

สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม แอลดีพีอี/อีเอ็มเอ/ซีโอไลต์เอ  
เพื่อใช้งานบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด

**PROPERTIES OF LDPE/EMA/ZEOLITE A BLEND FILMS  
FOR FRESH-PRODUCE PACKAGING**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-SC-M-014-055

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PROPERTIES OF LDPE/EMA/ZEOLITE A BLEND FILMS  
FOR FRESH-PRODUCE PACKAGING**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY  
FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2014**

**KMITL-2014-SC-M-014-055**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2014**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม แอลดีพีอี/อีเอ็มเอ/ซีไอไลต์เอ  
เพื่อใช้งานบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด  
PROPERTIES OF LDPE/EMA/ZEOLITE A BLEND FILMS FOR  
FRESH-PRODUCE PACKAGING

นักศึกษา

นายฐิตินันท์ ศิริจันทน์

รหัสประจำตัว

55651102

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา


เทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภัทธารุช	มนตรีวิเศษ	
รศ.ดร.จุฑารัตน์	ปรัชญาวรรการ	
รศ.ดร.กัลยาณี	สิริสิงห์	
รศ.ดร.ตะวัน	สุขน้อย	
ผศ.ดร.สุภารัตน์	รักชลี	

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2557 เวลา 09.00 – 12.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 306 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุขนิ ฐนะบริพัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ ๑๒ เดือน ธันวาคม พ.ศ. ๕๗

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม แอลดีพีอี/อีเอ็มเอ/ซีโอไลต์เอ เพื่อ  
งานบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด  
นักศึกษา นายฐิตินันท์ ศิริจันทนันท์  
รหัสประจำตัว 55651102  
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต  
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์  
พ.ศ. 2557  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักษลธิ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ด้วยเอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (EMA) และซีโอไลต์เอ เพื่องานบรรจุภัณฑ์ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสด โดยศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA เป็น 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 ทำการผสมสูตรพอลิเมอร์ โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด และขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ LDPE/EMA มีการกระจายตัวของ EMA ที่ดี โดยค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและค่ายังมอดุลัสมีค่าน้อยกว่าฟิล์ม LDPE และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ EMA ส่วนค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ EMA การศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันซึ่งโคพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ในการเปรียบเทียบกับคือ EMA, เอทิลีนเอทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) และเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) พบว่าเมื่อควบคุมให้ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วใกล้เคียงกัน สมบัติเชิงกลของฟิล์มแต่ละสูตรมีค่าไม่แตกต่างกัน ฟิล์มสูตร L70E30 มีค่า WVP สูงกว่าฟิล์มชนิดอื่นๆ การศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอ (20% โดยน้ำหนัก) พบว่าซีโอไลต์เอกระจายตัวได้ดีในวัฏภาคของโคพอลิเมอร์ที่มีขั้ว โดยฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอนั้นมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากไม่แตกต่างกัน ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 มีค่า WVP มากกว่าฟิล์ม LDPE 180% และมีค่ามากกว่าฟิล์มสูตร L80M20 83% จากผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกชี้หูสด ที่ 5°C เป็นเวลา 20 วัน พบว่าบรรจุภัณฑ์จากฟิล์ม L80M20Z20 มีไอน้ำกักเก็บที่คงเหลือในบรรจุภัณฑ์น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่นๆ โดยฟิล์ม L80M20Z20 มีสมบัติความแข็งแรงดิ่งต่ำกว่าฟิล์ม LDPE แต่มีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในงานบรรจุภัณฑ์ งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของ LDPE สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มวัฏภาคอสัณฐานที่มีขี้วให้แกฟิล์มพอลิเมอร์ และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเติมซีโอโลต์เอ

**คำสำคัญ :** ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/เอทิลีนโคพอลิเมอร์, ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ, ซีโอโลต์เอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Properties of LDPE/EMA/Zeolite A blend films for fresh-produces packaging
<b>Student</b>	Mr. Thitinan Sirichantanan
<b>Student ID</b>	55651102
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Polymer Technology
<b>Year</b>	2014
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Suparat Rukchonlatee
<b>Thesis Coadvisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Tawan Sooknoi

### ABSTRACT

This research studied on modification of water vapor permeability (WVP) of low density polyethylene (LDPE) film by blending with ethylene methyl acrylate copolymer (EMA) and zeolite A for a longer shelf-life packaging of fresh produces. The LDPE/EMA compounds were mixed for blend ratios of 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 and 60/40 using an internal mixer. The films were prepared using a compression molding process. It was found that EMA was well dispersed in LDPE matrix. Tensile strength at yield and Young's modulus were lower than those of parent LDPE film. In addition, those properties were decreased when EMA content increased. The WVP of LDPE/EMA blend films increased with increasing EMA content. The effect of copolymer functional groups was studied using EMA, ethylene ethyl acrylate copolymer (EEA) and ethylene vinyl acetate copolymer (EVA). It was found that mechanical properties of all LDPE/Copolymer films were in similar range. However, the WVP of L70E30 film was the highest. The effect of zeolite A (20% by weight) was also studied and it was found that zeolite A was well dispersed and virtually found in the polar copolymer phase. Accordingly, no significant effect of zeolite A addition on tensile strength at yield of the film was illustrated. However, the WVP of L80M20Z20 film was higher than that of LDPE film 180% and that of L80M20 film 83%. In addition, the extending shelf-life of fresh chili with the developed packaging films was performed at 5°C for 20 days. It was found that the L80M20Z20 film package had the lowest water

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

condensed in the package. Although the tensile properties of L80M20Z20 film were lower than those of LDPE film, they were still in an acceptable range for packaging. From this research, it can be concluded that WVP of LDPE could be improved by increasing polar amorphous region in polymer and adding zeolite A.

**Keywords:** LDPE/Ethylene copolymer film, Water vapor permeation, Zeolite A



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ และ รศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาและข้อแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ภัทรารุช มนต์วิเศษ และ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร อาจารย์ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ และช่วย ตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. กัลยาณี สิริสิงห ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา ผู้ทรงคุณวุฒิการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บริษัทพีคิว เคมีคอลด์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ ซีไอไลต์เอ

ขอขอบพระคุณ คุณเทพศักดิ์ สิทธิอำไพ กรรมการผู้จัดการ บริษัทแบ็กส์ แอนด์ โกลฟ์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ EMA

ขอขอบพระคุณ คุณธนพัทธ์ กวีไตรภพ, Global Flexible Packaging Department Manager บริษัทเอสซีจี พลาสติก จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ EEA

ขอขอบพระคุณ JASSO Scholarship และ School of materials science, Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST) และ Professor Masayuki Yamaguchi และ Assistant Professor Shogo Nobukawa สำหรับคำแนะนำและให้คำปรึกษา สำหรับการใช้เครื่องมือ DMA และ Rheometer และขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ค่าเดินทางไปทำวิจัยระยะ สั้นที่ประเทศญี่ปุ่น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุชาติ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทาง อุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมถึงให้ คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ ตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์ และสถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุนการทำวิจัย และทุนสนับสนุนการเดินทางไปนำเสนอผลงานทาง วิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกให้การทำวิจัยนี้ดำเนินไปด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมายที่ยังมิได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ซึ่งผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นายฐิตินันท์ ศรีจันทน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	III
กิตติกรรมประกาศ .....	V
สารบัญ .....	VII
สารบัญตาราง .....	XII
สารบัญรูป .....	XIV
<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>6</b>
2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว .....	6
2.1.1 การเปลี่ยนแปลงของพืชหลังการเก็บเกี่ยว .....	8
2.1.1.1 การหายใจ .....	8
2.1.1.2 การคายน้ำ .....	14
2.1.1.3 การสุก .....	16
2.2 การซึมผ่าน .....	19
2.2.1 สมการการแพร่และการดูดซับ .....	20
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านฟิล์มพลาสติก .....	20
2.2.3 การตรวจวัดการซึมผ่าน .....	26
2.2.3.1 การตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ .....	26
2.2.3.2 การตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ .....	28
2.3 บรรจุกัมมันต์สำหรับรักษาคุณภาพพืช .....	30
2.3.1 ความต้องการทางบรรจุกัมมันต์ของผักและผลไม้สด .....	31
2.3.2 การออกแบบบรรจุกัมมันต์สำหรับผู้บริโภค .....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) .....	36
2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ LDPE .....	36
2.4.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LDPE .....	36
2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน .....	37
2.5 พอลิเมอร์ร่วมพอลิเอทิลีน (Ethylene copolymer) .....	38
2.5.1 เอทิลีนเอทิลอะคริเลต โคลิโพลิเมอร์ (EEA) .....	38
2.5.1.1 ลักษณะทั่วไปของ EEA .....	38
2.5.1.2 สมบัติบางประการของ EEA .....	39
2.5.1.3 สมบัติในการใช้งานของ EEA เมื่อเปรียบเทียบกับ LDPE .....	39
2.5.1.4 การประยุกต์ใช้งาน .....	39
2.5.2 เอทิลีนเมทิลอะคริเลต โคลิโพลิเมอร์ (EMA) .....	40
2.5.2.1 ลักษณะทั่วไปของ EMA .....	40
2.5.2.2 สมบัติบางประการของ EMA .....	40
2.5.2.3 สมบัติในการใช้งานของ EMA เปรียบเทียบกับ LDPE .....	41
2.5.2.4 การประยุกต์ใช้งาน .....	41
2.5.3 เอทิลีนไวนิลอะซิเตต โคลิโพลิเมอร์ (EVA) .....	41
2.5.3.1 ลักษณะทั่วไปของ EVA .....	41
2.5.3.2 สมบัติบางประการของ EVA .....	42
2.5.3.3 การประยุกต์ใช้งาน .....	43
2.6 ซีโอไลต์เอ .....	43
2.6.1 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ .....	44
2.6.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ .....	44
2.6.3 สมบัติของซีโอไลต์เอ .....	45
2.6.4 การนำซีโอไลต์เอไปใช้งาน .....	46
2.7 พอลิเมอร์ผสม .....	46
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	48
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>55</b>
3.1 สารเคมี .....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	56
3.3 ขั้นตอนการทดลอง .....	58
3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม .....	58
3.3.2 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ .....	59
3.3.2.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยการผสมผ่านสูตรเข้มข้น (Masterbatch mixing) .....	59
3.3.2.2 สูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอด้วยการผสมแบบครั้งเดียว (One shot mixing) .....	60
3.3.3 การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการกดอัด .....	60
3.3.4 ความหนาของฟิล์ม .....	61
3.3.5 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม .....	61
3.3.6 การศึกษาพฤติกรรมการไหลด้วย Capillary rheometer .....	61
3.3.7 การศึกษาพฤติกรรมการไหลด้วย Cone and plate rheometer .....	61
3.3.8 การศึกษาสมบัติทางความร้อนแบบพลวัตด้วย DMA .....	62
3.3.9 การวิเคราะห์ปริมาณซีโอไลต์เอในฟิล์มตัวอย่าง .....	62
3.3.10 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และ ปริมาณผลึก .....	62
3.3.11 การศึกษาสัณฐานวิทยา .....	63
3.3.11.1 การกระจายตัวของเอทิลีน โคอพอลิเมอร์ .....	63
3.3.11.2 การกระจายตัวของซีโอไลต์เอ .....	63
3.3.12 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง .....	64
3.3.13 สมบัติความแข็งแรงเชิงกล .....	65
3.3.14 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ .....	65
3.3.15 การทดสอบมุมสัมผัส .....	66
3.3.16 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ .....	66
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง .....</b>	<b>68</b>
4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA .....	68
4.1.1 การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสม .....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 การศึกษาผลของการกระจายตัวของ EMA ในฟิล์ม LDPE/EMA .....	71
4.1.3 การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LDPE/EMA .....	73
4.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE/EMA .....	74
4.1.5 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง .....	76
4.2 การศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชัน .....	78
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว .....	79
4.2.2 การศึกษาผลของการกระจายตัวของ Copolymer ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ...	81
4.2.3 การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม .....	82
4.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม .....	83
4.2.5 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม .....	85
4.3 การศึกษาผลของลำดับการผสมและผลของการเติมซีโอไลต์เอ .....	88
4.3.1 การศึกษาผลของลำดับในการผสม .....	88
4.3.1.1 การตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์เอใน L80M20Z20 ที่มีลำดับ การผสมต่างกัน .....	89
4.3.1.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน .....	89
4.3.1.3 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับผสมต่างกัน	91
4.3.1.4 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับผสมต่างกัน .....	91
4.3.1.5 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน	93
4.3.2 การศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอ .....	94
4.3.2.1 การตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์เอในพอลิเมอร์ผสม .....	95
4.3.2.2 การศึกษาสมบัติการไหลที่สภาวะแรงเฉือนสูง .....	95
4.3.2.3 พฤติกรรมทางความร้อนแบบพลวัตของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเมอร์ ผสม .....	96
4.3.2.4 การศึกษาการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ...	100
4.3.2.5 ผลของการเติมซีโอไลต์เอที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม พอลิเมอร์ .....	102
4.3.2.6 ผลของการเติมซีโอไลต์เอที่มีต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.	103
4.3.2.7 ผลของการเติมซีโอไลต์เอต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของ ฟิล์มพอลิเมอร์ .....	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ .....	108
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	<b>114</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	114
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	115
เอกสารอ้างอิง .....	116
ภาคผนวก .....	121
ประวัติผู้เขียน .....	146



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	การเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ EVA และ EMA .....	3
2.1	อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม และระยะเวลาในการเก็บรักษาผัก .....	7
2.2	อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Climacteric .....	11
2.3	อัตราการหายใจของผลไม้แต่ละชนิดประเภท Non-climacteric .....	12
2.4	ผลของโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน ....	20
2.5	ผลของการจัดระเบียบ โมเลกุลต่อค่า Pm (O <sub>2</sub> ) ของพลาสติก .....	21
2.6	ผลของระดับของความเป็นผลึกต่อค่า Pm (O <sub>2</sub> ) ของพลาสติก .....	22
2.7	ขนาดโมเลกุลและสัดส่วนของค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซไนโตรเจน ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ .....	23
2.8	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ การละลายและค่าอัตราการซึมผ่านของ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไนโตรเจน ของ LDPE ที่ 25°C .....	24
2.9	ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์ม พลาสติกชนิดต่างๆ .....	32
2.10	ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ .....	32
2.11	สมบัติของฟิล์มพลาสติกที่ไม่มีเจาะรู และฟิล์มพลาสติกที่มีการเจาะรูขนาดเล็ก ..	35
2.12	สมบัติทั่วไปของ LDPE .....	37
3.1	สมบัติบางประการของ LDPE .....	55
3.2	สมบัติบางประการของเอทิลีน โคพอลิเมอร์ .....	56
3.3	สมบัติบางประการของ Zeolite A .....	56
3.4	พอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมดโดยน้ำหนัก .....	58
3.5	องค์ประกอบและปริมาณสารที่ใส่ในเครื่องผสมของพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20	59
3.6	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์ (โดยน้ำหนัก) .....	60
4.1	สูตรพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA และความหนาของฟิล์ม .....	68
4.2	T <sub>m</sub> และ T <sub>c</sub> ของ LDPE และ EMA และความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมในฟิล์ม LDPE/EMA .....	73
4.3	ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ .....	77
4.4	สูตรพอลิเมอร์ผสม LDPE/Copolymer และความหนาของฟิล์ม .....	79
4.5	ค่าดัชนีการบดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม .....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.6	$T_m$ และ $T_c$ ของ LDPE และความเป็นผลึกรวมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม .....	83
4.7	ค่ามุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิวภาคตัดขวางของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม .....	87
4.8	องค์ประกอบของ L80M20Z20 โดยน้ำหนักและความหนาของฟิล์มตัวอย่าง .....	88
4.9	ปริมาณซีโอไลต์เอใน L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน .....	89
4.10	พฤติกรรมทางความร้อนและความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ในฟิล์ม L80M20Z20	91
4.11	ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมซีโอไลต์เอและความหนาความหนาเฉลี่ย .....	95
4.12	ปริมาณซีโอไลต์เอในพอลิเมอร์ผสม .....	95
4.13	ค่า $T_g$ ของพอลิเมอร์ .....	100
4.14	สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ .....	103
4.15	ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมซีโอไลต์เอและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ .....	108
4.16	ปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม .....	112
ค.1	ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ .....	133
ง.1	ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร LDPE .....	135
ง.2	น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร LDPE และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์ .....	135
ง.3	ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร L80Z20 .....	136
ง.4	น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร L80Z20 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์ .....	136
ง.5	ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร L80M20 .....	137
ง.6	น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร L80M20 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์ .....	137
ง.7	ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร L80M20Z20 .....	138
ง.8	น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร L80M20Z20 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์ .....	138
ข.1	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฟิล์มพลาสติกโพลีเอทิลีนสำหรับงานเกษตรกรรม (มอก. 711-2530) .....	145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน .....	10
2.2 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้ก๊าซ O <sub>2</sub> และไม่ใช้ก๊าซ O <sub>2</sub> .....	10
2.3 กระบวนการซึมผ่านพลาสติกของก๊าซหรือไอ .....	19
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน สำหรับพลาสติก PE .....	22
2.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน สำหรับฟิล์มพลาสติก ชนิดต่างๆ .....	25
2.6 การตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซผ่านพลาสติกด้วยวิธี Manometric method	26
2.7 แผนภูมิการตรวจวัดอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน ตามมาตรฐาน ASTM D3985 ..	28
2.8 อุปกรณ์สำหรับตรวจวัด WVTR .....	29
2.9 โครงสร้างของ LDPE .....	36
2.10 โครงสร้างของ EEA .....	38
2.11 โครงสร้างของ EMA .....	40
2.12 โครงสร้างของ EVA .....	42
2.13 Frame work ของซีไอไลต์เอ .....	44
2.14 โครงผลึกของซีไอไลต์เอ .....	44
2.15 ภาพขยายของซีไอไลต์เอ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	45
2.16 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเข้ากันได้ (Miscible) .....	47
2.17 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีไม่ผสมเข้ากันได้ (Immiscible) .....	48
3.1 ลักษณะของชิ้นงานตัวอย่าง .....	64
3.2 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงลักษณะแบบ Die C .....	65
4.1 สมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว LDPE/EMA ที่ 130°C .....	69
4.2 สมบัติการไหลที่สภาวะแรงเฉือนสูงของพอลิเมอร์หลอมเหลว LDPE/EMA ที่ 190°C .....	70
4.3 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์ม LDPE/EMA ที่มีการสกัดวัฏภาคของ EMA ออก (กำลังขยาย 3500 เท่า) .....	72
4.4 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LDPE/EMA .....	75
4.5 สมบัติความแข็งแรงลักษณะของฟิล์ม LDPE/EMA .....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EMA .....	77
4.7 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง FT-IR .....	80
4.8 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการสกัดวัฏภาคกระจายออก (กำลังขยาย 3500 เท่า) .....	82
4.9 อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม .....	84
4.10 อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อสมบัติความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม .....	85
4.11 อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม .....	85
4.12 แบบจำลองสัณฐานวิทยาของฟิล์ม LDPE/Copolymer ที่มีอัตราส่วนต่างกัน .....	86
4.13 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน ก่อนสกัดวัฏภาคกระจายออก (กำลังขยาย 5000 เท่า) .....	90
4.14 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน หลังสกัดวัฏภาคกระจายออก (กำลังขยาย 5000 เท่า) .....	90
4.15 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน .....	93
4.16 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับในการผสมที่ต่างกัน .....	94
4.17 สมบัติการไหลที่สภาวะแรงเฉือนสูงของพอลิเมอร์ที่มีซีไอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก .....	96
4.18 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสสะสม, มอดูลัสสูญเสีย และ $\tan \delta$ กับอุณหภูมิ ของพอลิเมอร์ที่มีการเติมและไม่เติมซีไอไลต์เอ .....	99
4.19 พื้นผิวภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมซีไอไลต์เอ 20% (กำลังขยาย 5000 เท่า) .....	100
4.20 พื้นผิวที่แตกหักของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมซีไอไลต์เอหลังสกัด (กำลังขยาย 5000 เท่า) .....	101
4.21 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีการเติมซีไอไลต์เอ .....	106
4.22 สมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการเติมซีไอไลต์เอเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมซีไอไลต์เอ .....	107
4.23 ภาพการทดสอบการใช้ฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์ที่เก็บรักษาพริกก่อนและหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 20 วัน ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5°C ความชื้นสัมพัทธ์ 40% .....	110
4.24 ปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์ในระยะเวลา 20 วัน .....	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 ปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ และปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์เทียบกับปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม .....	113
ข.1 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE .....	125
ข.2 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม EMA .....	126
ข.3 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม EVA .....	126
ข.4 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม EEA .....	127
ข.5 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L90M10 .....	127
ข.6 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L80M20 .....	128
ข.7 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L70M30 .....	128
ข.8 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L60M40 .....	129
ข.9 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L70E30 .....	129
ข.10 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L80V20 .....	130
ข.11 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L80Z20 .....	130
ข.12 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L80M20Z20 (via Masterbatch mixing) .....	131
ข.13 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L80M20Z20 (via One shot mixing) .....	131
ข.14 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L80V20Z20 .....	132
ข.15 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L70E30Z20 .....	132
จ.1 เทอร์โมแกรมของ LDPE .....	140
จ.2 เทอร์โมแกรมของ EMA .....	141
จ.3 เทอร์โมแกรมของ EVA .....	142
จ.4 เทอร์โมแกรมของ EEA .....	143
ฉ.1 สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ที่สถานะแรงเฉือนสูง .....	144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ผักและผลไม้สดหลังการเก็บเกี่ยวแล้วยังคงมีชีวิตอยู่ มีการหายใจ การคายน้ำ และกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) อื่นๆ ซึ่งหากเกิดในอัตราที่สูงจะทำให้ผักและผลไม้สดเน่าเสียเร็ว [1] ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ที่จะนำมาใช้บรรจุต้องสามารถระบายอากาศได้เพียงพอ สามารถระบายไอน้ำและก๊าซที่เกิดขึ้นจากการหายใจได้อย่างรวดเร็วให้ทันกับอัตราการหายใจของผลิตภัณฑ์สดเหล่านั้น เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำที่เป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเน่าเสียได้ [2]

ในบรรดาพลาสติกที่ใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) นับว่ามีการใช้กันอย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นรูปแบบของขวด ก่อถ่วง ถัง เชือก ตาข่าย ฯลฯ อีกทั้งมีสมบัติแตกต่างกันไปตามชนิดและโครงสร้าง เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เป็นต้น ซึ่ง LDPE เป็นหนึ่งในพลาสติกที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ทั้งในรูปวัสดุอ่อนตัวและภาชนะบรรจุทรงรูป โดยสมบัติทั่วไปของ LDPE คือ เหนียว โปร่งแสง ทนต่อแรงดึงขาดได้ดี ขึ้นรูปได้ง่าย ราคาถูก ไม่เป็นพิษ จึงเหมาะกับการนำมาทำบรรจุภัณฑ์เพื่อบรรจุอาหารและยา แต่ LDPE มีการซึมผ่านของไอน้ำต่ำทำให้ไม่เหมาะในการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์สด จึงมีการใช้การเจาะรูที่บรรจุภัณฑ์เพื่อช่วยระบายไอน้ำที่พืชหายใจออกมา แต่การเจาะรูนั้นทำให้บรรจุภัณฑ์ขาดความสวยงาม ทำให้ความแข็งแรงลดลงและเกิดการฉีกขาดได้ง่าย นอกจากนี้อาจทำให้จุลินทรีย์ ในอากาศสัมผัสกับผักและผลไม้ได้ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำของบรรจุภัณฑ์โดยไม่ต้องทำการเจาะรูที่บรรจุภัณฑ์ [2]

งานวิจัยก่อนหน้านี้นี้จึงได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากฟิล์มที่มีการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี เพื่อบรรจุผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยเลือกใช้ LDPE เป็นพอลิเมอร์ที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ ซึ่งได้มีการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำโดยการเติมซีโอไลต์ ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง มีรูพรุนและมีสมบัติการดูดซับไอน้ำได้ดีมาผสมกับ LDPE เพื่อเพิ่มสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ แต่

การนำเอาซีโอไลต์ที่มีขั้วมาผสมกับ LDPE ที่ไม่มีขั้วนั้นทำให้เกิดปัญหาการกระจายตัวไม่ดีของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลต์เอและใส่ซีโอไลต์เอได้ในปริมาณน้อย เนื่องจากความแตกต่างกันระหว่างขั้วของฟิล์ม LDPE กับซีโอไลต์เอ [3] งานวิจัยต่อเนื่องจึงมีการปรับปรุงแก้ไขปัญหาเรื่องการกระจายตัวโดยการนำเอาซีโอไลต์เอมาเคลือบด้วยกรดสเตียริก เพื่อช่วยในการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์ม LDPE ให้ดีขึ้น แต่กรดสเตียริกที่ใช้เคลือบผิวของซีโอไลต์เอนั้นเป็นกรดไขมันที่ไม่ชอบน้ำ จึงส่งผลให้ฟิล์มที่ได้นั้นมีความชอบน้ำลดลงและทำหน้าที่เหมือนตัวกั้น ทำให้อิอน้ำซึมผ่านรูพรุนของซีโอไลต์ได้ยากขึ้น [4] และงานวิจัยถัดมามีการใช้ซีโอไลต์เอและแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) เป็นสารตัวเติมในการปรับปรุงฟิล์มเอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โคลพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) พบว่าฟิล์ม EVA (ปริมาณไวนิลอะซิเตต (VA) 27.5%) ที่ถูกปรับปรุงด้วยซีโอไลต์เอมีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมากกว่า มีลักษณะการกระจายตัวของซีโอไลต์เอที่ดีกว่าและมีสมบัติเชิงกลดีกว่าฟิล์ม EVA ที่ถูกปรับปรุงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต [5] จากการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ EVA พบว่า พอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA (VA 9%) ที่มีปริมาณของ LDPE สูงมีความเข้ากันได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของ EVA สูงและพอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิการหลอมผลึก (Crystalline melting temperature,  $T_m$ ) ของ LDPE ลดลง เนื่องจากผลการละลายของ EVA หรือ การเกิดผลึกร่วมของ LDPE กับบางส่วนของ EVA [6]

นันทวรรณ ม่วงมี [7] ได้ทำการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม LDPE ที่มีการปรับปรุงด้วย EVA และซีโอไลต์เอ พบว่า EVA สามารถกระจายตัวได้ดีใน LDPE และเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA และซีโอไลต์เอ ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้น เนื่องจากความมีขั้วของซีโอไลต์เอและการมีวัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วของ EVA เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LLDPE กับ EVA [8] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ EVA ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากความมีขั้วที่สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ของน้ำที่มีค่ามุมลดลง โดยที่อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมผลึก และปริมาณความเป็นผลึกของ LLDPE ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และจากงานวิจัยที่ศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันของ โคลพอลิเมอร์ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE โดยใช้เอทิลีน ไวนิลแอลกอฮอล์ โคลพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl alcohol copolymer, EVOH) และ EVA ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของ LDPE/EVOH เปรียบเทียบกับ LDPE/EVA พบว่า EVOH สามารถกระจายตัวได้ดีในฟิล์ม LDPE/EVOH และฟิล์มนี้มีค่าความ

แข็งแรงถึง ณ จุดขาดและค่ายังมอดูลัสสูงกว่า พลาสติก LDPE/EVA เมื่อมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันในฟิล์มใกล้เคียงกัน แต่ฟิล์มทั้งสองชนิดมีการซึมผ่านของไอน้ำที่ไม่แตกต่างกันเนื่องจากฟิล์ม LDPE/EVOH เกิดการแข่งขันกันระหว่าง สันฐานวิทยาและความมีขี้ว กล่าวคือ EVOH มีขี้วสูงกว่า EVA แต่ EVOH สามารถเกิดผลึกในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ [9] จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับ LDPE นั้นต้องเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นอสัณฐานสูงและมีขี้วสูง

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ EVA และ EMA [10]

สมบัติ	EVA	EMA
อุณหภูมิในการขึ้นรูป (Processing range), °C	สูงสุด 230	150 - 325
เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)	ต่ำ	ดีเยี่ยม
กัดกร่อน (Corrosive)	กัดกร่อน	ไม่กัดกร่อน
ว่องไวต่อความชื้น (Moisture sensitive)	ไม่ว่องไวต่อความชื้น	ไม่ว่องไวต่อความชื้น

ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ EVA และเอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene methyl acrylate copolymer, EMA) พบว่า EVA มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ส่วน EMA มีค่าดังกล่าวดีเยี่ยม งานวิจัยนี้จึงเลือก EMA เป็น โคพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมกับ LDPE เพราะ EMA เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีขี้วและมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า EVA นอกจากนี้ การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันที่มีการซึมผ่านไอน้ำซึ่งโคพอลิเมอร์ที่เลือกนำมาศึกษาในเชิงเปรียบเทียบคือเอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene ethyl acrylate copolymer, EEA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขี้วและมีหมู่ข้างเคียง (Side group) ที่มีความเกะกะมากกว่า EMA

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีการซึมผ่านไอน้ำได้ดีเพื่อนำไปใช้สำหรับผลิตผลทางการเกษตร โดยทำการปรับเปลี่ยนคู่พอลิเมอร์ผสมเพื่อศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันของโคพอลิเมอร์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม LDPE ซึ่งพอลิเมอร์ที่เลือกนำมาผสมกับ LDPE คือ EMA และ EEA ซึ่งพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้มีขี้วและมีหมู่ข้างเคียงที่มีขนาดใหญ่ จึงน่าจะทำให้ฟิล์มที่เตรียมได้มีความมีขี้วและมีความเป็นอสัณฐานสูง ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นและช่วยกระจายอนุภาคของซีโอไลต์ได้ดี เพื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจาก LDPE/EVA และมีการเติมซีโอไลต์เอในปริมาณเท่าๆ กัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเตรียมฟิล์มที่มีการซึมผ่านไอน้ำได้ดีจาก LDPE/EMA และ LDPE/EEA ที่มีซีโอไลต์เอ เป็นองค์ประกอบ
2. สามารถเข้าใจถึงปัจจัยที่ส่งผลถึงสมบัติของฟิล์มในแง่หมู่ฟังก์ชันของกลุ่มพอลิเมอร์ผสม

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการเตรียมและผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA ในอัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก
2. ศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันของโคพอลิเมอร์ในฟิล์มพอลิเมอร์ LDPE/EMA, LDPE/EEA และ LDPE/EVA ที่มีต่อการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ โดยมีการควบคุมปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีซ้ำให้ใกล้เคียงกัน
3. ศึกษาผลของลำดับการผสมในพอลิเมอร์สูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอและศึกษาผลของซีโอไลต์เอที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
4. ขึ้นรูปฟิล์มจากกระบวนการกดอัด (Compression molding)
5. ศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวด้วยเครื่อง Cone and plate rheometer และ Capillary rheometer
6. ศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึงของฟิล์มและความแข็งแรงลักษณะของฟิล์มด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)
7. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) และ Dynamic mechanical analysis (DMA)
8. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)
9. ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
10. ศึกษาสมบัติพื้นผิวด้วยการทดสอบมุมสัมผัส ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มด้วยเครื่อง Water vapor permeability analyzer
12. ทดลองทำเป็นบรรจุภัณฑ์ยืดอายุสำหรับเก็บรักษาพริกชี้หนูสด

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตฟิล์มที่มีความสามารถการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี มาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดได้นานขึ้น เข้าใจถึงอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม LDPE และนำความรู้ที่ได้ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว [11]

การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อรักษาคุณภาพที่ดีของผักและผลไม้ไว้ ซึ่งหลังการเก็บเกี่ยวแล้วผลิตผลนั้นจะถูกตัดขาดจากแหล่งน้ำที่เคยได้รับจากราก แต่การสูญเสียน้ำเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา เนื่องจากผลิตผลนั้นยังคงมีการหายใจและคายน้ำอยู่เหมือนกับขณะที่อยู่บนต้น การสูญเสียน้ำนอกจากจะทำให้น้ำหนักที่จะขายขาดหายไปแล้ว ยังทำให้รูปร่างลักษณะของผลิตผลนั้นเปลี่ยนไปในทางที่แย่ลง ทำให้รสชาติและคุณภาพของผลิตผลนั้นๆ เปลี่ยนไปด้วย การสูญเสียน้ำออกจากพืชนั้นขึ้นกับความชื้นบรรยากาศภายนอก ความชื้นนี้จะแปรผันไปตามสภาพแวดล้อม จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มาของน้ำและอุณหภูมิ ดังนั้นหลังจากการเก็บเกี่ยว ควรมึวิธีการเก็บรักษาที่ดี เพราะการเก็บรักษาเป็นวิธีการสำคัญในการยืดอายุของผลิตผลทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยวให้มีอายุการใช้ประโยชน์ได้นานขึ้น โดยที่ยังมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

ในการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรนั้นจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานเพียงใดเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ [11]

- ความชื้นในบรรยากาศ ความชื้นหรือความดันไอน้ำในบรรยากาศปกติจะมีอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าความชื้นอิ่มตัว นั่นคือความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 100% จึงจะมีโอกาสที่บรรยากาศจะรับน้ำได้อีกมาก ส่วนผักและผลไม้ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่า 70% และส่วนใหญ่มีน้ำอยู่ถึง 90% ความดันไอน้ำในผลไม้ก่อนข้างสูงเพราะผลไม้เปรียบเสมือนภาชนะปิด ไอน้ำรอบๆ เซลล์จะอยู่ในสมดุลกับน้ำภายในเซลล์ ซึ่งอาจถือได้ว่าความดันไอน้ำภายในผลิตผลจะมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว เพราะฉะนั้นจึงมีการสูญเสียน้ำออกจากผลิตผลอยู่ตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับว่าบรรยากาศภายนอกมีความชื้นมากน้อยเพียงใดในกรณีที่ความชื้นของบรรยากาศรอบๆ อิ่มตัวด้วยน้ำหรือมีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100% น้ำยังมีโอกาสสูญเสียดังกล่าวให้กับบรรยากาศได้ เนื่องจากผลิตผลเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจทำให้มีพลังงานความร้อนออกสู่บรรยากาศรอบๆ ทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นและทำให้อากาศรับน้ำได้มากขึ้นกว่าเดิม

- อุณหภูมิ มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับความชื้นและการสูญเสียน้ำ ทั้งนี้เพราะสารทุกอย่างมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะพวกของเหลวและก๊าซ ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนไหวของโมเลกุลจะมีมาก โอกาสของน้ำที่จะหลุดออกจากผักและผลไม้จึงมีค่าสูงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม ความดันไอน้ำของอากาศที่อยู่รอบๆ ไม่ได้สูงตามไปด้วย เพราะมีปริมาณ โมเลกุลของน้ำอยู่เท่าเดิม แต่ไม่ได้ถูกจำกัดปริมาณเหมือนในผลไม้ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำระหว่างภายในผลิตผลกับภายนอกผลิตผลจึงเพิ่มสูงมากขึ้น โอกาสที่ไอน้ำจะออกจากผลิตผลสู่ภายนอกจึงมีมากขึ้น อุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษานอกจากจะต้องควบคุมให้ต่ำแล้วยังต้องควบคุมให้สม่ำเสมออยู่ตลอดเวลาด้วย เพราะถ้าหากอุณหภูมิขึ้นลงอยู่เสมอ ผลิตผลจะสูญเสียน้ำออกไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จนกระทั่งอากาศรอบๆ อิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงไอน้ำจะควบแน่นเป็นหยดน้ำอยู่ตามภาชนะบรรจุหรือผนังห้องเก็บรักษา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีกอากาศจะรับไอน้ำจากผลิตผลได้อีกเรื่อยๆ ทำให้ผลิตผลสูญเสียน้ำไปมาก สภาพในที่เก็บรักษาจะชื้นแฉะทำให้ผลิตผลเน่าเสียได้ง่าย

- การถ่ายเทอากาศ ในระหว่างการเก็บรักษาจำเป็นต้องมีการระบายถ่ายอากาศ เนื่องจากสภาพบรรยากาศปกติประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิดซึ่งชนิดที่มีความสำคัญและมีความจำเป็นต่อการหายใจของผลิตผลคือ ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ )

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม และระยะเวลาในการเก็บรักษาผัก [12-13]

ชนิดของผลิตผล	อุณหภูมิ		ความชื้นสัมพัทธ์	ระยะเวลาที่เก็บรักษาได้
	°F	°C		
หน่อไม้ฝรั่ง	32	0	85-90	3-4 สัปดาห์
บรอกโคลี	32	0	90-95	7-10 วัน
กะหล่ำปลี				
พันธุ์เบา	32	0	90-95	3-6 สัปดาห์
พันธุ์หนัก	32	0	90-95	3-4 สัปดาห์
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

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ชนิดของผลิตผล	อุณหภูมิ		ความชื้นสัมพัทธ์	ระยะเวลาที่เก็บรักษาได้
	°F	°C		
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	55-70	13-21	85-90	2-6 สัปดาห์
พริกชี้หนู	47-48	8-9	85-90	2-3 สัปดาห์

### 2.1.1 การเปลี่ยนแปลงของพืชหลังการเก็บเกี่ยว

ผลิตผลเกษตรสดที่เก็บเกี่ยวมาจากต้นแล้ว ยังมีชีวิตมีการหายใจกระบวนการต่างๆ ทั้ง สรีระและชีวเคมียังคงดำเนินอยู่เช่นเดียวกับระยะที่ยังติดอยู่บนต้น ดังนั้นพืชผลหลังการเก็บเกี่ยว ยังคงมีการหายใจมีการคายน้ำเหมือนกับเมื่ออยู่บนต้น การสูญเสียเนื่องจากการหายใจและการคายน้ำขณะที่ผลิตผลยังอยู่บนต้นเดิมจะถูกชดเชยโดยน้ำที่ดูดจากดินเข้าสู่ภายในต้นและอาหารที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ทั้งแร่ธาตุที่ได้จากดิน ส่วนการหายใจและการคายน้ำที่เกิดหลังจากการเก็บเกี่ยว จะถูกชดเชยด้วยอาหารสะสมภายในพืชไม่มีการหามาเพิ่มเติมจากภายนอกและใช้ความชื้นที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อเท่านั้น ทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่า เทียนและเน่าเสียในที่สุด ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงด้านเคมีและชีวเคมีที่เกิดขึ้นกับผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยวจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพต่อผลิตผลเกษตรสด การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมีผลทำให้คุณภาพดีขึ้นหรือเลวลง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในพืชหลังเก็บเกี่ยวมีหลายประการดังต่อไปนี้ [14]

#### 2.1.1.1 การหายใจ [15]

ผัก ผลไม้ และผลิตผลทางการเกษตรทุกชนิดเป็นสิ่งมีชีวิต การเก็บเกี่ยวออกจากต้นไม่ทำให้กระบวนการต่างๆ ภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตหยุด ดังนั้นผลิตผลทางการเกษตรทุกชนิด ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวจึงมีชีวิตอยู่ ประกอบด้วยเนื้อเยื่อและเซลล์ที่มีชีวิต การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวจึงต้องกระทำด้วยความระมัดระวังและต้องคำนึงเสมอว่ากำลังปฏิบัติต่อสิ่งมีชีวิต

