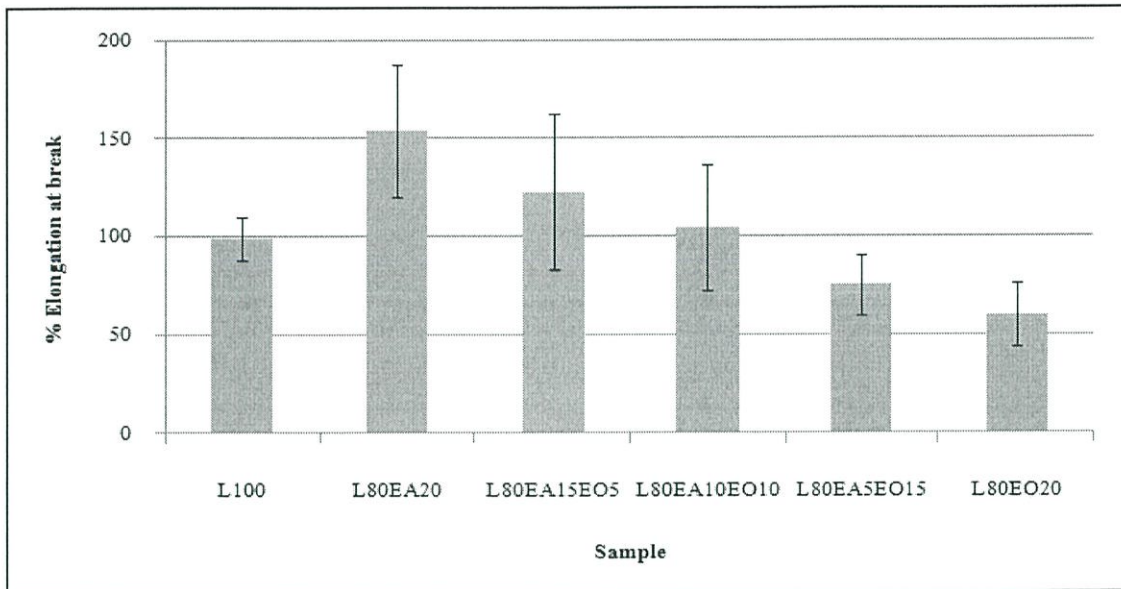
(b) การดึงยืด ณ จุดคราก



(c) ย้ังมอดุลัส



(d) ความแข็งแรงถึง ณ จุดขาด



(e) การดึงยืด ณ จุดขาด

#### รูปที่ 4.5 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH ที่อัตราส่วนต่างๆ

##### 4.2.7 การทดสอบวัดมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA/EVOH

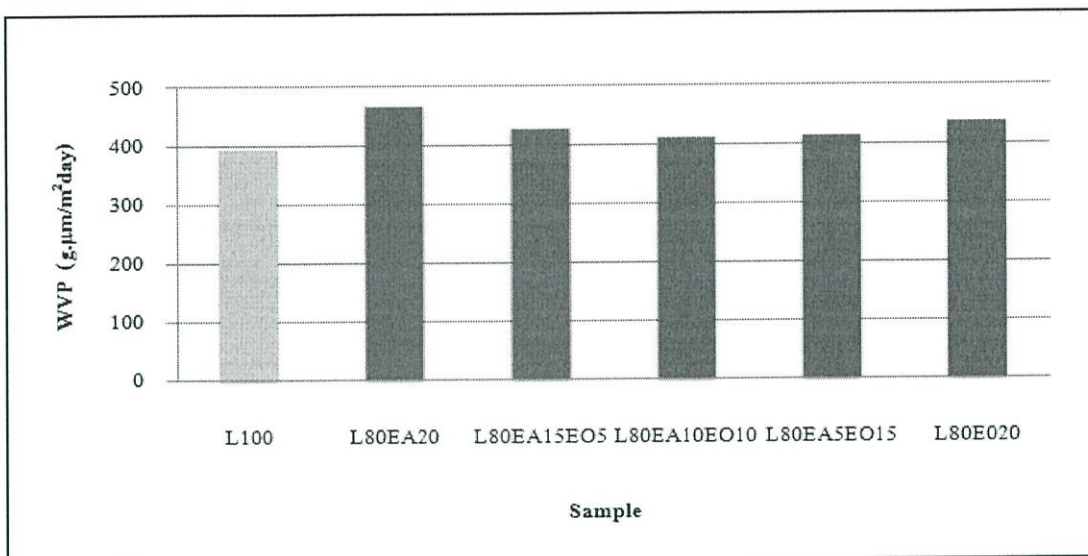
เนื่องจากการทดลองไม่สามารถวัดความมีขี้ของ LDPE/EVA/EVOH ได้โดยตรง ดังนั้นจึงทำการวัดความมีขี้ทางอ้อมโดยการวัดมุมสัมผัส ซึ่งเป็นการวัดความสามารถในการเปียก (Wettability) ของพื้นผิวชิ้นงาน ชิ้นงานที่มีมุมสัมผัสกับน้ำน้อยกว่า แสดงว่ามีความสามารถในการเปียกที่พื้นผิวได้ดีกว่าชิ้นงานที่มีค่ามุมสัมผัสมาก ผลการทดสอบวัดมุมสัมผัสของน้ำบนพื้นที่ตัดขวางของชิ้นงานสูตรต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า EVA และ EVOH มีค่ามุมสัมผัสน้อยกว่า LDPE ที่ไม่มีขี้ เนื่องจาก EVA และ EVOH มีความเป็นขี้ทำให้ชอบกับโมเลกุลของน้ำซึ่งมีขี้ ทำให้มีพื้นผิวสัมผัสกับน้ำเพิ่มขึ้น โดย EVOH มีค่ามุมสัมผัสน้อยกว่า EVA เนื่องจาก EVOH มีความเป็นขี้สูงกว่า EVA เพราะ EVOH นั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตร L80EA20 กับ L80EO20 ซึ่งทั้งสองสูตรมีปริมาณอัตราส่วนโคพอลิเมอร์เท่ากัน พบว่าชิ้นงานที่มีการผสม EVOH จะมีค่ามุมสัมผัสน้อยกว่าชิ้นงานที่มีการผสม EVA และเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA/EVOH พบว่าเมื่อปริมาณ EVOH เพิ่มขึ้น ค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มลดลง เพราะ EVOH มีความเป็นขี้สูงกว่า EVA ตามคำอธิบายข้างต้น

ตารางที่ 4.6 ค่ามอดุลสัมพัทธ์ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

ตัวอย่าง	มอดุลสัมพัทธ์ (องศา)
LDPE	99.0 ± 0.2
EVA	87.8 ± 4.1
EVOH	79.7 ± 3.8
L80EA20	95.2 ± 1.4
L80EA15EO5	93.5 ± 0.8
L80EA10EO10	91.2 ± 3.6
L80EA5EO15	88.6 ± 2.6
L80EO20	88.5 ± 3.3

#### 4.2.8 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH

จากรูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH ที่อัตราส่วน EVA/EVOH ต่างๆ เปรียบเทียบฟิล์ม L100 กับ L80EA20 พบว่าฟิล์ม L80EA20 มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่สูงกว่าฟิล์ม L100 เนื่องจากฟิล์ม L80EA20 มีความเป็นอสัณฐานในฟิล์มมากกว่า สูตร L100 เนื่องจากผล DSC ในตารางที่ 4.5 ค่าความเป็นผลึกในสูตร L80EA20 มีความเป็นผลึก 25% และสูตร L100 มีความเป็นผลึก 34% ในขณะที่การวัดมอดุลสัมพัทธ์ ตารางที่ 4.6 สูตร L80EA20 มีค่ามอดุลสัมพัทธ์ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าฟิล์ม L80EA20 จะอาศัยสมบัติความเป็นอสัณฐานและความมีขั้วของ EVA ในการซึมผ่านไอน้ำ เมื่อเปรียบเทียบฟิล์ม L100 กับ L80EO20 พบว่าฟิล์ม L80EO20 มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่สูงกว่าฟิล์ม L100 เนื่องจาก L80EO20 มีความเป็นขั้วสูงกว่าสูตร L100 จากผลการวัดมอดุลสัมพัทธ์ในตารางที่ 4.6 แม้ว่าสูตร L80EO20 มีความเป็นผลึก 42% ซึ่งมีสัดส่วนอสัณฐานของฟิล์มน้อยกว่าสูตร L100 และเมื่อเปรียบเทียบฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH พบว่าเมื่อปริมาณ EVOH เพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มมีขั้วเพิ่มขึ้นแต่ค่าความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นด้วย จึงเกิดการแข่งขันกันระหว่างความเป็นอสัณฐานและความมีขั้ว ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH มีค่าใกล้เคียงกัน