เซลล์ของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ต้องการพลังงานจำนวนหนึ่ง เพื่อใช้ในการ

สังเคราะห์สารต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับเมตาโบลิซึมของเซลล์ จึงมีการหายใจเอาก๊าซออกซิเจนเพื่อ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปออกซิไดส์สารอาหารต่างๆ ที่มีอยู่ในเซลล์ให้เป็นพลังงานเพื่อให้กระบวนการต่างๆ ภายในเซลล์ดำเนินต่อไปทำให้ดำรงชีวิตอยู่ได้

การหายใจของผลิตผลสดมี 3 ขั้นตอน [16] คือ

1. การย่อยคาร์โบไฮเดรตพวกที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายๆ โมเลกุลให้กลายเป็นโมเลกุลเดี่ยว

2. ขั้นตอนการเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นให้เป็นกรดไพรูวิก

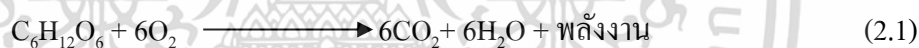
3. ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไพรูวิกและกรดอินทรีย์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานซึ่งเกิดในการหายใจของผลิตผลหรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ

ชนิดของการหายใจมี 2 ชนิด [15] คือ

1. การหายใจที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic respiration)

การหายใจที่เกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันของน้ำตาล ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน ในปฏิกิริยาออกซิเดชันจะมีกรดอินทรีย์ต่างๆ เอนไซม์ และโคเอนไซม์ต่างๆ เข้ามาเกี่ยวข้องในการใช้ออกซิเจนผ่าน Respiration chain

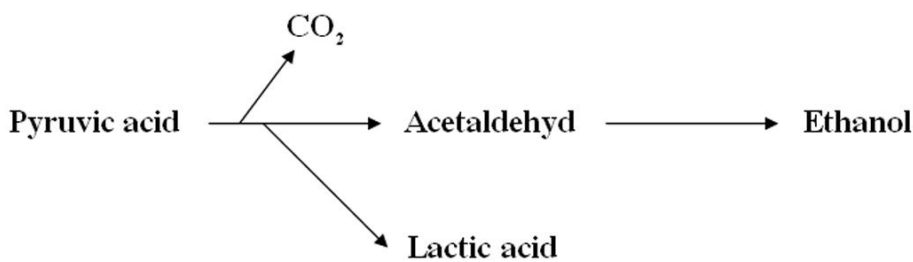
การออกซิเดชันของน้ำตาลที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สรุปได้สมการดังนี้



พลังงานที่เกิดขึ้นอยู่ในรูป ATP (Adenosine triphosphate) โดยที่การหายใจในสภาพที่มีก๊าซออกซิเจนสมบูรณ์จะได้ปริมาณ ATP ต่อโมเลกุลน้ำตาลมากกว่าการหายใจในสภาพที่มีก๊าซออกซิเจนน้อยหรือไม่มีก๊าซออกซิเจน

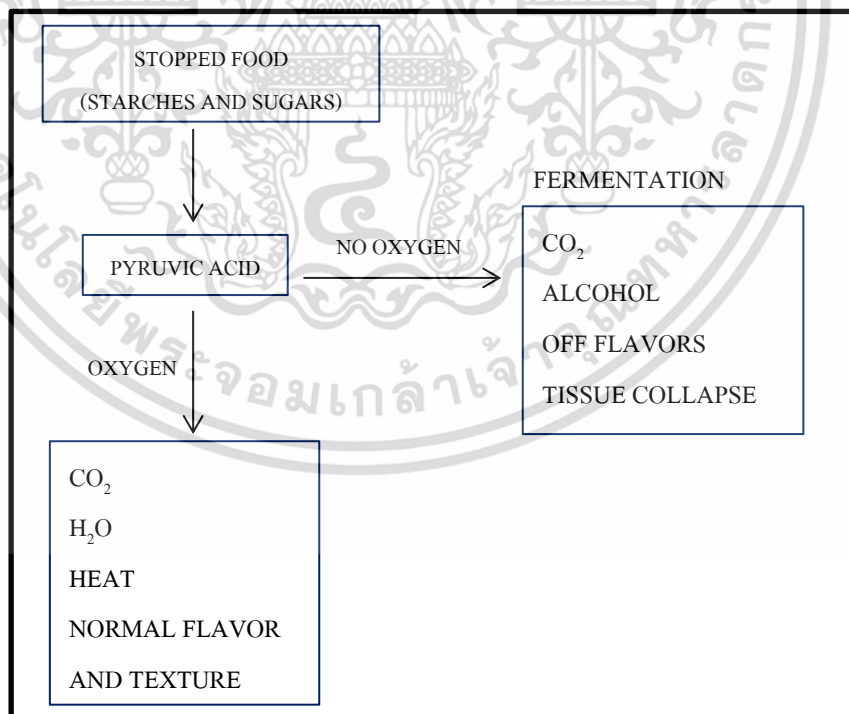
2. การหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration)

การหายใจชนิดนี้บางทีเรียกว่า การหมัก (Fermentation) เป็นการหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจน หรือใช้ในจำนวนจำกัด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการสลายน้ำตาลกลูโคสให้เป็นกรดไพรูวิก แต่กรดไพรูวิกจะถูกเปลี่ยนต่อเป็นกรดแลคติกหรือเป็นสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น อะซิทัลดีไฮด์และเอทิลแอลกอฮอล์ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน [15]

การหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะให้พลังงานน้อยกว่าการหายใจที่ใช้ออกซิเจน ซึ่งโดยปกติผลิตผลทางการเกษตรทุกชนิดจะมีการหายใจที่ใช้ออกซิเจน แต่ในการเก็บรักษาบางสภาวะที่มีการลดปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าปกติ ทำให้ออกซิเจนในบรรยากาศอาจมีไม่เพียงพอที่จะรักษาระดับของการหายใจที่ใช้ออกซิเจนได้ ทำให้เกิดการหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจน หรือใช้ออกซิเจนในปริมาณจำกัดได้ ความเข้มข้นที่ต่ำสุดของออกซิเจนที่จะทำให้เกิดการหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจนนั้น จะผันแปรไปตามชนิดของเนื้อเยื่อ พันธุ์ ความแก่อ่อน และอุณหภูมิ



รูปที่ 2.2 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้ก๊าซ O<sub>2</sub> และไม่ใช่ก๊าซ O<sub>2</sub> [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบการหายใจของพืชแต่ละชนิดจะมีอัตราการหายใจที่ไม่เท่ากัน ซึ่งแบ่งตามชนิดของพืช [14] ดังต่อไปนี้

1. Climacteric fruit คือ ผลไม้ที่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากที่ได้แก่จัดจะมีอัตราการหายใจต่ำลงมาก เมื่อเริ่มเข้าสู่กระบวนการสุกอัตราการหายใจจะสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งการเพิ่มอัตราการหายใจนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงมากด้วย เมื่อสุกเต็มที่แล้วอัตราการหายใจจะค่อยๆ ลดต่ำลงจนเข้าสู่ระยะเสื่อมสลาย ฉะนั้นผลไม้พวกนี้สามารถเก็บแล้วนำมาบ่มให้สุกได้ภายหลังการเก็บเกี่ยว เช่น มะเขือเทศ มังคุด ละมุด กล้วย ทูเรียน

ตารางที่ 2.2 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Climacteric [14]

ผลไม้	พันธุ์	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการหายใจ (ml/CO <sub>2</sub> /kg/hr)	
			ต่ำสุด	สูงสุด
แอปเปิ้ล	Barnley Seedling	23	10	16
อโวคาโด	Fuerte	20	35	155
กล้วย	Grous 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

2. Non-climacteric fruit คือผลไม้ที่ไม่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากที่ได้แก่จัดจะมีอัตราการหายใจต่ำลงในระยะเก็บเกี่ยว หลังการเก็บเกี่ยวแล้วผลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก คือ อัตราการหายใจค่อนข้างที่จะคงที่ตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนถึงระยะเสื่อมสลาย รสชาติคงที่ อายุการเก็บรักษาค่อนข้างยาว ฉะนั้นถ้าเก็บเกี่ยวผลที่ยังไม่แก่จัดเต็มที่ จะได้ผลไม้ที่มีรสชาติเหมือนเดิมตลอดไป จึงต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลแก่จัด เช่น ส้ม สับปะรด มะนาว เงาะ ลำไย ลิ้นจี่ แตงกวา

ตารางที่ 2.3 อัตราการหายใจของผลไม้แต่ละชนิดประเภท Non-climacteric [14]

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

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการหายใจ [15]

1) อุณหภูมิ

อัตราการหายใจของสิ่งมีชีวิตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดเรียกว่า Optimum temperature หลังจากจุดนี้ถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอีก อัตราการหายใจจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงจุดที่การหายใจหยุด เรียกจุดของอุณหภูมิที่ทำให้ผักและผลไม้หยุดหายใจว่า Thermal death point การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงมีผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้หลังเก็บเกี่ยว

ในด้านการจัดการการหลังการเก็บเกี่ยวได้มีการตัดแปลงอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเก็บรักษาผลิตผล เพื่อให้ผลิตผลมีอัตราการหายใจและกระบวนการเมตาโบลิซึมเกิดขึ้นในระดับต่ำ

2) ก๊าซเอทิลีน

การให้ก๊าซเอทิลีนจากภายนอกจะมีผลต่ออัตราการหายใจของผลไม้แตกต่างกัน คือ ถ้าเป็นผลไม้จำพวก Non-climacteric การให้ก๊าซเอทิลีนจากภายนอกจะเร่งอัตราการหายใจให้เพิ่มสูงขึ้น ยิ่งเพิ่มปริมาณของเอทิลีนให้มากขึ้น อัตราการหายใจยิ่งสูงขึ้นจนเกิดเป็น Climacteric peak ได้เช่นเดียวกับผลไม้จำพวก Climacteric แต่เอทิลีนไม่มีผลต่ออัตราการหายใจของผลไม้จำพวก Climacteric เอทิลีนมีผลเพียงช่วยเลื่อน Climacteric peak ของผลไม้จำพวก Climacteric ให้เกิดเร็วขึ้นทำให้จุดเริ่มต้นของการสุกเกิดได้เร็วขึ้น แต่เอทิลีนไม่มีผลในการเร่งอัตราการหายใจ ถึงแม้จะเพิ่มปริมาณของเอทิลีนให้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) ส่วนประกอบของก๊าซในบรรยากาศ

การตัดแปลงบรรยากาศของสภาพแวดล้อมที่ใช้เก็บรักษาผลิตผลเป็นอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งนิยมปฏิบัติกันเพื่อควบคุมอัตราการหายใจ และกระบวนการเมทาโบลิซึมของผลิตผล ประโยชน์ของการตัดแปลงสภาพบรรยากาศนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณก๊าซในบรรยากาศ

– ปริมาณของก๊าซออกซิเจน เมื่อมีปริมาณของออกซิเจนในบรรยากาศลดลงจากปกติจนถึง 2-3% อัตราการหายใจจะลดลง ในการเก็บรักษาผลิตผลนั้นเมื่อควบคุมปริมาณก๊าซออกซิเจนให้ต่ำลงแล้ว อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมจะต้องเหมาะสมด้วย ในเนื้อเยื่อที่มีกระบวนการเมทาโบลิซึมสูง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงการลดปริมาณออกซิเจนลงอาจจะเพิ่มอัตราการหายใจได้ เมื่อใช้วิธีวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมา ทั้งนี้เพราะเมื่อลดปริมาณออกซิเจนลง เซลล์จะมีปริมาณของ ATP มากขึ้นแต่เนื่องจากปริมาณออกซิเจนมีน้อยมาก กรดไพรูวิกจึงไม่สามารถเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและพลังงานได้ แต่จะเปลี่ยนไปเป็นเอทานอลซึ่งมีพิษต่อพืช ดังนั้นการตัดแปลงปริมาณของออกซิเจนให้น้อยเกินไปจึงอาจก่อให้เกิดผลเสียได้

– ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ การเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากเกินไปในสภาพบรรยากาศที่เก็บรักษาผลิตผลอาจจะก่อให้เกิดเอทานอลได้ การเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้มากขึ้นจะทำให้อัตราการหายใจลดลง

### 4) ภาวะความเครียด (Physical stress)

การเกิดความเครียดในผลิตผล เช่น ถูกเชื้อจุลินทรีย์เข้าทำลาย การเกิดบาดแผลต่างๆ ส่งผลให้ผลิตผลมีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้น โดยมักจะมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของก๊าซเอทิลีนซึ่งผลิตผลปลดปล่อยออกมาด้วย

### 5) ส่วนประกอบทางเคมีและโครงสร้างของผักและผลไม้

เนื่องจากผักและผลไม้แต่ละชนิดมีส่วนประกอบทางเคมีและโครงสร้างแตกต่างกัน ทำให้ผักและผลไม้มีอัตราการหายใจแตกต่างกัน อัตราการหายใจจะสูงหรือต่ำไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของส่วนประกอบทางเคมีเสมอไป เช่น มันเทศ มีคาร์โบไฮเดรตสูงแต่มีอัตราการหายใจต่ำ ส่วนผักกาดหอมซึ่งมีปริมาณน้ำสูงถึง 90% แต่มีอัตราการหายใจสูงกว่ามันเทศ เป็นต้น

โครงสร้างและส่วนต่างๆ ของพืชมีอัตราการหายใจแตกต่างกัน ส่วนของพืชที่มีอัตราการหายใจสูง มักเป็นพวกเนื้อเยื่ออ่อน (Young tissues) เช่น ยอด หน่อ ดอกและผลอ่อน ยกตัวอย่างเช่น หน่อไม้ฝรั่ง บรอกโคลีและข้าวโพดอ่อน เป็นต้น

พืชที่เป็นหัวจะมีอัตราการหายใจต่ำ เช่น มันเทศ มันฝรั่ง หัวหอมและหัวกระเทียม เป็นต้น ส่วนผลแก่บางชนิดมีอัตราการหายใจต่ำ เช่น พริกทอง และพริก เป็นต้น สำหรับพืชที่มีอัตราการหายใจปานกลาง ได้แก่ ผลไม้แก่ที่ยังไม่สุก และผักใบต่างๆ

#### 6) ช่วงการเจริญเติบโตในระยะที่เก็บเกี่ยว

ผักและผลไม้ ภายหลังจากการตัดออกจากต้นจะมีการหายใจสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับชนิดและระยะความแก่อ่อนของผักและผลไม้ นั้น ผักและผลไม้ที่ยังอ่อนจะมีอัตราการหายใจสูง เมื่อเข้าสู่ระยะแก่ อัตราการหายใจจะลดลง การลดลงจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับชนิดของผักหรือผลไม้ เช่น ผลไม้จำพวก Non-climacteric นั้น อัตราการหายใจจะลดลงไปเรื่อยๆ จนเนื้อเยื่อเสียดสภาพ ส่วนผลไม้จำพวก Climacteric จะมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่งเมื่อผลไม้เริ่มสุกแล้วจึงลดลงจนเนื้อเยื่อเสื่อมสภาพเช่นเดียวกัน

#### 7) ปัจจัยก่อนเก็บเกี่ยว

อัตราการหายใจของผลผลิตแต่ละชนิดในแต่ละแหล่งหรือในแต่ละฤดูจะผันแปรออกไป ซึ่งการผันแปรนี้เป็นผลมาจากสภาพดินฟ้าอากาศ ตลอดจนการเกษตรกรรมต่างๆ เช่น แอปเปิ้ล ที่ปลูกภายใต้สภาพที่มีแคลเซียมต่ำ จะมีการหายใจที่สูงกว่าพวกที่ปลูกภายใต้สภาพที่มีแคลเซียมเพียงพอ เป็นต้น

#### 2.1.1.2 การคายน้ำ [15]

น้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด โดยเฉพาะในเซลล์ของผักและผลไม้มีปริมาณน้ำสูงมาก เนื้อเยื่อของผักและผลไม้มีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 80-90% ดังนั้นการสูญเสียน้ำของผักและผลไม้ภายหลังการเก็บเกี่ยวจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหาย มีการสูญเสียน้ำหนักและมีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไป โดยทั่วไปถ้าผักและผลไม้มีการสูญเสียน้ำไปเพียง 5% จะทำให้ผักและผลไม้หยาบมีคุณภาพลดลงและอาจขายไม่ได้ราคา ถ้าผักและผลไม้อยู่ในสภาพที่มีอุณหภูมิสูงหรือมีลมพัดจะยิ่งเร่งให้เกิดการเหี่ยวได้เร็วขึ้นภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง

การสูญเสียน้ำยังอาจทำให้ลักษณะเนื้อของผลิตผลเปลี่ยนไปด้วยและอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีบางอย่างที่ทำให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพ เช่น มีสีหรือรสชาติที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้การสูญเสียน้ำยังอาจทำให้เกิดความเสียหายทางอ้อมได้ เช่น ผลิตผลบางชนิดที่บรรจุใส่ภาชนะแน่นพอดี แต่เมื่อเกิดการการสูญเสียน้ำไปจะทำให้ผลิตผลไม่แน่นพอดี เกิดการเคลื่อนไหวของผลิตผลภายในภาชนะบรรจุอาจทำให้เกิดรอยแผลจากการเสียดสีได้

ในทางตรงกันข้าม ถ้าผักและผลไม้อยู่ในสภาพเปียกหรือมีน้ำมากเกินไป จะทำให้เกิดการสูญเสียได้เช่นเดียวกัน เพราะการเปียกจะทำให้เชื้อจุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ง่าย ทำให้ผักและผลไม้เกิดการเน่าเสียเร็วขึ้นหรือทำให้เกิดการแตกได้ เช่น การแตกของผลมะเขือเทศและผลเชอร์รี่ เป็นต้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าน้ำมีบทบาทอย่างมากมายต่อคุณภาพของผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว

เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีและเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในเซลล์ของพืช ดังนั้นพืชจึงต้องมีวิธีป้องกันการสูญเสียน้ำโดยควบคุมการปิดเปิดของปากใบ และการมีกิวติเคิลเคลือบที่ผิว เป็นต้น การสูญเสียน้ำของผักและผลไม้จะสูญเสียในรูปของไอน้ำ โดยทั่วไป อากาศแห้งจะประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจน 78% ออกซิเจน 21% คาร์บอนไดออกไซด์ 0.03% และ ก๊าซอื่นๆ อีกประมาณ 1% สำหรับอากาศชื้นจะประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ ความชื้นในอากาศหมายถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในรูปของไอน้ำในอากาศ ปริมาณไอน้ำในอากาศผันแปรได้จากศูนย์ถึงมากที่สุด เมื่ออากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำซึ่งจะผันแปรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันด้วย ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 30°C อากาศที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำจะมีปริมาณไอน้ำ 4% การระเหยของน้ำกลายเป็นไอน้ำเป็นกระบวนการทางกายภาพที่ต้องใช้พลังงาน

ปริมาณความชื้นหรือไอน้ำในอากาศแสดงในรูปของความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) หมายถึง อัตราส่วนของความดันไอน้ำในอากาศต่อความดันไอน้ำในอากาศที่อิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน และมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

$$\text{ความชื้นสัมพัทธ์} = \frac{\text{ความดันไอน้ำในอากาศ}}{\text{ความดันไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน}} \times 100 \quad (2.2)$$

อากาศที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำจะมีความชื้นสัมพัทธ์ 100% ดังนั้นเมื่อนำผลิตผลที่มีน้ำมาวางไว้ในอากาศในภาชนะปิด ปริมาณไอน้ำในอากาศที่อยู่ในภาชนะจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำในผลิตผลและในอากาศ ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนซึ่งกันและกัน จนกระทั่งเกิดสภาวะสมดุล คือ เมื่อจำนวนของน้ำในรูปไอน้ำเคลื่อนที่เข้าและออกเท่ากัน

ความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุลนี้ เรียกว่า Equilibrium relative humidity (ERH) ซึ่งเป็นสมบัติของผลิตภัณฑ์และปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์นั้นๆ เช่น น้ำบริสุทธิ์จะมี ERH 100%

ผักและผลไม้มีปริมาณน้ำสูงอยู่ภายในเซลล์ได้ด้วยความดันออสโมซิสภายในเซลล์น้ำส่วนใหญ่อยู่ในรูปของน้ำอิสระ มีเพียงส่วนน้อยที่อยู่ร่วมกับสารประกอบ และน้ำที่อยู่ในเซลล์ของพืชยังมีสารต่างๆ ละลายอยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งมีผลต่อความดันไอของน้ำ ดังนั้นเมื่อนำผักและผลไม้ไปใส่ไว้ในภาชนะปิด อากาศที่อยู่ภายในจะไม่สามารถอึดตัวด้วยไอน้ำได้ เนื่องจากในน้ำมีสารละลายอยู่ และรวมอยู่กับสารประกอบ ดังนั้นสำหรับผักและผลไม้สดจะมี ERH ประมาณ 97% การที่ ERH ลดลงเล็กน้อยเนื่องจากบางส่วนของน้ำใช้เป็นตัวทำละลาย ละลายสารที่อยู่ภายในเซลล์ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับ Water activity และ Water potential ดังนั้น Water activity และ Water potential เป็นการแสดงถึงสภาวะพลังงานของน้ำภายในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต และเป็นตัวชี้บ่งสภาวะของน้ำภายในเซลล์ว่ามีเพียงพอที่จะใช้ในกระบวนการต่างๆ ของเซลล์มากน้อยเพียงใด การวัดค่าเหล่านี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพราะ Water activity และ Water potential ที่ลดลงจำนวนเล็กน้อย จะสมดุลพอดีกับค่า ERH ที่ลดลงด้วย ถ้า ERH ลดลงเหลือ 95% จะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดได้ แต่การลดการเจริญของจุลินทรีย์บางชนิดอาจจะต้องการ Water activity และ Water potential ที่ต่ำกว่าปกติเพื่อทำให้ ERH ลดลงน้อยกว่า 85%

### 2.2.1.3 การสุก [15]

การสุกของผลไม้เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทั้งทางสรีรวิทยา ทางกายภาพและทางเคมี เป็นกระบวนการที่มีปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ เกิดขึ้นมากมายภายในเซลล์ของเนื้อผลไม้ ซึ่งผลไม้แต่ละชนิดอาจมีปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นบางอย่างเหมือนกันและบางอย่างไม่เหมือนกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการสุกของผลไม้มีดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงทางเคมี ระหว่างกระบวนการสุกของผลไม้จะมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของผลไม้ดังนี้

- มีการเปลี่ยนแปลงสีของผลไม้
- การเปลี่ยนคุณภาพของรสชาติ
- การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของผนังเซลล์
- มีการสังเคราะห์โปรตีนขึ้นมาใหม่
- มีการเปลี่ยนแปลงของเอนไซม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของกรดอะมิโน
- ผลไม้บางชนิดมีปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น
- มีการเปลี่ยนแปลงของ Tissue permeability
- ผลไม้พวก Climacteric ขณะสุกจะมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้น
- ขณะผลไม้สุกจะมีก๊าซเอทิลีนปล่อยออกมา
- มีวิตามินบางชนิดเปลี่ยนไป

การที่ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการสุกของผลไม้จะช่วยให้เลือกระยะเวลาในการเก็บผลไม้ได้เหมาะสมและปฏิบัติต่อผลไม้ได้ถูกต้อง เช่น อาจเร่งผลไม้สุกเร็วขึ้นหรือชะลอให้ผลไม้สุกช้าลงได้

2. การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาด น้ำหนัก และความแน่นเนื้อ (Firmness) ซึ่งจะผันแปรไปตามชนิดของผลไม้และระยะการสุก

3. การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา เป็นผลของกระบวนการเมทาโบลิซึมภายในเซลล์ ผลไม้ในระยะการเจริญเติบโต เมทาโบลิซึมภายในเซลล์จะเป็นการสังเคราะห์มากกว่าการสลายเซลล์ของผลไม้ นั่นจำเป็นต้องใช้พลังงานสูง ทำให้มีอัตราการหายใจสูง เมื่ออัตราการเจริญเติบโตช้าลง อัตราการหายใจของผลไม้จะค่อยๆ ลดลงด้วย

สำหรับผลไม้จำพวก Climacteric ซึ่งมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่งเมื่อผลไม้เริ่มสุกเนื่องจากในกระบวนการสุกมีปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ เกิดขึ้นมากมายซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง

ปัจจัยที่มีผลต่อการสุกของผลไม้ [15]

#### 1. ออกซิเจน

ปริมาณของออกซิเจนในบรรยากาศมีผลต่อการสุกของผลไม้ การเพิ่มปริมาณของออกซิเจนให้สูงกว่าบรรยากาศ อาจเร่งหรือไม่มีผลต่อการสุกของผลไม้ ขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ การลดปริมาณของออกซิเจนในอากาศลง มีผลทำให้การสุกของผลไม้ช้าลง เพราะอัตราการหายใจและเมทาโบลิซึมภายในเซลล์เกิดช้าลง ชะลออัตราการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ให้ช้าลง การสังเคราะห์เอทิลีนลดน้อยลงและลดความไวของผลไม้ต่อการทำงานของเอทิลีนให้ช้าลงด้วย ปริมาณออกซิเจนต่ำสุดที่ยับยั้งการสุกโดยไม่มีผลต่อสรีรวิทยาที่สำคัญของผลไม้ คือ ประมาณ 3-5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. คาร์บอนไดออกไซด์

การเพิ่มปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศให้สูงขึ้น มีผลทำให้อัตราการหายใจช้าลง ยับยั้งการสังเคราะห์เอทิลีนและการทำงานของเอทิลีน

## 3. ก๊าซเอทิลีน

เอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชชนิดหนึ่ง มีความสำคัญมากต่อสรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวพืชสวน โดยเฉพาะเป็นสารที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสุกของผลไม้ จึงเรียกเอทิลีนว่า Ripening gas เอทิลีนยังทำให้เกิดความผิดปกติแก่ใบผักและดอกไม้ด้วย

การให้ก๊าซเอทิลีนจากภายนอกแก่ผลไม้ดิบจะช่วยเร่งให้ผลไม้สุกเร็วขึ้นและมีสีผิวสม่ำเสมอ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการสุก คือประมาณ 20-22°C และความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมประมาณ 85-90%

กลไกที่เอทิลีนเร่งการสุกของผลไม้ เกิดขึ้น โดยเอทิลีนช่วยเลื่อนจุดเริ่มต้นของการสุกหรือเดือน Climacteric peak ให้เร็วขึ้น แต่เอทิลีนไม่มีผลต่ออัตราเร็วของกระบวนการสุก ตัวอย่างเช่น กล้วยดิบที่แก่จัดเมื่อตัดมาจากต้นปล่อยทิ้งไว้ให้สุกจะใช้เวลา 8 วัน จึงเริ่มสุกและใช้เวลาประมาณ 3 วัน จึงจะสุกเหมาะแก่การบริโภคได้ ถ้านำกล้วยดิบนี้มาบ่มให้สุกเร็วขึ้นด้วยเอทิลีนกล้วยจะเริ่มสุกในวันที่ 4 ซึ่งจะสุกเร็วกว่าปกติ 4 วัน แต่อัตราการสุกของกล้วยยังคงเป็น 3 วัน เท่าเดิม จนกว่าจะสุกบริโภคได้ การให้ก๊าซเอทิลีนแก่ผลไม้ที่เริ่มเกิด Climacteric peak แล้วเอทิลีนจะไม่มีผลต่อการสุกของผลไม้เลย

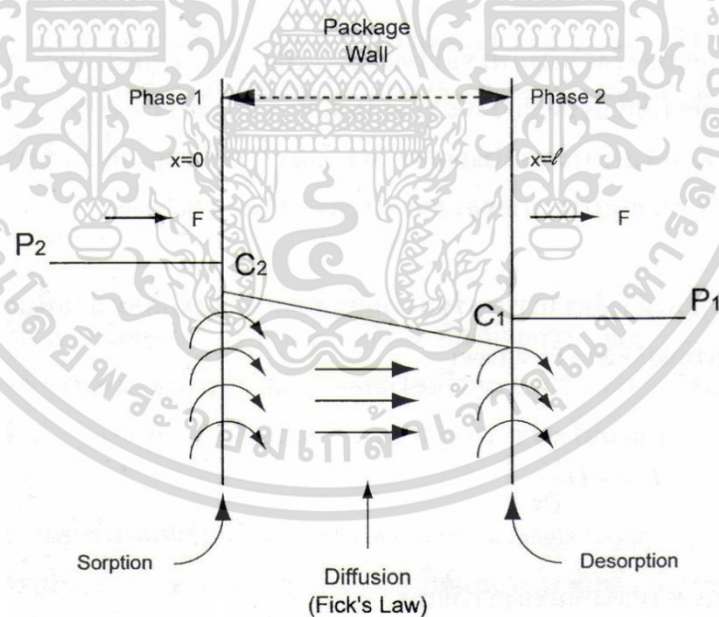
## 4. อุณหภูมิ

อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมที่สูงเกินไปหรือต่ำเกินไปจะมีผลต่ออัตราการสุกและการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีระหว่างกระบวนการสุกของผลไม้ ผลไม้จะสุกช้าลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิต่อการสุกของผลไม้ผันแปรขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ เช่น แอปเปิลจะสุกที่อุณหภูมิ 0-4°C ส่วนการสุกจะผิดปกติถ้าเก็บรักษากล้วยไว้ต่ำกว่า 12°C หรือสูงกว่า 30°C และถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 30°C การสังเคราะห์ไลโคพิน (รงควัตถุสีแดง) ของมะเขือเทศจะถูกยับยั้ง อุณหภูมิยังมีผลต่ออัตราการหายใจ การสังเคราะห์เอทิลีนและการทำงานของเอทิลีนอีกด้วย

## 2.2 การซึมผ่าน [1]

การซึมผ่าน (Permeation) หมายถึง กระบวนการแพร่ของโมเลกุลของก๊าซ ไอ หรือของเหลวผ่านเมมเบรน (Membrane) ทั้งนี้ไม่รวมการแพร่ผ่านรูรั่วหรือรอยปริแตกของเมมเบรนนั้นๆ โมเลกุลที่แพร่ผ่านเมมเบรนนี้ เรียกว่า Permeant และค่าที่แสดงอัตราการแพร่ผ่านเมมเบรนหรืออัตราการซึมผ่านเมมเบรนนี้เรียกว่า Permeability

การซึมผ่านเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อภาชนะบรรจุภัณฑ์พลาสติก ทั้งประเภทแผ่นฟิล์ม ภาชนะบรรจุอ่อนตัวและภาชนะบรรจุคงรูป จากโครงสร้างทางเคมีของพลาสติก ทำให้ก๊าซ ไอและสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็กสามารถละลาย (Dissolve) เข้าไปในพลาสติกได้ โมเลกุลที่ละลายเข้าไปนี้จะแพร่ผ่าน (Diffuse) พลาสติกโดยกระบวนการที่เรียกว่า Activated diffusion process หรือ Molecular diffusion process เพื่อสร้างสมดุลของศักย์ทางเคมี (Chemical potential) ของโมเลกุลนั้นและแพร่จากที่มีศักย์สูงกว่าไปสู่ที่มีศักย์ต่ำกว่าจนกระทั่งผ่านพลาสติกไปอีกด้านหนึ่ง (Desorb หรือ Evaporate)



รูปที่ 2.3 กระบวนการซึมผ่านพลาสติกของก๊าซหรือไอ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 สมการการแพร่และการดูดซับ [1]

อัตราการซึมผ่านเมมเบรนของโมเลกุลต่างๆ ที่สถานะคงตัว หรือ Permeability coefficient หรือนิยมเรียกว่า Permeability และเขียนด้วยสัญลักษณ์  $P_m$  (บางครั้งใช้  $P$ )  $P_m$  นี้เป็นผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient หรือ  $D$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์การละลาย (Solubility coefficient หรือ  $S$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$P_m = D \times S \quad (2.3)$$

$D$  เป็นค่าที่แสดงอัตราการแพร่ผ่านของโมเลกุลผ่านเมมเบรน จากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า และ  $D$  จะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของโมเลกุลที่แพร่

$S$  เป็นค่าที่แสดงปริมาณของ โมเลกุลของสารที่ละลายในเมมเบรน ที่สภาวะสมดุล

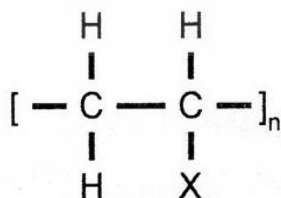
### 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านฟิล์มพลาสติก [1]

ก. โครงสร้างทางเคมีของพลาสติก

โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกมีผลต่อทั้งค่า  $D$  และ  $S$  นั่นคือผลโดยตรงต่อค่า  $P_m$  ของพลาสติกนั้นๆ ตารางที่ 2.4 แสดงผลของโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนโดย  $X$  จะเป็นโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของพลาสติก ค่าอัตราการซึมผ่านที่แสดงนี้เป็นค่าสัมพัทธ์ที่เปรียบเทียบกับค่าอัตราการซึมผ่านของพลาสติกที่มี  $X$  เป็นหมู่ (-OH)

ตารางที่ 2.4 ผลของโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน [1]

Structure	X	Relative $P_m$ ( $O_2$ )
	-OH	1 <sup>a</sup>
	-CN	4
	-Cl	800
	-F	1,500
	-COOCH <sub>3</sub>	1,700
	-CH <sub>3</sub>	15,000
	-C <sub>6</sub> H <sub>5</sub>	42,000
	-H	48,000



<sup>a</sup> $P_m$  ( $O_2$ ) เมื่อ  $X$  หมายถึง -OH มีค่าเท่ากับ  $0.038 \text{ cc.mm/m}^2 \cdot \text{atm.day}$  ที่  $23^\circ\text{C}$ , ความชื้นสัมพัทธ์ 0% เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข. สัณฐานวิทยาของพลาสติก (Morphology of plastic)

สัณฐานวิทยาของพลาสติก หมายถึง โครงสร้างทางกายภาพของพลาสติกที่มีทั้งบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous region) และบริเวณกึ่งผลึก (Semi-crystalline region) อยู่ด้วยกัน โดยการเกิดโครงสร้างลักษณะนี้มาจากการจัดระเบียบโมเลกุล (Orientation) ทางเคมีและการจัดระเบียบโมเลกุลทางกายภาพ ความสำคัญของสัณฐานวิทยาต่อการซึมผ่านพลาสติก แบ่งออกเป็น 2 ประเด็นสำคัญคือ

1) สมมาตรและสภาพมีขั้วของมอนอเมอร์ (Symmetry and polarity of monomer) จะมีผลโดยตรงต่อการเกิดโครงสร้างผลึก (Crystalline structure) พลาสติกที่มีสมมาตรจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าพลาสติกที่ไม่มีสมมาตรหรือมีสมมาตรน้อยกว่า นั่นคือค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซจะต่ำกว่าด้วย ตัวอย่าง PE มีโครงสร้างสมมาตรกว่ายาง ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซของ PE จึงต่ำกว่ายาง

2) การจัดระเบียบของสายโซ่โมเลกุล จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบผลึกมากขึ้น พลาสติกที่มีระดับของความเป็นผลึก (Crystallinity) เพิ่มขึ้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายลดลง นั่นคือค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างผลึกจะขัดขวางเส้นทางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่แพร่เข้ามา ทำให้โมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่เป็นเส้นทางวกวน (Tortuous path) เป็นผลให้แพร่ออกมาได้ยากและใช้เวลานานมากขึ้น

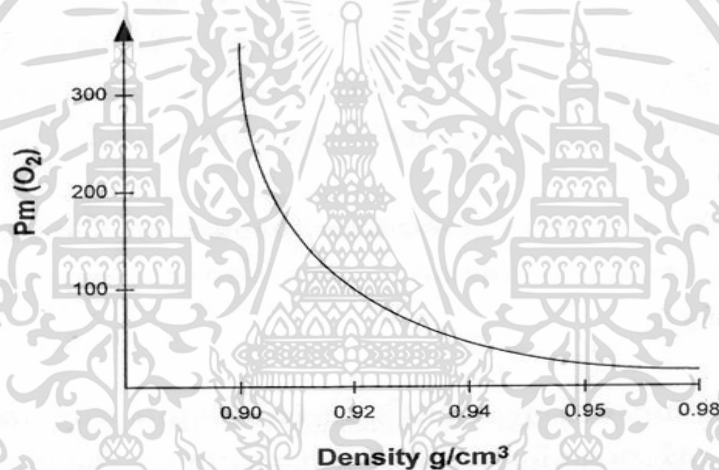
#### ตารางที่ 2.5 ผลของการจัดระเบียบ โมเลกุลต่อค่า $P_m(O_2)$ ของพลาสติก [1]

Polymer	Degree of orientation	$P_m(O_2)$ (cc.mm/m <sup>2</sup> .atm.day ที่ 23°C)
Polypropylene (PP)	0	57
	300%	30
Polystyrene (PS)	0	160
	300%	114
Poly(ethylene terephthalate) (PET)	0	3.8
	500%	1.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง พิล์มโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่ผ่านการจัดระเบียบของสายโซ่ โมเลกุลที่ 90°C และ 115°C จะมีความเป็นผลึกร้อยละ 22 และ 31 ตามลำดับ พบว่าค่าอัตราการซึมผ่านของฟิล์ม PET ตัวอย่างแรกมีค่าเป็น 4 เท่าของตัวอย่างที่สอง ผลของการจัดระเบียบสายโซ่ โมเลกุลต่อค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซแสดงในตารางที่ 2.5

3) ความหนาแน่น (Density) โดยทั่วไปค่าความหนาแน่นของพลาสติกชนิด หนึ่งๆ จะขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน กระบวนการ แปรรูป โดยเฉพาะขณะทำให้เย็นและกระบวนการจัดระเบียบโมเลกุล อัตราการซึมผ่านของก๊าซจะ ลดลงเมื่อค่าความหนาแน่นของพลาสติกเพิ่มขึ้น และค่าความหนาแน่นของพลาสติกจะแปรผันตรง กับระดับความเป็นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน สำหรับ พลาสติก PE [1]

ตารางที่ 2.6 ผลของระดับของความเป็นผลึกต่อค่า Pm (O<sub>2</sub>) ของพลาสติก [1]

Polymer	% Crystallinity	Pm (O <sub>2</sub> ) cc.mm/m <sup>2</sup> .atm.day ที่ 23°C
Low density polyethylene	50	182
High density polyethylene	80	42
Nylon 66 (Soaked)	20	3
Nylon 66 (Annealed)	40	0.6

ค. วัตถุเติมแต่งในพลาสติก (Plastic additive)

1) พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) มอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่เติมลงไป ในพลาสติก โดยทั่วไปจะทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซของพลาสติกนั้นสูงขึ้น (แต่อาจมีข้อยกเว้นสำหรับพลาสติกไซเซอร์บางประเภท) เช่น การเติมยางใน PVC อาจทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น 2 เท่า หรือการเติมพลาสติกไซเซอร์ใน PVC อาจทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มได้ถึง 20 เท่า กรณีฟิล์มพลาสติกที่ไวต่อความชื้นนิยมเรียก Hydrophilic plastic เช่น Nylon และ Ethylene vinyl alcohol (EVOH) เมื่ออยู่ในที่มีความชื้นสูง จะดูดซับน้ำเข้าไปในพลาสติกได้ น้ำส่วนนี้จะทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไซเซอร์ ทำให้โมเลกุลของพลาสติกเคลื่อนที่ได้มากขึ้น