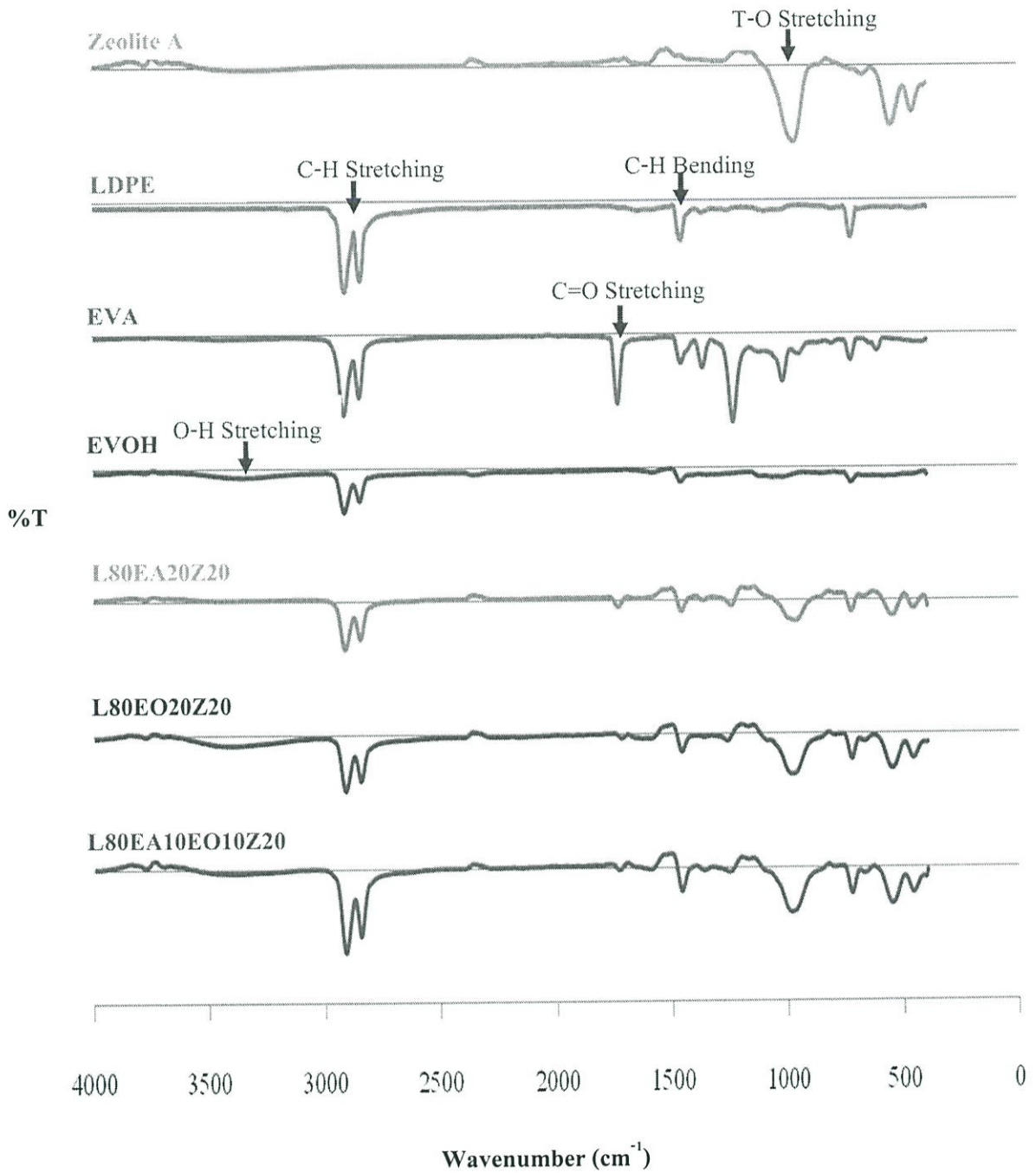


รูปที่ 4.6 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง จากการศึกษาผลของอัตราส่วน EVA/EVOH

### 4.3 การศึกษาผลของการมีซีโอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

#### 4.3.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A

จากตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/ Zeolite A โดยเลือกตัวอย่างฟิล์มสูตร L80EA20Z20, L80EO20Z20 และ L80EA10EO10Z20 เพื่อยืนยันการมีอยู่ขององค์ประกอบต่างๆ ในฟิล์ม พบว่าสเปกตรัมที่ได้แสดงสัญญาณของหมู่ T-O Stretching โดย T คือ Si หรือ Al ในช่วง  $900-1000\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสัญญาณของซีโอไลต์เอ แสดงสัญญาณหมู่ C-H Stretching ของหมู่  $\text{CH}_3$  ในช่วง  $2960-2850\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ C-H Bending ของ  $\text{CH}_2$  ในช่วง  $1470-1350\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ LDPE, EVA และ EVOH นอกจากนี้ยังพบสเปกตรัมที่แสดงสัญญาณหมู่ C=O Stretching ที่ประมาณ  $1714\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ EVA และ หมู่ O-H Stretching ที่ประมาณ  $3400\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ EVOH ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีหมู่ฟังก์ชันของซีโอไลต์เอและพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ตามต้องการ นอกจากนี้ในสูตร L80EO20Z20 พบว่าเมื่อผสม EVOH เข้าไป อาจมีหมู่ฟังก์ชันบางส่วนเปลี่ยนแปลง จากหมู่ O-H Stretching ของ EVOH ไปเป็นหมู่ C=O Stretching เกิดขึ้นที่ประมาณ  $1700\text{ cm}^{-1}$  แสดงว่าโครงสร้างของ EVOH อาจเกิดการเสถียรภาพทางความร้อน [40] จากกระบวนการผสมและการขึ้นรูปในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของซีโอไลต์เอและฟิล์ม LDPE, EVA, EVOH และ ฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A

#### 4.3.2 ความหนาของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/ Zeolite A

จากการวัดความหนาของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A พบว่ามีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 52-58  $\mu\text{m}$

ตารางที่ 4.7 ความหนาของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A

สูตร	ความหนาเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
L80EA20Z20	55 $\pm$ 3
L80EA10EO10Z20	54 $\pm$ 2
L80EO20Z20	56 $\pm$ 2

#### 4.3.3 การตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์เอในสูตรพอลิเมอร์ผสม

ปริมาณที่แท้จริงของซีโอไลต์เอในสูตรพอลิเมอร์ผสมแสดงในตารางที่ 4.8 เนื่องจากธรรมชาติของซีโอไลต์เอมีการฟุ้งกระจายง่าย ขั้นตอนการผสมได้นำพอลิเมอร์ผสมและซีโอไลต์เอผสมกันก่อนลงในเครื่องผสมระบบปิด ทำให้ลดโอกาสในการฟุ้งกระจายและสูญหายของอนุภาคซีโอไลต์เอ พบว่าปริมาณซีโอไลต์เอในสูตรพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการ

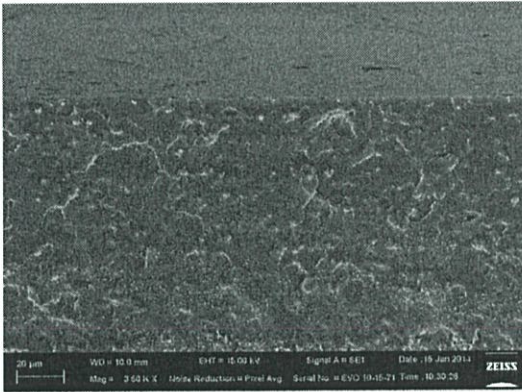
ตารางที่ 4.8 ปริมาณของซีโอไลต์เอในสูตรพอลิเมอร์ผสม

สูตรผสม	ปริมาณซีโอไลต์เอที่ต้องการ (%wt)	ปริมาณซีโอไลต์เอที่พบ (%wt)
L80EA20Z20	20	20
L80EA10EO10Z20	20	21
L80EO20Z20	20	21

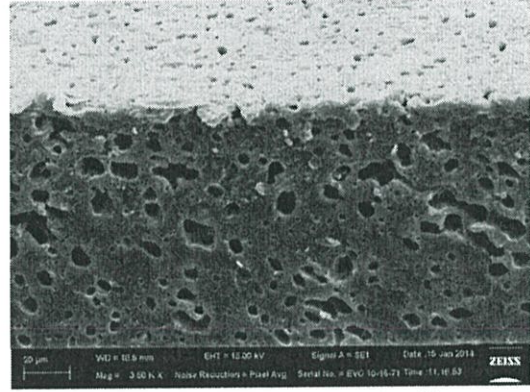
#### 4.3.4 การศึกษาการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A

จากรูปที่ 4.8 (a), (c) และ (e) แสดงรูปพื้นผิวแตกหักของฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก โดยไม่มีการสกัด สังเกตการกระจายตัวของซีโอไลต์เอ พบว่ามีการกระจายตัวเป็นจุดต่างๆ แต่ไม่ชัดเจน เนื่องจากซีโอไลต์เอมีการฝังตัวเข้าไปอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ เพราะการมี EVA และ/หรือ EVOH อยู่ในฟิล์ม ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีขั้ว ทำให้เกิดอันตรกิริยาที่ดีกับซีโอไลต์เอ ซึ่งสามารถสังเกตการกระจายตัวของซีโอไลต์เอได้ชัดเจนมากขึ้นหลังจากการสกัด EVA และ/หรือ EVOH ออก โดยแสดงในรูปที่ 4.8 (b), (d) และ (f) พบว่ามีช่องว่างเกิดขึ้นและมีการกระจายตัวดีอยู่ในภูมิภาคต่อเนื่องของ LDPE และไม่พบอนุภาคของซีโอไลต์เอเหลืออยู่ แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์เอที่มีความเป็นขั้วสูงชอบที่จะอยู่กับ EVA และ/หรือ EVOH ที่มีความมีขั้วบางส่วนมากกว่าที่จะไปอยู่กับภูมิภาคที่ไม่มีขั้วของ LDPE ทำให้ซีโอไลต์เอหลุดไปพร้อมกับ EVA และ/

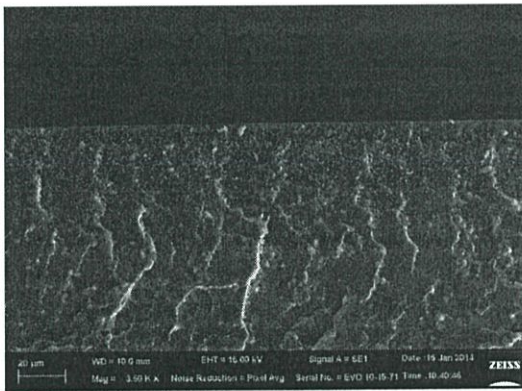
หรือ EVOH ที่สกัดออกไป และจากรูปที่ 4.9 (a) ขนาดรูพรุนของฟิล์มสูตร L80EO20Z20 หลังสกัด พบว่าช่องว่างที่เหลืออยู่มีขนาดใหญ่ประมาณ  $11.1 \mu\text{m}$  และมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างในกรณีที่ไม่ใช่ซีโอไลต์เอ (L80EO20) ในรูปที่ 4.9 (b) ซึ่งปกติซีโอไลต์เอมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ  $4 \mu\text{m}$  แสดงว่าการแตกตัวของซีโอไลต์เออาจยังไม่ดี อนุภาคของซีโอไลต์เอจึงอยู่เป็นอนุภาคเดี่ยวและบางส่วนรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนหลุดออกไปพร้อมกับ EVA และ/หรือ EVOH ในระหว่างการสกัด