2) ตัวเติม (Filler) โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่ใช้เติมในพลาสติกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความเสถียรต่อรูปร่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไททานเนียมไดออกไซด์ และทัลคัม จะมีผลทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของพลาสติกนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นกับปริมาณที่เติม ขนาดและรูปร่างของสาร อย่างไรก็ตามตัวเติมส่วนใหญ่จะทำให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น

3) สารคู่ควบ (Coupling agent) ใช้เพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างพลาสติกกับตัวเติม เช่น ทิทาเนต (Titanate) และซิลเลน (Silane) จะทำให้การซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซลดลงได้

ง. สมบัติของสารแพร่

ขนาด รูปร่างและสภาพผิวของสารแพร่มีผลต่อการซึมผ่านฟิล์มพลาสติก ซึ่งจะต้องพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะเนื่องจากมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทั่วไปสารแพร่ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะแพร่ได้เร็วกว่าพวกที่มีโมเลกุลใหญ่ เมื่อพิจารณาดารางที่ 2.7 พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าทั้งออกซิเจนและไนโตรเจน แต่ค่าอัตราการซึมผ่านกลับสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากขนาดโมเลกุลมีผลต่อการแพร่ แต่ไม่มีผลกับการละลาย จากตารางที่ 2.8 จะพบว่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าก๊าซอื่นมาก ทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านสูงกว่าก๊าซอื่นไปด้วย

ตารางที่ 2.7 ขนาดโมเลกุลและสัดส่วนของค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซไนโตรเจน ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ [1]

Gas	Molecular diameter, A°	Pm (X): Pm (O <sub>2</sub> )
N <sub>2</sub>	3.0	0.25
O <sub>2</sub>	3.1	1
CO <sub>2</sub>	3.4	6

ตารางที่ 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ การละลายและค่าอัตราการซึมผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไนโตรเจน ของ LDPE ที่ 25°C [1]

Gas	$D \times 10^6$ cm <sup>2</sup> /S	$S \times 10^2$ ml (STP)/ml.atm	$Pm \times 10^{10}$ ml (STP).cm/cm <sup>2</sup> .s.cm.Hg
CO <sub>2</sub>	0.37	25.8	12.6
O <sub>2</sub>	0.46	4.78	2.88
N <sub>2</sub>	0.32	2.31	0.969

สารแพร่ที่มีโมเลกุลเป็นเส้นตรงจะแพร่ได้ดีกว่า โมเลกุลเป็นวงหรือเป็นกิ่งก้าน และสารที่มีขั้วจะแพร่ผ่านแผ่นพลาสติกที่มีขั้วได้ดี โมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะแพร่ผ่านพลาสติกที่ไม่มีขั้วได้ดีกว่าพลาสติกที่มีขั้ว

จ. อุณหภูมิ

ค่าการซึมผ่าน การแพร่ และการละลายจะขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิแบบเอกซ์โพเนนเชียล ตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius' equation) ดังนี้คือ

$$Pm = Pm_0 \exp\left(-\frac{E_p}{RT}\right) \quad (2.4)$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \quad (2.5)$$

$$S = S_0 \exp\left(-\frac{E_S}{RT}\right) \quad (2.6)$$

$Pm_0, D_0, S_0$  หมายถึง ค่าคงที่ของการซึมผ่าน การแพร่และการละลาย ตามลำดับ

$E_p, E_D, E_S$  หมายถึง พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ของการซึมผ่าน การแพร่และการละลาย ตามลำดับ

R หมายถึง ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas constant)

T หมายถึง อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)

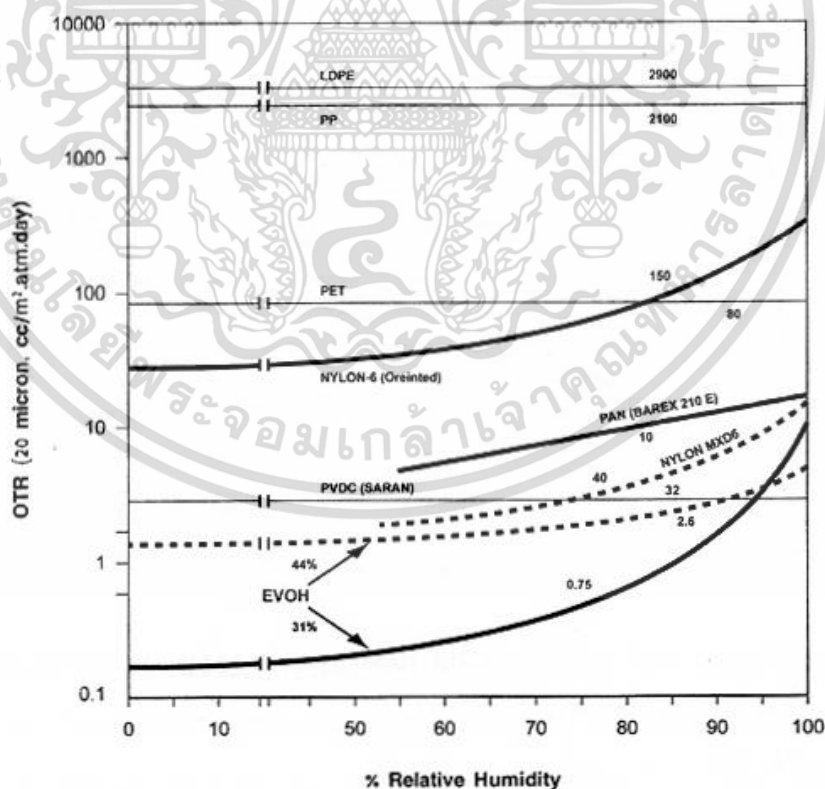
การใช้สมการของอาร์เรเนียสอธิบายผลของอุณหภูมิต่อการซึมผ่านจะมีข้อจำกัดเกี่ยวกับช่วงค่าอุณหภูมิ โดยจะใช้สำหรับช่วงอุณหภูมิที่ไม่กว้างและไม่อยู่ในช่วงเดียวกับค่า  $T_g$  ของพลาสติกนั้น เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $T_g$  พลาสติกจะอยู่ในสถานะที่เรียกว่า คล้ายยาง (Rubbery state)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลจะเคลื่อนไหวได้มาก ทำให้การแพร่และการซึมผ่านของก๊าซเกิดได้ง่าย ค่า  $E_p$  และ ค่า  $E_D$  จึงต่ำทำให้ค่า  $P_m$  มีค่าสูง (สมการที่ 2.4) ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  ของพลาสติก จะอยู่ในสถานะที่เรียกว่า คลายแก้ว (Glassy state) การเคลื่อนไหวของโมเลกุลพลาสติกเกิดได้ยากขึ้น และมีค่า  $E_p$  และ  $E_D$  สูงทำให้มีค่า  $P_m$  มีค่าลดลง

จ. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

พลาสติกบางชนิดสามารถดูดซับความชื้นได้ง่าย (Hydrophilic plastic) เช่น EVOH และ Nylon ความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้โมเลกุลของพลาสติกมีความยืดหยุ่นและเคลื่อนไหวได้มากขึ้น การซึมผ่านของก๊าซจึงสูงขึ้น ซึ่งน้ำจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำให้  $E_p$  ลดลง ค่า  $P_m$  จึงสูงขึ้น พลาสติกพวกนี้เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูง การซึมผ่านของก๊าซจะสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.5 สำหรับพลาสติกที่ไม่ดูดน้ำหรือความชื้น เรียก Hydrophobic plastic เช่น LDPE, PP และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVDC) พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศไม่มีผลต่อการซึมผ่านของก๊าซ



รูปที่ 2.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน สำหรับฟิล์มพลาสติกชนิด

ต่างๆ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

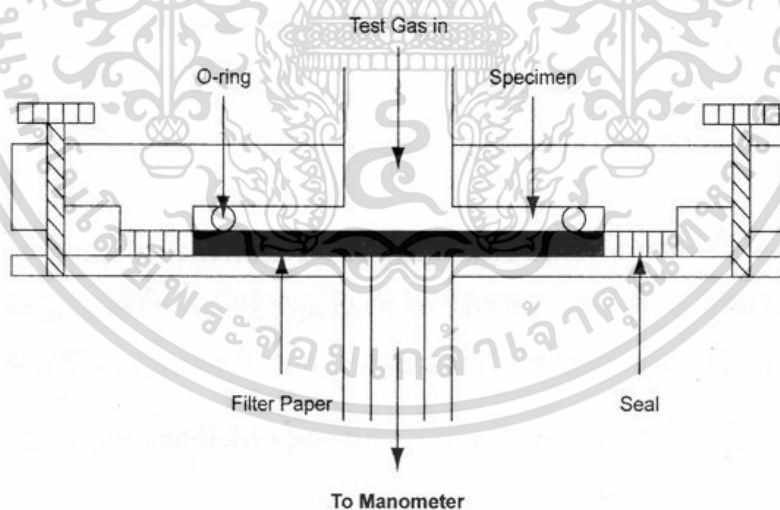
### 2.2.3 การตรวจวัดการซึมผ่าน [1]

การตรวจวัดการซึมผ่าน (Permeation measurment) การแพร่ และการละลายของสาร สำหรับพลาสติก อาศัยหลักการตรวจวัดการถ่ายเทมวลของสารนั้นผ่านพลาสติก ซึ่งอาจใช้การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความดันหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร หรือการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารอื่นที่ทำปฏิกิริยากับสารที่ถ่ายเทผ่านพลาสติกมา

#### 2.2.3.1 การตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ

##### ก. วิธีการตรวจวัดความดันที่เพิ่มขึ้น (Pressure increase method)

จากหลักการของก๊าซในอุดมคติ (Ideal gas) ค่าความดันของก๊าซจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของก๊าซนั้นๆ เมื่ออยู่ในปริมาตรคงที่และอุณหภูมิคงที่ วิธีการตรวจวัดนี้จึงใช้วิธีการตรวจวัดความดันของก๊าซที่ซึมผ่านพลาสติกจากด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่ง ความดันที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าปริมาณก๊าซได้ การตรวจวัดนี้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1434 นิยมเรียกวิธีนี้ว่า Manometric method ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซผ่านพลาสติกด้วยวิธี Manometric method [1]

นำฟิล์มพลาสติกทดสอบวางบนกระดาษกรองเพื่อช่วยพยุงฟิล์มให้สามารถทนทานต่อความดันที่ใช้ได้ ปิดชุดทดสอบให้สนิทด้วยวงแหวน เรียก O-ring ผ่านก๊าซทดสอบไปที่ด้านหนึ่งของพลาสติก โดยทั่วไปใช้ความดัน 1 บรรยากาศ อีกด้านหนึ่งของพลาสติกจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

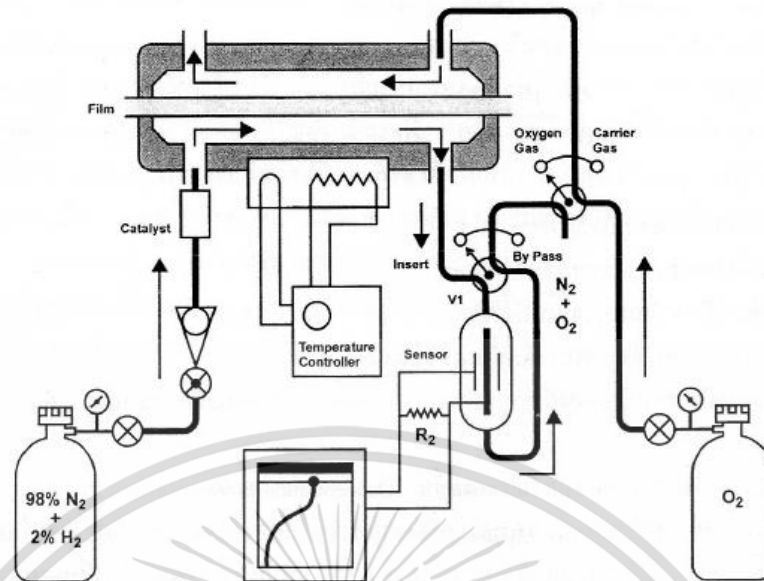
สูญญากาศและต่อเข้ากับมาโนมิเตอร์ (Manometer) ก๊าซทดสอบที่ซึมผ่านพลาสติกไป จะทำให้ความดันในมาโนมิเตอร์สูงขึ้น นำค่าความดันที่เพิ่มขึ้นนี้มาเขียนกราฟกับเวลา เมื่อถึงสถานะคงตัวจะได้กราฟเส้นตรง หากความชันของกราฟและนำไปคำนวณหาค่าอัตราการซึมผ่านตามสมการที่ 2.7

$$P_m = \frac{\Delta p}{\Delta t} \times \frac{V}{T} \times \frac{273}{760} \times \frac{l}{A \times (p_1 - p_2)} \quad (2.7)$$

- T หมายถึง อุณหภูมิขณะตรวจวัด, K  
 V หมายถึง ปริมาตรของเซลล์ทดสอบ  
 l หมายถึง ความหนาของฟิล์มพลาสติก  
 A หมายถึง พื้นที่ของฟิล์มพลาสติกที่มีการซึมผ่าน  
 $p_1, p_2$  หมายถึง ความดันของก๊าซทดสอบและความดันอีกด้านหนึ่งของแผ่นพลาสติก

#### ข. วิธีตรวจวัดความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (Concentration increase method)

วิธีนี้นิยมเรียกว่า Isostatic method เนื่องจากความดันของก๊าซทดสอบและก๊าซเฉื่อยที่เป็นตัวพา (Sweep gas) ซึ่งอยู่คนละด้านของพลาสติกจะมีค่าเท่ากัน ก๊าซทดสอบจะซึมผ่านพลาสติกมายังอีกด้านที่มีก๊าซเฉื่อย โดยมีความแตกต่างของความดันย่อย (Partial pressure) ของก๊าซทดสอบเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) ปริมาณก๊าซทดสอบที่ซึมผ่านมานี้ สามารถตรวจวัดได้หลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ทางเคมี การใช้ก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) การวัดค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) การใช้เทคนิคกัมมันตรังสี (Radiation technique) และการใช้อิเล็กโทรดเฉพาะ (Special electrode) เป็นต้น การตรวจวัดนี้เป็นไปตาม ASTM D3985 ดังแสดงแผนภูมิการตรวจวัดในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภูมิการตรวจวัดอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน ตามมาตรฐาน ASTM D3985 [1]

การตรวจวัดปริมาณก๊าซทดสอบที่ซึมผ่านพลาสติกมาอยู่ในก๊าซเฉื่อย จะใช้วิธีที่แตกต่างกันดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ทั้งนี้ขึ้นกับเครื่องมือที่ใช้ โดยทั่วไปผู้ผลิตเครื่องมือนิยมที่จะติดตั้งอุปกรณ์สำหรับแปลงค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้เป็นค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ และแสดงค่าผ่านเครื่องบันทึกหรือจอแสดงค่าวิธี Isostatic method สามารถใช้งานได้กว้างขวางกว่า Monometric method ด้วยเหตุผล 2 ประเด็นสำคัญ คือ

- 1) สามารถปรับความชื้นสัมพัทธ์ของก๊าซทดสอบและก๊าซเฉื่อยได้ ทำให้สามารถใช้ตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซสำหรับพลาสติกที่ไวต่อความชื้น เช่น EVOH, Nylon และ Cellophane ได้
- 2) สามารถใช้ตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของตัวอย่างที่เป็นสถานะบรรจุขึ้นรูป เช่น ขวด ถ้วย ถาด เป็นต้น โดยต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติมจากผู้ผลิตเครื่องมือ

### 2.2.3.2 การตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

การแสดงค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeation) มีดังนี้

- Water vapor transmission rate หรือ WVTR

$$\text{WVTR} = \frac{\text{weight of water vapor}}{\text{area} \times \text{time}} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$WVTR = \frac{Q}{A \times t} \tag{2.9}$$

WVTR นิยมแสดงเป็นหน่วย  $g/m^2 \cdot day$

- Water vapor permeability หรือ WVP

$$WVP = WVTR \cdot \frac{1}{\Delta p} \tag{2.10}$$

$$WVP = \frac{Q}{A \times t} \cdot \frac{1}{\Delta p} \tag{2.11}$$

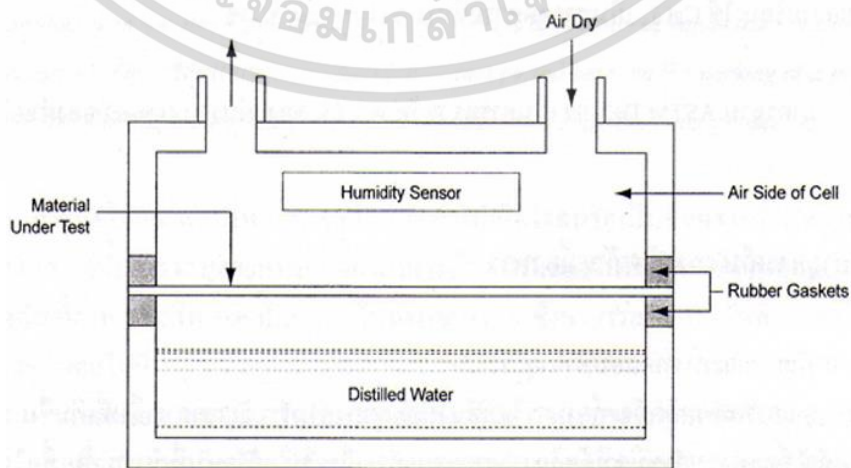
WVP แสดงเป็นหน่วย  $g \cdot mm/m^2 \cdot day \cdot cm \text{ Hg}$

- Permeance หรือ  $\frac{WVP}{l}$

$$\text{Permeance} = \frac{WVTR}{\Delta p} \tag{2.12}$$

หน่วยของ Permeance นิยมใช้  $g/m^2 \cdot day \cdot cm \text{ Hg}$

- Q หมายถึง น้ำหนักของไอน้ำ
- A หมายถึง พื้นที่ของฟิล์มพลาสติกที่มีการซึมผ่าน
- l หมายถึง ความหนาของฟิล์มพลาสติก
- $\Delta p$  หมายถึง ผลต่างของความดันของก๊าซทดสอบกับความดันอีกด้านหนึ่งของแผ่นพลาสติก



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์สำหรับตรวจวัด WVTR [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เหมาะสมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.8 ในเซลล์ทดสอบส่วนล่างจะบรรจุน้ำกลั่น เพื่อปรับสภาพอากาศให้มีความชื้นสัมพัทธ์ 100% แผ่นฟิล์มทดสอบจะถูกตรึงแยกส่วนล่างและส่วนบนของเซลล์ทดสอบ ด้านบนจะผ่านอากาศแห้งเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมดก่อนเริ่มทำการทดสอบ เมื่อไอน้ำซึมผ่านฟิล์มขึ้นมา อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณไอน้ำ (Humidity sensor) จะทำงาน ทำให้สามารถหาค่า WVTR ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ การตรวจวัดวิธีนี้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM F372 และ ASTM F1249

### 2.3 บรรจุภัณฑ์สำหรับรักษาคุณภาพพืช [17]

ฟิล์มสำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการบรรจุในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด ซึ่งชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ขึ้นกับการนำไปใช้งานที่ต่างๆ กัน ที่นิยมใช้มีหลายชนิด เช่น

- พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นฟิล์มที่ยอมให้ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านได้ ป้องกันการผ่านของไอน้ำได้
- พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) ฟิล์มประเภทนี้สามารถให้ไอน้ำ และก๊าซผ่านไปได้ นิยมใช้กันมากในการปิดด้านบนของถาดโฟมที่ใส่ผลิตผลสด แต่ฟิล์มชนิดนี้ไม่เหมาะในการทำถุง
- พอลิพรอพิลีน (Propylene, PP) มีลักษณะโปร่งใสกว่าพวก LDPE สามารถทำเป็นถุงได้และใช้ทำถาด สามารถใช้ความร้อนปิดผนึกได้
- เซลโลเฟน (Cellophane) มีใช้กันอยู่หลายชนิด อาจใช้ปิดด้านบนของถาดโฟม ทำเป็นถุง มีลักษณะโปร่งแสง ไม่สามารถทำให้ติดกันด้วยความร้อน ยอมให้ความชื้นผ่านได้
- Rubber hydrochloride หรือ Pliofilm เป็นแผ่นฟิล์มที่มีความแข็งแรงมาก ป้องกันการผ่านของไอน้ำได้ดีใช้เป็นถุงบรรจุผัก และผลไม้สดที่มีน้ำหนักมากๆ อากาศและความชื้น ผ่านไปได้ยากมาก ถ้าใช้ต้องมีการเจาะรูเพื่อระบายอากาศและความชื้น

ในปัจจุบันมีการใช้แผ่นพลาสติกห่อผลิตผลกันมากขึ้น โดยแผ่นพลาสติกจะช่วยในการป้องกันและรักษาผลิตผลให้อยู่ได้นาน โดยทั่วไปแผ่นพลาสติกจะช่วยให้เกิดสภาพแวดล้อมรอบๆ ผลิตผล (Microclimate) เหมาะสมต่อการเก็บรักษาทั้งนี้ต้องคำนึงถึงสมบัติด้านการซึมผ่าน

สมบัติการซึมผ่านของฟิล์มขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผลิตพอลิเมอร์ เช่น พอลิเมอร์กิ่งผลึก ในส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือส่วนที่เป็นผลึก เป็นส่วนที่ไม่ยอมให้ก๊าซหรือไอน้ำซึมผ่าน และส่วนที่เป็นอสัณฐานสายโซ่พอลิเมอร์จะอยู่อย่างไม่เป็น

ระเบียบ ซึ่งเป็นส่วนที่ก๊าซหรือไอน้ำสามารถซึมผ่านได้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ คล้ายแก้ว ( $T_g$ ) การเคลื่อนที่ของสายโซ่จะถูกจำกัด ปริมาตรอิสระ (Free volume) จะถูกจำกัดเช่นกัน แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว สายโซ่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระมากขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรอิสระ การเปลี่ยนแปลงนี้มีความสำคัญมากต่อความสามารถของโมเลกุลที่จะแพร่ผ่านวัสดุความแตกต่างของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของพอลิเมอร์ขึ้นกับ

- ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการซึมผ่านของก๊าซ
- ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันของสายโซ่พอลิเมอร์
- อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ต่อการละลายได้ของก๊าซในส่วนที่เป็นอสัณฐานของสายโซ่พอลิเมอร์

ความสามารถในการซึมผ่านจะลดลงถ้าส่วนของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่วนการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์โดยการยืด (Stretching) फिल्मเป็นการเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกและลดความสามารถในการซึมผ่านลง

### 2.3.1 ความต้องการทางบรรจุก๊าซของผักและผลไม้สด [1]

การเลือกวัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้สด จะต้องพิจารณาสมบัติต่างๆ ที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

#### ก. สมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซ

วัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้สด จะต้องยอมให้ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าออกได้เหมาะสม และสอดคล้องกับอัตราการหายใจของพืช เพื่อป้องกันมิให้ปริมาณออกซิเจนภายในภาชนะบรรจุมีน้อยเกินไป จนกระทั่งพืชขาดออกซิเจนสำหรับหายใจทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติได้ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่พืชคายออกมาจะต้องระบายออกจากภาชนะบรรจุได้พอควร เพื่อป้องกันการสะสมจนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงเกินไปจนทำลายเซลล์ของพืชได้ อัตราการหายใจของพืชมีความแตกต่างกันมากขึ้นกับสายพันธุ์ ความแก่-อ่อน สรีระของพืช สภาพทางกายภาพของพืช และอุณหภูมิเก็บรักษา จึงจำเป็นต้องพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะของพืชแต่ละชนิด

ตารางที่ 2.9 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [18]

ชนิดของพลาสติก	ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซ O <sub>2</sub> (cc.25 μm/m <sup>2</sup> .atm.day)	ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซ CO <sub>2</sub> (cc.25 μm/m <sup>2</sup> .atm.day)
PET	52-130	180-390
PVC	620-2,248	4,263-8,138
LDPE	3,900-13,000	7,000-77,000
PP	1,300-6,400	7,700-21,000
PS	10,000-260,000	2,600-7,700

ข. สมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ

วัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้สด จะต้องยอมให้ไอน้ำซึมผ่านได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นกับอัตราการหายใจ และการคายน้ำของพืช พืชที่หายใจเร็วจะคายน้ำออกมามาก ภาชนะบรรจุต้องยอมให้ไอน้ำผ่านออกไปได้ดี เพื่อป้องกันการสะสมของไอน้ำภายในภาชนะ จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวแล้วกลั่นเป็นหยดน้ำ ซึ่งจะทำให้พืชเน่าเสียได้เร็วขึ้น หากพืชหายใจช้า ภาชนะบรรจุควรให้ไอน้ำผ่านได้น้อย เพื่อป้องกันการเหี่ยวเฉาของพืช ในกรณีที่วัสดุบรรจุ โดยเฉพาะพลาสติกที่นิยมใช้มาก มีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ อาจจะต้องเจาะรูช่วยระบายไอน้ำ หรือเคลือบสารประเภทป้องกันการเกิดหยดน้ำ เรียกว่า Anti-fogging agent ที่ผิวด้านในของฟิล์ม

ตารางที่ 2.10 ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [19]

ชนิดของพลาสติก	ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (cc/25μm/m <sup>2</sup> .day ที่ 38°C, 90%RH)
PET	16-20
PVC	80-500
HDPE	4.7
LDPE	16-24
PP	11

#### ค. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

วัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้สด จะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอ และสามารถป้องกันแรงกระทำจากภายนอก ที่จะทำให้ผักและผลไม้ช้ำและเน่าเสียได้ สมบัติเชิงกลนี้ขึ้นกับชนิดของผักและผลไม้สด ผักและผลไม้ที่มีเนื้ออ่อนและเกิดรอยช้ำได้ง่าย เช่น องุ่น สตรอเบอร์รี่ ผักใบชนิดต่างๆ ย่อมต้องการภาชนะบรรจุที่มีความแข็งแรงสูงกว่าผักและผลไม้เนื้อแข็ง หรือผลไม้ที่มีเปลือกแข็ง เช่น ส้มโอ มังคุด จิง ข่า เป็นต้น นอกจากนี้รูปร่างและขนาดของภาชนะยังมีผลต่อการเลือกวัสดุบรรจุ เช่น การบรรจุ องุ่นสด 500 กรัม ในถุงพลาสติกเจาะรู จะต้องเลือกพลาสติกที่มีความต้านทานแรงดึงขาดได้ดี ในขณะที่การบรรจุในถาดเทอร์โมฟอร์มพร้อมฝาปิด ต้องเลือกพลาสติกที่มีความแข็งแรง (Stiffness) เพื่อความคงรูปของภาชนะบรรจุ น้ำหนักบรรจุที่เพิ่มขึ้นจะต้องใช้วัสดุที่มีความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย

#### ง. สมบัติทนทานต่อน้ำ (Water resistance)

วัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้จะต้องทนทานน้ำได้ดีระหว่างการขนส่งและจัดจำหน่าย ภาชนะบรรจุผักและผลไม้สดมักสัมผัสกับน้ำ เช่น น้ำจากการกลั่นตัวของไอน้ำในอากาศ น้ำจากการฉีดหรือการพรมเพื่อรักษาความสด หากวัสดุนั้นดูดซับน้ำได้ จะต้องยังคงความแข็งแรงได้เพียงพอสำหรับการใช้งาน โดยทั่วไปมักเลือกใช้พลาสติกที่มีค่าการดูดซับน้ำต่ำจึงไม่มีปัญหา ในขณะที่กระดาษจะดูดซับได้มาก จึงมักเคลือบกระดาษและกล่องกระดาษด้วยพลาสติก

#### จ. สมบัติทนทานต่ออุณหภูมิต่ำ

เนื่องจากการเก็บรักษาผักและผลไม้สดที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยยืดอายุการเก็บได้ วัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้สดจึงต้องทนทานอุณหภูมิต่ำได้ดี สมบัติทางการบรรจุของสมบัติของพลาสติกจะขึ้นกับอุณหภูมิ เช่น สมบัติด้านการซึมผ่าน ความแข็งแรง เป็นต้น จึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน สำหรับกระดาษเคลือบไข ต้องเลือกชนิดและความหนาของไขให้เหมาะสมที่อุณหภูมิต่ำๆ ไขบางชนิดอาจแตกเป็นชิ้นเล็ก และหลุดออกมาได้

#### ฉ. ความยืดหยุ่น (Flexibility) ของขนาดและรูปร่าง

เนื่องจากผักและผลไม้มีรูปร่างและขนาดไม่สม่ำเสมอ การออกแบบภาชนะบรรจุภัณฑ์และการเลือกใช้วัสดุบรรจุจะต้องสามารถปรับขนาดและรูปร่างได้พอสมควร ให้เข้ากับขนาดและรูปร่างของผักและผลไม้ได้ง่าย เช่น กล่องบรรจุสับประดทั้งหมด ควรออกแบบให้มีติดยานอกคงที่เพื่อความ

สะดวกในการขนส่งและการจัดการ แต่มีศักยภาพในกล่องควรปรับเปลี่ยนได้พอควรให้เหมาะสมกับขนาดของสับประรดแต่ละผลที่บรรจุ

#### ข. ความโปร่งใส (Transparence)

ผู้บริโภคส่วนใหญ่ต้องการมองเห็นและสัมผัสผักและผลไม้สดก่อนตัดสินใจซื้อและบางครั้งต้องการเลือกด้วย วัสดุและภาชนะบรรจุต้องโปร่งใส เพื่อให้ผู้บริโภคมองเห็นสินค้าได้ชัดเจน และควรมีการออกแบบที่ยอมให้มีการสัมผัสหรือเลือกสินค้าได้บ้าง เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค แต่ควรมีขอบเขตจำกัดด้วยเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการสัมผัส การจับ การบีบ การตกกระแทก และการลักขโมย

#### ข. ส่งเสริมการตลาด

ภาชนะบรรจุที่เลือกใช้นอกจากจะทำหน้าที่ด้านเก็บรักษาแล้ว ควรส่งเสริมการจัดการและการตลาดด้วย เช่น กล่องกระดาษหรือลังไม้ที่ใช้ขนส่งผลไม้ ควรออกแบบทั้งโครงสร้างและกราฟิกให้สามารถใช้เป็นภาชนะสำหรับการจำหน่ายปลีกได้ เช่น ถุงตาข่ายบรรจุส้ม 1 กิโลกรัม จะออกแบบให้มีแถบคล้ายริบบิ้นติดที่หัวและท้ายถุง เพื่อหิ้วถุงได้สะดวก และสื่อสารข้อมูล เป็นต้น

### 2.3.2 การออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค

ผลิตภัณฑ์จะเก็บรักษาได้ดีที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90-95% การเก็บรักษาในภาชนะบรรจุที่ใช้แผ่นพลาสติกหรือถุงพลาสติก จะเกิดการสะสมความชื้นเพิ่มขึ้นอาจสูงถึง 100% จึงต้องเจาะรูถุงพลาสติกเพื่อให้ไอน้ำภายในถุงพลาสติกได้ระบายออกไป เป็นการช่วยปรับความชื้นภายในถุงพลาสติกให้เหมาะสม ดังนั้นการเก็บผักและผลไม้ไว้ในภาชนะที่เหมาะสมจะยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้นาน

แผ่นพลาสติกหรือถุงพลาสติกที่ใช้นั้น ควรมีรูระบายอากาศ การบรรจุในถุงควรมีรูอย่างน้อย 2-4 รู ขนาด 1/4-1/8 นิ้ว เพื่อระบายอากาศผลิตผลจะไม่ขาดก้ำชอกซิเจน และไม่เกิดการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่วางขายในสภาพที่อุณหภูมิสูง ในบางครั้งการเก็บรักษาในสภาพถุงที่ไม่มีรูอาจเกิดผลดี เพราะเกิดสภาพบรรยากาศที่มีอัตราส่วนของก๊าซชนิดต่างๆ แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติขึ้นมาได้ แต่ควรระมัดระวังการเกิดกลิ่นที่ผิดปกติหรือมีรสชาติแอลกอฮอล์เกิดขึ้น [19]

สมบัติของฟิล์ม พลาสติกประเภทที่ไม่มีการเจาะรู (Continuous films) และฟิล์มพลาสติกที่

มีการเจาะรูขนาดเล็ก (Microperforation) แสดงในตารางที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 สมบัติของฟิล์มพลาสติกที่ไม่มีเจาะรู และฟิล์มพลาสติกที่มีการเจาะรูขนาดเล็ก

[21-22]

สมบัติ	ฟิล์มพลาสติกที่ไม่มีการ เจาะรู	ฟิล์มพลาสติกที่มีการเจาะรูขนาด เล็ก
อัตราการเคลื่อนที่ของก๊าซ	ก๊าซผ่านทางเนื้อพอลิเมอร์	ก๊าซผ่านทางเนื้อพอลิเมอร์และ ผ่านทางรูที่ถูกเจาะ
ความสามารถในการซึมผ่าน	CO <sub>2</sub> มากกว่า O <sub>2</sub> 2-8 เท่า	CO <sub>2</sub> มากกว่า O <sub>2</sub> 0.77 เท่า
อุณหภูมิ	ความสามารถในการซึมผ่าน ก๊าซ CO <sub>2</sub> และ O <sub>2</sub> เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น	ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซ CO <sub>2</sub> และ O <sub>2</sub> ไม่มีผลเมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ	ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์	มาก, ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ และปริมาณการเจาะรู

เนื่องจากผลิตผลแต่ละชนิดมีอัตราการหายใจแตกต่างกัน ผลผลิตที่มีอัตราการหายใจสูงมักมีอายุการเก็บรักษาสั้น การยืดอายุและรักษาคุณภาพผลิตผลสดส่วนใหญ่ ต้องอาศัยสมบัติของวัสดุที่นำมาทำเป็นภาชนะบรรจุ ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของฟิล์มพลาสติก ดังนั้นฟิล์มพลาสติกเพื่อการบรรจุผลิตผลสด จึงเป็นฟิล์มที่ควรมีสมบัติยอมให้ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซเอทิลีนและความชื้น แพร่ผ่านด้วยอัตราที่เหมาะสม โดยสามารถดัดแปลงสภาวะบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุ (Modified atmosphere, MA)

สภาวะบรรยากาศดัดแปลงในภาชนะบรรจุ (MA) ส่งผลต่อการชะลอการหายใจ การคายน้ำลดการเสื่อมสภาพ ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตผลสดได้ ซึ่งความสามารถในการเลือกก๊าซแต่ละชนิดให้แพร่ผ่านด้วยอัตราที่แตกต่างกันของฟิล์ม MA เป็นผลมาจากการควบคุมโครงสร้างของพอลิเมอร์ ได้แก่ การควบคุมการกระจายตัวของสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อปรับแต่งโครงสร้างหรือช่องว่างระหว่างวัฏภาค ซึ่งมีผลต่อการผ่านของก๊าซในฟิล์มที่ยอมให้ผ่านได้สูง และมีผลต่อสมบัติการควบคุมความสามารถในการเลือกผ่านของก๊าซ (Perm-selectivity, P)

หลักการและความแตกต่างในการดัดแปลงสภาวะบรรยากาศ เมื่อเลือกใช้ฟิล์มพลาสติกพบว่า สภาวะบรรยากาศในฟิล์มพลาสติกที่มีการเจาะรูจะไม่เกิดการดัดแปลงจึงไม่เหมาะสมต่อการ

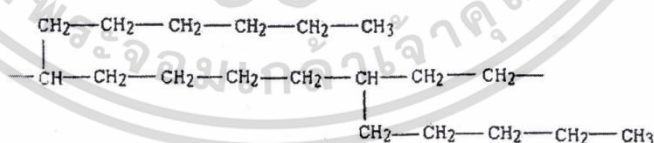
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยี่ดอายุการเก็บรักษาผลิตผลคือ มีการซึมผ่านของทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจนในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ส่วนสภาวะบรรยากาศในฟิล์มที่ยอมให้ก๊าซผ่านได้น้อย (Barrier films) จะเกิดสภาวะบรรยากาศตัดแปลง แต่มีปริมาณก๊าซออกซิเจนต่ำเกินไป และมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงเกินไป อาจเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนผลิตผลมีกลิ่นและรสชาติผิดปกติได้ สำหรับสภาวะบรรยากาศในฟิล์ม MA ค่าความสามารถในการซึมผ่านของฟิล์มสามารถปรับให้เข้ากับอัตราหายใจของผลิตผล ส่งผลต่อการควบคุมสัดส่วนของก๊าซภายในภาชนะบรรจุ โดยสามารถตัดแปลงสภาวะบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุให้มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าก๊าซออกซิเจน ซึ่งสามารถชะลออัตราการหายใจและการเสื่อมสภาพ ทำให้รักษาคุณภาพผลิตผลและยี่ดอายุการเก็บรักษา ซึ่งสัดส่วนของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตผล อุณหภูมิการเก็บรักษา และลักษณะการบรรจุด้วย

## 2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

### 2.4.1 ลักษณะทั่วไปของ LDPE [23]

LDPE เป็นพลาสติกที่ใช้มากในงานฟิล์มบรรจุภัณฑ์และมีชื่อสามัญเรียกว่า “ถุงเย็น” มักจะใช้ทำถุง ฟิล์มหัด ฟิล์มยืด ขวดน้ำ และฝาขวด เป็นต้น เนื่องจากยืดตัวได้ดีทนต่อการที่มทะเลและการฉีกขาด พร้อมทั้งสามารถใช้ความร้อนเชื่อมติดปิดผนึกได้ดี โครงสร้างของพอลิเอทิลีนจะสามารถป้องกันความชื้นได้ดีพอสมควร นอกจากนี้ LDPE สามารถปล่อยให้อากาศซึมผ่านได้ง่าย



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของ LDPE [24]

### 2.4.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LDPE [24]

- มีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
- มีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ดีพอสมควร
- ฟิล์มที่ได้จาก LDPE จะมีความเป็นมันเงา (Gloss) ต่ำ และมีความเป็นฝ้า (Haze) ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป็นฉนวนไฟฟ้า (Dielectric property) ที่ค่อนข้างดี

LDPE มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เพราะราคาไม่แพง ทนต่อสารเคมีทั้งกรดและด่าง อีกทั้งยังแปรรูปได้ง่าย มีความยืดหยุ่นและไม่มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ จึงสามารถนำมาใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารได้

ตารางที่ 2.12 สมบัติบางประการของ LDPE [24]

สมบัติ	หน่วย	ASTM	LDPE
ความถ่วงจำเพาะ	-	D792	0.91-0.925
ความเป็นผลึก	%	-	50.0-70.0
อุณหภูมิหลอมเหลว	°C	-	98.0-120.0
ความแข็งแรงดึง	MPa	D638	4.1-16.0
มอดุลัส	GPa	D638	0.10-0.26
การดึงยืด ณ จุดขาด	%	D638	90-800
ความแข็งแรงกระแทก	J.m <sup>-1</sup>	D256	No break
อุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน	°C	D648	38.0-49.0

### 2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน [24]

1. งานแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ถุงขนาดต่างๆ ตั้งแต่ขนาดที่บรรจุสินค้าทั่วไป ตลอดจนถึงขนาดใหญ่ที่ต้องแบกรับน้ำหนักมากๆ ได้แก่