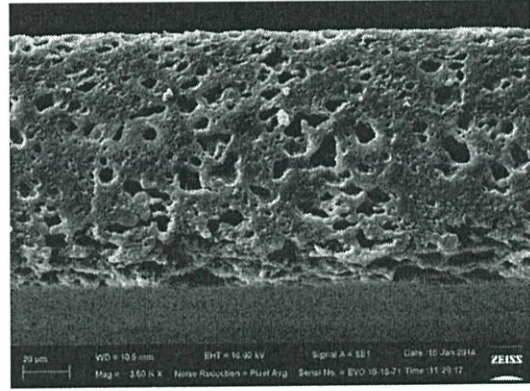
(a) L80EA20Z20 ก่อนสกัด



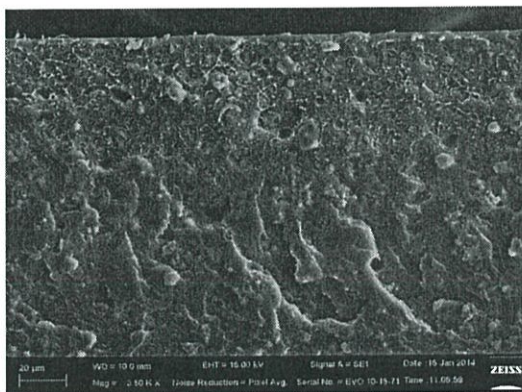
(b) L80EA20Z20 หลังสกัด



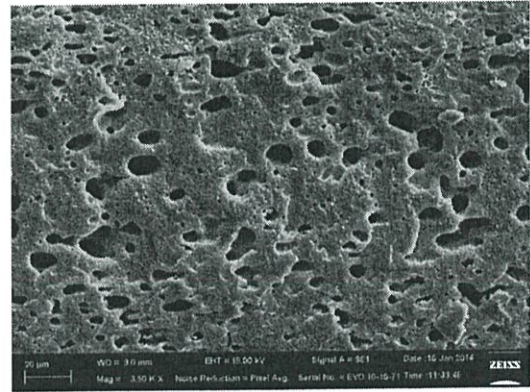
(c) L80EA10EO10Z20 ก่อนสกัด



(d) L80EA10EO10Z20 หลังสกัด

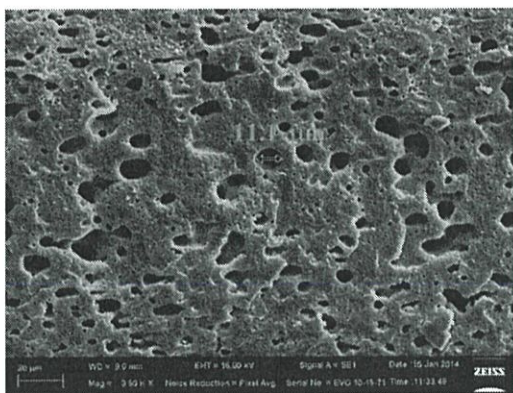


(e) L80EO20Z20 ก่อนสกัด

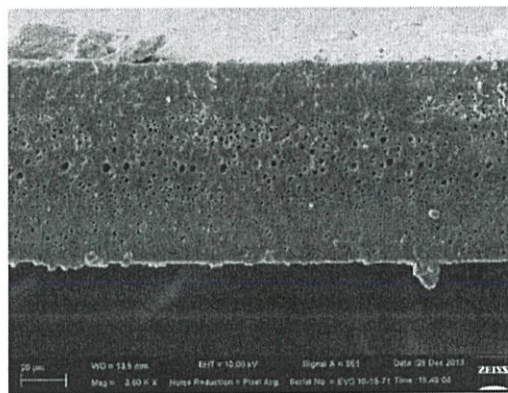


(f) L80EO20Z20 หลังสกัด

รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ของพื้นผิวที่แตกหักของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A (กำลังขยาย 3500 เท่า)



(a) फिल्म L80EO20Z20 หลังสกัด



(b) फिल्म L80EO20 หลังสกัด

รูปที่ 4.9 ภาพเปรียบเทียบขนาดของรูพรุนในฟิล์ม L80EO20Z20 กับ L80EO20 หลังสกัด (กำลังขยาย 3500 เท่า)

#### 4.3.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zelite A

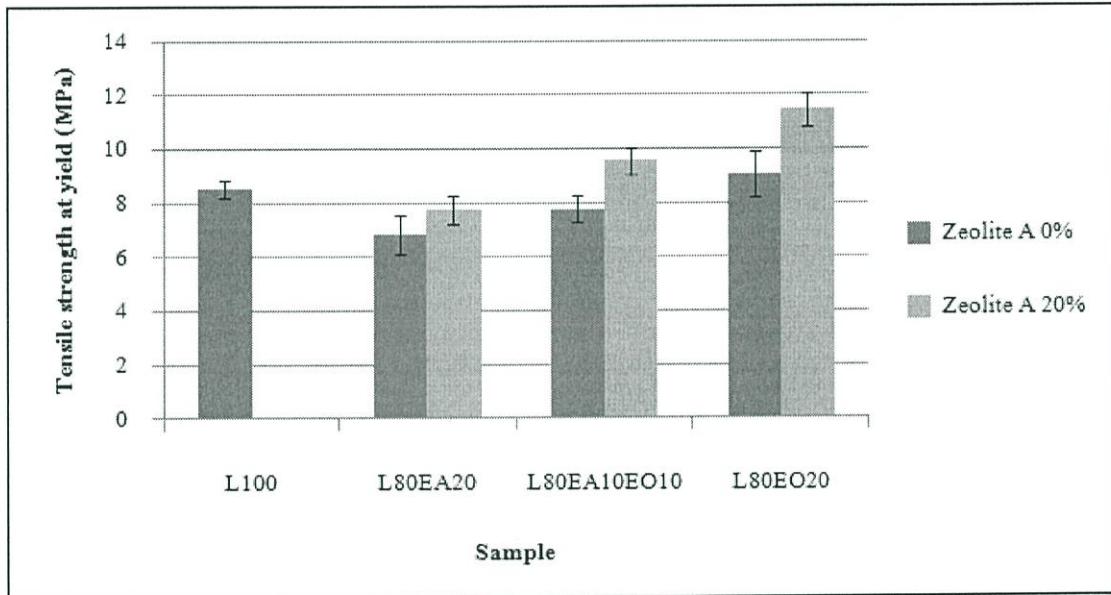
ตารางที่ 4.9  $T_m$ ,  $T_c$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ในฟิล์มสูตรต่างๆ ที่มีซีโอไลต์เอ

สูตร	พอลิเมอร์ที่เกิดผลึก	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	ความเป็นผลึก (%)
L80EA20	LDPE	111.3	95.5	25%
L80EA10EO10	LDPE และ EVOH	110.6	96.4	33%
L80EO20		113.2	95.3	42%
L80EA20Z20	LDPE	111.7	94.1	32%
L80EA10EO10Z20	LDPE และ EVOH	112.2	92.3	33%
L80EO20Z20		111.5	95.3	46%

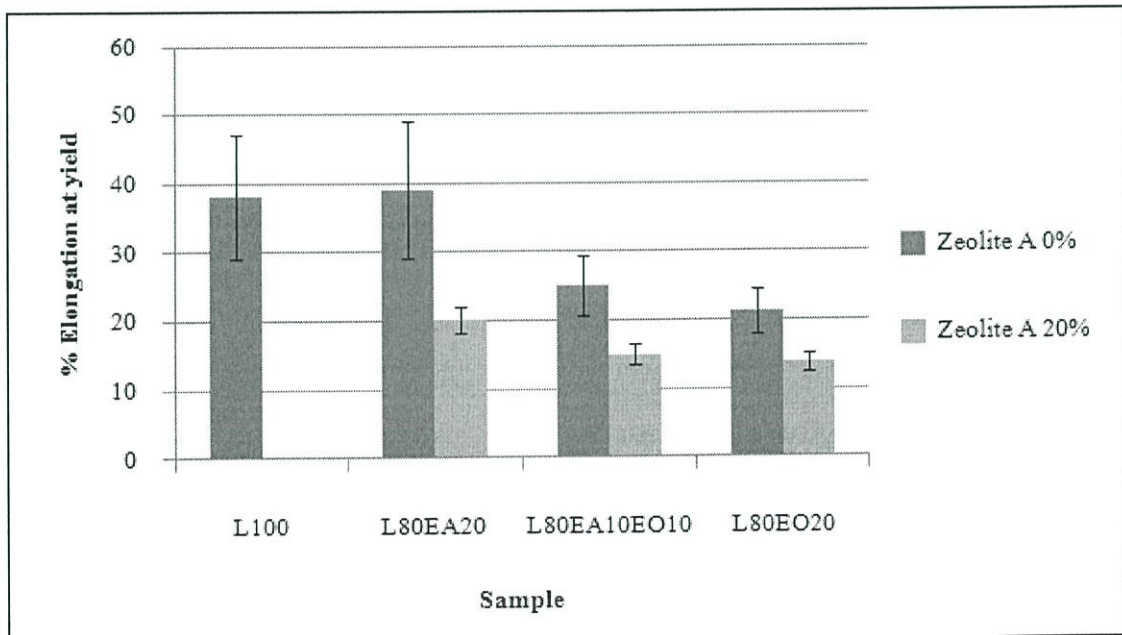
จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA/EVOH/Zelite A มีอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) และอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ของ LDPE มีค่าไม่แตกต่างกัน โดยพบ  $T_m$  ของ LDPE และ EVOH ตามคำอธิบายก่อนหน้านี้ สูตร L80EA20Z20 พบว่ามีค่าความเป็นผลึกมากกว่า สูตร L80EA20 ที่ไม่มีซีโอไลต์เอ แสดงให้เห็นว่า LDPE มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ในขณะที่สูตร L80EA10EO10Z20 และ L80EO20Z20 พบว่ามีค่าความเป็นผลึกไม่แตกต่างกับสูตร L80EA10EO10 และ L80EO20 ที่ไม่มีซีโอไลต์เอ แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์เอไม่ได้ไปรบกวนการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ในฟิล์มสูตรผสม

#### 4.3.6 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A

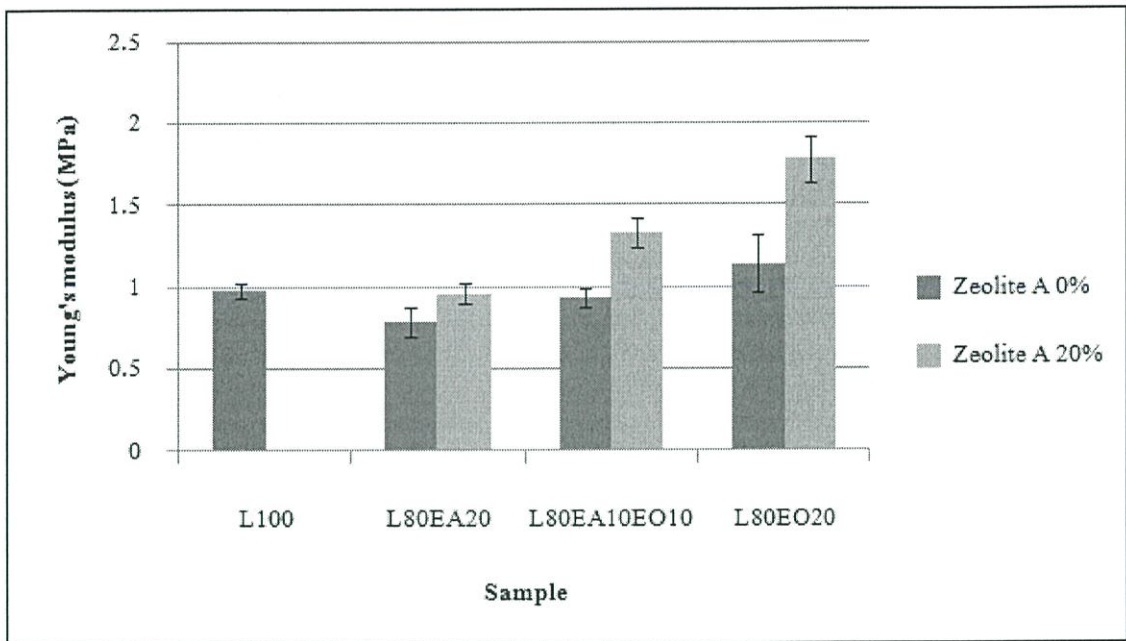
ในงานวิจัยนี้เลือกเฉพาะสูตรพอลิเมอร์ผสม L80EA20, L80EA10EO10 และ L80EO20 มาผสมกับซีโอไลต์ 20% โดยน้ำหนัก เนื่องจากว่าสูตร L80EA10EO10 มีความเป็นอสัณฐาน ใน ส่วนของ EVA และมีสมบัติเชิงกลที่ดีในส่วนของ EVOH จึงเลือกสูตร L80EA10EO10 มา เปรียบเทียบกับสูตร L80EA20 และสูตร L80EO20 นำมาทดสอบสมบัติการรับแรงดึง แสดงผล การทดลองดังรูปที่ 4.10



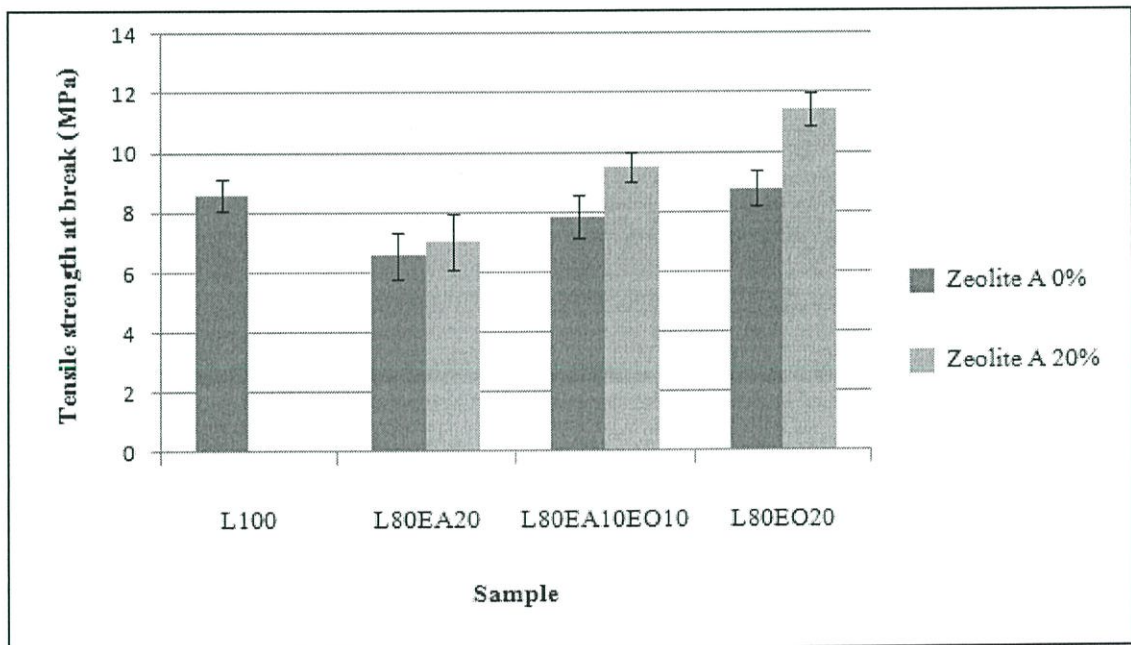
(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก



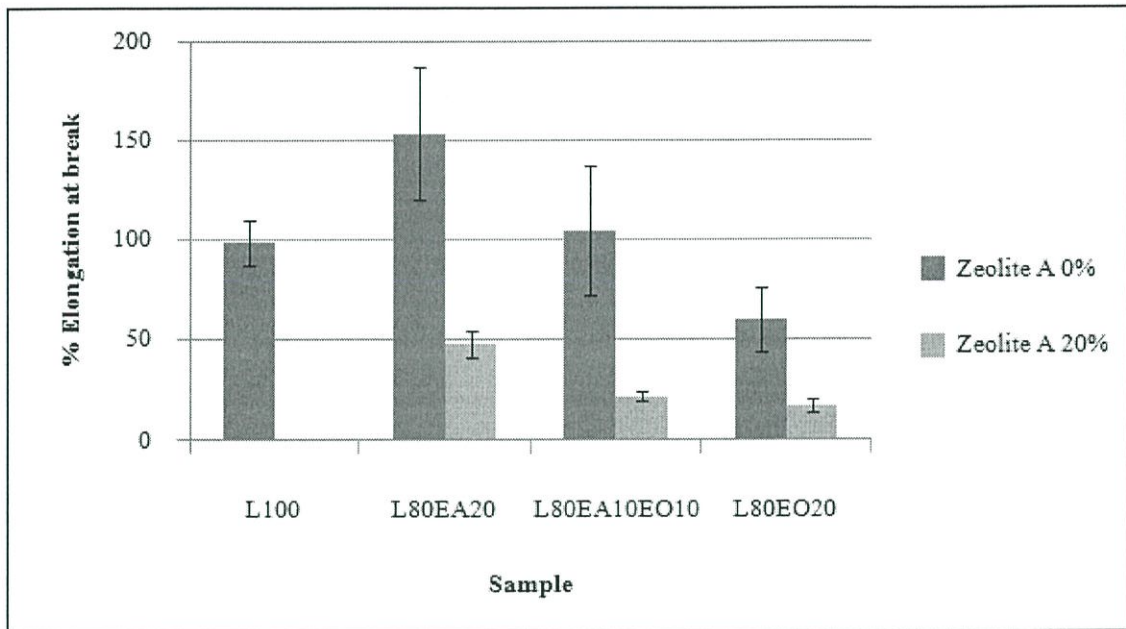
(b) การดึงยืด ณ จุดคราก



(c) ย้ังมอดูลัส



(d) ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด



(e) การดิ่งยืด ณ จุดขาด

#### รูปที่ 4.10 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zeolite A

จากรูปที่ 4.10 การเติมซีโอไลต์เอเข้าไปในชั้นงานทำให้ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก, ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่า Young's Modulus สูงขึ้น ส่วนการดิ่งยืด ณ จุดคราก และการดิ่งยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง แสดงว่าฟิล์มเสียรูปได้ยากขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นอนุภาคของแข็ง ทำให้ความแข็งแรงโดยรวมของฟิล์มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนซึ่งสังเกตได้จากค่า Young's Modulus ที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH ที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ

#### 4.3.7 การทดสอบวัดมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ

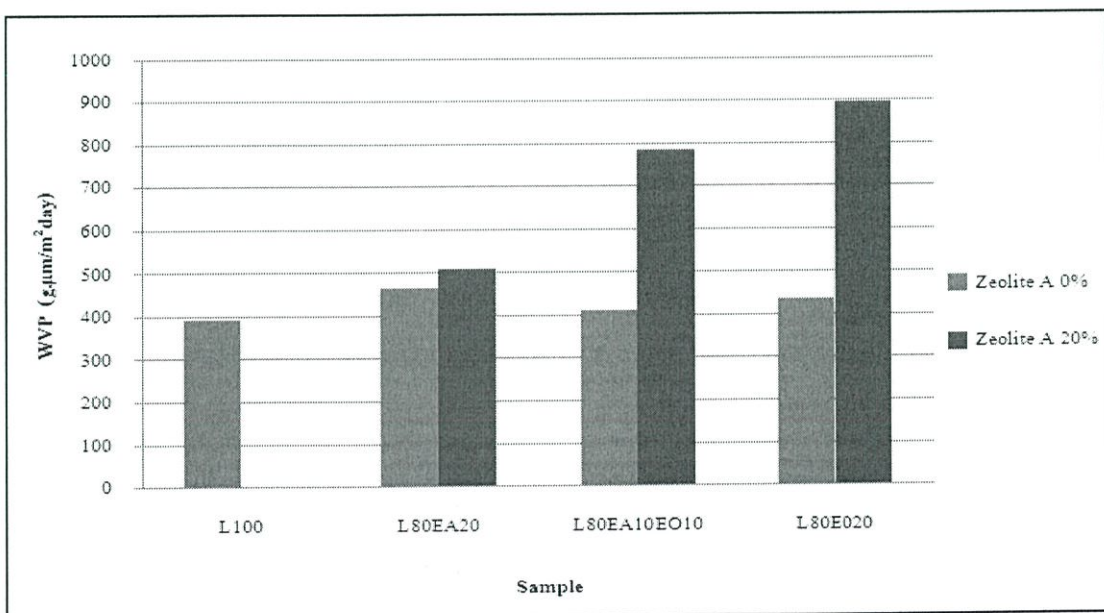
ตารางที่ 4.10 ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ที่มีซีโอไลต์เอ