- ถุงบรรจุอาหาร เช่น ผัก ผลไม้สด ขนมปัง ลูกกวาด อาหารแช่แข็ง อาหารแห้ง
- ถุงบรรจุสินค้าหนัก เช่น ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ข้าวสาร ปุ๋ย ชิ้นส่วนเครื่องจักร
- ถุงชั้นในของถุงกระดาษหรือกระสอบพลาสติกซึ่งใช้บรรจุอาหารสัตว์ ปุ๋ย ฯลฯ
- ถุงบรรจุสินค้าอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น เสื้อผ้าสำเร็จรูป สิ่งทอ กระดาษชำระ ฯลฯ
- ฟิล์มหด (Shrink film) และฟิล์มยืด (Stretch film) ที่ต้องการความเหนียวสูง เช่น ใช้

รัดสินค้าที่วางเรียงบนแท่นรองรับสินค้า (Pallet) เพื่อการขนส่งเป็นหน่วยใหญ่

2. งานฉีดเข้าแบบ ได้แก่ ภาชนะ ของเล่นที่ต้องการลักษณะชิ้นงานที่นึ่งเล็กน้อย งานจัดของสวยงาม เช่น ดอกไม้พลาสติก ใบไม้พลาสติก รวมทั้งเครื่องใช้ในบ้านอื่นๆ เช่น ตะกร้า ถัง ซามอย่าง

3. งานเป่าเข้าแบบ ได้แก่ การเป่าทำขวดต่างๆ เช่น ขวดน้ำเกลือ ขวดยาหยอดตา ขวดน้ำดื่ม และเป่าเพื่อทำกระป๋องและกล่อง

4. งานแผ่นเคลือบหรือแผ่นประกบ ได้แก่ งานเคลือบบนผิวฟิล์ม บนแผ่นอะลูมิเนียมพอยล์ เช่น ซองบรรจุอาหารแห้งประเภทหะหมี่กึ่งสำเร็จรูป อาหารเสริมเด็กอ่อน ขนมขบเคี้ยว ซึ่งต้องการสมบัติป้องกันความชื้นและการซึมผ่านของก๊าซต่างๆ

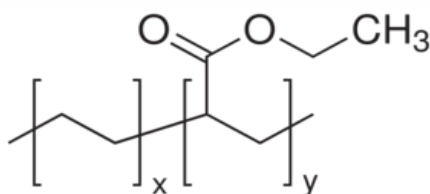
5. งานเคลือบผิวโลหะ ได้แก่ การเคลือบลวดเอนกประสงค์ เช่น ตะแกรงวางดินค้ำ ชั้นวางของ ตะกร้า รถจักรยานยนต์ ตลอดจนงานเคลือบพิเศษ เช่น สายเคเบิล สายโทรศัพท์ สายไฟฟ้า

## 2.5 พอลิเมอร์ร่วมพอลิเอทิลีน (Ethylene copolymer)

### 2.5.1 เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EEA)

#### 2.5.1.1 ลักษณะทั่วไปของ EEA [25]

เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene-ethyl acrylate copolymer, EEA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับเอทิลอะคริเลต (Ethyl acrylate, EA) โดยทำปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระ (Free-radical polymerization) ในเครื่องปฏิกรณ์พอลิเอทิลีนความดันสูง (High pressure polyethylene reactor) โดยเอทิลอะคริเลตเป็นส่วนที่ให้ความมีขั้วและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ เมื่อเพิ่มปริมาณ EA จะทำให้ EEA มีขั้ว ความยืดหยุ่น ความเหนียว และความหยุ่นตัว (Resilient) ที่มากขึ้น ซึ่งความมีขั้วที่มากขึ้นของ EEA ช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติดและการรับหมึกของพื้นผิว



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของ EEA [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1.2 สมบัติบางประการของ EEA [27]

- ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) เท่ากับ 0.93
- โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) เท่ากับ 28-52 MPa
- ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break) เท่ากับ 11-14 MPa
- ความต้านทานแรงกดอัด (Compressive strength) ณ จุดครากหรือจุดขาด เท่ากับ 21-25 MPa

- ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) เท่ากับ 700-750%
- ค่าความแข็งแรงกด (Hardness) Shore D เท่ากับ 27-38
- ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) เท่ากับ 0.04% โดยน้ำหนัก
- ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) โดยขึ้นงาน ไม่มีรอยบากหนา 1/8 นิ้ว เท่ากับ 450-550 v/mil

- อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป (Processing temperature)
  - สำหรับเทคนิคกดอัด (Compression molding) เท่ากับ 93-149°C
  - สำหรับเทคนิคการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เท่ากับ 121- 260°C

### 2.5.1.3 สมบัติในการใช้งานของ EEA เมื่อเปรียบเทียบกับ LDPE [25]

- มีความต้านทานต่อการแตก (Resistance to crack) เพิ่มขึ้น
- ความสามารถในการทนการด้าจากการ โค้งงอ (Flexural fatigue) เพิ่มขึ้น
- สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน (Coefficient of friction) เพิ่มขึ้น
- สมบัติที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature properties) ดีขึ้น
- อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting point) ต่ำลง

### 2.5.1.4 การประยุกต์ใช้งาน [25]

EEA copolymer เข้ากันได้ดีกับพอลิโอฟีน เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (VLDPE), LDPE, LLDPE, HDPE และ PP เป็นต้น และสามารถขึ้นรูปด้วยเทคนิคอัดรีด (Extrusion), กระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป EEA มีการประยุกต์ใช้งานหลายๆ ด้าน เช่น

- มักใช้เป็นชั้นยึดติด (Tie layer) ในฟิล์มแบบหลายชั้น (Multilayer films)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังกระดานข่าวออนไลน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผสมกับพอลิเมอร์อื่นเพื่อปรับปรุงความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature toughness) และความต้านทานต่อการแตก (Stress crack resistance)
- กาวแบบหลอมขณะร้อน (Hot-melt adhesive) และ วัสดุยาแนวรอยต่อ (Sealants)
- แผ่นลามิเนต (Laminate sheet)
- ส่วนประกอบสายไฟและสายเคเบิล (Wire and cable compound)
- ชิ้นส่วนที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปและอัดรีด (Injection molded/extruded parts)
- สายยางและท่อที่มีความยืดหยุ่น (Flexible hose and tubing)

## 2.5.2 เอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (EMA)

### 2.5.2.1 ลักษณะทั่วไปของ EMA [25]

เอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene-methyl acrylate copolymer, EMA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง เอทิลีนกับเมทิลอะครีเลต (Methyl acrylate, MA) โดยทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายใต้ความดันสูง โดยมีการเติมมอนอเมอร์เมทิลอะครีเลต นิดเข้าไปยังถังปฏิกิริยาที่มีก๊าซเอทิลีนเพื่อผลิต โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของ EMA [28]

### 2.5.2.2 สมบัติบางประการของ EMA [29]

- ค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 0.942-0.945
- โมดูลัสยืดหยุ่น เท่ากับ 83 MPa
- ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด เท่ากับ 11 MPa
- ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก เท่ากับ 11 MPa
- ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด เท่ากับ 740%
- อุณหภูมิในการขึ้นรูปในกระบวนการอัดรีด เท่ากับ 93-327°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2.3 สมบัติในการใช้งาน EMA เปรียบเทียบกับ LDPE [25]

- อุณหภูมิของการอ่อนตัว (Vicat softening temperature) ลดลงจาก 90°C เป็น 59°C
- โมดูลัสของการโค้งงอลดลง
- ค่าของความคงทนต่อสภาพแวดล้อม (Environmental stress crack resistance, ESCR)

เพิ่มขึ้น

### 2.5.2.4 การประยุกต์ใช้งาน [25]

EMA เป็นหนึ่งในอัลฟาโอเลฟินโคพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพ ซึ่งมีการประยุกต์ใช้ในหลายๆด้าน เช่น

- ใช้เป็น Tie layer เพื่อเพิ่มการยึดติดกับ พอลิโอเลฟิน (Polyolefin), ไอโอโนเมอร์ (Ionomer), พอลิเอสเตอร์ (Polyester), พอลิคาร์บอเนต (PC), EVA, PVDC, เอทิลีนอะคริลิก-แอซิด โคพอลิเมอร์ (EAA), PET ชนิดจัดเรียงโมเลกุล (OPET) และ PP ชนิดจัดเรียงโมเลกุล (OPP)
  - ท่อที่มีความยืดหยุ่นที่มีความต้านทานต่อการแตกและความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ (Low-temperature impact strength) ที่ดี
  - EMA ถูกนำมาผสมกับ LDPE, PP, PS, Nylon และ PC เพื่อปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงกระแทก ความเหนียว สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นผิว และการยึดติด เพิ่มขึ้นแต่ทำให้ความแข็งแรงลดลง
  - นิยมใช้งาน Extrusion coating เนื่องจาก EMA มีเสถียรภาพทางความร้อน
- ที่ดี

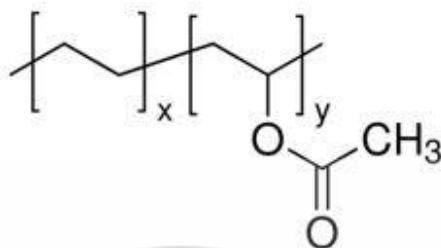
### 2.5.3 เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA)

#### 2.5.3.1 ลักษณะทั่วไปของ EVA [30]

เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟินเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate, VA) โดยการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายใต้ความดันสูงของเอทิลีนและไวนิลอะซิเตต โดยอุณหภูมิและความดันที่ใช้ต่ำกว่าของกรณีปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนตัวเดียว สารก่ออนุมูลอิสระที่นิยมใช้คือ Azo-bis-isobutyronitrile, Organic peroxides และ Persulfates โดยมีไวนิลอะซิเตตเป็นตัวเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่จะทำให้เกิดความยืดหยุ่นโดยลดการเกิดผลึก พบว่าถ้าปริมาณเอทิลีนมากกว่า 75% จะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็ง



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของ EVA [31]

### 2.5.3.2 สมบัติบางประการของ EVA [30]

- มีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 0.926-0.95
- จุดเปราะ (Brittle Point) อยู่ ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า  $-70^{\circ}\text{C}$
- จุดอ่อนตัว (Softening Point) อยู่ระหว่าง  $60-80^{\circ}\text{C}$
- ค่าความแข็งกด Shore D เท่ากับ 90-95
- ค่าความแข็งแรงดึง เท่ากับ 2.9-19.6 MPa
- ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด เท่ากับ 500-700%
- สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอะโรมาติก (Aromatic) และคลอรีเนเตดไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbon) ที่อุณหภูมิสูง
- เป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดใสจนถึงขุ่น
- มีความโค้งงอที่อุณหภูมิสูง
- มีความสามารถในการสปริงตัวได้ดี โดยไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์
- ทนต่อสภาวะการใช้งาน การชะล้าง และมีอายุการใช้งานสูง
- สามารถให้สีได้ง่ายและสวยงาม
- ขึ้นรูปได้ง่าย
- มีความยืดหยุ่นและโค้งงอได้ดี โดยไม่ต้องใช้พลาสติกไซเซอร์

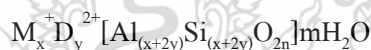
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3.3 การประยุกต์ใช้งาน [30]

- EVA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและจุดอ่อนตัวต่ำ มักใช้เป็น Wax additive ในงานเคลือบกระดาษ
- ใใช้เป็นสารยึดติด (Adhesive)
- ใใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์
- EVA ที่มีสมบัติคล้ายยาง มักใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ประเภทอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์
- EVA ใช้ในงานผลิตรองเท้าและเบาะรองนั่ง
- ปริมาณไวโนลอะซิเตตน้อยกว่า 7% จะได้ฟิล์มที่มีความเหนียวใส และมีความมันวาว
- ใช้ทำลวดสายไฟและสายเคเบิล

### 2.6 ซีโอไลต์เอ [32-33]

ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต มีโครงสร้างเป็นรูพรุนสามมิติและมีลักษณะเป็นเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ที่มีออกซิเจน 4 ตัวล้อมรอบ การแทนที่ Si ด้วย Al ทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุจึงต้องมีประจุบวกเพื่อทำให้เกิดความสมดุลของประจุ สูตรเคมีของซีโอไลต์เป็นดังนี้



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

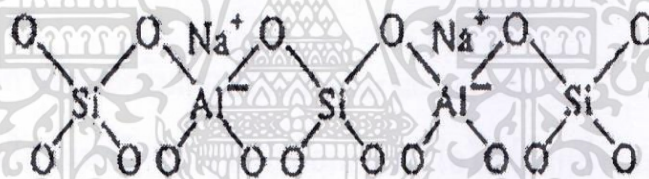
ซีโอไลต์เป็นสารที่มีรูพรุนที่มีพื้นที่ผิวมากคือ ประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม ในโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์จะมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งมีไอออนประจุบวกและโมเลกุลของน้ำอยู่ในโพรงช่องว่างนี้ ธรรมชาติของช่องว่างและโพรงที่เชื่อมต่อกันของซีโอไลต์จะเป็นตัวการสำคัญในการกำหนดสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของซีโอไลต์ในการแลกเปลี่ยนไอออนและดูดซับสาร

### 2.6.1 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ

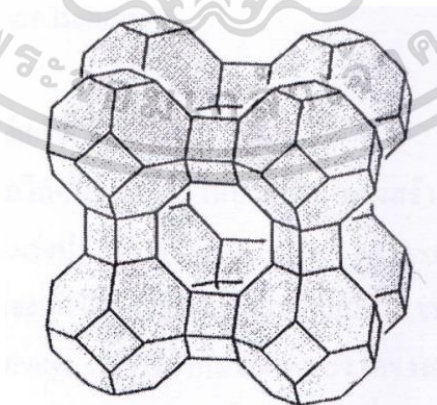
ซีโอไลต์เอ มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{Na}_{12}[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_4] \cdot 27\text{H}_2\text{O}$  โดยมีอัตราส่วนระหว่างช่องว่างต่อปริมาตรเท่ากับ 0.47 อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเท่ากับ 4.2 อังสตรอม

### 2.6.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

ซีโอไลต์เอ มีวิธีการสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการทำให้เป็นเจลคล้ายซีโอไลต์อื่นๆ ทั่วไป โดยใช้อะลูมินา (นิยมใช้โซเดียมอะลูมิเนต) และซิลิกา (นิยมใช้โซเดียมซิลิเกต) ผสมกันในสารละลายที่ทำให้เป็นเจลซึ่งสารละลายเหล่านั้นได้แก่ สารละลายของอัลคาไล เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) หรือสารละลายเกลือแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) เอมีน หรือสารละลายอินทรีย์ที่มีขี้ เมื่อผ่านกระบวนการที่ทำให้เป็นเจลแล้ว จะนำเจลที่ได้มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ  $70\text{--}300^\circ\text{C}$  จะได้ผลึกของซีโอไลต์ในรูปแบบของโซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ )

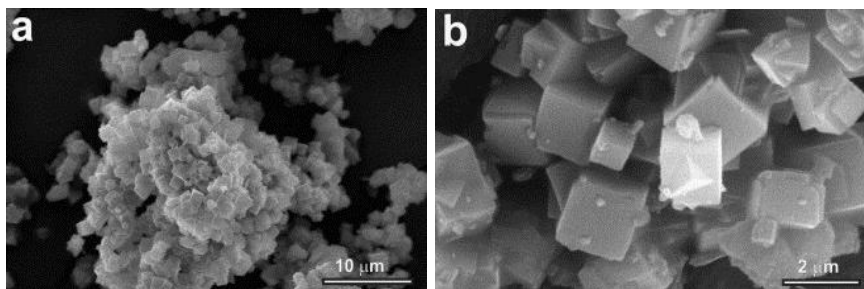


รูปที่ 2.13 Frame work ของซีโอไลต์เอ [33]



รูปที่ 2.14 โครงผลึกของซีโอไลต์เอ [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ภาพขยายของซีโอไลต์เอ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด [35]

### 2.6.3 สมบัติของซีโอไลต์เอ

#### - สารดูดน้ำ (Desiccants)

เนื่องจากซีโอไลต์เอ มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 ซึ่งทำให้ซีโอไลต์เอมีความมีขั้วสูงจึงสามารถดูดซับสารที่มีขั้วได้ดี เช่น น้ำ และเมื่อดูดซับน้ำแล้วจะเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้เป็นอย่างดี

#### - การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchangers)

เนื่องจากซีโอไลต์เอมีขั้วจึงทำให้ดูดซับน้ำได้ดี น้ำที่อยู่ในซีโอไลต์จึงเปรียบเสมือนไอออนบวกที่ถูกลบในซีโอไลต์เอ โดยน้ำที่อยู่ในซีโอไลต์นั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ตลอดเวลาดังสมการ



ไฮดรอกไซด์ไอออนนี้จะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกชนิดอื่นๆ ที่ต้องการแลกเปลี่ยน ซึ่งปฏิกิริยาลักษณะนี้จะเกิดเฉพาะกับซีโอไลต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบสูงซึ่งดูดซับน้ำได้ดี เช่น ซีโอไลต์เอ

#### - สมบัติการคัดแยกโมเลกุล (Molecular sieves)

เมื่อทำให้ซีโอไลต์แห้งโดยการไล่น้ำออกแล้ว ซีโอไลต์ดังกล่าวจะมีความสามารถในการดูดซับสารชนิดต่างๆ ได้ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับความเป็ขั้วของซีโอไลต์ และสารหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เช่น ซีโอไลต์เอซึ่งมีขั้วสูง (มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ) สามารถดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วสูง ส่วนซีโอไลต์ที่มีขั้วต่ำจะดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วต่ำ ด้วยเหตุนี้ซีโอไลต์จึงมีสมบัติในการคัดแยกโมเลกุล

## 2.6.4 การนำซีโอไลต์เอไปใช้งาน

ซีโอไลต์เอ เป็นซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างแบบซูเปอร์เคจ (Supercage) เหมาะกับการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Specio-specific catalysis) พื้นที่ภายในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนนั้นมีมากในการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสาร ขนาดของรูพรุนที่มีขนาดเล็กจะมีความเฉพาะเจาะจง (Selective) ในการจำกัดขนาดของโครงสร้างที่จะเข้าออกของซีโอไลต์ นอกจากนี้ยังใช้งานอย่างกว้างขวางในการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสาร และแลกเปลี่ยนไอออนได้อีกด้วย และเนื่องจากการที่ซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีความเป็นขั้วสูงและมีขนาดรูพรุนจำนวนมาก

## 2.7 พอลิเมอร์ผสม [36-37]

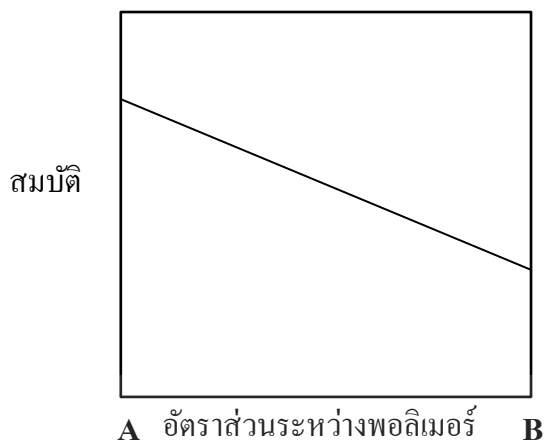
พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เป็นการผสมพอลิเมอร์เพื่อเตรียมวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติเฉพาะได้จากการนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมเข้ากันเพื่อปรับปรุงสมบัติซึ่งไม่สามารถได้จากพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว ดังนั้นจึงได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นโดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่าการผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเข้ากันของการผสมเป็นหลัก ซึ่งการผสมพอลิเมอร์ที่เข้ากันไม่ได้ จะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคของพอลิเมอร์แต่ละชนิดกันอย่างชัดเจน โดยแต่ละวัฏภาคจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ดีน้อยกว่าพอลิเมอร์เดิมที่นำมาผสม

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ (Miscible blend) หมายถึงพอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter,  $\delta$ ) ใกล้เคียงกันเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว

ถ้าพอลิเมอร์ผสมซึ่งกันและกันได้อย่างสมบูรณ์ในระดับโมเลกุลและเกิดเป็นวัฏภาคเนื้อเดียว โดยทั่วไปสมบัติที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรงหรืออย่างน้อยที่สุดเป็นเส้นโค้งสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเข้ากันได้ (Miscible)

2. พอลิเมอร์ไม่ผสมเข้ากัน (Immiscible blend) สามารถอธิบายได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (2.14)$$

เมื่อ

$\Delta G_{\text{mix}}$  คือ พลังงานอิสระกิบส์ในการผสม

$\Delta H_{\text{mix}}$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสม

$\Delta S_{\text{mix}}$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสม

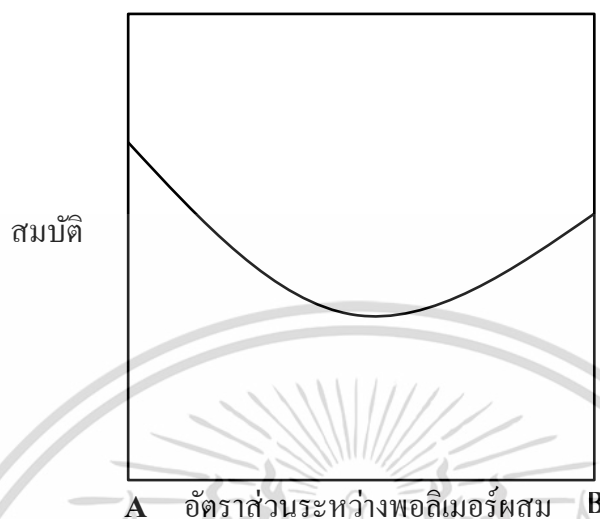
T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนมากเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นสาเหตุทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสมต่ำ ส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสมมักมีค่าเป็นบวก ดังนั้นทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์ของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากกว่าศูนย์ เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวหรือกล่าวได้ว่า พอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลายต่างกันมาก เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียว สามารถแบ่งได้เป็น 2 วัฏภาค คือ พอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของพอลิเมอร์ผสม เรียกว่า วัฏภาคหลัก (Matrix phase) ส่วนพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบส่วนน้อยเรียกว่า วัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ซึ่งสามารถวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

เมื่อพอลิเมอร์สองชนิดไม่ผสมเข้ากันและแยกออกเป็นแต่ละวัฏภาค โดยระหว่างวัฏภาค อาจจะมีการดึงดูดระหว่างกันเพียงเล็กน้อย ทำให้เกิดบริเวณที่อ่อนแอด้วยเหตุนี้จึงเกิดการเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แม้ในกรณีที่มีความเค้นต่ำมากๆ ทั้งทางกล ทางความร้อน หรือทางเคมี จากนั้นสมบัติของพอลิเมอร์ผสมอาจจะลดต่ำมากกว่าพอลิเมอร์แต่ละตัวที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีไม่ผสมเข้ากันได้ (Immiscible)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J.S Borah และ T.K. Chaki [38] ทำการศึกษา พฤติกรรมการไหลเชิงพลวัต (Dynamic rheology) สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของ LDPE/EMA ในอัตราส่วน 60/40 โดยมีการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (LLDPE-g-MA) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (0, 1, 3, 5 และ 7% โดยน้ำหนัก) ทำการเตรียมฟิล์มด้วยการกดอัด พบว่าปริมาณของ LLDPE-g-MA ที่เหมาะสมคือ 3% โดยน้ำหนัก เพราะ LLDPE-g-MA ทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interphase) ของ EMA และ LDPE มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้พฤติกรรมการไหลเชิงพลวัต เช่น โมดูลัสสะสม (Storage modulus) สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดึง โมดูลัสการดึงยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงกระแทก และสมบัติทางความร้อน เช่น อุณหภูมิที่เริ่มสลายตัว (Initial decomposition temperature, IDT) อุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_m$ ) มีค่าสูงขึ้น อีกทั้ง LLDPE-g-MA ยังส่งผลให้วัฏภาคกระจาย EMA ใน LDPE/EMA มีขนาดเล็กลง เนื่องจาก LLDPE-g-MA ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial tension) EMA และ LDPE นอกจากนี้ยังยับยั้งการเกิดการกลับมารวมตัวกันของวัฏภาคกระจาย (Coalescence) ทำให้ได้สันฐานวิทยาที่เสถียร

A.E. Bishara และ H. I. Shaban [39] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP/EMA ในอัตราส่วน 75/25 w/w ทำการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) พบว่าเมื่อเติม EMA (มีปริมาณเมทิลอะคริเลต 9 wt% และ MFI 2.6 g/10 min) ลงใน PP (มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (Mn) 68,000 และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Mw) 380,000) ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PP จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัว (Initial degradation temperature, IDT) และพบว่าความหนืดขณะหลอมเหลว (Melt viscosity) มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะ PP มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบกว้าง (Broad MWD) ซึ่งเมื่อเติม EMA ที่มีความหนืดสูงลงไป PP จึงส่งผลให้ความหนืดขณะหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ EMA ทำให้สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงกระแทก และการดึงยืด ณ จุดขาด ของ PP/EMA สูงขึ้น แต่ความแข็งแรงดึงทั้งที่จุดครากและจุดสุดท้ายและยังมอดูลัสลดลง เนื่องจาก EMA เป็นวัสดุที่นิ่มกว่าวัสดุของ PP นอกจากนี้มีการศึกษาผลของการใช้พอลิพรอพออิลินต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MAH) ซึ่งเป็นสารช่วยผสม พบว่าการใช้ PP-g-MAH จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและสมบัติเชิงกล เนื่องจาก PP-g-MAH จะทำให้รอยต่อระหว่างวัสดุของ PP/EMA มีความแข็งแรงมากขึ้น และ PP-g-MAH จะทำให้ความหนืดของระบบมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการยึดติดระหว่างวัสดุ PP และ EMA

S.A. Mousavi และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeation) ของฟิล์ม PE และฟิล์ม EVA ที่มีปริมาณไวนิลอะซิเตต (VA) 18 และ 28% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาฟิล์ม PE พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์ม PE จะทำให้สมบัติการซึมผ่านของก๊าซและการละลาย (Solubility) ของ  $O_2$  และ  $CO_2$  ลดลง แต่พบว่าฟิล์ม PE มีการแพร่ของก๊าซ (Gas diffusivity) ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ  $O_2$  และ  $CO_2$  ในฟิล์มทั้งสองชนิด พบว่าก๊าซ  $CO_2$  มีความสามารถในการซึมผ่านมากกว่าก๊าซ  $O_2$  เนื่องจาก ก๊าซ  $CO_2$  มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางจลนศาสตร์ (Kinetic diameter) ที่เล็กกว่า  $O_2$  และมีความสามารถในการรวมตัวกัน (Condensability) สูงกว่า จึงส่งผลให้มีความสามารถในการซึมผ่านก๊าซที่มากกว่า จากการศึกษาฟิล์ม EVA พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ VA จะส่งผลให้การซึมผ่านของ  $CO_2$  มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการมีหมู่ VA ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้วจึงเกิดการดูดซับและส่งผ่าน โมเลกุลของก๊าซ  $CO_2$  ที่มีขั้วได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นันทวรรณ ม่วงมี [7] ทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVA และซีโพลีเอ โดยใช้อัตราส่วน LDPE/EVA เป็น 100/0, 85/15, 80/20 และ 75/25 โดยมีการใช้ซีโพลีเอ เป็นสารตัวเติม 0-25 % โดยน้ำหนัก ผสมสูตรพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่และขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าโดยใช้อุณหภูมิที่หัวคาย 170°C จากการศึกษาผลของกระบวนการผสมสูตรฟิล์มที่เตรียมจากสูตรเข้มข้น (Masterbatch) ของ EVA กับซีโพลีเอ พบว่าอนุภาคของซีโพลีเอมีการกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ได้ดีกว่าฟิล์มที่เตรียมจากการผสม LDPE, EVA และซีโพลีเอพร้อมกัน และจากการศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE/EVA ที่มีต่อฟิล์ม LDPE/EVA พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดและมอดุลัสมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยางทำให้เกิดความยืดหยุ่นมากขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณซีโพลีเอมากขึ้นเนื่องจากการเติม ซีโพลีเอเป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งในชิ้นงานและแรงกระทำระหว่างซีโพลีเอกับวัฏภาค EVA เป็นแรงระหว่างขั้วที่เกิดที่พื้นผิวเท่านั้นทำให้การยึดเกาะไม่ดี เมื่อมีการให้แรงกระทำแก่ชิ้นงานจึงเกิดช่องว่างระหว่างซีโพลีเอกับพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้มีการรับแรงดึงลดลงและขาดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้พบว่า เมื่อมีการเติมซีโพลีเอและ EVA ในปริมาณสูง ทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) สูงด้วย เนื่องจากความมีขั้วของซีโพลีเอทำให้สามารถเหนี่ยวนำโมเลกุลของไอน้ำได้ดีและไอน้ำสามารถผ่านส่วนอสัณฐานของ EVA ได้ดีกว่าอสัณฐานของ LDPE และ WVP มีค่าเพิ่มเมื่อมีการเติมซีโพลีเอเพิ่มขึ้น โดยในฟิล์มที่มีอัตราส่วน LDPE/EVA เป็น 80/20 โดยน้ำหนัก (LE(80/20)) มีค่า WVP มากกว่าฟิล์ม LDPE 29% และเมื่อเติมซีโพลีเอ 25% โดยน้ำหนักในสูตรฟิล์ม LE(80/20) ทำให้ค่า WVP สูงขึ้นจากฟิล์ม LE(80/20) 60% และสูงกว่าฟิล์ม LDPE 106% และจากการทดสอบฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์บรรจุมะเขือเทศ พบว่าฟิล์มสูตร LE(80/20)Z25 มีมวลไอน้ำกักเก็บสะสมอยู่น้อย จึงสามารถเก็บรักษามะเขือเทศได้นานขึ้น

ณัฐริกา ใจสมบูรณ์ [8] ได้ทำการศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม Linear low density polyethylene (LLDPE) ด้วย EVA และซีโพลีเอ โดยการศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม LLDPE/EVA เป็น 100/0, 90/10, 80/20 และ 75/25 ทำการผสมสูตรพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นฟิล์มแบบเป่าโดยใช้อุณหภูมิที่หัวคาย 200°C พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LLDPE/EVA มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากฟิล์มมีขั้วที่สูงขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดและมอดุลัสมีแนวโน้มลดลงจาก

ฟิล์ม LLDPE เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยางทำให้เกิดความยืดหยุ่นมากขึ้น อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกและปริมาณความเป็นผลึกของ LLDPE ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากการศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์เอในฟิล์ม LLDPE/EVA โดยใช้อัตราส่วน พอลิเมอร์ผสม LLDPE/EVA เป็น 80/20 โดยใช้ซีโอไลต์เอ 0-25% โดยน้ำหนัก การผสมสูตรเตรียม จากสูตรเข้มข้นของ EVA กับซีโอไลต์เอ และทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคกดอัด พบว่าฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite A มีการกระจายตัวของซีโอไลต์เอดี โดยส่วนใหญ่ซีโอไลต์เอกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของ EVA จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอทุกสูตรใกล้เคียงกันกับสูตรที่ไม่ใส่ซีโอไลต์เอ (LLDPE/EVA เป็น 80/20) และจากการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite A พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มสูงขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณซีโอไลต์เอมากขึ้น เนื่องจากไอน้ำสามารถซึมผ่านได้ดีในวัฏภาคอสัณฐานของ EVA เพราะมีสมบัติมีขั้วเหมือนกันและการใช้ซีโอไลต์เอที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนและมีขั้วสูงจึงช่วยให้ฟิล์มพอลิเมอร์เกิดอันตรกิริยากับไอน้ำได้ดีและช่วยเหนี่ยวนำให้ไอน้ำสามารถซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ได้ดี เนื่องจากการเพิ่มความมีขั้วให้กับฟิล์ม ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการทดสอบมุมสัมผัสไอน้ำที่ลดลง และจากการทดสอบฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์บรรจุพริกสด พบว่าปริมาณไอน้ำกักเก็บที่คงเหลือในถุงบรรจุภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงในบรรจุภัณฑ์ที่มี EVA และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์เอสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP)

จิตรา ศักดาพิสุทธ์ และคณะ [9] ได้ปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVOH เพื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA โดยการสังเคราะห์ EVOH จาก EVA ที่มีไวนิลอะซิเตด (VA) เท่ากับ 18.0% และ 27.5% โดยน้ำหนัก ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ได้ EVOH ที่มีไวนิลแอลกอฮอล์ (VOH) เท่ากับ 10.0% และ 16.2% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เตรียมสูตรพอลิเมอร์ LDPE/EVOH และ LDPE/EVA ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และนำไปขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันในฟิล์ม LDPE/EVOH และ LDPE/EVA โดยควบคุมจำนวนหมู่ฟังก์ชันให้ใกล้เคียงกัน โดยใช้อัตราส่วน 100/0, 90/10, 85/15 และ 80/20 พบว่า EVOH และ EVA มีการกระจายตัวดีในทุกสูตรฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และ EVOH ในฟิล์ม LDPE/EVOH สามารถเกิดผลึกได้ในขณะที่ EVA ในฟิล์ม LDPE/EVA ไม่เกิดผลึกได้ฟิล์ม LDPE/EVA ที่มีความนิ่ม เสียรูปได้ง่ายกว่าฟิล์ม LDPE/EVOH และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EVOH

ส่งผลให้มอดูลัสของฟิล์ม LDPE/EVOH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่ม EVOH ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้นและทำให้ฟิล์มเสียรูปได้ยากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการดึงยึด ณ จุดครากและการดึงยึด ณ จุดขาดมีค่าลดลง และการเพิ่มปริมาณ EVOH เป็นการเพิ่มความมีขั้วให้แก่ฟิล์ม LDPE/EVOH ซึ่งสอดคล้องกับค่ามอดูลัสของน้ำที่ลดลง แต่ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVOH ทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน และจากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA กับ LDPE/EVOH พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำไม่แตกต่างกัน เนื่องจากฟิล์ม LDPE/EVOH มีผลึกเกิดขึ้นทั้งใน LDPE และ EVOH ส่วนในกรณีของฟิล์ม LDPE/EVA แม้ว่าจะมีขั้วต่ำกว่า แต่ EVA ไม่สามารถเกิดผลึกได้ จึงให้ความเป็นอสัณฐานที่มากกว่า นอกจากนี้จากการศึกษาผลของการใช้ซีโอไลต์เอ (20% โดยน้ำหนัก) พบว่าซีโอไลต์เอส่วนมากจะอยู่ในวัฏภาคของ EVOH และมีแนวโน้มที่จะเกาะกลุ่มเป็นก้อนมากกว่าที่จะอยู่เป็นอนุภาคเดี่ยวและการมีซีโอไลต์เอไม่ได้ทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มเปลี่ยนแปลงไป แต่ทำให้ค่าความสามารถในการดึงยึดลดลงและมีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เอมีอันตรกิริยาที่ดีกับ EVOH ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงขึ้นและเสียรูปได้ยากขึ้น และจากการเติมซีโอไลต์เอซึ่งเป็นสารที่มีรูพรุนและมีขั้วสูงลงในฟิล์ม LDPE/EVOH ทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVOH มีค่าเพิ่มขึ้น

พรพรรณ มั่นประสิทธิ์ และภาสินี แต่ตี [5] ได้ทำการศึกษาการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม EVA (VA 18%) ที่ปรับปรุงด้วยซีโอไลต์เอเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ที่ 10% โดยน้ำหนัก โดยการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการเป่า จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม พบว่าสารตัวเติมไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมผลึก ( $T_m$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ EVA จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า เมื่อมีการผสมสารตัวเติม ค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์ม EVA ที่ไม่มีการใส่สารตัวเติม เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคไม่แข็งแรงและรอยต่อระหว่างวัฏภาคเป็นเสมือนจุดสะสมความเค้นของชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อออกแรงดึงจึงเสียหายเร็วกว่าฟิล์มที่ไม่มีการใส่สารตัวเติม โดยฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติมมีค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าฟิล์มที่มี  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารตัวเติม ด้านสมบัติความแข็งแรงฉีกขาด พบว่า เมื่อมีการผสมสารตัวเติมไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงฉีกขาด ส่วนความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่มีการใช้ซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติม นั้นมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มที่ใช้  $\text{CaCO}_3$  เป็นสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเติม เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีความชอบน้ำสูง และน้ำสามารถซึมผ่านทางรูพรุนของซีโอไลต์เอได้

S. Marais และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซ CO<sub>2</sub> และก๊าซ O<sub>2</sub> ของแผ่นฟิล์ม EVA ที่มีปริมาณ VA ต่างกัน โดยขึ้นรูปฟิล์มโดยใช้เทคนิคการหล่อแบบสารละลาย (Solution casting) จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณ VA เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความเป็นผลึกของ EVA ลดลง ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่ดีขึ้น เนื่องจากมีหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) เพิ่มขึ้นทำให้ความมีขั้วเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการผสมพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ลงไปใน EVA พบว่าเมื่อปริมาณ PVC เพิ่มขึ้นการซึมผ่านของน้ำไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากหมู่ VA เกิดแรงกระทำกับหมู่ฟังก์ชันของ PVC ซึ่งจะปลดจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วที่จะไปเกิดอันตรกิริยากับน้ำ สำหรับความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ CO<sub>2</sub> และก๊าซ O<sub>2</sub> พบว่าปริมาณ VA ที่เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวแปรสำคัญที่ช่วยในการเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ เนื่องจากปริมาณ VA เพิ่มขึ้น จะทำให้ความเป็นผลึกลดลง ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณ VA เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T<sub>g</sub>) ของ EVA เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากมีโอกาสดังกล่าวที่เกิดแรงกระทำระหว่างหมู่ที่มีขั้วสูงขึ้น

K.G. Gravalos และคณะ [42] ได้ทำการศึกษา In situ compatibilization ของพอลิเมอร์ผสม PET/Ethylene ethyl acrylate copolymer (EEA) โดยการเกิดผ่านทางปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ของหมู่เอคริเลตเอสเทอร์ (Acrylate ester group) ของ EEA กับ หมู่ฟังก์ชัน -OH และ -COOH ของ PET ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองนำไปสู่การต่อกิ่ง (Grafting) ที่รอยต่อระหว่างวัฏภาคของ PET/EEA จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงขึ้น จากการศึกษาสถานะในการผสม พบว่าที่อุณหภูมิ 290°C และใช้เวลาในการผสม 25 นาที จะทำให้ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดและการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าสูงสุด จากการศึกษาผลของอัตราส่วน PET/EEA ที่ 100/0, 95/5, 15/85, 25/75, 50/50, 75/25 และ 0/100 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ EEA จะทำให้ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น และอัตราส่วน PET/EEA ที่ 85/15 จะให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และการดึงยืด ณ จุดขาด สูงที่สุด จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่า T<sub>m</sub> ของ PET มีค่าลดลง เนื่องจากการเติม EEA เป็นการรบกวนการเกิดผลึกของ PET และพบว่า T<sub>m</sub> ของ EEA มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่ามีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรอยต่อของวัฏภาค EEA กับ PET

I.C. McNeill และ M.H. Mohammed [43] ได้ทำการศึกษา เสถียรภาพทางความร้อนของ EEA ที่มีการผสม  $\text{CaCO}_3$  ซึ่งเป็นสารตัวเติมชนิดอนินทรีย์ (Inorganic filler) โดยมีการใช้  $\text{CaCO}_3$  3 ชนิดคือ ชนิด Whiting, ชนิด Calcite ซึ่งมีขนาดอนุภาค 1.5, 0.9 และ 5  $\mu\text{m}$  และชนิด Precipitated โดย  $\text{CaCO}_3$  ที่ใช้มีการใช้ในรูปแบบที่ไม่เคลือบและเคลือบด้วยกรดสเตียริก (Steric acid) พบว่า  $\text{CaCO}_3$  ชนิด Calcite ทำให้ EEA มีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่าการใช้  $\text{CaCO}_3$  ชนิด Whiting และ Precipitated และการใช้อนุภาค  $\text{CaCO}_3$  ที่มีการเคลือบด้วย Steric acid จะเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของ EEA โดย  $\text{CaCO}_3$  จะป้องกันการเกิดกรดอะซิติก (Acetic acid) และกรดโพรพานอิก (Propanoic acid) โดยการเกิดอันตรกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด (Acid groups) ของ Steric acid

ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์นั้นนิยมทำมาจาก LDPE และ LLDPE แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงปรับปรุงความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ LDPE ในการทำการทดลอง เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำกว่า LLDPE จึงเป็นการลดความเสี่ยงต่อการเสถียรภาพทางความร้อนของโคพอลิเมอร์ ซึ่งค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำนั้นสามารถเพิ่มขึ้นได้โดย การเพิ่มส่วนวิภาคอสถฐานที่มีขี้ผึ้ง และ/หรือเพิ่มสภาพขี้ผึ้งให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ โดยการผสมกับ Ethylene copolymer เช่น EVA และ EVOH เป็นต้น เนื่องจากพอลิเมอร์เหล่านี้ประกอบด้วยส่วนที่มีขี้ผึ้งและส่วนที่ไม่มีขี้ผึ้ง โดยส่วนที่ไม่มีขี้ผึ้งจะช่วยให้ Copolymer กระจายตัวได้ดีในวิภาค LDPE และส่วนที่มีขี้ผึ้งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ แต่งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า EVOH สามารถเกิดผลึกได้ จึงส่งผลให้ฟิล์ม LDPE/EVOH มีค่าการซึมผ่านไอน้ำไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับฟิล์ม LDPE/EVA นอกจากนี้สมบัติการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเติมซีโอไลต์เนื่องจากซีโอไลต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนที่มีขี้ผึ้งสูงและมีความชอบน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE โดยทำการผสมกับ EMA ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีขี้ผึ้งและมีเสถียรทางความร้อนที่ดีกว่า EVA และได้มีการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบคือ EMA, EEA และ EVA ร่วมกับการศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์ 20% โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มความชอบน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เกรด LD1905F จากบริษัท ไทยโพลีเอทิลีน จำกัด
2. เอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene methyl acrylate copolymer, EMA) เกรด Elvaloy® AC 1224 จากบริษัท ดูปองท์ (ประเทศไทย) จำกัด
3. เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene ethyl acrylate copolymer, EEA) เกรด AMPLIFY™ EA 101 จาก บริษัท ดาวเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด
4. เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) เกรด UL00728CC จากบริษัท Exxon Mobile Chemical จำกัด
5. ซีโอไลต์เอ (Zeolite A) เกรดการค้า จากบริษัท พีคิวเคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด
6. คลอโรฟอร์ม (Chloroform) บริษัท CARLOERBA จำกัด
7. ไซลีน (Xylene) บริษัท CARLOERBA จำกัด
8. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N<sub>2</sub>)

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LDPE\*

สมบัติ	LD1905F	หน่วย
ดรรรชนีการไหล (Melt flow rate, 190°C /2.16 kg)	5.00	g/10 min
ความหนาแน่น (Density)	0.919	g/cm <sup>3</sup>
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)	MD:-**,TD:9.81**	MPa
การดึงยืด ณ จุดขาด (Tensile elongation at break)	MD:400**, TD:700**	%
จุดหลอมเหลว (Melting point)	108	°C

หมายเหตุ \*\*ฟิล์มหนา 38 µm MD: ทดสอบตามแนวเครื่องจักร, TD: ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของเอทิลีน โคพอลิเมอร์\*

สมบัติ	EMA	EEA	EVA	หน่วย
หมู่แทนที่/ปริมาณ ในโคพอลิเมอร์	MA/24.0	EA/18.5	VA/27.5	%wt
ครรชนิกการไหล (Melt flow rate, 190°C /2.16 kg)	2.0	6.0	7.0	g/10 min
ความหนาแน่น (Density)	0.944	0.931	0.952	g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว (Melting point)	91	97.8	70	°C

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ Zeolite A\*

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

หมายเหตุ \*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) บริษัท CHAREON TUT จำกัด รุ่น MX500-D75L90
2. เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression molding machine) บริษัท แมช กิรूप (1992) จำกัด รุ่น MGLP 20 AT
3. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) บริษัท Bosco Engineering จำกัด รุ่น Bosco A600
4. เครื่องวัดความหนืดแบบกรวยและแผ่นเรียบ (Cone and plate rheometer) บริษัท UBM จำกัด รุ่น MR500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical analyzer) บริษัท UBM จำกัด รุ่น Rheogel-E4000
6. เครื่องวัดความหนืดแบบแคปิลลารี (Capillary rheometer) บริษัท Yasuda Seiki Seisakusyo จำกัด รุ่น Cappillary rheometer 140 SAS-2002
7. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) บริษัท LLOYD Instrument จำกัด รุ่น LR 5K
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท JEOL จำกัด รุ่น JSM-5410LV
9. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) บริษัท Perkin Elmer จำกัด รุ่น FTIR Spectrum Gx
10. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) บริษัท NETZSCH จำกัด รุ่น DSC 204 F1 Phoenix®
11. เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeation analyzer) บริษัท Illinois Instrument จำกัด รุ่น 7002
12. เครื่องทดสอบมุมสัมผัส บริษัท Dataphysics จำกัด รุ่น Contact angle system OCA
13. เครื่องบีบลม บริษัท Hitachi จำกัด รุ่น BEBICON 400
14. คีม
15. ตู้อบลมความร้อน
16. เครื่องชั่งละเอียดดิจิทัลความละเอียด 0.0001 g
17. ไมโครมิเตอร์
18. กระบอกใส่ไนโตรเจน
19. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 ml
20. เครื่องกรองสุญญากาศ
21. เดซิเคเตอร์ (Desiccator)
22. เครื่องพ่นกึ่งอุตสาหกรรม
23. อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนผสม โดยทำการผสมดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมดโดยน้ำหนัก

สูตรที่	สูตร	ปริมาณสาร (%)			
		LDPE	EMA	EEA	EVA
1	LDPE	100	-	-	-
2	L90M10	90	10	-	-
3	L80M20	80	20	-	-
4	L70M30	70	30	-	-
5	L60M40	60	40	-	-
6	L80V20	80	-	-	20
7	L70E30	70	-	30	-

ซึ่งส่วนผสมดังตารางที่ 3.4 โดยการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณพอลิเมอร์ผสมรวม 300 กรัม เข้าเพื่อให้ผสมกัน จากนั้นนำมาเทใส่ในเครื่องผสมระบบปิด โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 140°C
- ความเร็วรอบ 60 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 20 min

นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้เป็นเม็ดละเอียด เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมสำหรับการอัดขึ้นรูปฟิล์มต่อไป

### 3.3.2 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ

#### 3.3.2.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยการผสมผ่านสูตรเข้มข้น (Masterbatch mixing)

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีซีโอไลต์เอเป็นองค์ประกอบ โดยการผสมผ่านสูตรเข้มข้นของ EMA/Zeolite A โดยศึกษาในสูตร L80M20Z20 (งานวิจัยนี้เลือกใช้ซีโอไลต์ 20% โดยน้ำหนัก) ซึ่งการเตรียมสูตรเข้มข้นของ EMA/Zeolite A เตรียมได้โดยนำซีโอไลต์เอไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาผสมกับ EMA ที่อัตราส่วน 50/50 โดยน้ำหนัก ทำการเขย่าเพื่อให้เข้ากัน โดยการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณสารผสมรวม 300 กรัม จากนั้นนำมาเทใส่ในเครื่องผสมระบบปิด โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 140°C
- ความเร็วรอบ 60 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 20 min

นำสูตรเข้มข้นที่เตรียมได้มาบด เพื่อเตรียมสำหรับผสมสูตร L80M20Z20

การเตรียมพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 ผ่านสูตรเข้มข้น (Masterbatch mixing) ทำได้โดยชั่ง LDPE, ซีโอไลต์เอ และสูตรเข้มข้นของ EMA/Zeolite A ดังตารางที่ 3.5 โดยในการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณสารผสมรวม 300 กรัม ซึ่งแสดงการคำนวณปริมาณสารในภาคผนวก ก.3 จากนั้นนำมาเทใส่ในเครื่องผสมระบบปิด โดยตั้งสภาวะของเครื่องเหมือนด้านบน

นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้เป็นเม็ดละเอียดเพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมสำหรับการอัดขึ้นรูปฟิล์มต่อไป

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบและปริมาณสารที่ใส่ในเครื่องผสมของพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20

สูตร	ปริมาณสาร (%wt)			ปริมาณสารที่ใส่ในเครื่องผสมรวม 300 กรัม (กรัม)		
	LDPE	EMA	Zeolite A	LDPE	สูตรเข้มข้น EMA/Zeolite A	Zeolite A (ใส่เพิ่ม)
L80M20Z20 (Masterbatch mixing)	64	16	20	192	48	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.2 สูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอด้วยการผสมแบบครั้งเดียว (One shot mixing)

การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอด้วยการผสมแบบครั้งเดียวทำได้โดยเตรียม LDPE, เอทิลีนโคพอลิเมอร์ (EMA, EEA หรือ EVA) และ Zeolite ให้ได้สัดส่วนของพอลิเมอร์ระหว่าง LDPE/EMA/Zeolite A, LDPE/EEA/Zeolite A หรือ LDPE/EVA/Zeolite A ตามตารางที่ 3.6 โดยในการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณสารผสมรวม 300 กรัม

ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ (โดยน้ำหนัก)

สูตร	ปริมาณของ Zeolite A	ปริมาณสาร (%)			
		LDPE	EMA	EEA	EVA
L100Z20	20	100	-	-	-
L80M20Z20	20	64	16	-	-
L80V20Z20	20	64	-	-	16
L70E30Z20	20	56	-	24	-

นำส่วนผสมทั้งหมดใส่ลงไปในเครื่องผสมระบบปิด โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 140°C
- ความเร็วรอบ 60 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 20 min

นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้เป็นเม็ดละเอียดเพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมสำหรับการอัดขึ้นรูปฟิล์มต่อไป

### 3.3.3 การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีกดอัด

นำพอลิเมอร์ผสมสูตรที่บดแล้วไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นขึ้นรูปฟิล์ม โดยตั้งสภาวะของเครื่องกดอัดดังนี้ เพื่อควบคุมความหนาให้ได้ 50-70  $\mu\text{m}$  โดยชั่งน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมในแต่ละครั้งประมาณ 1 กรัม

- อุณหภูมิในการกดอัด 170°C
- อุณหภูมิในการเย็นตัว 15 $\pm$ 5°C
- เวลาในการกดอัด 5 min
- เวลาในการเย็นตัว 5 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความดันในการกดอัด 1800 psi

### 3.3.4 ความหนาของฟิล์ม

วัดความหนาของฟิล์มทุกชนิดที่ผลิตขึ้นมา โดยใช้ไมโครมิเตอร์ ประมาณ 50 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

### 3.3.5 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

นำแผ่นฟิล์มเรียบที่เตรียมได้มาทำการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์-ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) โดยใช้ Transmission mode ในช่วงเลขคลื่น  $370\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $4,000\text{ cm}^{-1}$  จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนความเข้มระหว่าง Absorbance ของพีค C=O Stretching ที่  $1714\text{ cm}^{-1}$  กับพีค Absorbance ของ C-H Rocking ที่  $720\text{ cm}^{-1}$  เพื่อหาการมีอยู่ของพีคของหมู่ C=O Stretching ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

### 3.3.6 การศึกษาพฤติกรรมการไหลด้วย Capillary rheometer

ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ผสม ที่สถานะแรงเฉือนสูงด้วย Capillary rheometer โดยทำการวัดในช่วงอัตราเฉือน (Shear rate)  $0-1000\text{ s}^{-1}$  เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า log ของอัตราเฉือน (log shear rate) กับ log ของความหนืดเฉือน (log shear viscosity) โดยใช้สถานะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	190°C
เส้นผ่านศูนย์กลางดาบ	1 mm
ความยาวดาบ	1 mm

### 3.3.7 การศึกษาพฤติกรรมการไหลด้วย Cone and plate rheometer

ทำการวัดค่ามอดุลัสสะสม ( $G'$ ) และค่ามอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Cone and plate rheometer เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ของแผ่นฟิล์มพลาสติกหนา 1 mm โดยทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 130°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ( $N_2$ ) ความถี่เชิงมุมในการทดสอบอยู่ในช่วง 0.01-100 rad/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.8 การศึกษาสมบัติความร้อนแบบพลวัตด้วย DMA

ทำการวัดค่ามอดุลัสสะสม ( $E'$ ) และค่ามอดุลัสสูญเสีย ( $E''$ ) และ  $\tan \delta$  ของพอลิเมอร์ผสม ด้วยเครื่อง Dynamic mechanical analyzer (DMA) ใน Tension mode สำหรับการทดสอบทำโดย ชิ้นงานที่ทดสอบมีขนาด  $1 \times 5 \times 10 \text{ mm}^3$  โดยทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิในช่วง  $-100$  ถึง  $100^\circ\text{C}$  ด้วย อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ  $2^\circ\text{C}$  ต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ความถี่ในการทดสอบ  $10 \text{ Hz}$

### 3.3.9 การวิเคราะห์ปริมาณซีโอไลต์เอนในฟิล์มตัวอย่าง

ทำการหาปริมาณซีโอไลต์เอนที่มีอยู่ในฟิล์ม ด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมีวิธีการดังนี้

**ตอนที่ 1** นำครุชชีเบลแบบถ้วยมาเผาด้วยเตาเผา (Furnace) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C}$  หลังจากนั้นทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำครุชชีเบลที่ผ่านการเผาแล้วมา ชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่งพร้อมทั้งจดบันทึกค่า โดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็น น้ำหนักของครุชชีเบล

**ตอนที่ 2** นำครุชชีเบลที่ผ่านการเผาแล้วมาใส่ชิ้นงานตัวอย่างโดยให้มีปริมาณ 2 ใน 3 ของ ความสูงครุชชีเบล จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่งพร้อมทั้งจดบันทึกค่าโดย น้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนักของครุชชีเบลก่อนเผา

**ตอนที่ 3** นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างที่ผ่านการชั่งแล้วมาเผาด้วยตะเกียงบุนเสนจนกระทั่งไม่เห็น เปลวไฟในครุชชีเบล จากนั้นทำการทดลองซ้ำตอนที่ 1 ค่าโดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนัก ของครุชชีเบลหลังเผา โดยปริมาณของซีโอไลต์เอนในฟิล์มตัวอย่าง สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$\text{น้ำหนักสารที่เหลือ} = \text{น้ำหนักของครุชชีเบลหลังเผา} - \text{น้ำหนักของครุชชีเบล}$$

$$\text{น้ำหนักสารทั้งหมด} = \text{น้ำหนักของครุชชีเบลก่อนเผา} - \text{น้ำหนักของครุชชีเบล}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของซีโอไลต์เอน} = \frac{\text{น้ำหนักสารที่เหลือ} \times 100}{\text{น้ำหนักสารทั้งหมด}} \quad (3.1)$$

### 3.3.10 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก

นำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง DSC ชั่งน้ำหนักฟิล์มประมาณ 5-10 มิลลิกรัม นำมาให้ความร้อน ด้วยอัตราการให้ความร้อน  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  จากอุณหภูมิห้องจนถึง

อุณหภูมิสูงสุดคือ  $180^\circ\text{C}$  และทำให้เย็น โดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  จนถึง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้อง นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) อุณหภูมิการตกผลึก ( $T_c$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกตามมาตรฐาน ASTM E794 [44]

$$\text{Heat of fusion } \Delta H_f (\text{J/g}) = \frac{\text{พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก (ที่ตำแหน่ง } T_m) (\text{mJ})}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}} \quad (3.2)$$

$$\text{ความเป็นผลึก (\%)} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^\circ} \quad (3.3)$$

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

$\Delta H_f^\circ$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่าเท่ากับ 293 J/g [45]

### 3.3.11 การศึกษาสัณฐานวิทยา

#### 3.3.11.1 การกระจายตัวของเอทิลีนโคพอลิเมอร์

นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาตัดให้มีขนาด  $1 \times 3 \text{ cm}^2$  แล้วนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ แล้วนำชิ้นงานที่หักไปแช่ในตัวทำละลายในอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่าที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  และ  $60^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยที่ใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายเพื่อสกัด EMA หรือ EEA ออกจากชิ้นงาน ตามลำดับ และใช้ไซลีนที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  เป็นตัวทำละลายเพื่อสกัด EVA ออกจากชิ้นงาน จากนั้นนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้น นำชิ้นงานพื้นที่ภาคตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของ EMA, EEA หรือ EVA ด้วย SEM

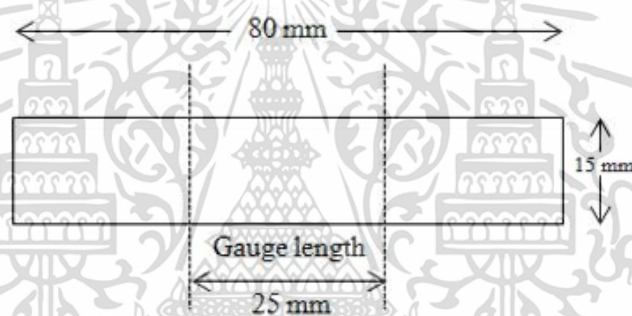
#### 3.3.11.2 การกระจายตัวของซีโอไลต์เอ

นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาตัดให้มีขนาด  $1 \times 3 \text{ cm}^2$  แล้วนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ นำชิ้นงานส่วนพื้นที่ภาคตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำแล้วนำไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของซีโอไลต์เอด้วยเครื่อง SEM

### 3.3.12 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

การทดสอบการรับแรงดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง 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 ตามมาตรฐาน ASTM D882 [46] 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

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)} = F_{\text{at yield}} / A \quad (3.4)$$

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)} = F_{\text{at break}} / A \quad (3.5)$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield)} = \frac{(l_{\text{at yield}} - l_0) \times 100}{l_0} \quad (3.6)$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)} = \frac{(l_{\text{at break}} - l_0) \times 100}{l_0} \quad (3.7)$$

$$\text{ค่า Young's modulus} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$F_{at\ yield}$	= แรงดึงยืดขึ้นงาน ณ จุดคราก
	$F_{at\ break}$	= แรงดึงยืดขึ้นงาน ณ จุดขาด
	$A$	= พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง ( $mm^2$ )
	$l_{at\ yield}$	= ระยะห่างระหว่างหัวจับขึ้นงานหลังทำการดึงขึ้นงานตัวอย่าง ณ จุดคราก
	$l_{at\ break}$	= ระยะห่างระหว่างหัวจับขึ้นงานหลังทำการดึงขึ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด
	$l_0$	= ระยะห่างระหว่างหัวจับขึ้นงานก่อนดึงขึ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 25 mm

หมายเหตุ ค่ายังมอดูลัสคำนวณจากค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 1 และ 3% การดึงยืด)

### 3.3.13 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด

นำฟิล์มตัวอย่างที่ขึ้นรูปจากกระบวนการกดอัดมาตัดเป็นชิ้นงานรูปปีกนกแบบ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D624 [47] ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ใช้ Load cell 100 N และความเร็วในการดึง 100 mm/min



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาดแบบ Die C [47]

### 3.3.14 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

ส่งตัวอย่างทดสอบที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ทำการหาปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มพลาสติก ในระยะเวลาที่กำหนดและภายใต้สภาวะที่คงที่มีหน่วยเป็น  $g/m^2 \cdot day$  ที่อุณหภูมิ  $38^{\circ}C$  ความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ 90% โดยวิธี Transfer time method โดยใช้เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ ตัดชิ้นงานฟิล์มให้มีขนาด  $6 \times 6\ cm^2$  ตามมาตรฐาน ASTM F1249 [48]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.15 การทดสอบมุมสัมผัส

นำพอลิเมอร์ผสมที่ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดตามหัวข้อที่ 3.3.3 โดยใช้แม่พิมพ์ขนาด  $40 \times 40 \times 6 \text{ mm}^3$  แต่ใช้เวลาในการให้ความร้อนและเวลาในการเย็นตัว 10 นาที ทำการตัดชิ้นงานตามขวางเพื่อทดสอบบริเวณพื้นผิวของพื้นที่ภาคตัดขวางหนา 6 mm ใช้ปริมาตรหยดน้ำ  $2 \mu\text{L}$  ทำการบันทึกค่ามุมสัมผัสเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที วัดมุมที่หยดน้ำกระทำกับผิววัสดุด้วยเครื่อง Contact angle system OCA ตามมาตรฐาน ASTM D5946 [49]

### 3.3.16 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

1. นำฟิล์มตัวอย่างขนาด  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  จำนวน 2 แผ่นต่อถุง มาผลิตเป็นถุงบรรจุภัณฑ์โดยการปิดผนึกร้อน โดยมีการชั่งน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ซึ่งบันทึกเป็นค่าน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ก่อนการเก็บรักษา
2. คัดเลือกพริกชี้หนูสดที่มีขนาดใกล้เคียงกันจากนั้นล้างพริกให้สะอาดและผึ่งให้แห้งจำนวนถุงละ 5 กรัม และชั่งน้ำหนักที่แน่นอนบันทึกเป็นค่าน้ำหนักพริกเริ่มต้น
3. บรรจุพริกชี้หนูสดลงในบรรจุภัณฑ์แล้วทำการปิดผนึกร้อนทั้ง 4 ด้าน ให้มีพื้นที่ภายใน  $9 \times 9 \text{ cm}^2$  ปริมาตรภายในบรรจุภัณฑ์ประมาณ  $18 \text{ cm}^3$  แล้วทำการชั่งน้ำหนักบรรจุภัณฑ์บันทึกเป็นค่าน้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ก่อนเก็บรักษา
4. เก็บรักษาบรรจุภัณฑ์ในช่องแช่แข็งของผู้เย็น ที่อุณหภูมิ  $5^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40% เป็นระยะเวลา 20 วัน [13] ในขณะที่เก็บรักษานั้นมีการชั่งน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์ทุกๆ 2 วัน จนครบเวลา 20 วัน บันทึกเป็นน้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ทุก 2 วัน
5. เมื่อเก็บรักษาบรรจุภัณฑ์จนครบ 20 วัน นำบรรจุภัณฑ์มาชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกเป็นค่าน้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์หลังการเก็บรักษา
6. จากนั้นตัดถุงบรรจุภัณฑ์และซับไอน้ำออกจากภายในบรรจุภัณฑ์และพื้นผิวของพริกเพื่อชั่งน้ำหนักของพริกและบรรจุภัณฑ์ แล้วบันทึกค่าน้ำหนักพริกหลังการเก็บรักษาและน้ำหนักบรรจุภัณฑ์หลังการเก็บรักษา ตามลำดับ
7. นำค่าน้ำหนักที่ได้คำนวณหาปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านบรรจุภัณฑ์ออกไปได้และปริมาณไอน้ำกักเก็บที่เหลือในถุงบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักของพริก 1 กรัม ดังสมการ

ปริมาณไอน้ำทั้งหมดที่พริกหายใจได้ทั้งหมดต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (%) =

$$\begin{aligned} & \text{ปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (วันที่ 20) (\%)} \\ & + \text{ปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (\%)} \end{aligned} \quad (3.9)$$

ปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (ในแต่ละวัน) (%) =

$$\frac{[(\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น} + \text{น้ำหนักบรรจุภัณฑ์}) - \text{น้ำหนักรวมในแต่ละวัน}] \times 100}{\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น}} \quad (3.10)$$

ปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (%) =

$$\frac{[\text{น้ำหนักรวมหลังการเก็บรักษา} - (\text{น้ำหนักพริกหลังการเก็บรักษา} + \text{น้ำหนักบรรจุภัณฑ์})] \times 100}{\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น}} \quad (3.11)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยทำการศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE ต่อเอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EMA) เป็น 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 ศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันระหว่าง EMA, เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) และเอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) ในสูตรที่มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกัน และศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอในปริมาณที่เท่าๆ กัน โดยมีการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์มก่อนเลือกบางสูตรของฟิล์มไปทดลองทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสดต่อไป

#### 4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA

การศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE/EMA ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและฟิล์มที่ผ่านการขึ้นรูป โดยนำพอลิเมอร์ผสมและฟิล์มมาวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ โดยใช้สูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 65–67 $\mu\text{m}$

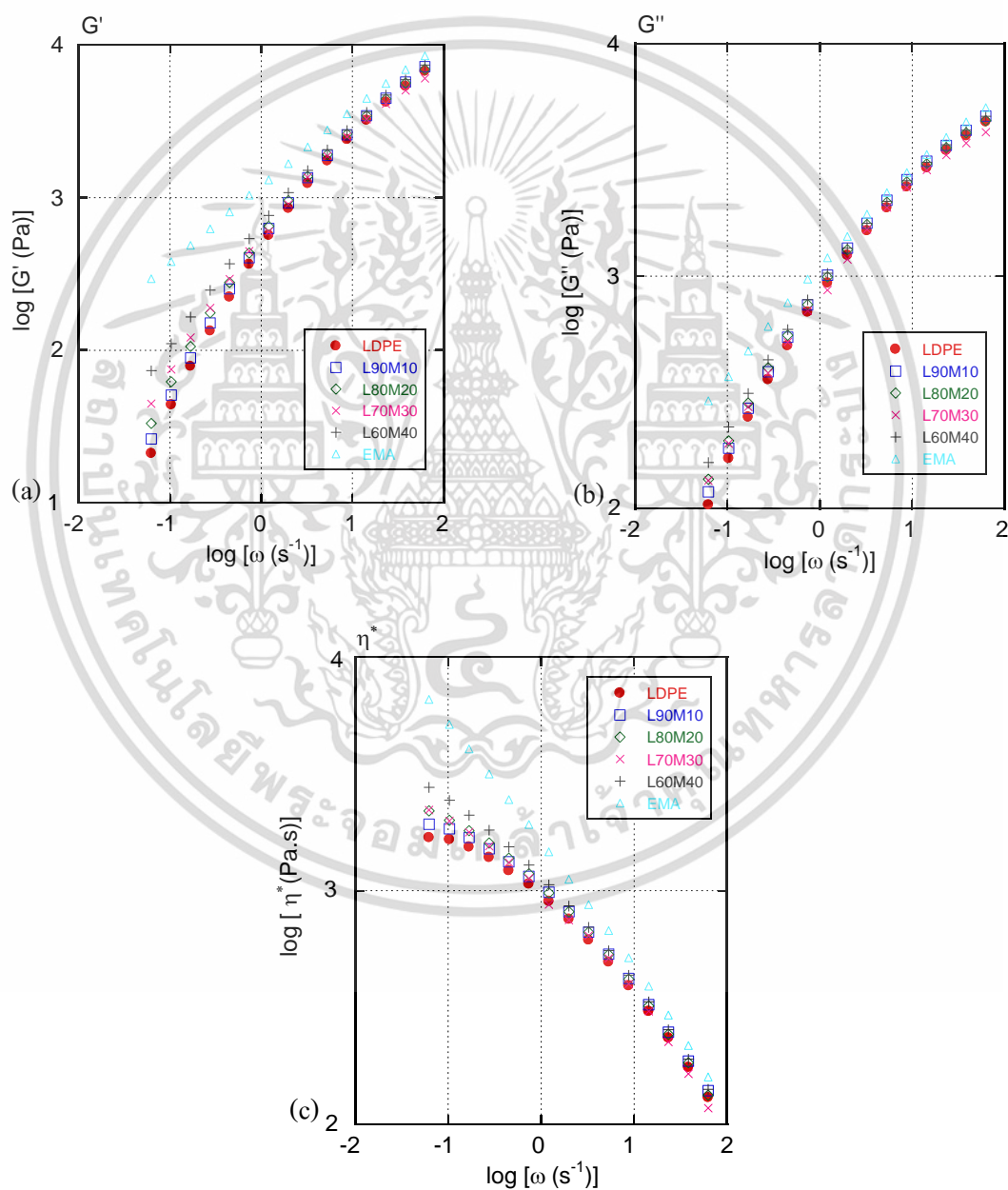
ตารางที่ 4.1 สูตรพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA และความหนาของฟิล์ม

สูตร	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม โดยน้ำหนัก		ความหนาเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
	LDPE	EMA	
LDPE	100	0	66 $\pm$ 6
L90M10	90	10	66 $\pm$ 4
L80M20	80	20	65 $\pm$ 6
L70M30	70	30	65 $\pm$ 6
L60M40	60	40	67 $\pm$ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสม

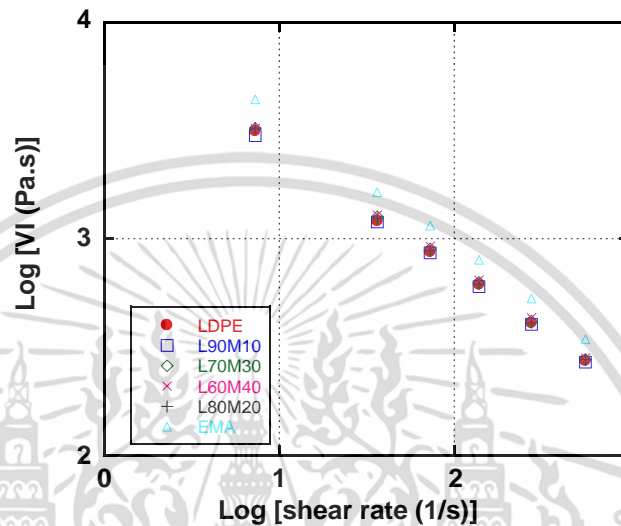
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว LDPE/EMA ด้วยเทคนิค Cone and plate rheometer โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 130°C จากรูปที่ 4.1 แสดงค่ามอดูลัสสะสม ( $G'$ ) ซึ่งแสดงสมบัติส่วนที่เป็น Elastic ของพอลิเมอร์ หมายถึงพลังงานที่พอลิเมอร์สะสมในระบบ และค่ามอดูลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ซึ่งแสดงสมบัติส่วนที่เป็น Viscous ของพอลิเมอร์ หมายถึงพลังงานสูญเสียไปของพอลิเมอร์ในระบบ และ Complex viscosity ( $\eta^*$ )



รูปที่ 4.1 สมบัติการไหลที่สภาวะแรงเฉือนต่ำของพอลิเมอร์หลอมเหลว LDPE/EMA ที่ 130°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของ EMA ทำให้ค่า  $G'$  และ  $G''$  สูงขึ้นและมีค่ามากกว่า LDPE ทั้งนี้เนื่องจาก EMA มีหมู่ MA ที่มีความเกาะก่ซึ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น จึงส่งผลให้ต้องใช้พลังงานในการเคลื่อนที่มากขึ้น



รูปที่ 4.2 สมบัติการไหลที่สภาวะแรงเฉือนสูงของพอลิเมอร์หลอมเหลว LDPE/EMA ที่ 190°C

นอกจากนี้ ได้ศึกษาพฤติกรรม การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว LDPE/EMA ด้วยเครื่อง Capillary rheometer โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 190°C แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.2 พบว่า EMA มีความหนืดที่สูงกว่า LDPE เช่นเดียวกับพฤติกรรมค่าความหนืดที่สภาวะแรงเฉือนต่ำ ดังรูปที่ 4.1 (c) เนื่องจาก EMA มีหมู่ข้างเคียงที่มีความเกาะก่ โดยที่พอลิเมอร์ทุกสูตรแสดงพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic นั่นคือเมื่อให้ความถี่ในการให้แรง และ/หรืออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการคลายตัวได้มากขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการไหลตามแนวแรงกระทำได้ดีขึ้น โดยที่พอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA มีค่าความหนืดอยู่ระหว่าง LDPE และ EMA จะสังเกตได้จากค่าความหนืดที่สภาวะแรงเฉือนต่ำ (รูปที่ 4.1 (c)) ในขณะที่ค่าความหนืดที่สภาวะแรงเฉือนสูงมีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากที่สภาวะแรงเฉือนสูง เมื่อให้แรงกระทำอย่างรวดเร็วจะทำให้สายโซ่เกิดการคลายตัวอย่างมากและพร้อมที่จะเสียรูปตามแนวแรงได้ดีขึ้น

ในระบบพอลิเมอร์ผสมปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลและพฤติกรรมการคลายตัว (Relaxation) คือ แรงตึงผิว (Surface tension) และการกระจายตัวของวัฏภาคกระจาย (Localized distribution of the dispersed droplets) เป็นไปตามหลักของอัตราส่วนความหนืด (Viscosity ratio)

$$\text{Viscosity ratio; } \lambda = \eta_2/\eta_1 \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\eta_1$  คือความหนืดของวัฏภาคหลัก

$\eta_2$  คือความหนืดของวัฏภาคกระจาย

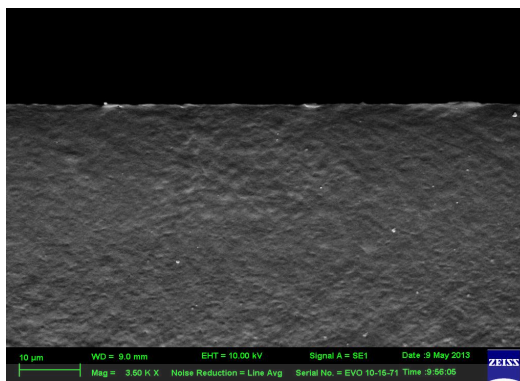
จากสมบัติของความหนืดของพอลิเมอร์ผสมที่สภาวะแรงเฉือนต่ำและสภาวะแรงเฉือนสูง พบว่า EMA มีความหนืดที่มากกว่า LDPE จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีค่า  $\lambda > 1$  อีกทั้ง EMA เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีขั้วที่สูงกว่า LDPE จึงส่งผลให้ EMA มีแรงตึงผิวที่สูงกว่า LDPE เมื่อให้แรงกระทำกับ EMA จะเกิดการแตกตัวในลักษณะเป็นเม็ด (Droplet) ซึ่งประพติตัวคล้ายเป็นเม็ดของแข็ง (Particulated solid) กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคหลัก คล้ายกับกรณีใช้สารเติมแต่งที่เป็นของแข็งในพอลิเมอร์หลอมเหลว เมื่อให้และปล่อยแรงกระทำกับพอลิเมอร์ผสม วัฏภาค EMA ที่หนืดกว่าจึงไม่เคลื่อนที่ตามวัฏภาค LDPE ในทันที แต่ค่อยๆ กลายแรงและหดสายโซ่กลับมามีอนเดิม พฤติกรรมนี้เหมือนผลการทดลองที่พบในงานวิจัยของรุจิเรจ วิวัฒนานุกูล [50] ที่ศึกษาพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS

#### 4.1.2 การศึกษาผลของการกระจายตัวของ EMA ในฟิล์ม LDPE/EMA

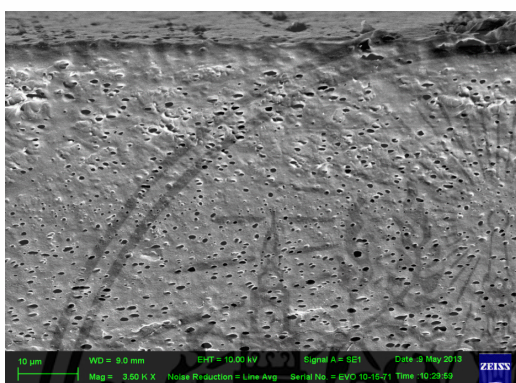
การศึกษาระบายตัวของ EMA ในฟิล์ม LDPE/EMA ในอัตราส่วนต่างๆ โดยทำการสกัด EMA ออกจากฟิล์ม LDPE/EMA ก่อน จึงนำมาตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM แสดงผลการศึกษาดังรูปที่ 4.3

จากรูปที่ 4.3 ฟิล์มสูตร LDPE มีลักษณะเป็นฟิล์มเนื้อแน่น แสดงว่าตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้เพื่อสกัดวัฏภาค EMA ออกนั้นไม่ส่งผลต่อวัฏภาค LDPE ส่วนฟิล์มสูตรที่มี EMA พบช่องว่างซึ่งคือบริเวณของ EMA ที่ถูกสกัดออกไปโดย EMA เป็นวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) อยู่ใน LDPE ที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) พบว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีการกระจายตัว (Distribution) ของ EMA ดี โดยเมื่อเพิ่มปริมาณ EMA พบว่าวัฏภาคของ EMA มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจาก EMA มีความหนืดมากกว่าวัฏภาคหลัก LDPE ( $\lambda > 1$ ) เมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรงเฉือนจากเครื่องผสมทำให้วัฏภาคของ EMA แตกตัวได้ยากขึ้น

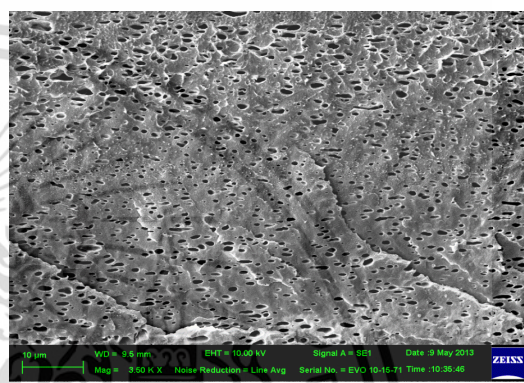
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



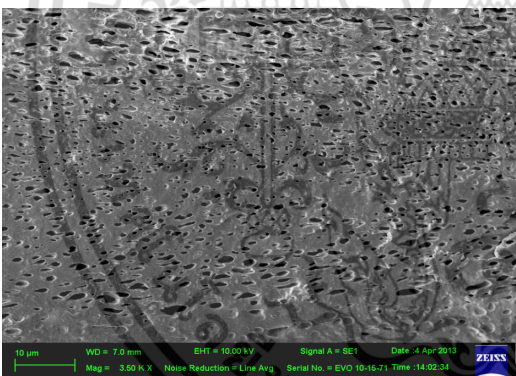
LDPE



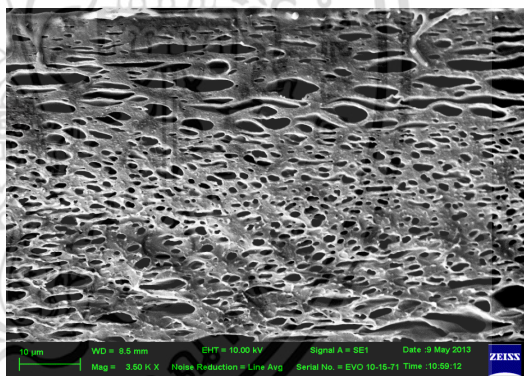
L90M10



L80M20



L70M30



L60M40

รูปที่ 4.3 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์ม LDPE/EMA ที่มีการสกัดวัฏภาคของ EMA ออก (กำลังขยาย 3500 เท่า) ( $10\ \mu\text{m}$ )