ตัวอย่าง	มุมสัมผัส (องศา)
L80EA20	95.2 ± 1.4
L80EA10EO10	91.2 ± 3.6
L80EO20	88.5 ± 3.3
L80EA20Z20	87.0 ± 3.5
L80EA10EO10Z20	83.9 ± 1.3
L80EO20Z20	82.3 ± 3.6

จากตารางที่ 4.10 พบว่าการมีซีโอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ค่ามุมสัมผัสลดลงทุกสูตรเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีซีโอไลต์เอ เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีขั้วสูง ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างน้ำกับพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอได้ดีมาก จึงทำให้ในพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถเปียกผิวของน้ำดีขึ้น

#### 4.3.8 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH/Zelite A

การซึมผ่านของไอน้ำจะซึมผ่านวัฏภาคอสัณฐานของฟิล์มสูตรต่างๆ ซึ่งการเติมซีโอไลต์เอลงไป (ดังรูปที่ 4.11) ทำให้การซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีรูพรุนและขั้วสูง ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีขั้วสูงและสูตรฟิล์มที่มีการผสมซีโอไลต์เอมีขั้วสูงขึ้นด้วย ซึ่งยืนยันได้จากการวัดมุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิวที่ลดลงดังตารางที่ 4.10 และรูพรุนที่มีขั้วของซีโอไลต์เอ ทำให้ซีโอไลต์เอมีอันตรกิริยากับไอน้ำได้ดี ซึ่งโดยธรรมชาติของซีโอไลต์เอมีน้ำอยู่ในรูพรุนอยู่แล้ว เมื่อซีโอไลต์เอดูดซับ โมเลกุลของไอน้ำเข้ามา โมเลกุลของไอน้ำจะเข้ามาแทนที่โมเลกุลไอน้ำที่มีอยู่เดิม ทำให้โมเลกุลไอน้ำหลุดออกไปได้ง่ายขึ้น โดยสูตร L80EA20Z20 เมื่อเทียบกับการสูตร L80EA20 ที่ไม่มีซีโอไลต์เอ พบว่าค่าการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นไม่มาก แม้ว่าจะมีซีโอไลต์เอ ทั้งนี้ เพราะค่าความเป็นผลึกในสูตร L80EA20Z20 (32%) มากกว่าสูตร L80EA20 (25%) ในขณะที่การซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นมากในสูตร L80EA10EO10Z20 และ L80EO20Z20 อาจเกิดมาจากการมี EVOH กับซีโอไลต์เอในปริมาณที่มาก ทำให้ซีโอไลต์เอที่มีขั้วสูงชอบอยู่กับ EVOH ที่มีขั้วสูง ยืนยันได้จากภาพ SEM ในรูปที่ 4.9 (a) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์เอมีการแตกกระจายในลักษณะอนุภาคเดี่ยวและบางส่วนเป็นกลุ่มก้อน ไอน้ำสามารถซึมผ่านช่องว่างระหว่างวัฏภาคได้ด้วย



รูปที่ 4.11 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง จากการศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอ

## บทที่ 5

# สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำ EVA และ/หรือ EVOH ซึ่งเป็นสารที่มีขั้วมาปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE และมีการใช้ซีโอไลต์เอที่มีความมีขั้วสูงมาเพิ่มการซึมผ่านไอน้ำจากผลทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

การศึกษาผลของอัตราส่วน EVA/EVOH ในฟิล์ม LDPE/EVA/EVOH จากกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (L100, L80EA20, L80EA15EO5, L80EA10EO10, L80EA5EO15 และ L80EO20) พบว่าสูตรพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีการกระจายตัวระดับหนึ่งของวัฏภาคกระจาย (EVA และ/หรือ EVOH) เมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก, ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่ายังมอดุลัสมีแนวโน้มลดลงจากฟิล์ม LDPE เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยางทำให้เกิดความยืดหยุ่นมากขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณความเป็นผลึกของ LDPE ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมี EVA ในขณะที่การมีปริมาณ EVOH เพิ่มขึ้น ค่าความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดึงยึด ณ จุดคราก และการดึงยึด ณ จุดขาด มีค่าลดลง ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก, ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่ายังมอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก EVOH สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น ในขณะที่การซึมผ่านไอน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน ความมีขั้วเพิ่มขึ้นจากการที่มี EVOH เพิ่มขึ้นไม่ได้ทำให้การซึมผ่านไอน้ำดีขึ้น เพราะมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นด้วย จึงเกิดแข่งขันกันระหว่างอัตราส่วนกับความมีขั้วของฟิล์ม ทั้งนี้การซึมผ่านไอน้ำจะผ่านวัฏภาคของอัตราส่วนเป็นหลัก

การศึกษาผลของซีโอไลต์เอ โดยใช้อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA/EVOH (สูตร L80EA20, L80EA10EO10 และ L80EO20) มาเติมซีโอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก พบว่า EVA, EVOH และซีโอไลต์เอมีการกระจายดีในทุกสูตรฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ซีโอไลต์เออยู่ในวัฏภาคของ EVA และ/หรือ EVOH กระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว และเป็นกลุ่มก้อน นอกจากนี้การมีซีโอไลต์เอไม่ได้ทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มเปลี่ยนแปลงไป แต่ทำให้ค่าความสามารถในการดึงยึด ณ จุดคราก และการดึงยึด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก, ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่ายังมอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นอนุภาคของแข็ง ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงขึ้นและเสีรูปร่างได้ยากขึ้น และช่วยเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำให้ดีขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมซีโอโลต์เอ ควรใช้พอลิเมอร์ผสม EVA กับ ซีโอโลต์เอ ในการเตรียมสูตรเข้มข้น เพื่อให้ซีโอโลต์เอมีโอกาสแตกตัวได้ดีขึ้น แล้วจึงใส่ LDPE และ EVOH เข้าไป

2. หาเครื่องมือในการขึ้นรูปฟิล์ม เช่น การเป่าขึ้นรูปฟิล์ม เพื่อเพิ่มอัตราการผลิต และทำให้สามารถควบคุมความหนาได้ดีกว่า

## เอกสารอ้างอิง

- [1] งามทิพย์ ภู่วโรดม. “ก๊าซกับการบรรจุผลิตภัณฑ์อาหาร”. กรุงเทพมหานคร: ลินคอร์นโปรดิวชัน. 2538. หน้า 17-18.
- [2] เนตรนภา ตามอ และเบญจวรรณ ตานนท์. “สมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปรับปรุงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและซีโอไลต์โซเดียมเอ”. โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [3] นันทวรรณ ม่วงมี. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลดีพีอีด้วยอีวีเอและซีโอไลต์เอ”. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [4] จิตรา ศักดาพิสุทธิ์, เมธาวิ อุตตสุรดี และรันตี บุญตา. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์และซีโอไลต์เอ”. โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.
- [5] สมชาย กล้าหาญ. “วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวพืชสวน”. ภาควิชาพืชสวน คณะเทคโนโลยีการเกษตรวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [6] Dirim S., Esin A. and Bayindirli A. “A New Protective Polyethylene Based Film Containing Zeolite for the Packaging of Fruits and Vegetables : Film Preparation”. Food Engineering Journal 63 (2004) 9-13.
- [7] Pantastico E.B. “Postharvest Physiology Handling and Utilization of Tropical and Subtropical Fruits and Vegetables”. Westport CT: The AVI Publishing Company INC. 1975.
- [8] Ryall A.L. and Lipton W.J. “Handling, transportation and storage of fruits and Vegetables Vol. 1”. Westport CT : The AVI Publishing Company INC. 1972.
- [9] จิรา ณ หนองคาย. “เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและดอกไม้”. สำนักพิมพ์แมสเวลล์ลิงคิง. กรุงเทพมหานคร. 2534.
- [10] Biale J.B. and Young R.B. “In Recent Advances in the Biochemistry of Fruits and Vegetables”. New York : Academic Press 1981.

- [11] คณัย บุญเกียรติ และนิธิยา รัตนาปนนท์. “การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้”. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 2535.
- [12] Plastics Design Library. “Permeability And Other Film Properties Of Plastics And Elastomers”. William Andrew Inc. (1996) 125-317.
- [13] Paine F.A. and Paine H.Y. “A Handbook of Food Packaging”. USA. : Chapman & Hall. 1992.
- [14] Shewfelt R.L. and Bruckner B. “Editors. Fruit and Vegetable Quality”. Pennsylvania : Technomic Publishing Company, Inc. 2000.
- [15] Howe-Grant M. and Mackenzie K.J. “Encyclopedia of Chemical Technology”. New York : John Willey & Sons Inc. 1993.
- [16] รุ่งนภา วิสิษฐอุตรการ. “เอกสารประกอบการสอนการประเมินอายุการเก็บรักษาของอาหาร”. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2540.
- [17] มาลินี ชัยสุภกิจสินธ์. “เคมีพอลิเมอร์”. โครงการตำราวิชาภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [18] วันชาติ ปรีชาตวิวงศ์. “พอลิเมอร์ (Polymer)”. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์.  
[online]. Availble : <http://www.gocities.com/thaimafia/orchem/polymer.ppt>. 2556.
- [19] Brydson J.A. “Plastic Materials”. 7<sup>th</sup> ed. Butterworth Heinemann Oxford. 1999.
- [20] ARmetrong R.B. “New EVAL® EVOH Resins for Flexible Packaging”.  
[online]. Availble : [http://www.eval.eu/media/15492/technical%20brochure\\_english.pdf](http://www.eval.eu/media/15492/technical%20brochure_english.pdf). 2013.
- [21] Gholizadeh M., Razavi J. and Mousavi S.A. “Gas permeability measurement in polyethylene and its copolymer flims”. Materials & Design. Vol.28 (2007) 2528-2532.
- [22] ตะวัน สุขน้อย. “เอกสารประกอบการเรียนวิชาชีโพลีไคต์และสารมีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง”. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [23] Gates C.B. “Catalytic Chemistry”. Toronto : Wiley & Sons. 1992.
- [24] Woodward P. “Solid State Chemistry”.  
[online]. Availble : [http://www.Chemistry.ohio-state.ed/woodward/chem\\_754.htm](http://www.Chemistry.ohio-state.ed/woodward/chem_754.htm). 2013.