นอกจากนี้สังเกตได้ว่าขนาดของวัฏภาคของ EMA ในบริเวณขอบทั้ง 2 ด้านของฟิล์มมีขนาดวัฏภาค EMA ที่ใหญ่กว่าบริเวณตรงกลางของฟิล์ม ทั้งนี้เนื่องจากในขณะที่ขึ้นรูปฟิล์มด้วยเทคนิคกดอัด EMA ที่ปรากฏอยู่ในบริเวณขอบทั้ง 2 ด้านของฟิล์มเคลื่อนที่รวมตัวกันจากการได้รับแรงกดอัด จึงส่งผลให้มีวัฏภาคของ EMA ในบริเวณดังกล่าวมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีฟิล์มสูตร L60M40 พบว่ามีการกระจายตัวของ EMA ที่ดี ซึ่งพบว่าฟิล์มสูตรดังกล่าวมีขนาดของวัฏภาคกระจายที่มีความหลากหลาย โดย EMA มีการแตกตัวเป็นวัฏภาคที่มีขนาดเล็ก และเมื่อทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเทคนิคกดอัด EMA ที่อยู่ในบริเวณขอบของฟิล์มเกิดการเคลื่อนที่มารวมกันส่งผลให้มีขนาดของวัฏภาคกระจายที่ใหญ่ขึ้น

#### 4.1.3 การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LDPE/EMA

การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LDPE/EMA ด้วย DSC แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 พบว่าค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) และอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ของ LDPE มีค่าใกล้เคียงกันในทุกสูตรฟิล์ม เนื่องจาก LDPE กับ EMA มีแรงยึดติระหว่างวัฏภาคที่ไม่ดีจึงมีความเข้ากันได้ต่ำ ทำให้ไม่ส่งผลต่อขนาดผลึกของ LDPE ฟิล์มทุกสูตรมีขนาดผลึกที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.2  $T_m$  และ  $T_c$  ของ LDPE และ EMA และความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมในฟิล์ม

LDPE/EMA

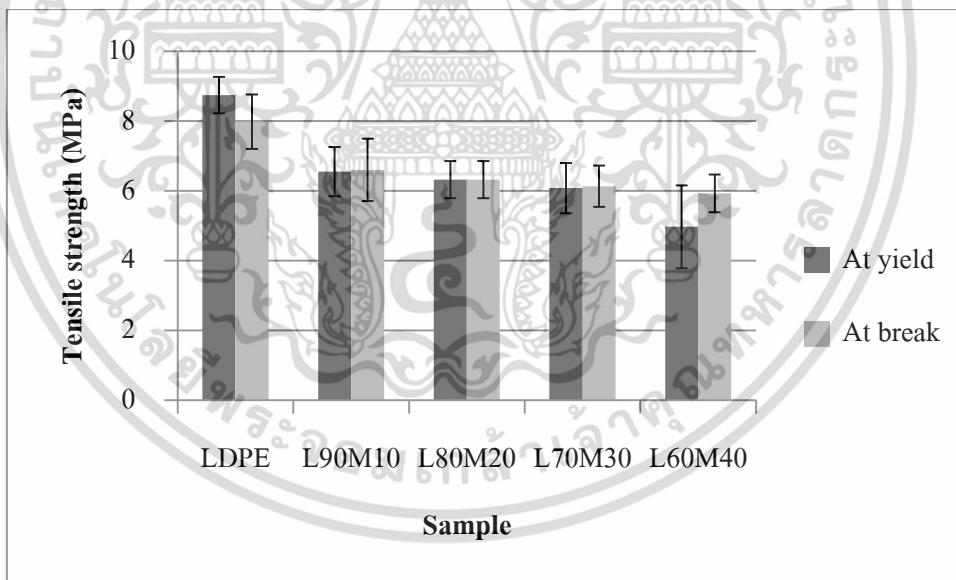
สูตร	$T_m$ (Peak) (°C)	$T_c$ (Peak) (°C)	$X_c$ (%)
L100	112.5	94.3	39
L90M10	111.1	95.7	34
L80M20	111.5	95.5	31
L70M30	111.6	95.5	22
L60M40	110.9	95.8	18
EMA	93.7	66.5	19

จากข้อมูล DSC (ภาคผนวก ข) พบว่า EMA มี  $T_m$  อยู่ในช่วง 30-110°C และ LDPE มี  $T_m$  อยู่ในช่วง 65-125°C ซึ่งมี  $T_m$  ปรากฏอยู่ในช่วงเดียวกัน อีกทั้ง EMA สามารถเกิดผลึกได้ ซึ่งสังเกตได้จากเทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมปรากฏที่  $T_c$  ของ EMA ที่อุณหภูมิประมาณ 65°C ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่า ผลึกที่พบมีความเป็นไปได้ว่าน่าจะมาจากผลึกของทั้งส่วน LDPE และ EMA ปริมาณผลึกที่แสดงจึงเป็นผลึกทั้งหมดของเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์ โดยความเป็นผลึกมีค่าลดลงตามปริมาณ EMA ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะฟิล์มสูตร L70M30 และ L60M40 มีค่าความเป็นผลึกต่ำกว่าฟิล์ม

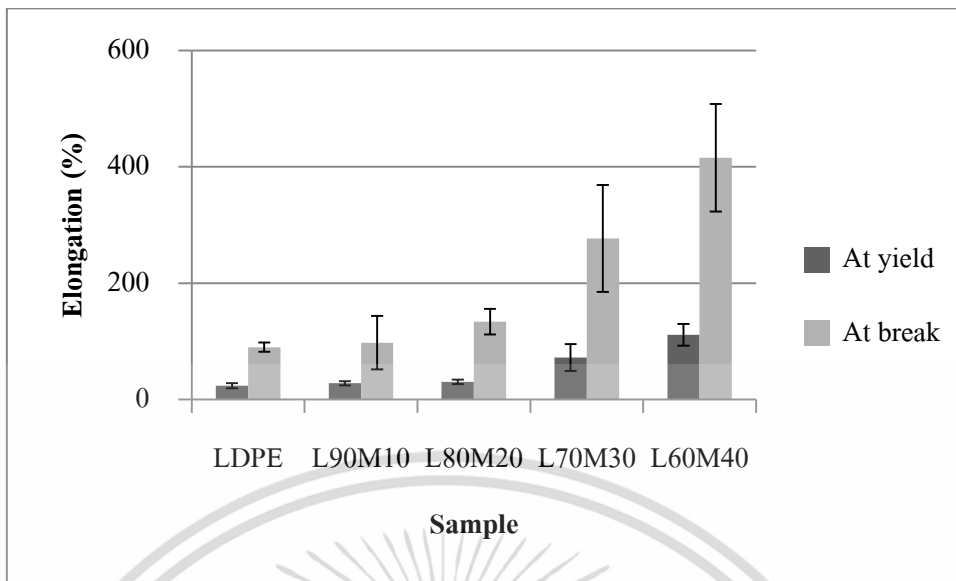
สูตรอื่นๆ เนื่องจากมี EMA มากขึ้นทำให้ LDPE และ EMA ครอบคลุมความสามารถในการเกิดผลึกซึ่งกันและกันอย่างชัดเจน

**4.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE/EMA**

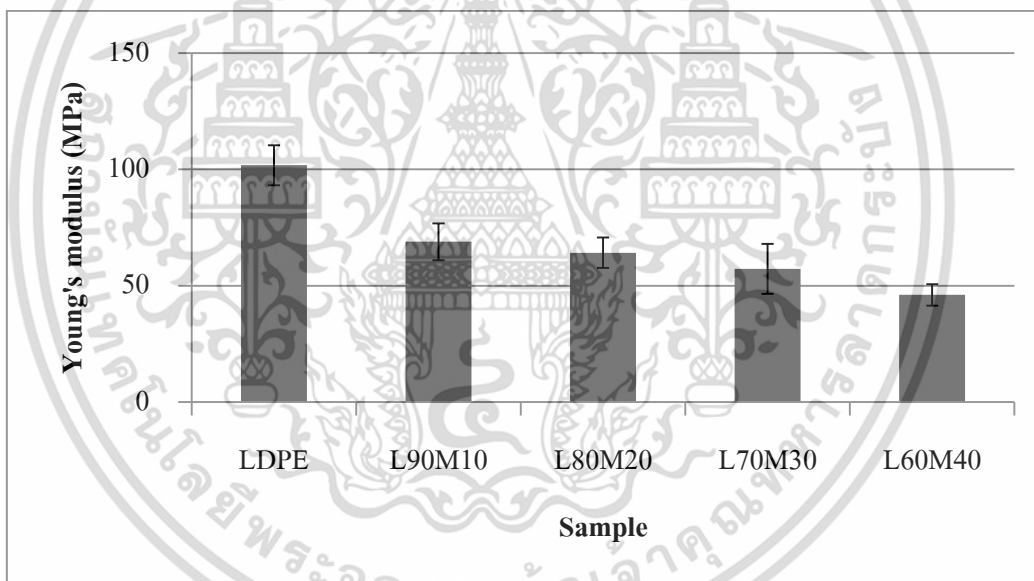
จากรูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LDPE/EMA และรูปที่ 4.5 แสดงผลสมบัติความแข็งแรงนิกษาคของฟิล์ม LDPE/EMA พบว่า LDPE เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่เป็นระเบียบจึงสามารถรับแรงได้มากก่อนเกิดการเสียรูป เมื่อเพิ่มปริมาณ EMA พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด และยังมีมอดูลัส ลดลง ส่วนการดึงยืด ณ จุดคราก/ขาด มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม LDPE นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความแข็งแรงนิกษาคของฟิล์มพอลิเมอร์ LDPE/EMA ลดลงจากฟิล์ม LDPE โดยในแต่ละสูตรมีค่าความแข็งแรงนิกษาคใกล้เคียงกันเมื่อ EMA มีปริมาณมากขึ้น เนื่องจาก EMA มีสมบัติคล้ายยางและมีความยืดหยุ่นทำให้เกิดการเสียรูปได้ง่ายกว่า LDPE



(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด ของฟิล์ม LDPE/EMA



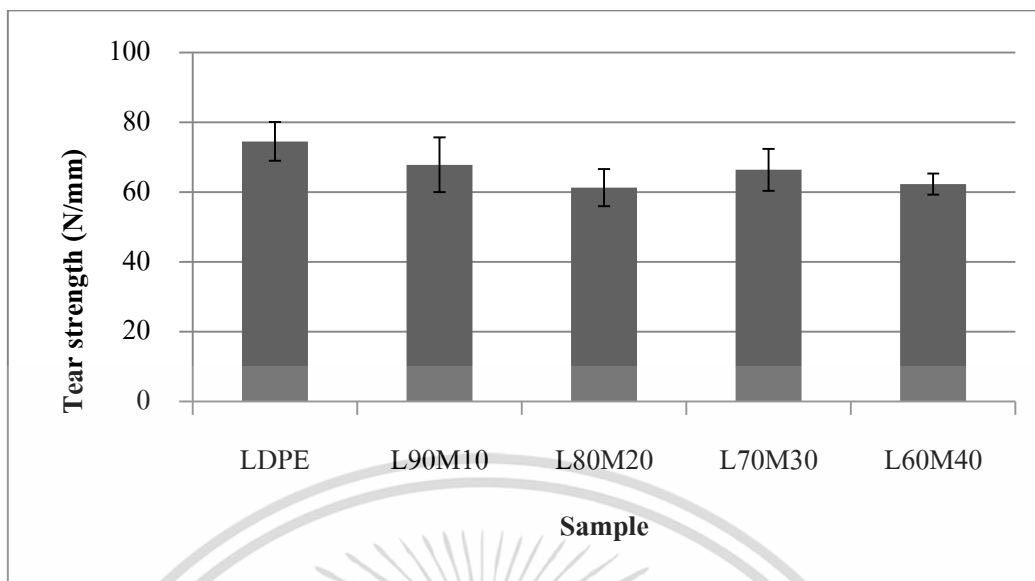
(b) การดัดยั้ง จุดคราก/ขาด ของฟิล์ม LDPE/EMA



(c) ยั้งมอดุลัสของฟิล์ม LDPE/EMA

รูปที่ 4.4 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LDPE/EMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



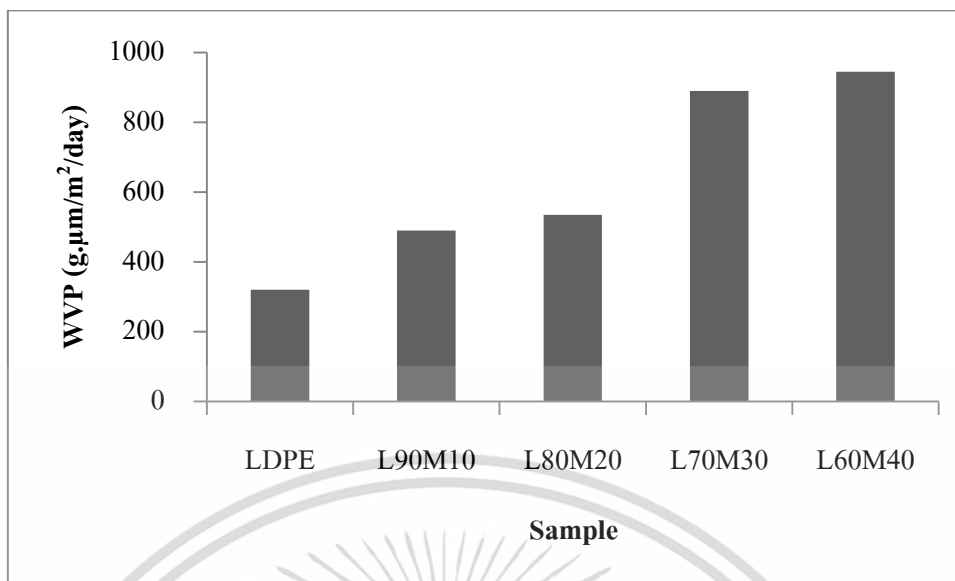
รูปที่ 4.5 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม LDPE/EMA

#### 4.1.5 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง

ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแสดงดังรูปที่ 4.6 โดยทั่วไปการวัดค่าการซึมผ่านไอน้ำด้วยเครื่อง Water vapor permeability analyzer นิยมรายงานค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeation rate, WVTR) แต่ในงานวิจัยนี้ฟิล์มที่ใช้ทดสอบนั้นมีความหนาที่แตกต่างกัน เพื่อกำจัดปัจจัยในเรื่องความหนา เพราะฟิล์มที่มีความหนาสูงขึ้นจะมีปริมาตรของเนื้อฟิล์มมากทำให้ไอน้ำเคลื่อนที่ผ่านได้ยาก ดังนั้นจึงแสดงผลการทดลองในรูปของค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permability, WVP) โดยคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$WVP = WVTR \times \text{Film thickness} \quad (4.2)$$

โดยทั่วไปโมเลกุลขนาดเล็กที่อยู่ในสถานะก๊าซ เช่น ไอน้ำ สามารถซึมผ่านวัสดุภาคอสัณฐานที่มีขั้วของ EMA ได้ดีกว่าวัสดุภาคอสัณฐานที่ไม่มีขั้วของ LDPE เนื่องจากการมีหมู่เมทิลอะคริเลต (MA) ที่มีขั้วของ EMA ทำให้เกิดอันตรกิริยากับไอน้ำได้ดีกว่า LDPE ที่ไม่มีขั้ว จากรูปที่ 4.5 พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของ EMA เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ EMA เป็นการเพิ่มวัสดุภาคอสัณฐานที่มีขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ โดยสังเกตได้จากผลการทดลอง DSC (ตารางที่ 4.2) พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกลดลง



รูปที่ 4.6 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EMA

จากตารางที่ 4.3 พบว่าการเติม EMA ลงในพอลิเมอร์ผสมจะทำให้พอลิเมอร์มีค่ามุมสัมผัสลดลงเมื่อเทียบกับ LDPE และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ EMA มีปริมาณมากขึ้น นั่นเป็นการแสดงให้เห็นว่า EMA ที่เติมลงไปช่วยเพิ่มสภาพขี้ให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยขี้ที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์เกิดอันตรกิริยาได้ดีกับน้ำและสามารถเหนี่ยวนำไอน้ำให้ซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้มากขึ้น

โดยฟิล์มสูตร L60M40 มีค่า WVP ที่สูงที่สุด เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกน้อยที่สุด (ตารางที่ 4.2) จึงส่งผลให้สูตรดังกล่าวมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าสูตรอื่น

ตารางที่ 4.3 ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์

ตัวอย่าง	ค่ามุมสัมผัส: $\Theta$ (degree)
LDPE	98.1±1.5
L90M10	83.4±2.1
L80M20	81.7±2.9
L70M30	78.3±2.6
L60M40	77.4±1.7
EMA	77.0±1.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE/EMA พบว่า ฟิล์มสูตร L90M10, L80M20 และ L70M30 มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด อยู่ในช่วงที่มาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนด (7 MPa) ซึ่งสามารถเลือกมาทำการศึกษาต่อ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการพิจารณาถึงค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EMA จะทำให้ค่ามอดูลัสมีค่าลดลง แสดงว่าฟิล์มพอลิเมอร์มีความนิ่มมากขึ้น โดยดูได้จากค่าการดึงยืด ณ จุดครากของสูตร L70M30 ซึ่งมีค่าสูงกว่า L90M10 และ L80M20 อย่างชัดเจน แสดงว่าฟิล์ม L70M30 มีโอกาสที่จะเสียรูปได้ง่ายที่สุด ดังนั้นฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L70E30 จึงไม่เหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์สด แม้จะมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่สูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L90M10 และ L80M20 ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L90M10 ซึ่งเป็นฟิล์มสูตรที่มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำใกล้เคียงกับฟิล์มสูตร L80M20 แต่ฟิล์มพอลิเมอร์สูตรดังกล่าวมีปริมาณของโคพอลิเมอร์ที่มีขั้วที่น้อยกว่า จึงน่าจะช่วยในการกระจายตัวของซีโอไลต์เอได้ไม่ดีเท่าพอลิเมอร์สูตร L80M20 ที่มีปริมาณโคพอลิเมอร์ที่มากกว่า เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นวัสดุที่มีขั้วสูงจึงชอบกระจายตัวในวัฏภาคที่มีขั้วของโคพอลิเมอร์ เหมือนกับงานวิจัยของนันทวรรณ ม่วงมี [7] ที่มีการปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของ LDPE ด้วย EVA และซีโอไลต์เอ

#### 4.2 การศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชัน

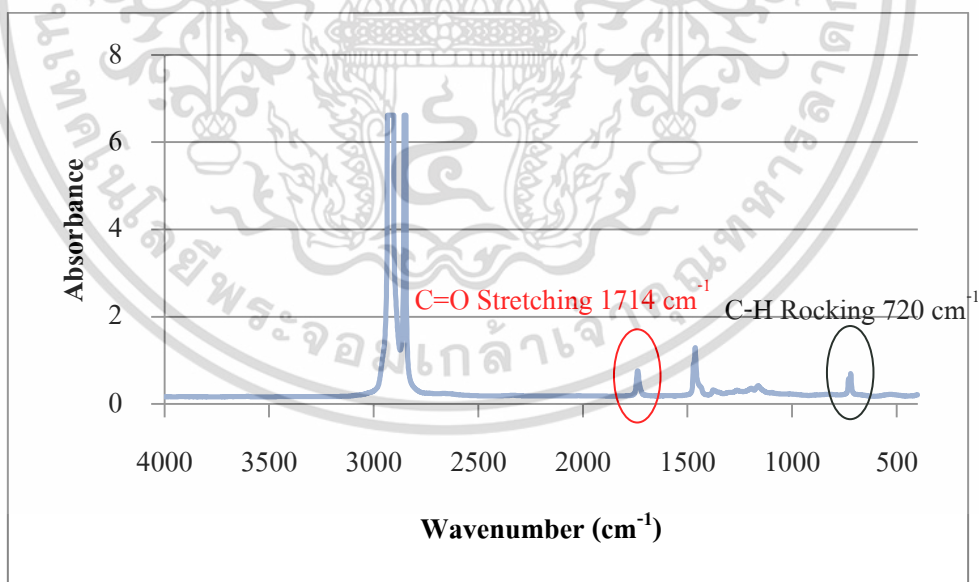
จากการศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE/EMA ในตอนที่ 4.1 เลือก LDPE/Copolymer ในอัตราส่วน 80/20 มาศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วที่ส่งผลต่อการซึมผ่านไอน้ำ โดยโคพอลิเมอร์ที่เลือกใช้เพื่อทำการเปรียบเทียบคือ EVA และ EEA ซึ่งพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ในการทดลองนี้มีปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วที่แตกต่างกัน โดย EMA มีปริมาณหมู่ MA 24% และ EVA มีปริมาณหมู่ VA 27.5% แต่ EEA มีปริมาณหมู่ EA 18.5% (ซึ่งมีปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วน้อยกว่าโคพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการควบคุมปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วให้ใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 62-66  $\mu\text{m}$

ตารางที่ 4.4 สูตรพอลิเมอร์ผสม LDPE/Copolymer และความหนาของฟิล์ม

Sample	Composition (%wt)				ปริมาณหมู่ฟังก์ชัน โดยรวม	Thickness ( $\mu\text{m}$ )
	LDPE	EMA	EEA	EVA		
LDPE	100	0	0	0	0.0	$66 \pm 6$
L80M20	80	20	0	0	4.8	$65 \pm 6$
L80V20	80	0	0	20	5.5	$62 \pm 5$
L70E30	70	0	30	0	5.6	$62 \pm 5$

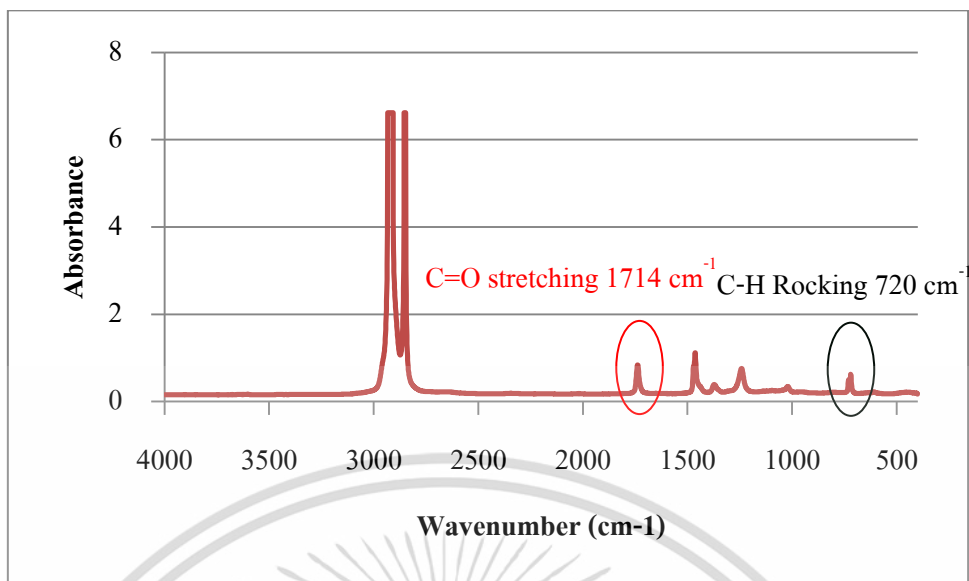
#### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ด้วยการศึกษาค่าการดูดแสงจาก FT-IR แสดงดังรูปที่ 4.7 (a)-(c) โดยการคำนวณหาดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index, CI) จากค่าการดูดแสงของหมู่ C=O Stretching ที่  $1714 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วซึ่งได้มาจาก EMA, EVA และ EEA ตามลำดับ เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C-H Rocking  $720 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนของสายโซ่หลัก (Backbone) ของ LDPE, EMA, EVA และ EEA ที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

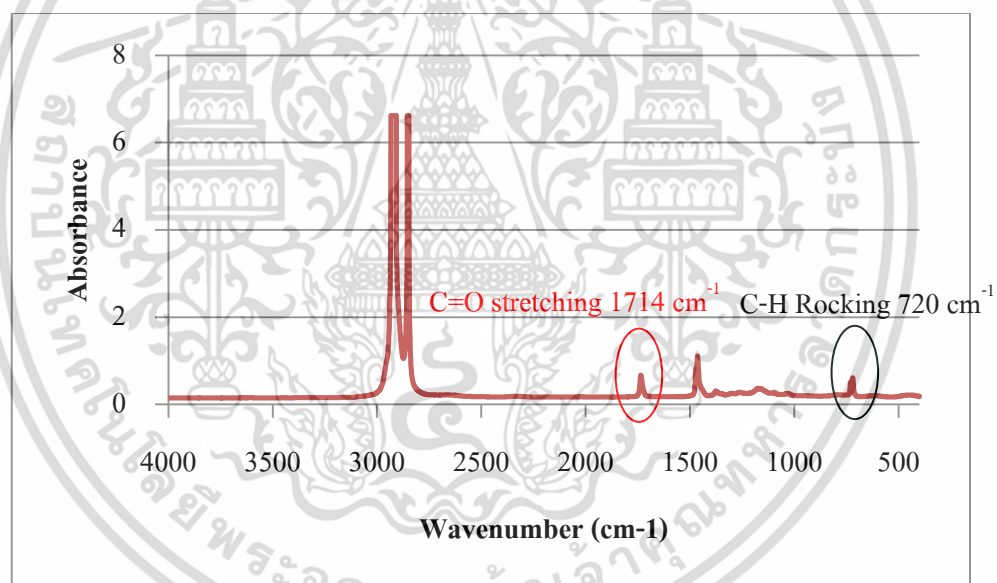


(a) L80M20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) L80V20



(c) L70E30

รูปที่ 4.7 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง FT-IR

จากรูปที่ 4.7 สามารถคำนวณหาดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index, CI) ซึ่งใช้แสดงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมโดยหาได้ ดังสมการที่ 4.3 และแสดงค่าดังตารางที่ 4.5

$$\text{ดัชนีคาร์บอนิล (CI)} = \frac{\text{ค่าดูดกลืนแสงของหมู่ C=O stretching ที่ } 1714 \text{ cm}^{-1}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C-H Rocking ที่ } 720 \text{ cm}^{-1}} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่าดัชนีคาร์บอนิลที่ใกล้เคียงกันซึ่งเป็นการยืนยันว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.5 ค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

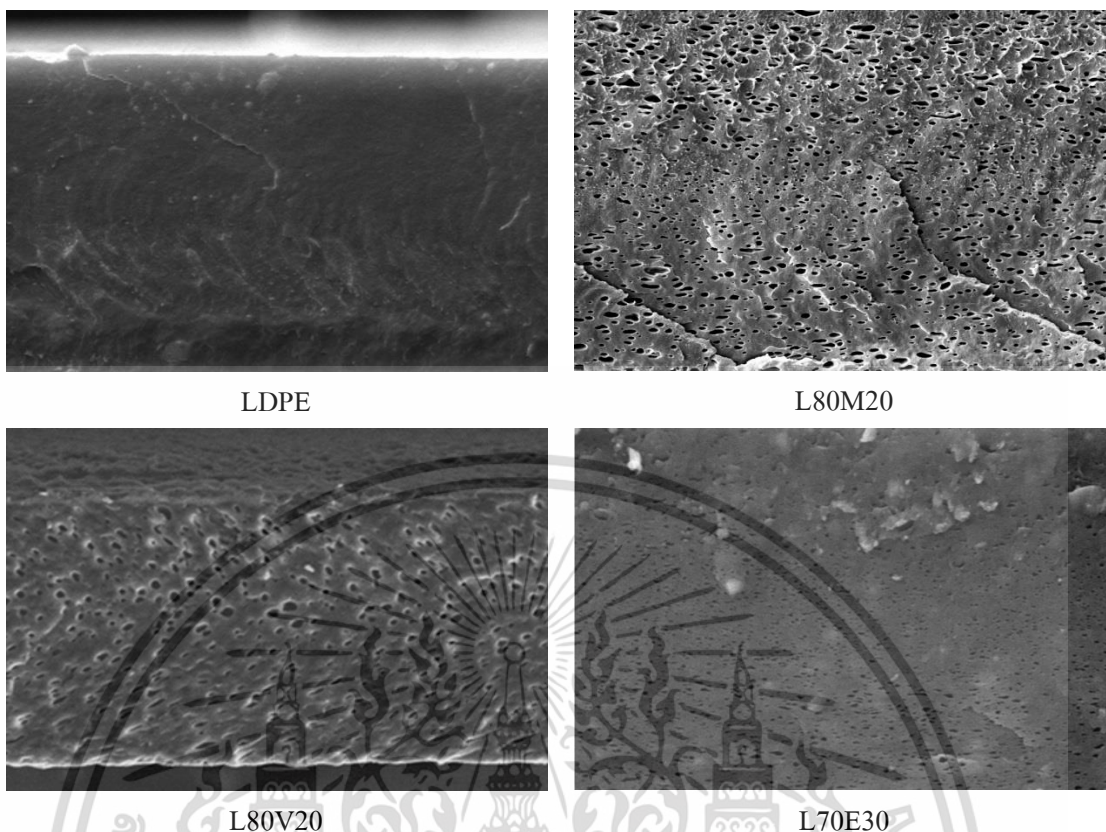
ตัวอย่าง	ดัชนีคาร์บอนิล
L80M20	0.32
L80V20	0.36
L70E30	0.35

#### 4.2.2 การศึกษาผลของการกระจายตัวของ Copolymer ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาการกระจายตัวของ Copolymer ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยทำการสกัดวัฏภาคกระจายออกจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนจึงนำมาตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM แสดงผลการศึกษาดังรูปที่ 4.8

จากรูปที่ 4.8 แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมหลังการสกัดวัฏภาคกระจายออกเทียบกับฟิล์ม LDPE โดยช่องว่างที่พบในรูปคือบริเวณของโคพอลิเมอร์ (EMA, EEA หรือ EVA แล้วแต่สูตร) ที่ถูกสกัดออกซึ่งทำหน้าที่เป็นวัฏภาคกระจายอยู่ใน LDPE ที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง พบว่าฟิล์มทุกสูตรมีการกระจายตัวของ Copolymer ที่ดีและมีความสม่ำเสมอ

ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20 มีขนาดของวัฏภาคกระจายที่ใหญ่กว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L70E30 เนื่องจาก EMA มีความหนืดที่สูงกว่า LDPE จึงส่งผลให้ EMA นั้นแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กได้ยาก ในขณะที่ EEA มีความหนืดที่ใกล้เคียง LDPE จึงทำให้ EEA สามารถแตกตัวเป็นวัฏภาคเล็กๆ ได้ดีกว่า จึงส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L70E30 มีขนาดของวัฏภาคกระจายที่เล็กกว่า (ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการสกัดวัฏภาคกระจายออก (กำลังขยาย 3500 เท่า) ( $10\ \mu\text{m}$ )

#### 4.2.3 การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วย DSC แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.6 พบว่าพอลิเมอร์ผสมมี  $T_m$  และ  $T_c$  ของ LDPE ใกล้เคียงกัน เนื่องจาก LDPE กับ Copolymer มีแรงยึดติดระหว่างวัฏภาคที่ไม่ดีจึงมีความเข้ากันได้ต่ำ ทำให้ไม่ส่งผลต่อขนาดผลึกของ LDPE

จากเทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ (ภาคผนวก ข) พบว่า LDPE มี  $T_m$  อยู่ในช่วง 65-125°C, EMA มี  $T_m$  อยู่ในช่วง 30-110°C, EVA มี  $T_m$  อยู่ในช่วง 20-95°C และ EEA มี  $T_m$  อยู่ในช่วง 30-120°C ซึ่งมี  $T_m$  ปรากฏอยู่ในตารางที่ 4.6 อาจมาจากผลึกของทั้งส่วน LDPE และโคพอลิเมอร์ เมื่อสังเกตจากเทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมปรากฏพิก  $T_c$  ของโคพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิประมาณ 65°C, 50°C และ 75°C ตามลำดับ จากตารางที่ 4.6 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีความเป็นผลึกลดลงจากฟิล์ม LDPE เนื่องจากโคพอลิเมอร์ที่เติมนั้นเกิดอันตรกิริยาที่ไม่ดีกับ LDPE อีกทั้งโคพอลิเมอร์นั้นมีปริมาณที่เยอะซึ่งจะเกิดการรบกวนผลึกซึ่งกันและกันระหว่าง LDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

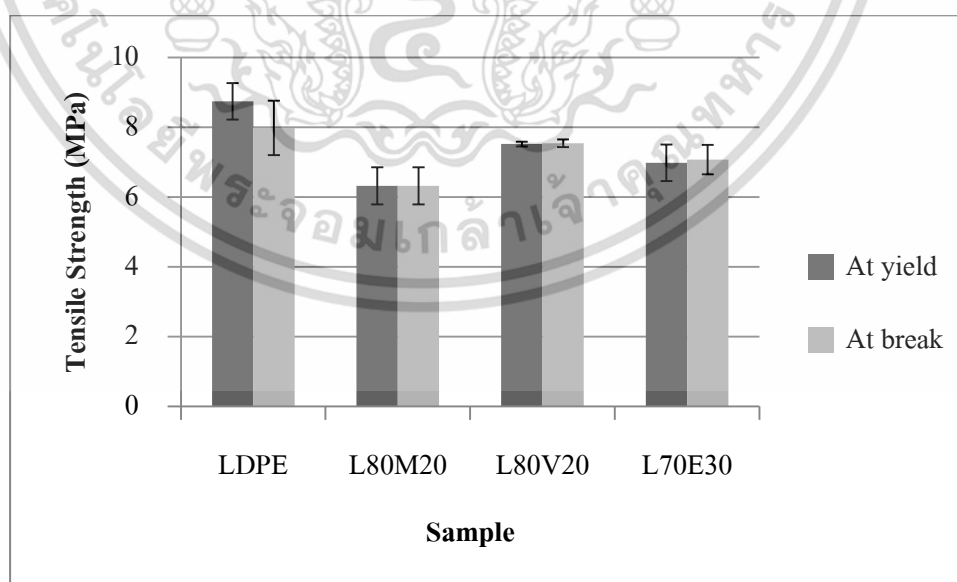
กับโคพอลิเมอร์ ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์มีวิฤภาคต่อเนื้อที่ที่สามารถเกิดผลึกได้ลดลง โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรมีค่าดังกล่าวไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.6  $T_m$  และ  $T_c$  ของ LDPE และความเป็นผลึกรวมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

Sample	$T_m$ Peak of LDPE (°C)	$T_c$ Peak of LDPE (°C)	$X_c$ (%)
LDPE	114.2	94.2	38
L80M20	112.0	95.5	31
L80V20	112.3	95.4	29
L70E30	111.3	94.9	29

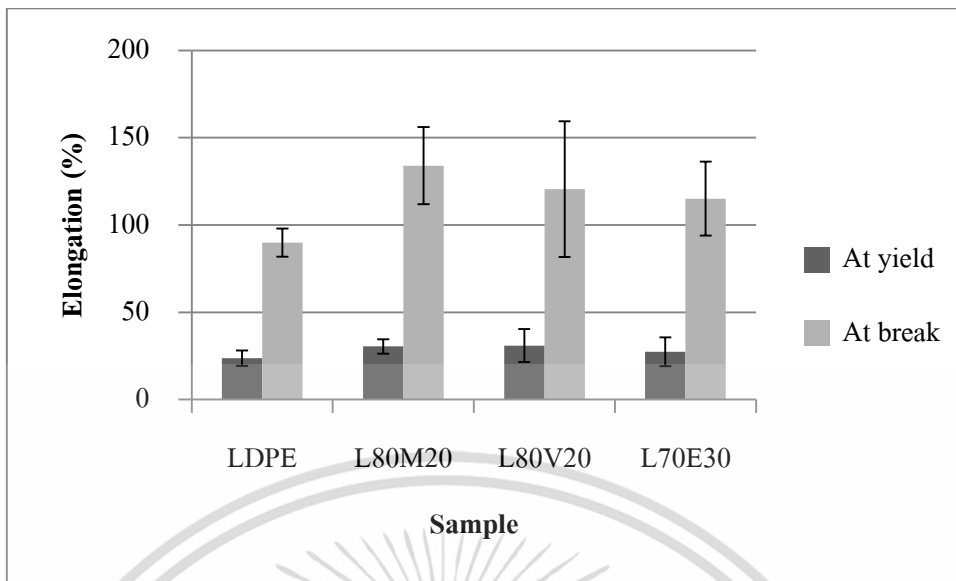
#### 4.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

จากรูปที่ 4.9 แสดงสมบัติการรับแรงดึง และรูปที่ 4.10 แสดงความแข็งแรงเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด และความแข็งแรงเชิงกลต่ำกว่าฟิล์ม LDPE เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีสมบัติคล้ายที่มีความยืดหยุ่นและนิ่มกว่า LDPE จึงส่งผลให้เกิดการเสียรูปได้ง่ายกว่า LDPE โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรมีค่าดังกล่าวไม่แตกต่างกัน

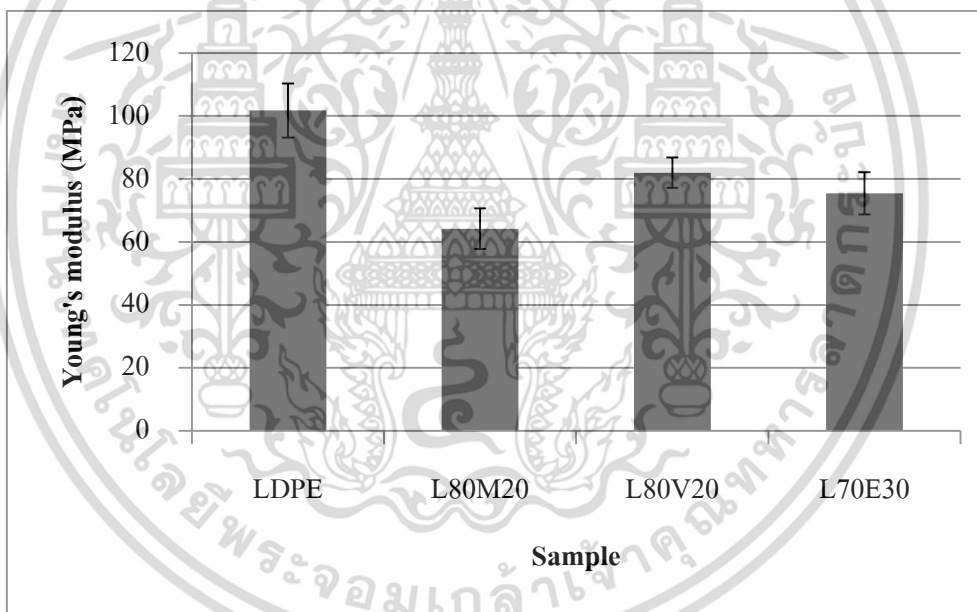


(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



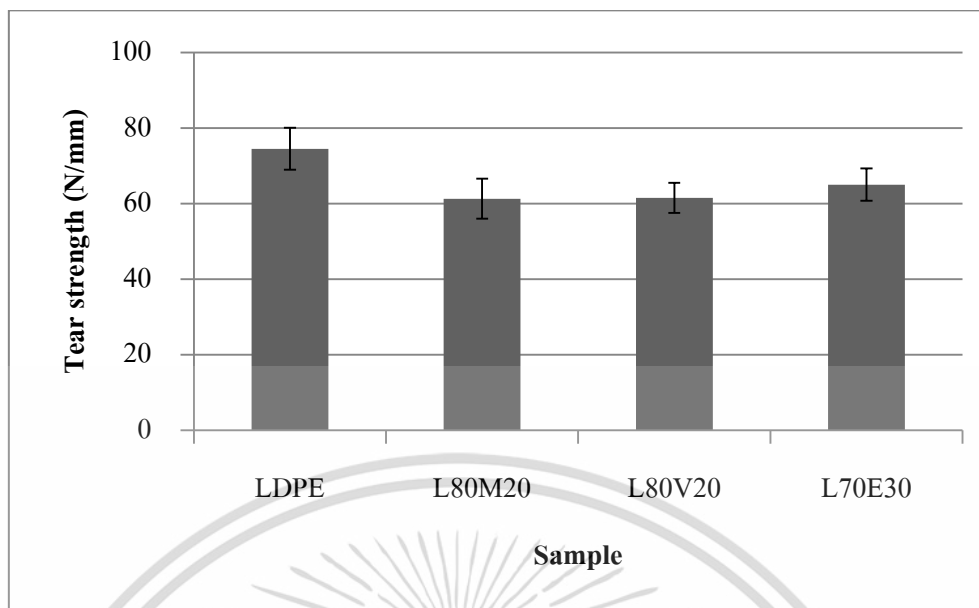
(b) การดัดงอ ณ จุดคราก/ขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม