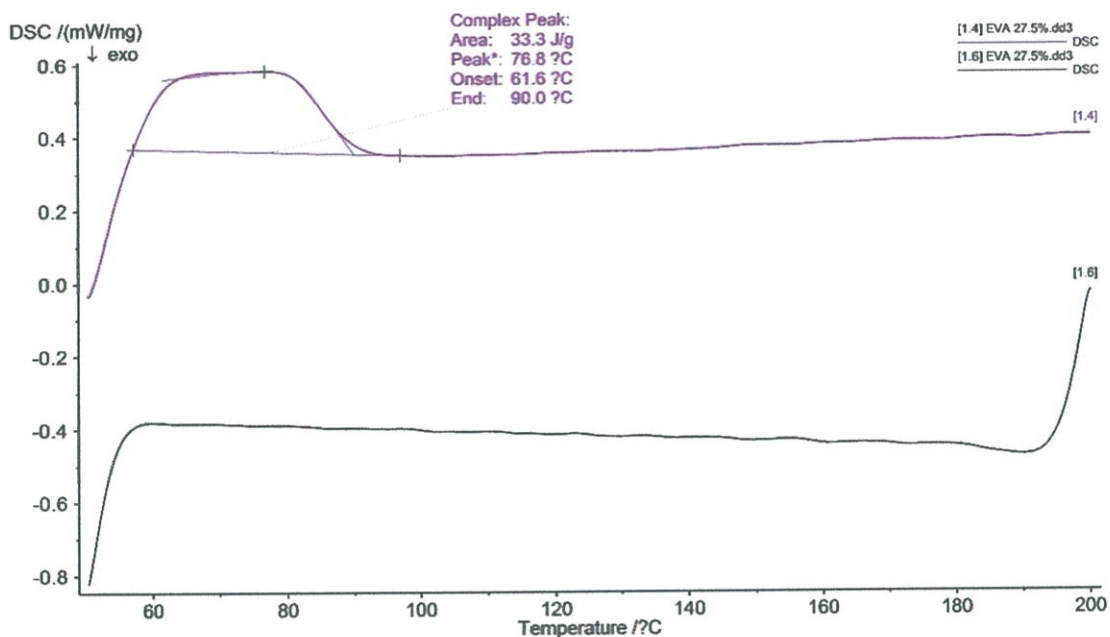
- [25] ชลลดา ฤตวิรุพห์. “พอลิเมอร์ผสม”. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. ปีที่10, ฉบับที่ 1, 2543. หน้า 14-17.
- [26] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. “สารปรับแต่งพอลิเมอร์”. กรุงเทพมหานคร : ปู้คเน็ท. 2547.
- [27] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. “การขึ้นรูปโดยวิธีการกดอัด”.  
[online]. Availble : [archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/ichem0352pp\\_ch2.pdf](http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/ichem0352pp_ch2.pdf). 2557.
- [28] Mausavi S. A., Lopez M., Sedghia S., Chenarc M.P., Barmalad M. and Soltania A. “**Effects of preparation conditions on the morphology and gas permeation properties of polyethylene(PE) and ethylene vinyl acetate(EVA) films**”. Chemical Engineering Research and Design 88 (2010) 1593-1598.
- [29] Faker M., Aghjeh R., Ghaffari M. and Seyyedi A. “**Rheology, morphology and mechanical properties of polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer(PE/EVA) blends**”. European Polymer Journal 44 (2008) 1834-1842.
- [30] Marais S., Bureau E., Gouanve F., Salem E.B., Hirata Y., Andrio A., Cabot C. and Atmani H. “**Transport of water and gases through EVA/PVC blend films-permeation and DSC investigations**”. Polymer Testing 23 (2004) 475-486.
- [31] Sadeghi M., Khanbabaei G., Amir H. and Khatt S. “**Gas permeation properties of ethylene vinyl acetate-silica nanocomposite membranes**”. Membrane Science 322 (2008) 423-428.
- [32] Lasagaba'ster A., Barral L., Ares A. and Bouza R. “**Application of FTIR spectroscopy to determine transport properties and water-polymer interactions in polypropylene(PP)/poly(ethylene-co-vinyl alcohol) (EVOH) blend films : Effect of poly(ethylene-co-vinyl alcohol) content and water activity**”. Polymer 50 (2009) 2981-2989.
- [33] Muriel-Galet V., P.Cerisuelo J., López-Carballo G., Aucejo S., Gavara R. and Hernández-Muñoz P. “**Evaluation of EVOH-coated PP films with oregano essential oil and citral to improve the shelf-life of packaged salad**”. Food Control 30 (2013) 137-143.
- [34] Ayvaz H. Schirmer S., Parulekar Y., Balasubramaniam V.M., Somerville J. A. and Daryaei H. “**Influence of selected packaging materials on some quality aspects of pressureassisted thermally processed carrots during storage**”. LWT-Food Science and Technology 46 (2012) 437-447.

- [35] American Standard for Testing and Materials. “**Standard Test Method for Melting And Crystallization Temperatures by Thermal Analysis**”. ASTM E794. Annual Book of ASTM Standard 14.02., Philadelphia. 2006.
- [36] Billmeyer F.W. “**Text book of Polymer Science**”. New York : John Wiley & Sons. 1984.
- [37] American Standard for Testing and Materials. “**Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting**”. ASTM D882. Annual Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia. 1998.
- [38] American Standard for Testing and Materials. “**Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Modulated Infrared Sensor**”. ASTM F1249. Annual Book of ASTM Standard 14.02., Philadelphia. 2011.
- [39] American Standard for Testing and Materials. “**Standard Test Method for Corona-Treated Polymer Films Using Water Contact Angle Measurements**”. ASTM D5946. Annual Book of ASTM Standard 14.02., Philadelphia. 2003.
- [40] Holland B.J. and Hay J.N. “**The thermal degradation of poly (vinyl alcohol)**”. Polymer 42 (2001) 6775-6783.

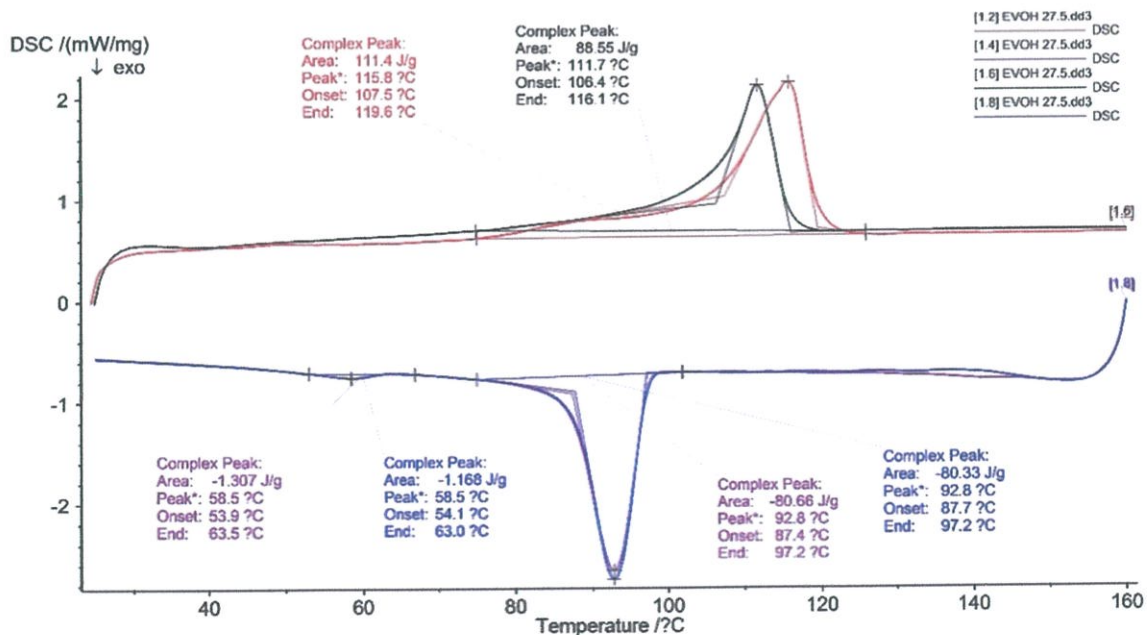
ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

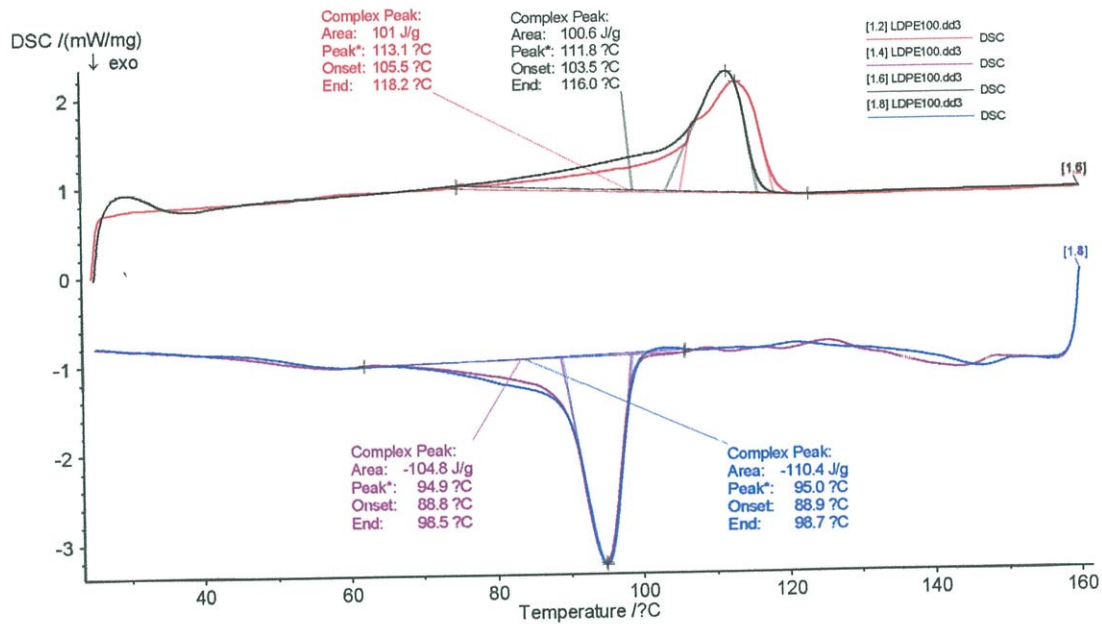
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)



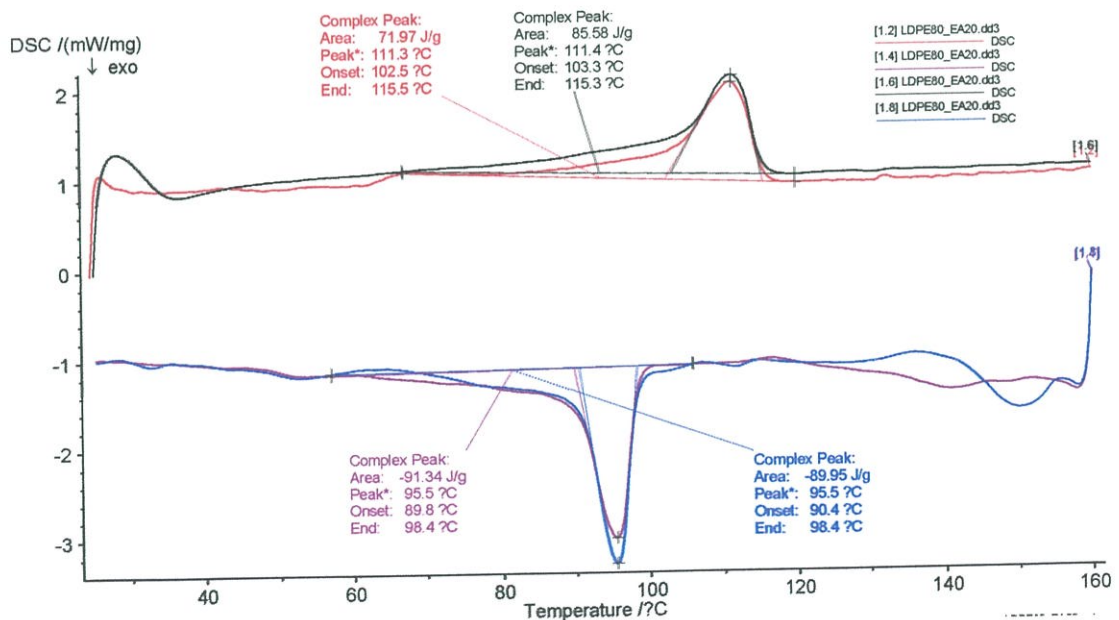
รูปที่ ก-1 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ EVA [4]



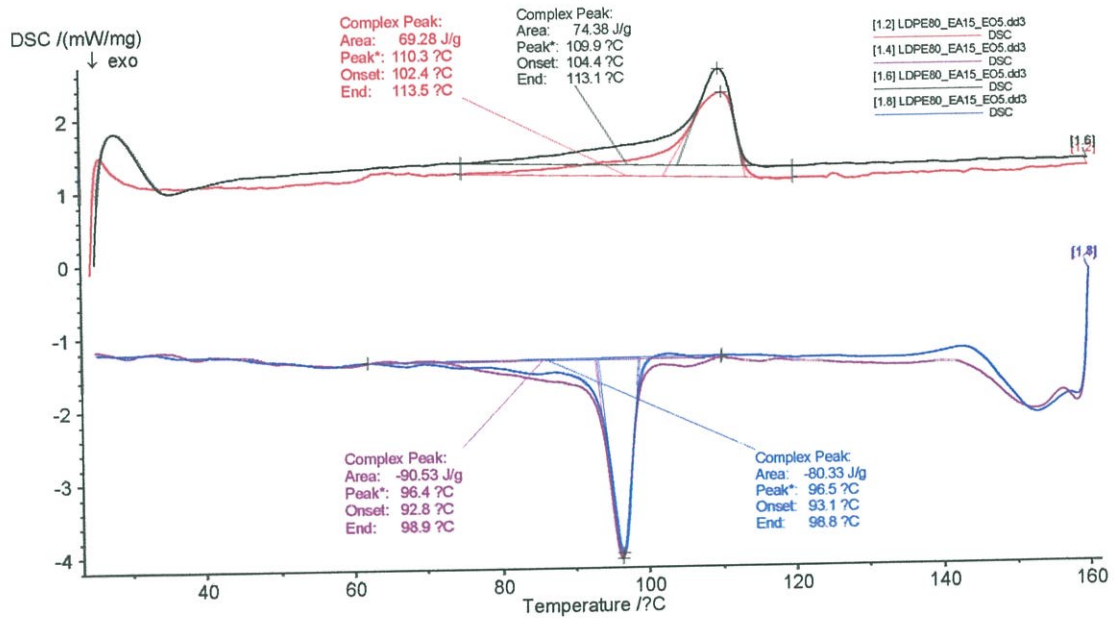
รูปที่ ก-2 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ EVOH [4]



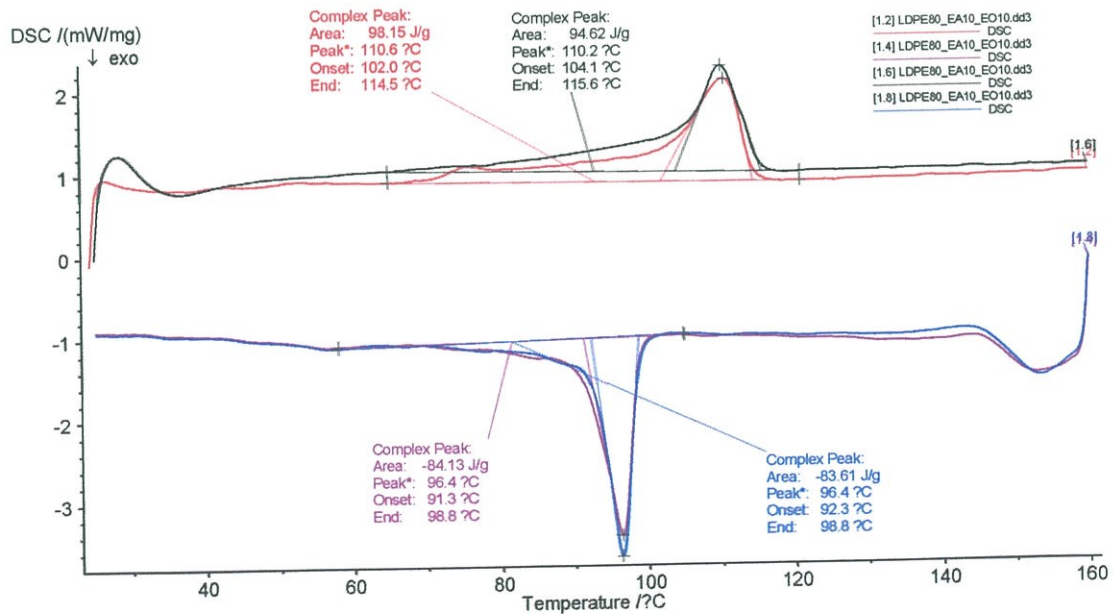
รูปที่ ก-3 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม L100



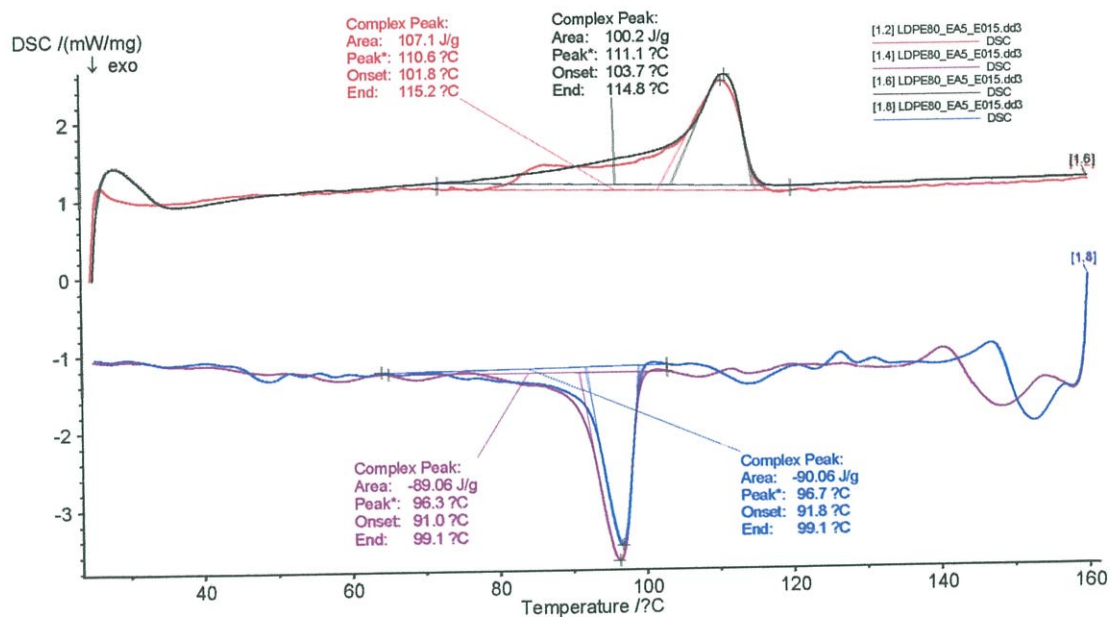
รูปที่ ก-4 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม L80EA20