(c) ยั่งมอดุลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

รูปที่ 4.9 อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

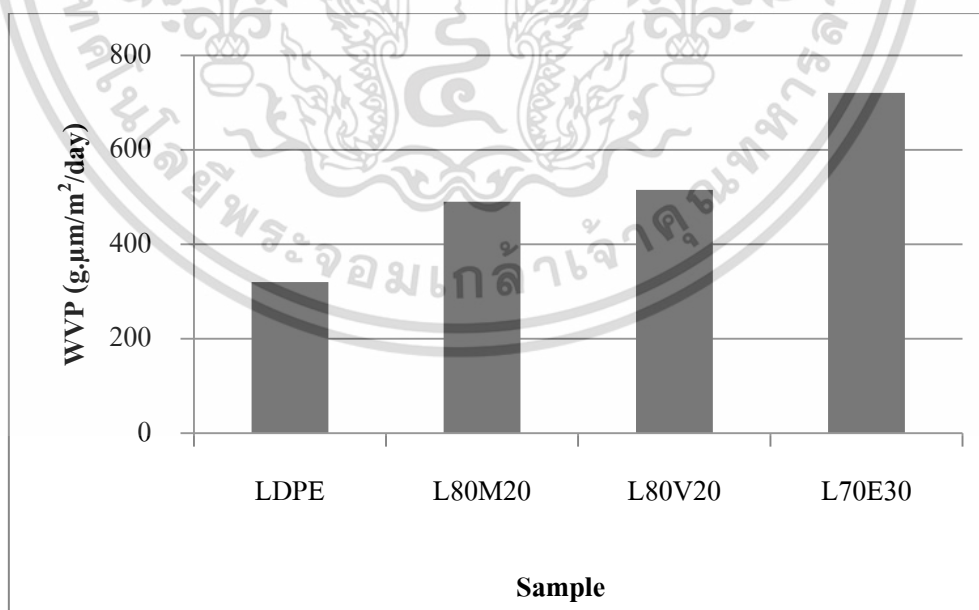
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อสมบัติความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

#### 4.2.5 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการควบคุมปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่ใกล้เคียงกันแสดงดังรูปที่ 4.11

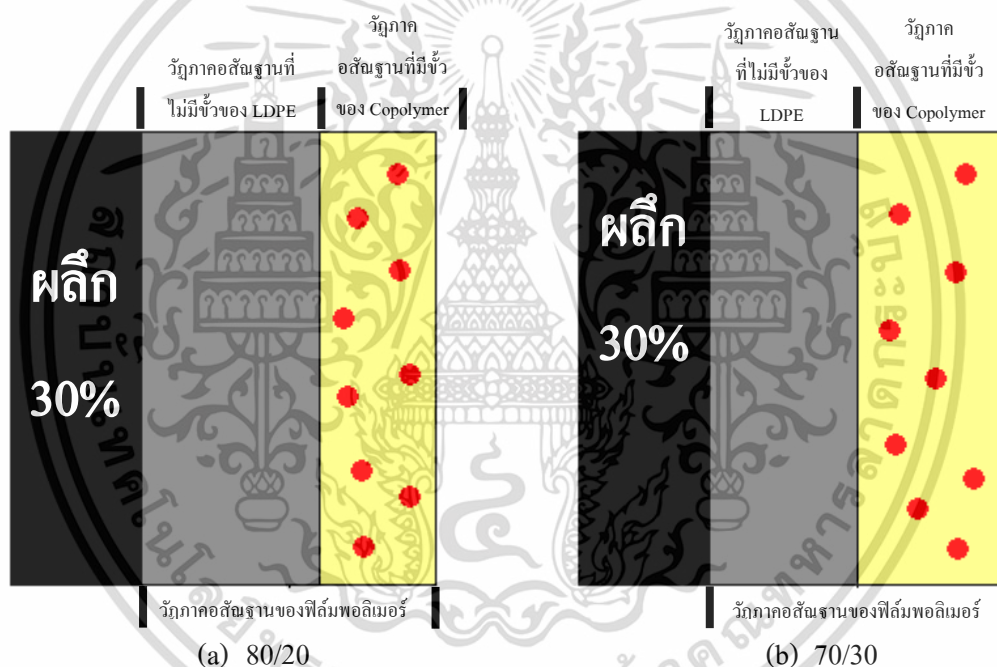


รูปที่ 4.11 อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 แสดงการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อเติมโคพอลิเมอร์ผสมที่มีขั้วลงในพอลิเมอร์ จะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์ม LDPE เนื่องจาก การเติมโคพอลิเมอร์ (EMA, EVA หรือ EEA) ลงในฟิล์มพอลิเมอร์เป็นการเพิ่มวฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ จึงส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์มีความชอบน้ำมากขึ้น

โดยพบว่าฟิล์มสูตร L70E30 มีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชนิดอื่น ทั้งๆ ที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่าความเป็นผลึก (ตารางที่ 4.6) และปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว (ตารางที่ 4.5) ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองสัณฐานของฟิล์ม LDPE/Copolymer ที่มีอัตราส่วนต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แบบจำลองสัณฐานวิทยาของฟิล์ม LDPE/Copolymer ที่มีอัตราส่วนต่างกัน

(● แสดงถึง หมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วของโคพอลิเมอร์)

รูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์ทั้ง 2 อัตราส่วนมีปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วที่ใกล้เคียงกันและมีปริมาณความเป็นผลึก (30%) นั่นคือมีส่วนที่เป็นวฏภาคอสัณฐานอยู่พอๆ กัน (70%) อย่างไรก็ตามฟิล์มพอลิเมอร์สูตรที่มีอัตราส่วน 70/30 นั้นมีปริมาณของวฏภาคอสัณฐานที่มาจากโคพอลิเมอร์มากกว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตรที่มีอัตราส่วน 80/20 ซึ่งโดยปกติโมเลกุลของไอน้ำจะซึมผ่านวฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วของโคพอลิเมอร์ได้ดีกว่าวฏภาคอสัณฐานที่ไม่มีขั้วของ LDPE จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้ฟิล์มสูตรที่มีอัตราส่วน 70/30 มีค่าการซึมผ่านไอน้ำที่สูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตรที่มีอัตราส่วน 80/20

ทั้งนี้แม้ว่าการออกสูตรฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรให้มีความเป็นขี้วใกล้เคียงกัน การประเมินสภาพขี้วของฟิล์มทางอ้อมสามารถทำได้โดยการวัดมุมสัมผัสกับน้ำ โดยตารางที่ 4.7 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิวภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมที่มีการควบคุมปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้วใกล้เคียงกันพบว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่ามุมสัมผัสไอน้ำลดลงจากฟิล์ม LDPE แสดงให้เห็นว่า การเติมโคพอลิเมอร์ที่มีขี้วนั้นเป็นการเพิ่มสภาพขี้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.7 ค่ามุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิวภาคตัดขวางของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม

ตัวอย่าง	ค่ามุมสัมผัส: $\Theta$ (degree)
LDPE	98.1±1.5
EMA	77.0±2.5
EVA	83.1±3.3
EEA	78.4±3.4
L80M20	81.7±2.9
L80V20	88.0±4.3
L70E30	84.3±3.0

เมื่อทำการวัดค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ พบว่าสภาพขี้วของ EMA>EEA>EVA จึงส่งผลให้สภาพขี้วของพอลิเมอร์ผสม L80M20>L70E30>L80V20 โดยเรียงตามสภาพขี้วของโคพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามจากค่าการซึมผ่านไอน้ำ (รูปที่ 4.11) กลับพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L70E30 มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่สูงกว่าฟิล์มสูตร L80M20 นั้นเป็นการแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของวิฤภาคอสัณฐานของโคพอลิเมอร์ ส่งผลต่อค่าการซึมผ่านไอน้ำมากกว่าอิทธิพลของสภาพขี้วของฟิล์มพอลิเมอร์

### 4.3 การศึกษาผลของลำดับการผสมและผลของการเติมซีโอไลต์เอ

การศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA, LDPE/EVA และ LDPE/EEA เพื่อเพิ่มสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม โดยมีการควบคุมปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วให้ใกล้เคียงกัน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอและผลของลำดับการผสมในสูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอ

#### 4.3.1 การศึกษาผลของลำดับในการผสม

งานวิจัยที่ผ่านมาของนันทวรรณ ม่วงมี [7] และณัฐริกา ใจสมบุญ [8] ได้ทำการผสมพอลิเมอร์สูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (L/D ratio) ของสกรูเท่ากับ 40 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ ส่งผลให้ซีโอไลต์กระจายตัวได้ไม่ดี จึงได้ทำการผสมพอลิเมอร์สูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอผ่านสูตรเข้มข้นของ EVA/Zeolite A ก่อนทำการผสมกับ PE เพื่อทำให้อุณหภูมิของซีโอไลต์เอกระจายตัวในพอลิเมอร์ผสมได้ดี

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนเครื่องมือผสม โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด จึงได้ทำการศึกษาผลของลำดับในการผสมสูตรพอลิเมอร์ในสูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอ โดยทำการศึกษาผลของลำดับในการผสมในสูตร L80M20Z20 ซึ่งใช้การผสม 2 วิธีคือการผสมผ่านสูตรเข้มข้นของ EMA/Zeolite A เป็นเวลา 20 นาทีแล้วจึงผสมกับ LDPE อีก 20 นาที และวิธีการผสมแบบพร้อมกันหมดในครั้งเดียวใช้เวลา 20 นาที โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดใช้ความเร็วในการผสม (Rotor speed) ที่ 60 rpm และอุณหภูมิที่ 140°C เหมือนกันทั้ง 2 วิธี ก่อนทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเทคนิคกดอัดสถานะเดียวกัน ซึ่งฟิล์มที่ได้มีความหนาประมาณ 67 $\mu$ m แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบของ L80M20Z20 โดยน้ำหนักและความหนาของฟิล์มตัวอย่าง

เทคนิค	อัตราส่วนของพอลิเมอร์โดยน้ำหนัก		ปริมาณ Zeolite A (%)	ความหนา ( $\mu$ m)
	LDPE	EMA		
Masterbatch mixing	80	20	20	67 $\pm$ 7
One shot mixing	80	20	20	67 $\pm$ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1.1 การตรวจสอบปริมาณของซีโอดีเอใน L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน

การตรวจสอบปริมาณของซีโอดีเอในพอลิเมอร์ผสม โดยใช้วิธีการเผาพอลิเมอร์ผสมที่อุณหภูมิ 600°C โดยแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.9 พบว่าทั้งสองวิธีการผสมมีปริมาณซีโอดีเอที่พบมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณซีโอดีเอที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสองวิธีนั้นได้มีการผสมผ่านเครื่องผสมแบบปิด การควบคุมปริมาณองค์ประกอบทำได้ค่อนข้างแน่นอนและไม่เกิดการสูญเสียสารที่ต้องการผสมไปในระหว่างการผสม

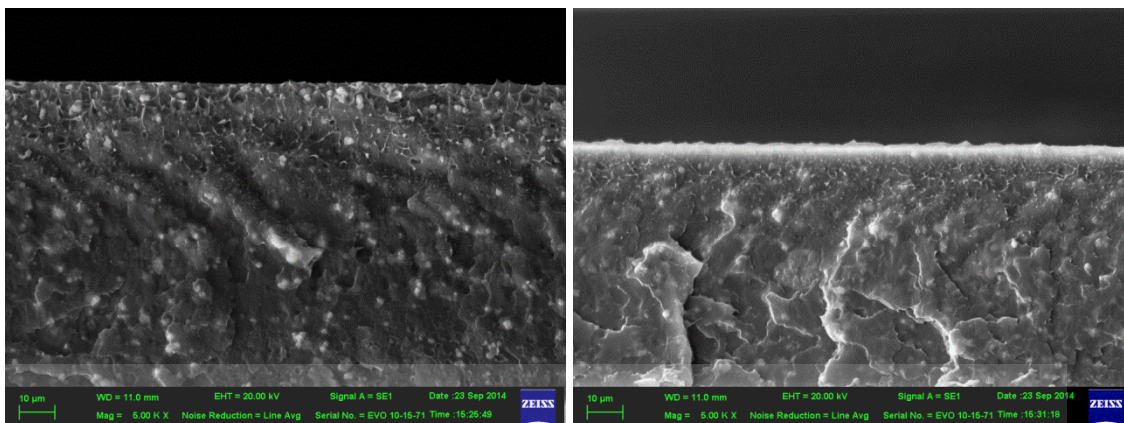
ตารางที่ 4.9 ปริมาณซีโอดีเอใน L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน

เทคนิค	ปริมาณซีโอดีเอ (%wt)	
	ที่ต้องการ	ที่พบ
Masterbatch mixing	20	20.1±0.1
One shot mixing	20	21.1±0.4

#### 4.3.1.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน

การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีลำดับในการผสมต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เตรียมจาก 2 วิธี ทั้งก่อนและหลังทำการสกัดวัฏภาคกระจายออกให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ทั้งสองมีปริมาณของ LDPE, EMA และซีโอดีเอในปริมาณที่เท่ากัน และได้ทำการการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดซึ่งสามารถควบคุมปริมาณสารและสภาวะในการผสม (อุณหภูมิและแรงเฉือน) ของเครื่องได้อย่างแน่นอน

โดยรูปที่ 4.13 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม L80M20Z20 ก่อนทำการสกัดวัฏภาคของ EMA พบว่าฟิล์มที่เตรียมจาก 2 วิธี มีการกระจายตัว (Distribution) ของซีโอดีเอดี โดยอนุภาคส่วนใหญ่สามารถแตกกระจายเป็นอนุภาคเดี่ยว (Dispersion) ได้ดี ทั้งนี้เนื่องจาก EMA มีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว โดยส่วนไม่มีขั้วของ EMA ทำให้ EMA กระจายตัวได้ดีใน LDPE และส่วนที่มีขั้วของ EMA ช่วยทำให้ซีโอดีเอนั้นกระจายตัวได้ดี

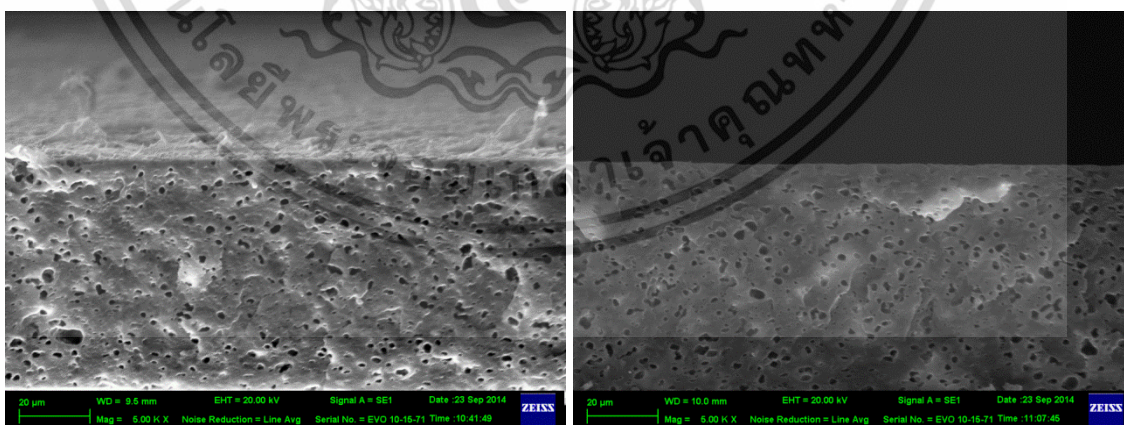


(a) Masterbatch mixing

(b) One shot mixing

รูปที่ 4.13 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน ก่อนสกัด  
 วิกฤตกระจายออก (กำลังขยาย 5000 เท่า) (  $\overline{\quad\quad}$  10 $\mu$ m )

จากรูปที่ 4.14 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม L80M20Z20 หลังทำการสกัดวิกฤตของ EMA ออก โดยช่องว่างที่ปรากฏในรูป แสดงถึงตำแหน่งที่เคยมี EMA ซึ่งเป็นวิกฤตที่กระจายตัวอยู่ในวิกฤตต่อเนื่องของ LDPE พบว่าฟิล์ม L80M20Z20 จากการผสม 2 วิธี มีการกระจายของ EMA ที่ดีในสูตรที่มีการเติมซีโอโลต์เอและไม่พบอนุภาคของซีโอโลต์เอในรูปที่ 4.14 นั้นแสดงให้เห็นว่าอนุภาคของซีโอโลต์เอชอบที่จะอยู่ในวิกฤตของ EMA ที่มีขั้วมากกว่าวิกฤตของ LDPE ที่ไม่มีขั้ว อนุภาคของซีโอโลต์เอจึงหลุดออกไปกับ EMA ที่ถูกสกัด



(a) Masterbatch mixing

(b) One shot mixing

รูปที่ 4.14 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน หลังสกัดวิกฤต  
 กระจายออก (กำลังขยาย 5000 เท่า) (  $\overline{\quad\quad}$  20 $\mu$ m )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1.3 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับผสมต่างกัน

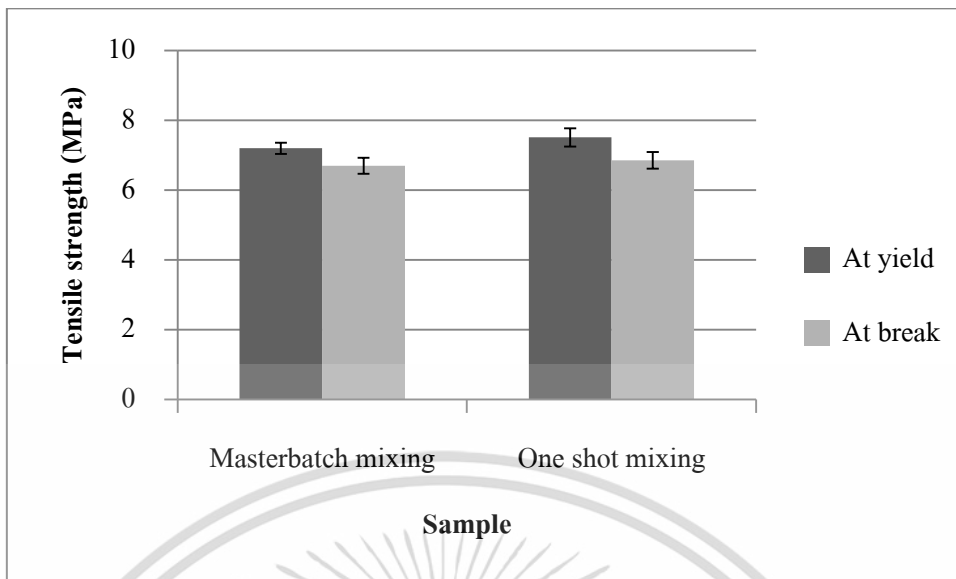
การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการผสมด้วยวิธีการผสมที่แตกต่างกันด้วยเทคนิค DSC แสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) และ อุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ที่ Peak ของ LDPE พอลิเมอร์ผสมสูตร L80M20Z20 ทั้ง 2 วิธีไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ทั้งสองมีองค์ประกอบของฟิล์มที่เหมือนกัน อีกทั้งฟิล์มทั้งสองมีการกระจายตัวของซีโอไลต์เอตี ซึ่งซีโอไลต์เอส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ในภูมิภาคที่มีขั้วของ EMA จึงไม่รบกวนการเกิดผลึกของ LDPE จึงส่งผลให้ฟิล์มสูตรดังกล่าวมีความเป็นผลึกที่ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.10 พฤติกรรมทางความร้อนและความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ในฟิล์ม L80M20Z20

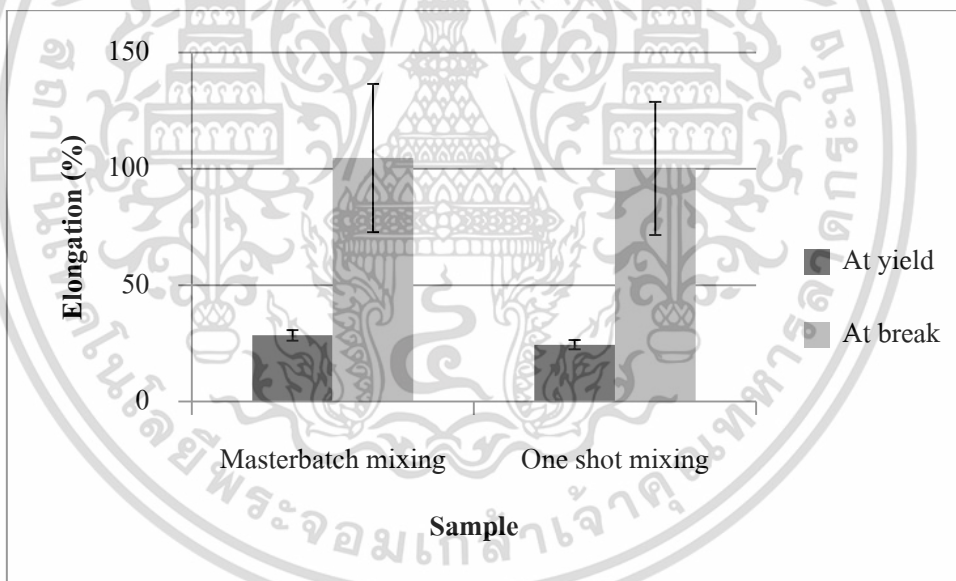
สาร	วิธีผสม	$T_m$ Peak of LDPE (°C)	$T_c$ Peak of LDPE (°C)	$X_c$ (%)
L80M20Z20	Masterbatch mixing	112.6	92.3	29
L80M20Z20	One shot mixing	116.1	93.1	29

#### 4.3.1.4 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับผสมต่างกัน

จากรูปที่ 4.15 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีวิธีการผสมที่แตกต่างกัน พบว่าฟิล์มที่มีวิธีการผสมที่แตกต่างกันมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด, ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก/ขาด, ย้ยมอดูลัส และความแข็งแรงนิกขาด ที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากฟิล์มในแต่ละสูตรมีปริมาณของ LDPE, EMA และซีโอไลต์เอที่เท่ากัน และมีการกระจายตัวของซีโอไลต์เอ และ EMA ที่คล้ายกัน จึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ไม่แตกต่างกัน

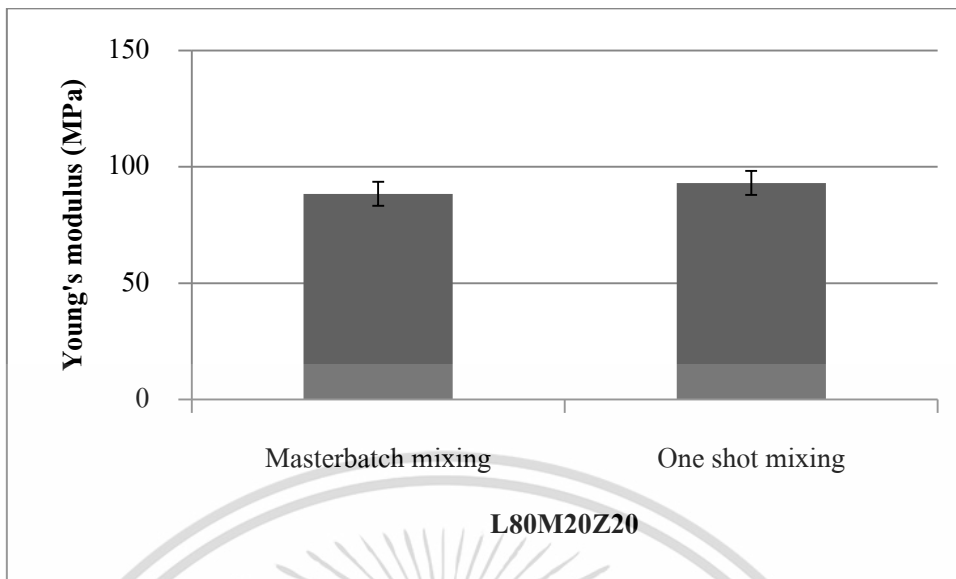


(a) ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด

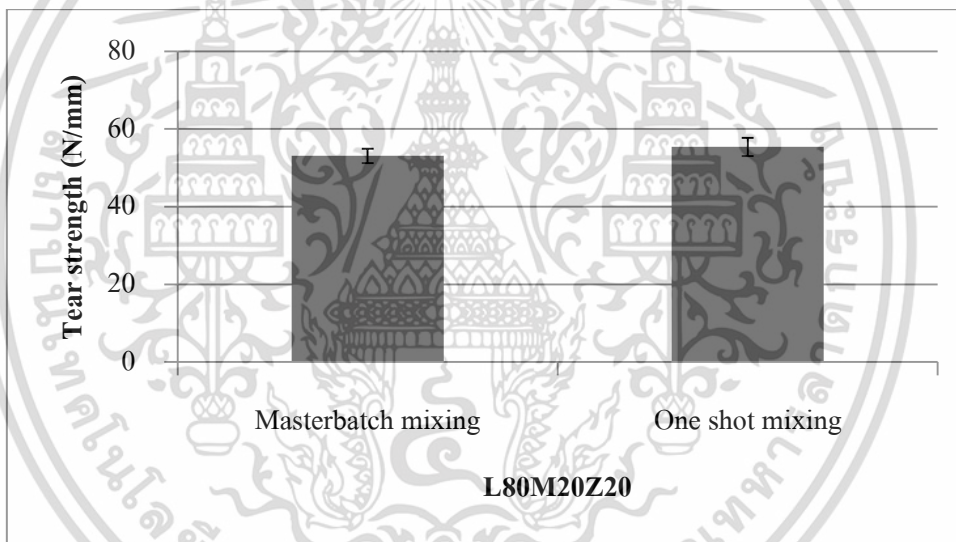


(b) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก/ขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) ยั่งมอดุลัส



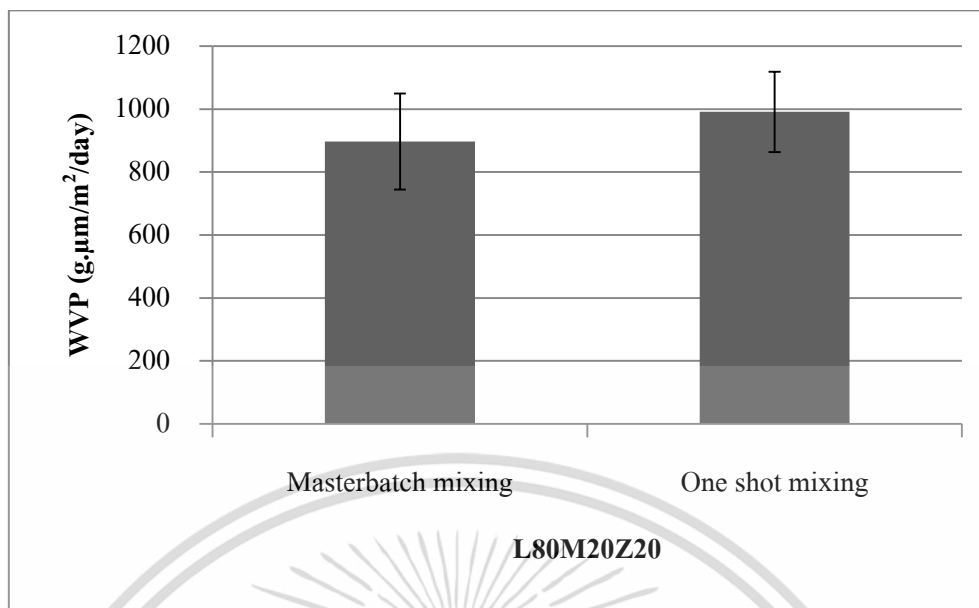
(d) ความแข็งแรงฉีกขาด

รูปที่ 4.15 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน

#### 4.3.1.4 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน

จากรูปที่ 4.16 พบว่าฟิล์มที่มีลำดับการผสมที่ต่างกันมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีปริมาณ EMA และซีโอไลต์เอเท่ากัน โดยฟิล์มที่มีลำดับการผสมที่ต่างกันมีลักษณะสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของซีโอไลต์เอที่คล้ายกัน ซึ่งไอน้ำสามารถซึมผ่านในส่วนที่เป็นวัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วของฟิล์มและรูพรุนที่มีขั้วของซีโอไลต์เอได้ดีเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับในการผสมที่ต่างกัน

จากการศึกษาผลของลำดับของการผสม พบว่าลำดับในการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด ที่สภาวะการผสมเหมือนกันคือ ความเร็วในการผสมที่ 60 rpm และอุณหภูมิที่ 140°C ไม่ส่งผลต่อ ลักษณะการผสมและการกระจายตัวของซีโอไลต์เอ ทำให้ฟิล์ม L80M20Z20 มีสมบัติเชิงกล, สมบัติทางความร้อน และความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่ไม่แตกต่างกัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการผสมแบบพร้อมกันหมดในครั้งเดียวในการเตรียม พอลิเมอร์สูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอในการศึกษาในตอนอื่นต่อไป เนื่องจากการผสมทั้ง 2 วิธีให้ผล การทดลองไม่ต่างกัน และการผสมแบบครั้งเดียวใช้เวลาในการผสม 20 นาที ซึ่งน้อยกว่าการผสม ผ่านสูตรเข้มข้น (Masterbatch mixing) (40 นาที) และเป็นการลดความเสี่ยงต่อการเสียดสภาพทาง ความร้อนอันเนื่องมาจากการสัมผัสกับความร้อนหลายครั้ง

#### 4.3.2 การศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอ

การศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอที่มีต่อการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA/Zeolite A, LDPE/EEA/Zeolite A และ LDPE/EVA/Zeolite A โดยที่มีการควบคุมให้มี ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วให้ใกล้เคียงกันและทำการขึ้นรูปฟิล์มแบบกดอัด นำเสนอโดยใช้ อักษรย่อเพื่อแสดงแทนสูตรต่างๆ ดังตารางที่ 4.11 ซึ่งฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 62-67 µm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 फिल्मพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมซีโอไลต์เอและความหนาเฉลี่ย

สูตร	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม โดยน้ำหนัก				ปริมาณ ซีโอไลต์เอ (%)	ความหนาเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
	LDPE	EMA	EEA	EVA		
LDPE	100	0	0	0	-	66 $\pm$ 6
L100Z20	100	-	-	-	20	65 $\pm$ 8
L80M20Z20	80	20	-	-	20	67 $\pm$ 7
L80V20Z20	80	-	-	20	20	62 $\pm$ 5
L70E30Z20	70	-	30	-	20	62 $\pm$ 7

#### 4.3.2.1 การตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์เอในพอลิเมอร์ผสม

การตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์เอในพอลิเมอร์ผสม โดยใช้วิธีการเผาพอลิเมอร์ผสมที่อุณหภูมิ 600°C โดยแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.12 พบว่าฟิล์มทุกสูตรมีปริมาณของซีโอไลต์เอใกล้เคียงกับปริมาณซีโอไลต์เอที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรใช้วิธีการผสมผ่านเครื่องผสมแบบปิด จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ไม่เกิดการสูญเสียไปในการผสม

ตารางที่ 4.12 ปริมาณซีโอไลต์เอในพอลิเมอร์ผสม

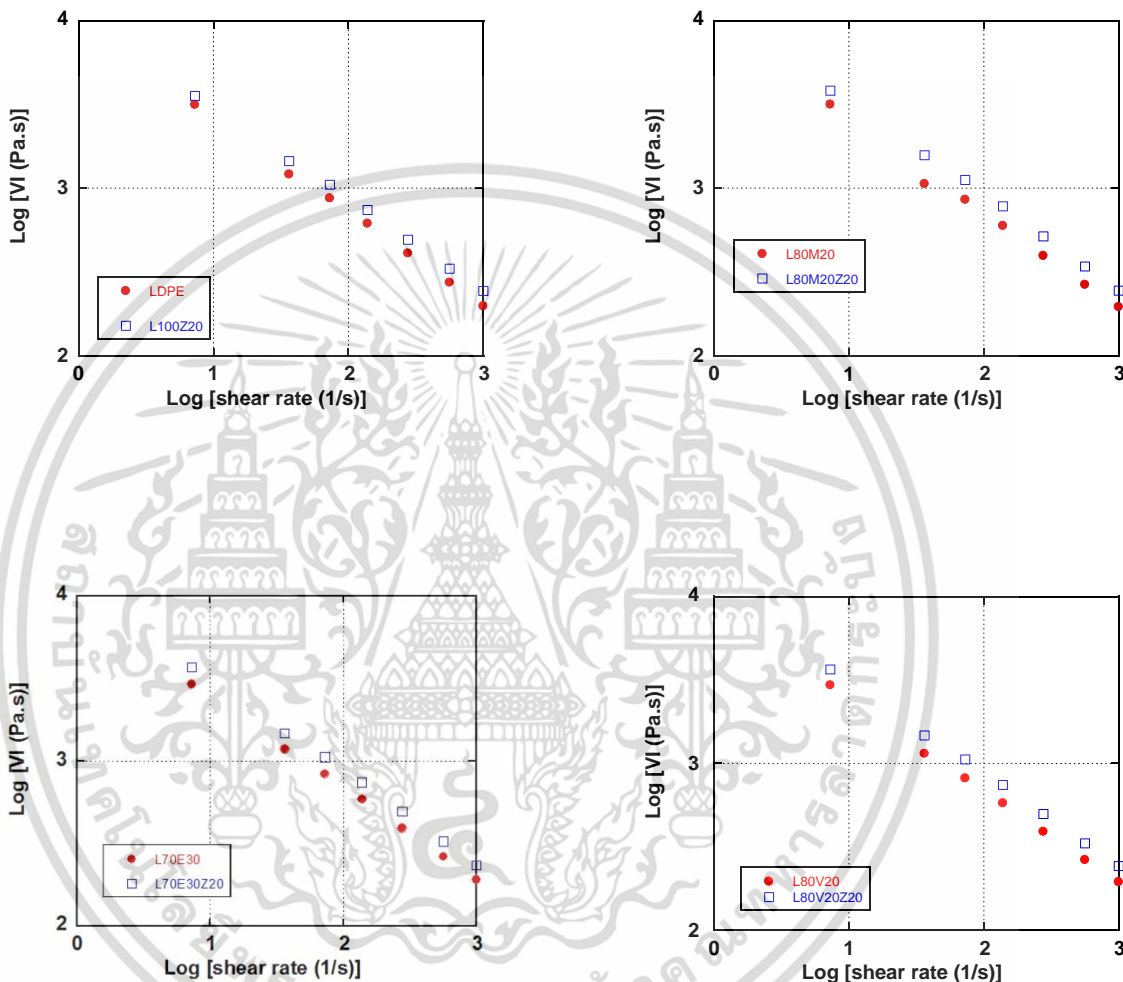
Sample	ปริมาณซีโอไลต์เอ (%)	
	ที่ต้องการ	ที่พบ
L100Z20	20	19.8 $\pm$ 0.0
L80M20Z20	20	20.1 $\pm$ 0.1
L80V20Z20	20	20.1 $\pm$ 0.0
L70E30Z20	20	20.1 $\pm$ 0.1

#### 4.3.2.2 การศึกษาสมบัติการไหลที่สภาวะแรงเฉือนสูง

จากการศึกษาผลของการไหลที่สภาวะแรงเฉือนที่สูงโดยใช้ Capillary rheometer พบว่า เมื่อทำการเติมซีโอไลต์เอลงในพอลิเมอร์ผสมทุกสูตร ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากซีโอโลต์เป็นอนุภาคของแข็งทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ยากขึ้น โดยที่พอลิเมอร์สูตรที่มีและไม่มีการเติมซีโอโลต์แอสแสดงพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic นั่นคือเมื่อ อัตราความเครียดเพิ่มขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการคลายตัวได้มากขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสม เกิดการไหลตามแนวแรงกระทำได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.17 สมบัติการไหลที่สภาวะแรงเฉือนสูงของพอลิเมอร์ที่มีซีโอโลต์ 20% โดยน้ำหนัก

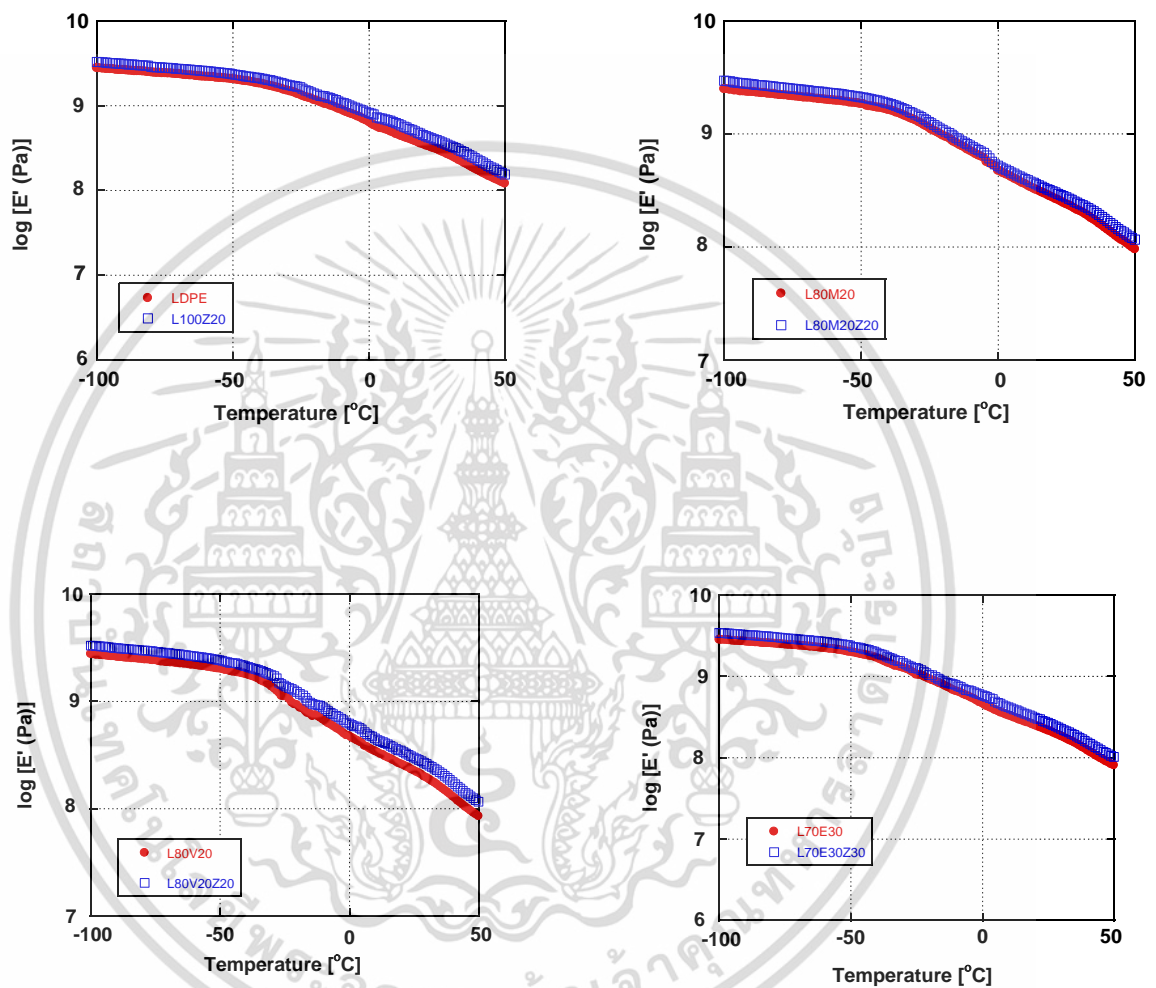
#### 4.3.2.3 พฤติกรรมทางความร้อนแบบพลวัตของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMA ซึ่งเป็นการศึกษาความร้อนเชิงกลของวัสดุเมื่อได้รับแรงสั่นอย่างต่อเนื่อง สามารถใช้หาค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus,  $E'$ ), ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $E''$ ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่กับอุณหภูมิ และจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างค่ามอดุลัสสูญเสียและมอดุลัส