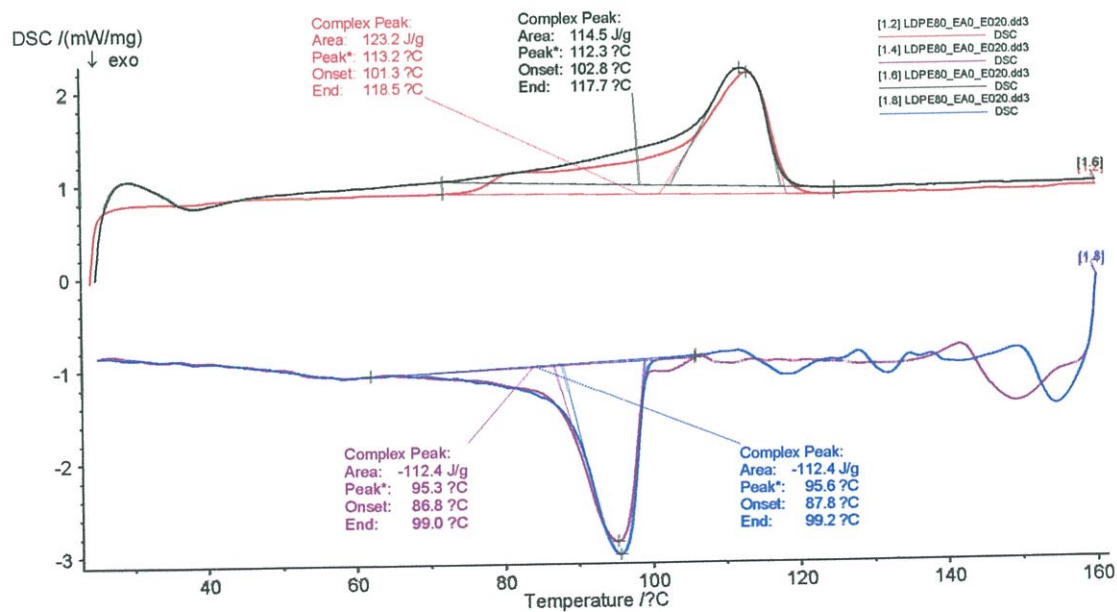
รูปที่ ก-5 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม L80EA15EO5



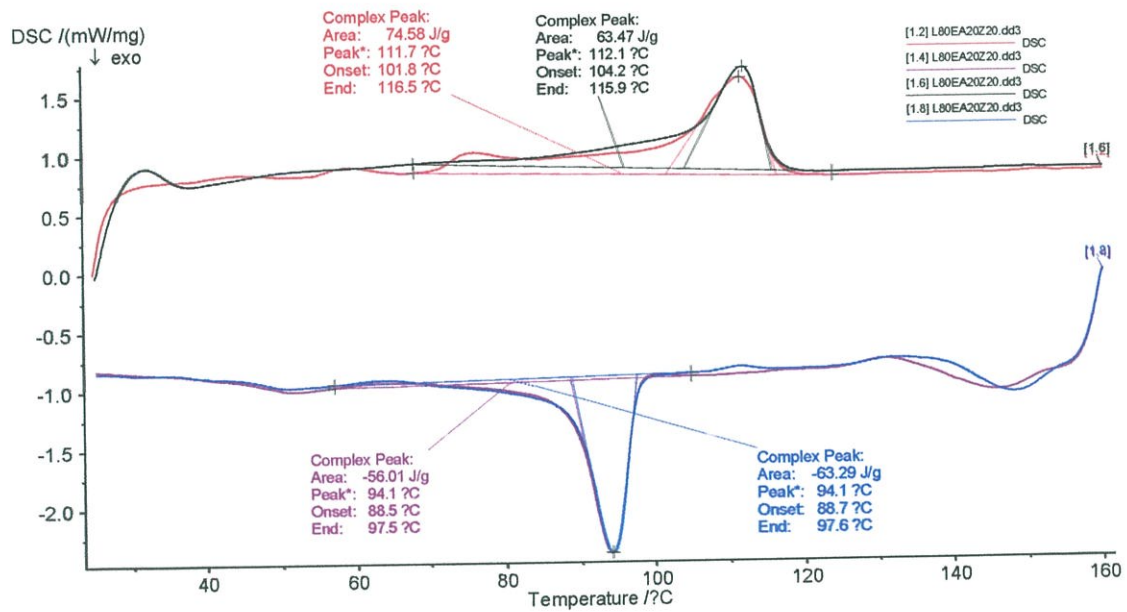
รูปที่ ก-6 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม L80EA10EO10



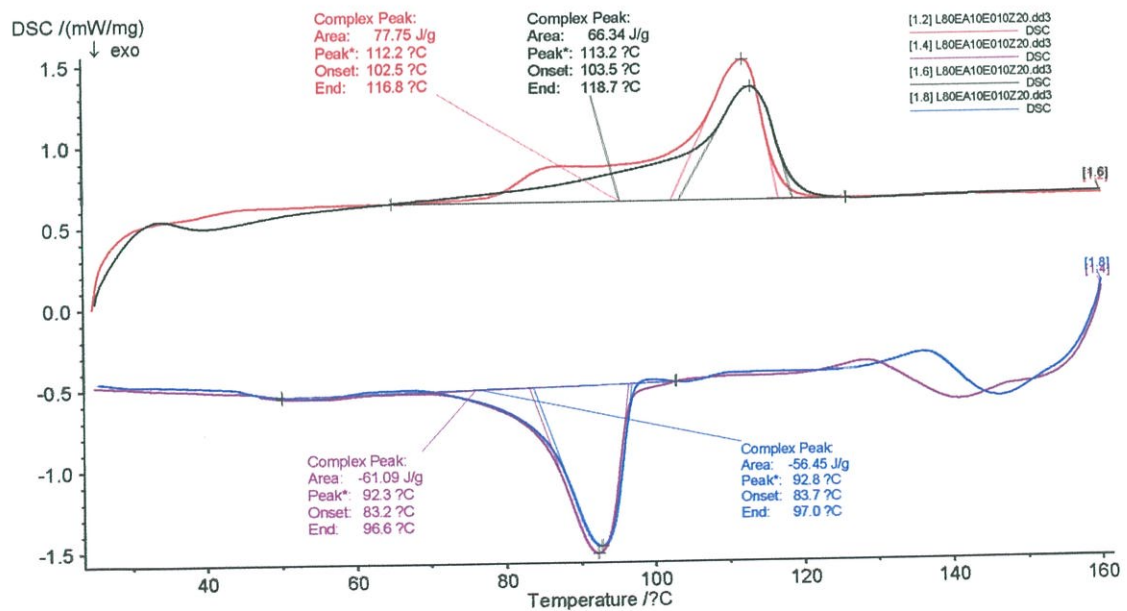
รูปที่ ก-7 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม L80EA5EO15



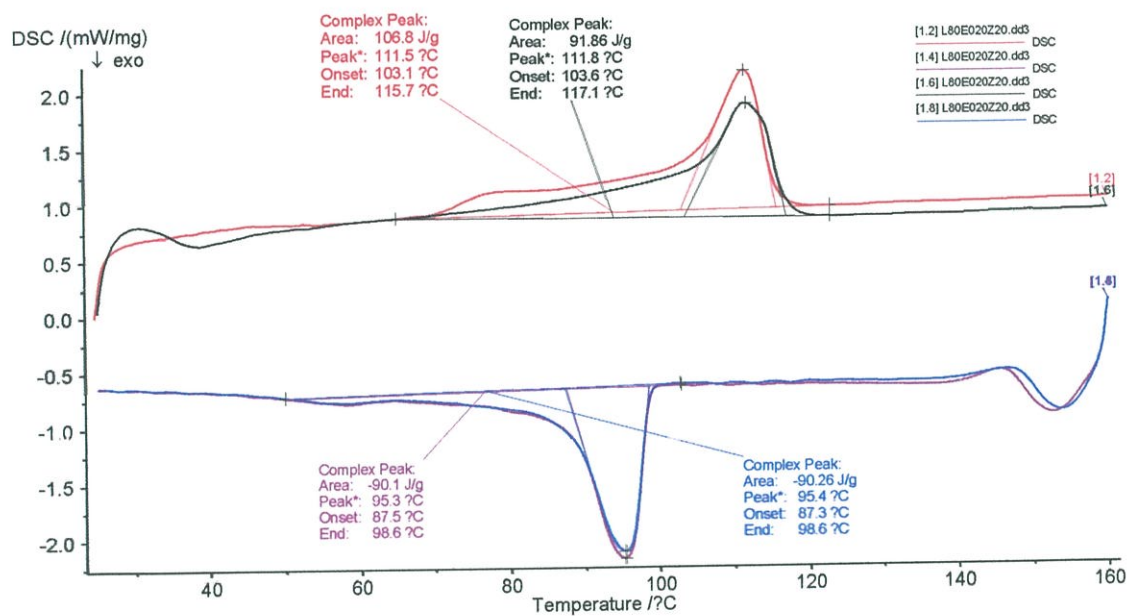
รูปที่ ก-8 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม L80EO20



รูปที่ ก-9 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม L80EA20Z20



รูปที่ ก-10 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม L80EA10EO10Z20



รูปที่ ก-11 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของฟิล์ม L80EO20Z20

## ภาคผนวก ข

### การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง

สูตร	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ )
L100	53	7.4
L80EA20	56	8.3
L80EA15EO5	56	7.6
L80EA10EO10	52	7.9
L80EA5EO15	51	8.1
L80EO20	51	8.6
L80EA20Z20	57	8.9
L80EA10EO10Z20	56	14.0
L80EO20Z20	56	16.0