สะสม (Loss modulus/Storage modulus,  $E''/E'$ ) ได้ค่าเป็น  $\tan \delta$

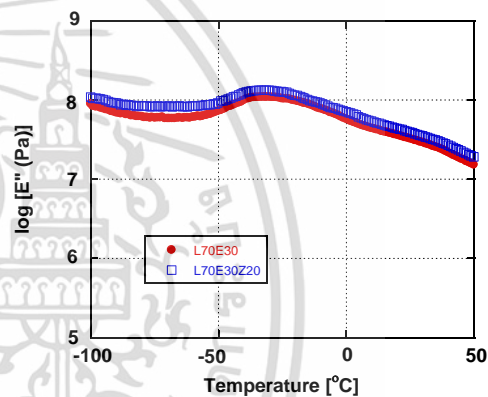
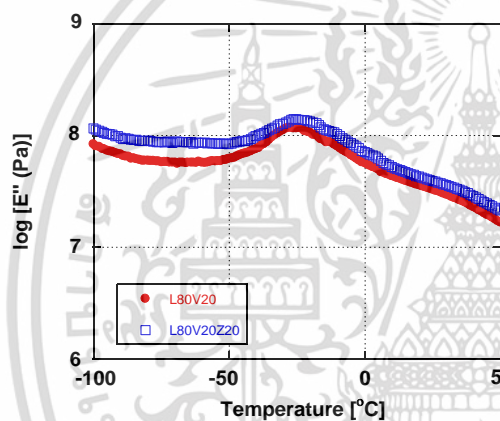
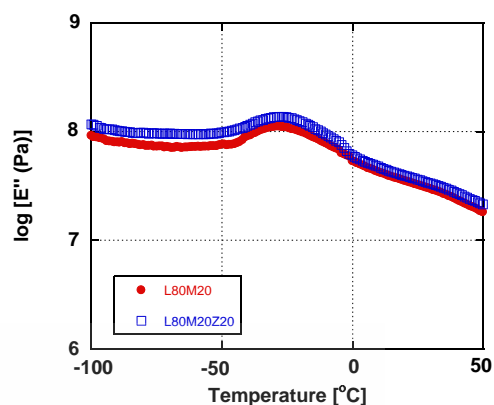
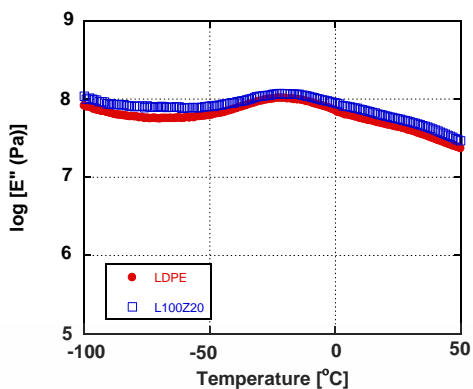
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18 (a-b) พบว่าเมื่อทำการเติมซีโอไลต์เอลงในพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคของซีโอไลต์เอไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น จึงต้องใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นในการทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่จึงส่งผลให้มีค่า  $E'$  และ  $E''$  ที่สูงขึ้น



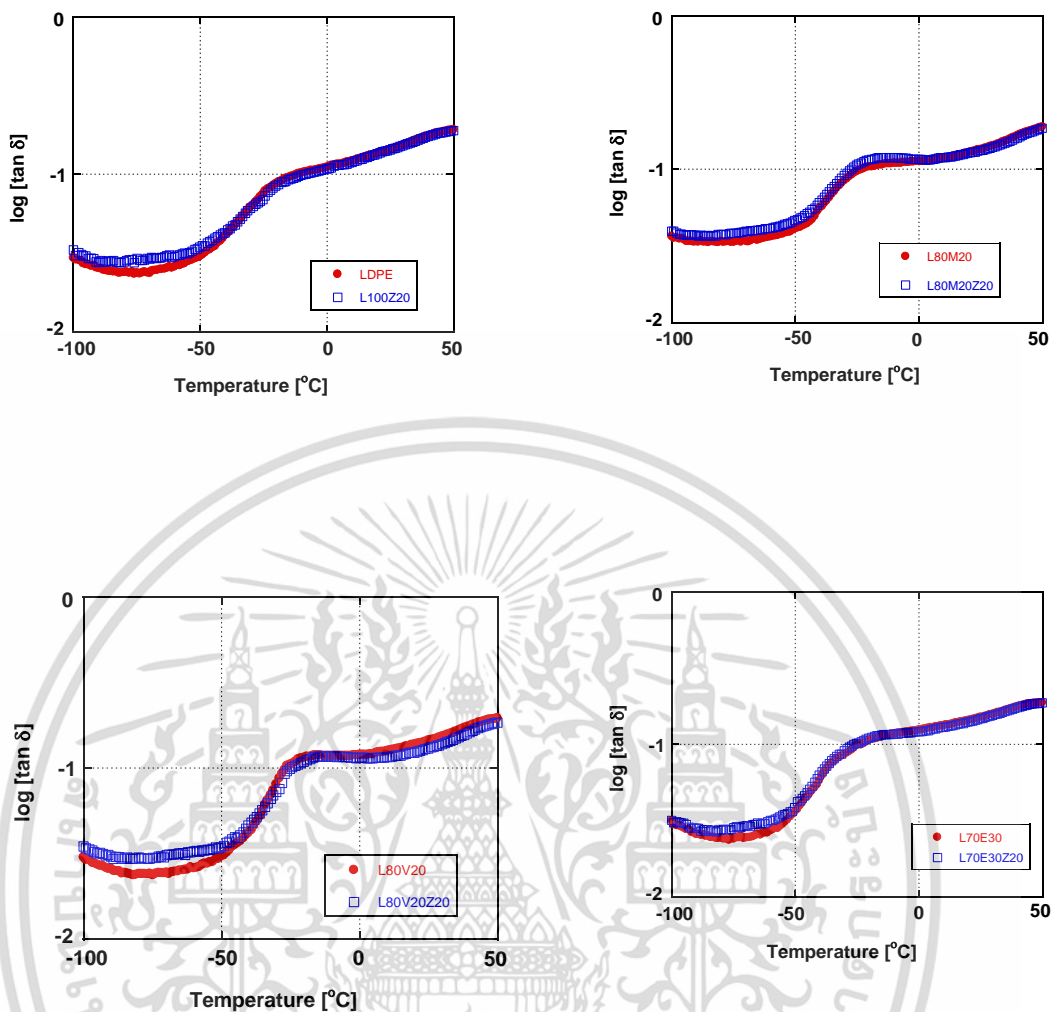
(a) เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสูญเสียกับอุณหภูมิ ของพอลิเมอร์ที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tan \delta$  กับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอ

รูปที่ 4.18 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม, มอดุลัสสูญเสีย และ  $\tan \delta$  กับอุณหภูมิ ของพอลิเมอร์ที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอ

จากรูปที่ 4.18 (c) เมื่อทำการพิจารณาค่า  $\tan \delta$  พบว่า  $\tan \delta$  ของพอลิเมอร์ที่มีและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ อยู่ในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 25°C โดย  $T_g$  ของพอลิเมอร์แต่ละตัวแสดงดังตารางที่ 4.13 สามารถบอกได้ว่า  $T_g$  ที่พบในรูปที่ 4.16 (c) คือ  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสม เมื่อเติมซีโอไลต์เอลงในพอลิเมอร์ผสม พบว่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสมไม่เปลี่ยนแปลงไป นั่นเป็นการแสดง

ให้เห็นว่าซีโอไลต์เอที่เติมลงไปนั้นไม่เกิดอันตรกิริยากับ LDPE และ โคลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

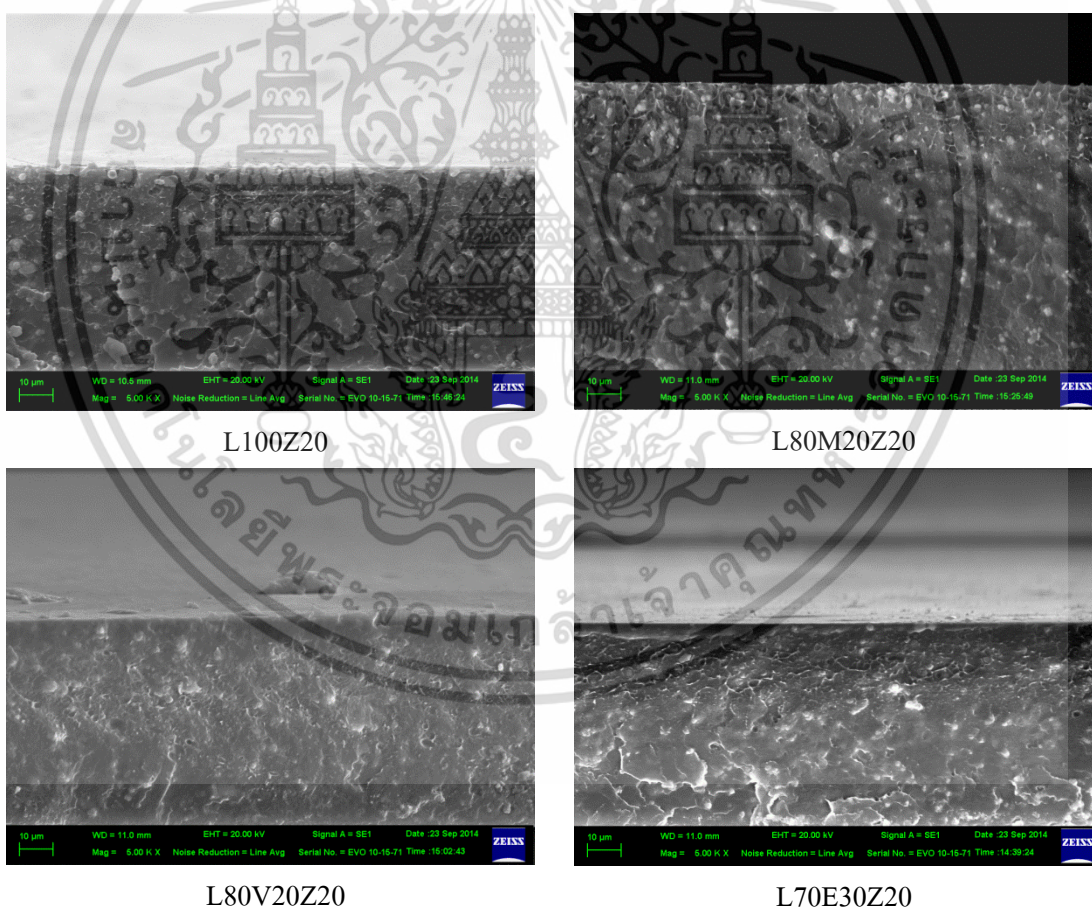
ตารางที่ 4.13 ค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์	$T_g$ (°C)
LDPE	-75 ถึง 50
EMA	-75 ถึง 50
EVA	-75 ถึง 25
EEA	-75 ถึง 75

#### 4.3.2.4 การศึกษาการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

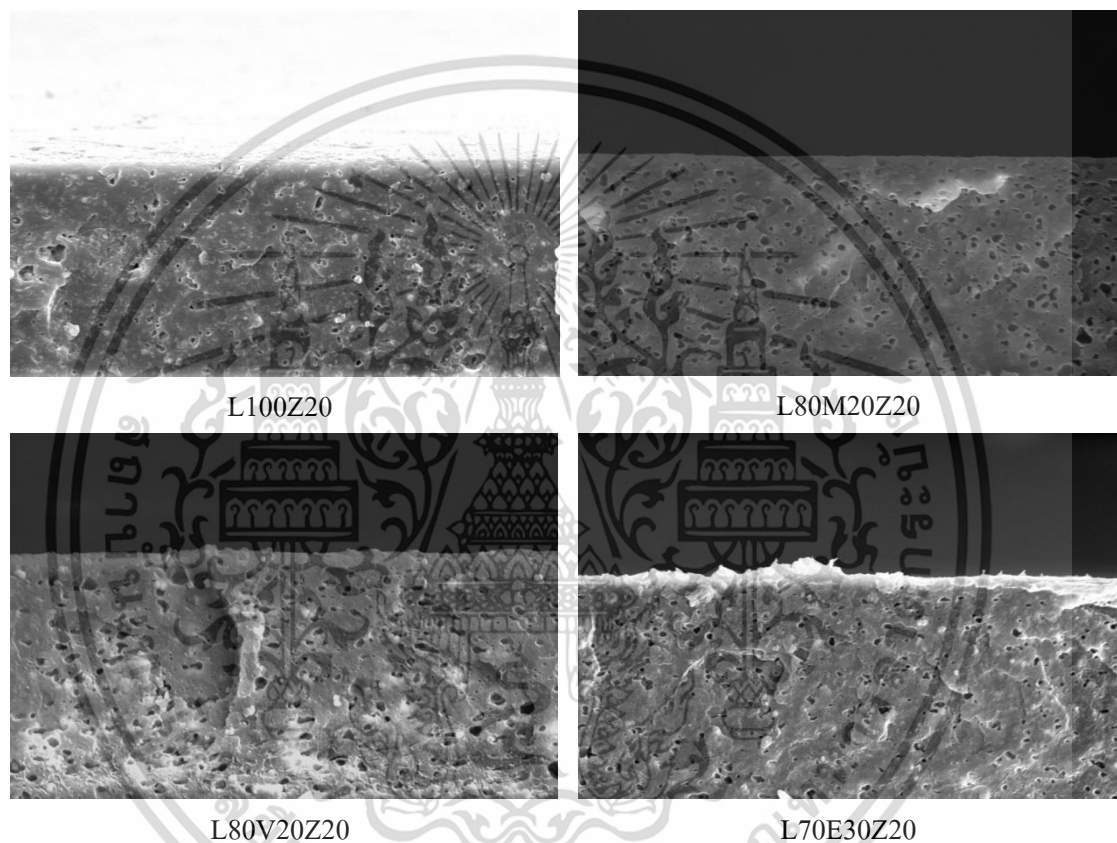
LDPE/EMA/Zeolite A, LDPE/EEA/Zeolite A และ LDPE/EVA/Zeolite A แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 พื้นผิวภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมซีโอไลต์เอ 20% (กำลังขยาย 5000 เท่า) (  $10\ \mu\text{m}$  )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 แสดงการกระจายตัวของซีโพลีเอ พบว่าฟิล์มสูตร L100Z20 มีการกระจายตัว (Distribution) ของซีโพลีเอดี แต่ซีโพลีเอมีการแตกตัว (Dispersion) เป็นอนุภาคเดี่ยว (Single particles) และเป็นกลุ่มก้อน (Aggregate) แต่เมื่อมีการเติม โคพอลิเมอร์ พบว่า ซีโพลีเอมีการแตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ได้ดีกว่า เนื่องจาก EMA, EVA และ EEA ประกอบด้วย ส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว จึงช่วยให้ซีโพลีเอสามารถกระจายตัวและแตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.20 พื้นผิวที่แตกหักของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมซีโพลีเอหลังสกัด (กำลังขยาย 5000 เท่า) ( $10^{\mu\text{m}}$  10  $\mu\text{m}$ )

รูปที่ 4.20 แสดง SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L100Z20 ไม่มี Copolymer เป็นองค์ประกอบ จึงพบช่องว่างที่มีขนาดเล็กและมีปริมาณน้อยกว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตรอื่นๆ โดยช่องว่างขนาดเล็กแสดงถึงบริเวณที่เคยมีอนุภาคซีโพลีเอที่แตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวปรากฏอยู่ ในขณะที่ช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่าแสดงถึงบริเวณที่เคยมีอนุภาคของซีโพลีเอที่รวมตัวกันปรากฏอยู่ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับภาพ

ก่อนการสกัดของฟิล์มสูตร L100Z20 (รูปที่ 4.19) พบว่าไม่ปรากฏช่องว่าง แสดงว่าสถานะที่ใช้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเบี่ยงประเด็นด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสกัดวัฏภาคกระจาย ทำให้เกิดการหลุดออกของอนุภาคซีโอล์ดเอบริเวณพื้นที่ที่ถูกสกัด เนื่องจากซีโอล์ดเอไม่มีอันตรกิริยาที่ดีกับ LDPE

ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20, L80V20Z20 และ L70E30Z20 ที่ผ่านการสกัด EMA, EVA และ EEA ตามลำดับ จะพบช่องว่างซึ่งแสดงถึงตำแหน่งที่เคยมีโคพอลิเมอร์ปรากฏอยู่ โดยโคพอลิเมอร์เหล่านี้สามารถกระจายตัวได้ดีในทุกสูตรฟิล์มที่มีการเติมซีโอล์ดเอ ทั้งนี้เนื่องจาก EMA, EVA และ EEA มีทั้งส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้ว โดยส่วนที่ไม่มีขั้วจะช่วยทำให้ Copolymer กระจายตัวได้ดีในวัฏภาคของ LDPE และส่วนที่มีขั้วจะช่วยทำให้ซีโอล์ดเออยู่ในวัฏภาคกระจาย สังเกตได้จาก ฟิล์มหลังการสกัดสูตร L80M20Z20, L80V20Z20 และ L70E30Z20 พบว่าภายในช่องว่างบางช่องว่างยังคงมีอนุภาคของซีโอล์ดเอหลงเหลืออยู่ ยิ่งเป็นการยืนยันว่าซีโอล์ดเอชอบอยู่ในวัฏภาคที่มีขั้วของ EMA, EVA และ EEA มากกว่าวัฏภาคที่ไม่มีขั้วของ LDPE

#### 4.3.2.5 ผลของการเติมซีโอล์ดเอที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์

การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยใช้ DSC แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.14 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตรที่มีการเติมซีโอล์ดเอมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ของ LDPE ใกล้เคียงกัน แสดงว่าขนาดของผลึกของ LDPE ไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตรดังกล่าวมีปริมาณความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน เนื่องจากซีโอล์ดเอที่เติมลงไปนั้นชอบกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคที่มีขั้วของโคพอลิเมอร์ซึ่งปกติโคพอลิเมอร์ (EMA, EVA หรือ EEA) สามารถเกิดผลึกได้ ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับ LDPE ดังนั้นเมื่อนำไปผสมกับ LDPE จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นผลึกอย่างชัดเจน

ในกรณีฟิล์มสูตร L100Z20 พบว่าเมื่อทำการเติมซีโอล์ดเอลงในพอลิเมอร์ จะทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ลดลง แสดงว่าซีโอล์ดเอที่เติมลงไปปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ไปรบกวนการเกิดผลึกของ LDPE

ตารางที่ 4.14 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีสารเติมซีโอโลต์

Sample	Zeolite A 0%			Zeolite A 20%		
	T <sub>m</sub> Peak of LDPE (°C)	T <sub>c</sub> Peak of LDPE (°C)	X <sub>c</sub> (%)	T <sub>m</sub> Peak of LDPE (°C)	T <sub>c</sub> Peak of LDPE (°C)	X <sub>c</sub> (%)
LDPE	114.2	94.2	38	112.8	94.9	31
L80M20	112.0	95.5	31	112.6	92.3	29
L80V20	112.3	95.4	29	112.8	93.4	27
L70E30	111.3	94.9	29	113.5	93.4	30

หมายเหตุ ค่า X<sub>c</sub> ในสูตรที่มีซีโอโลต์เอคำนวณเทียบกับน้ำหนักของพอลิเมอร์เท่านั้น (Normalized value)

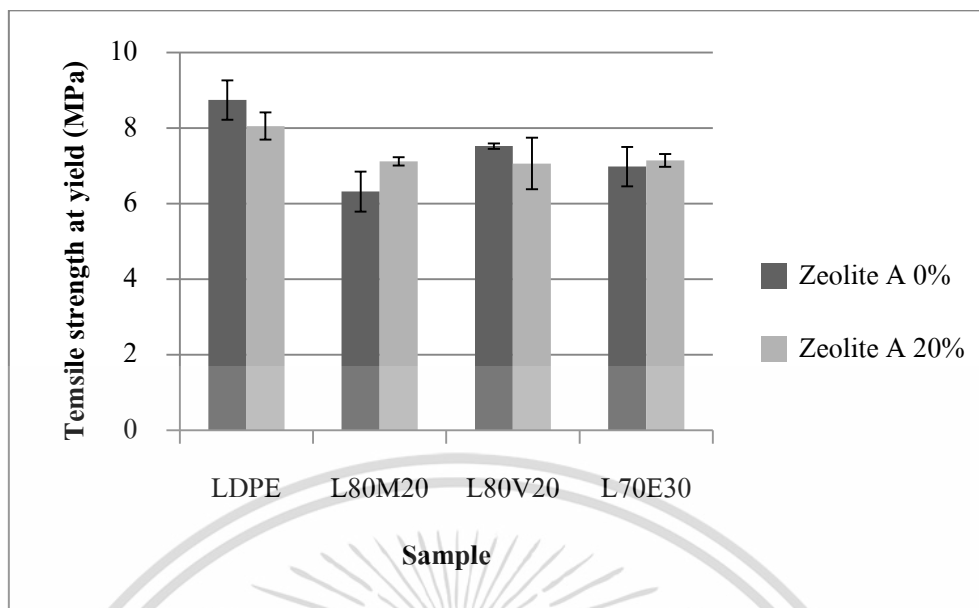
#### 4.3.2.6 ผลของการเติมซีโอโลต์เอที่มีต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

จากรูปที่ 4.21 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าฟิล์มสูตร L100Z20 มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด และการดึงยืด ณ จุดคราก/ขาด ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับฟิล์ม LDPE ทั้งนี้เนื่องจากซีโอโลต์เอที่เติมลงไปนั้นเกิดอันตรกิริยาที่ไม่ดีกับ LDPE

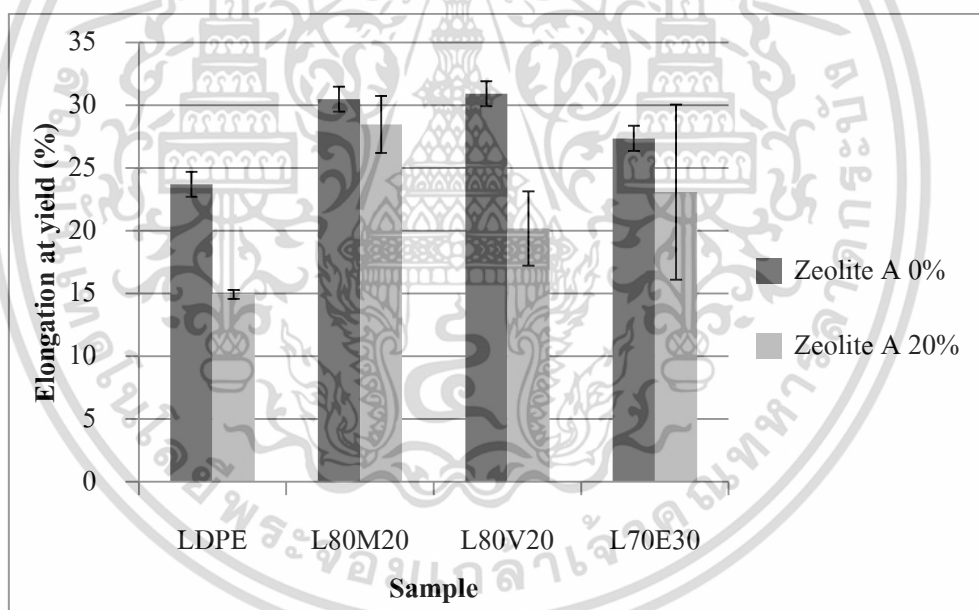
ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20, L80V20Z20 และ L70E30Z20 มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด ของฟิล์มที่มีการเติมซีโอโลต์เอ 20% มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มที่ไม่มีการเติมซีโอโลต์เอ ทั้งนี้เนื่องจากซีโอโลต์เอกระจายตัวอยู่ในวัฏภาค EMA, EVA และ EEA (ตามลำดับ) มากกว่าวัฏภาคที่ไม่มีซีโอโลต์ของ LDPE แต่การมีอนุภาคของแข็งจะทำให้ฟิล์มมีค่าการดึงยืด ณ จุดคราก/ขาด ลดลงเนื่องจากการมีอันตรกิริยาที่ไม่ดีระหว่างซีโอโลต์เอและโคพอลิเมอร์

ค่า Young's Modulus ของฟิล์มที่มีการเติมซีโอโลต์เอมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกสูตรฟิล์ม ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคซีโอโลต์เอเป็นอนุภาคของแข็งที่มีค่า Young's Modulus ที่สูงกว่าพอลิเมอร์

ในขณะที่ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมซีโอโลต์เอ ทั้งนี้เนื่องจากการเติมซีโอโลต์เอเป็นการเพิ่มจุดสะสมของความเค้น (Stress concentrator) จึงทำให้เมื่อฟิล์มพอลิเมอร์ได้รับแรงจึงฉีกขาดง่ายขึ้น

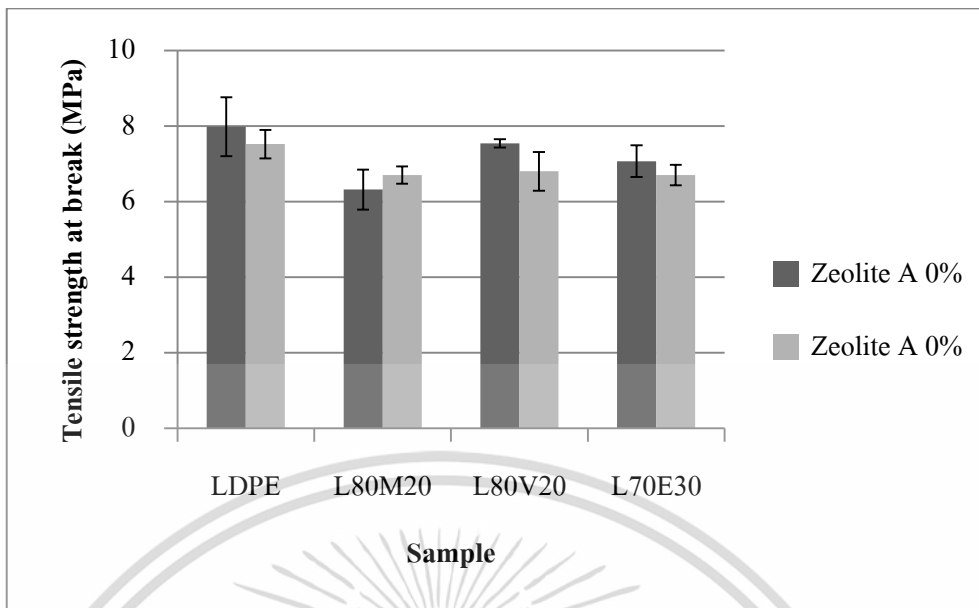


(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก

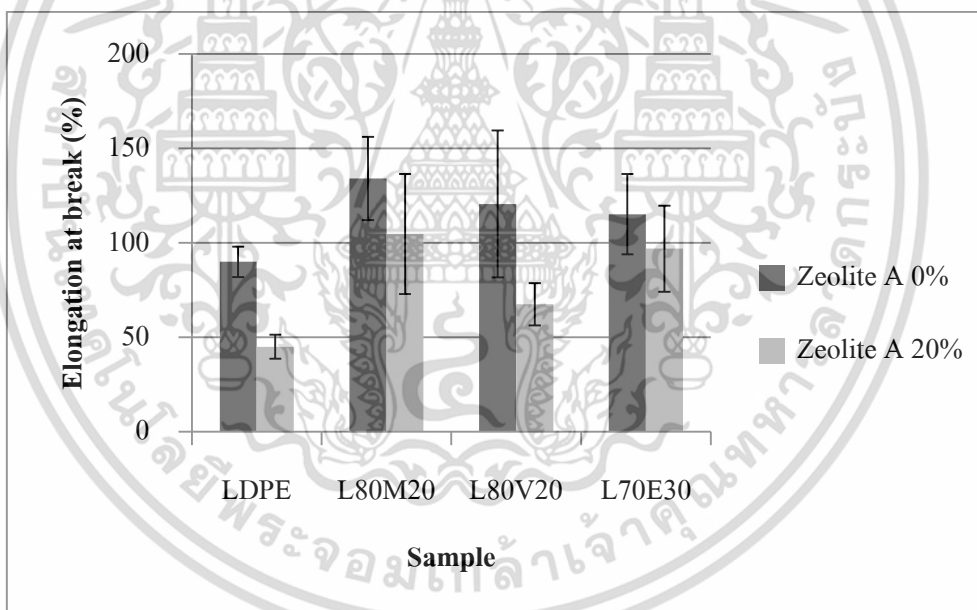


(b) การดึงยืด ณ จุดคราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

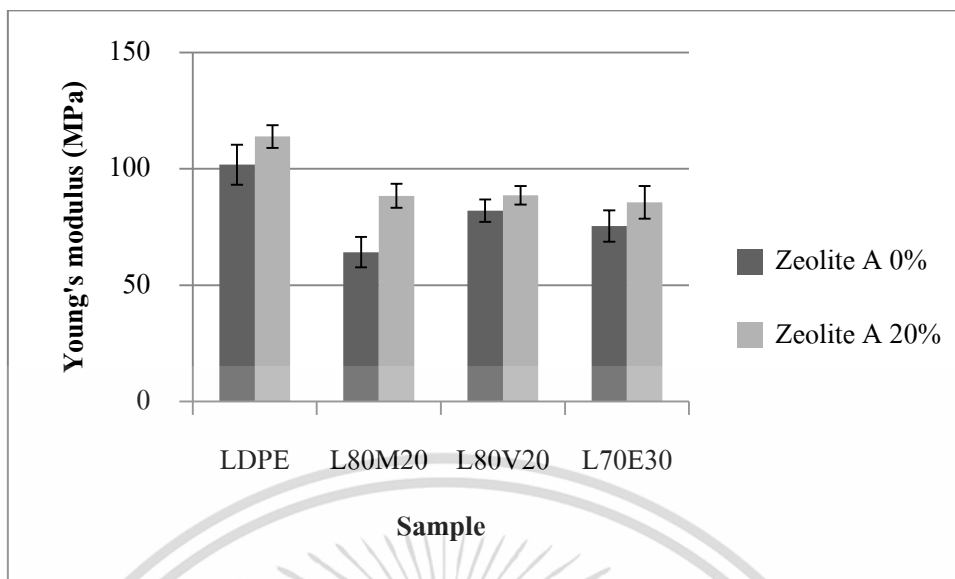


(c) ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด

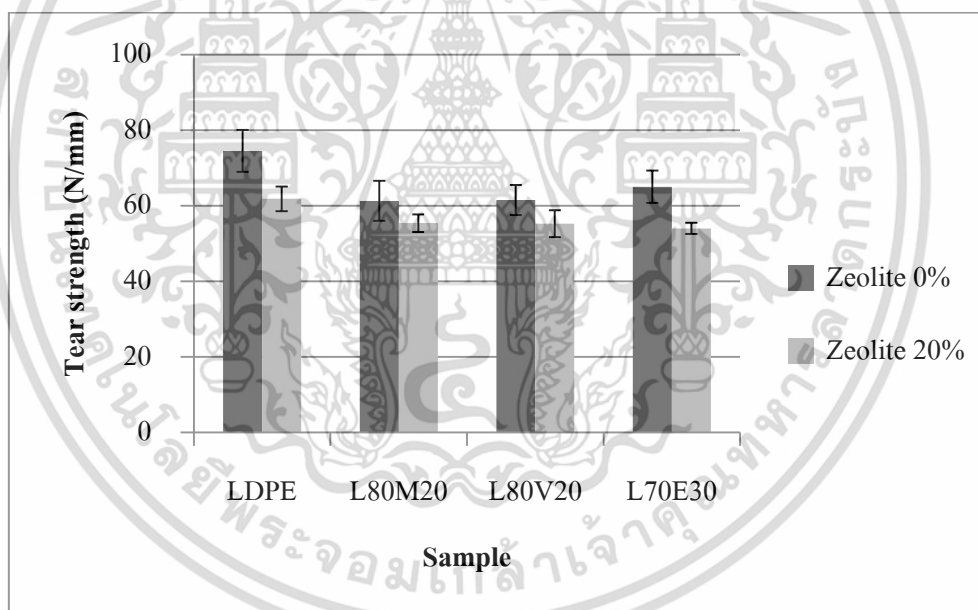


(d) การดึงยืด ณ จุดขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) ค่ามอดุลัสของยัง



(f) ความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

รูปที่ 4.21 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ

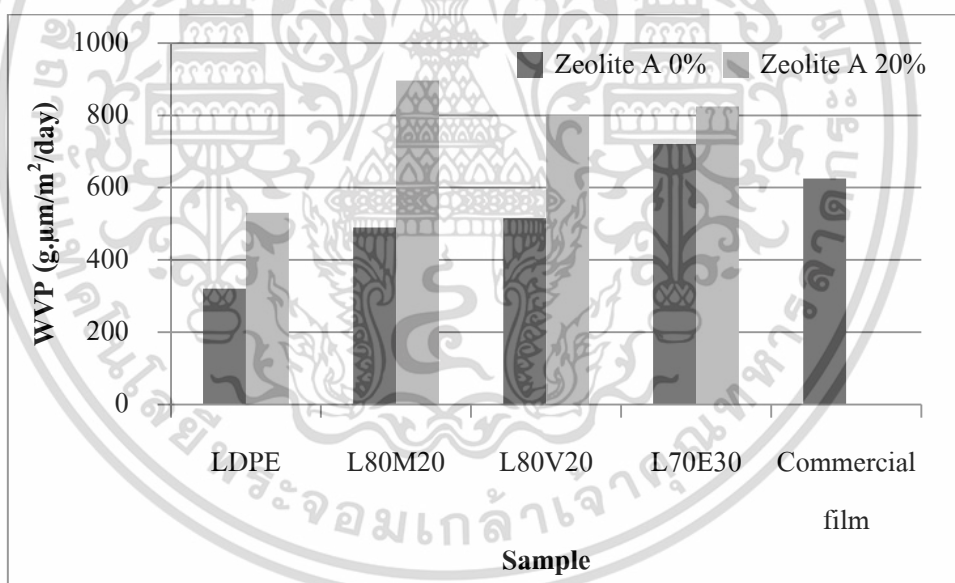
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2.7 ผลของการเติมซีโอไลต์เอตต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม

##### พอลิเมอร์

จากรูปที่ 4.22 พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของทุกสูตรฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมซีโอไลต์เอ เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นอนุภาคที่มีรูพรุนและมีขั้วสูง เมื่อเติมซีโอไลต์เอลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีสภาพขั้วที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้ฟิล์มสามารถเหนี่ยวนำให้ไอน้ำมาเกาะที่ผิวฟิล์มได้มากขึ้น โดยอนุภาคของซีโอไลต์เอสามารถดูดซับไอน้ำไว้ที่พื้นผิวแล้วปลดปล่อยไอน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของซีโอไลต์เอหลุดออก ทำให้ไอน้ำสามารถซึมผ่านฟิล์มได้เร็วขึ้น

ในกรณีของฟิล์มสูตร L100Z20 พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจากฟิล์ม LDPE เนื่องจากการมีซีโอไลต์เอดังกล่าวข้างต้น และไอน้ำยังสามารถซึมผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคของซีโอไลต์เอที่มีขั้วและ LDPE ที่ไม่มีขั้ว



รูปที่ 4.22 สมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการเติมซีโอไลต์เอเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ

ฟิล์มสูตร L80M20Z20, L80V20Z20 และ L70E30Z20 พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจากฟิล์มที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ เนื่องจากการมีซีโอไลต์เอดังกล่าวข้างต้น

ข้างต้น และเกิดจากการเติม โคลพอลิเมอร์ซึ่งเป็นการเพิ่มวัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ ซึ่งไอน้ำสามารถซึมผ่านวัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วของ โคลพอลิเมอร์ได้ดี

เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำระหว่างฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้กับฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาดที่ระบุว่าสามารถยืดอายุในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์สดได้ พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอเป็นองค์ประกอบมีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่สูงกว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีการขายในท้องตลาด โดยฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มที่มีขายในท้องตลาด 43%

จากตารางที่ 4.15 พบว่ามุมสัมผัสไอน้ำลดลงเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอ นั้นเป็นการแสดงให้เห็นว่าการเติมซีโอไลต์เอนั้นเป็นการเพิ่มสภาพขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ โดยฟิล์มที่มีขั้วเพิ่มขึ้นนั้นสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.15 ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมซีโอไลต์เอและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ

Sample	Contact angle ( $\theta$ )	
	Zeolite A 0%	Zeolite A 20%
LDPE	98.1 $\pm$ 1.5	75.5 $\pm$ 1.2
L80M20	81.7 $\pm$ 2.9	71.4 $\pm$ 3.5
L70E30	84.3 $\pm$ 3.0	72.5 $\pm$ 2.7
L80V20	88.0 $\pm$ 4.3	79.2 $\pm$ 2.7

จากการสังเกตพบว่า LDPE ที่มีการเติมซีโอไลต์เอ 20% (L100Z20) นั้นมีสภาพขั้วที่สูงกว่าพอลิเมอร์สูตร L80V20Z20 แต่กลับมีค่าการซึมผ่านไอน้ำที่ต่ำกว่า (รูปที่ 4.22) เป็นการยืนยันได้ว่าอิทธิของวัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วส่งผลต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมากกว่าอิทธิพลของสภาพขั้วของฟิล์ม

#### 4.4 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

ในการใช้งานฟิล์มเพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด ความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) เป็นปัจจัยที่ควรได้รับการพิจารณา จากงานวิจัยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฉัฐริกา ใจสมบุรณ์ [8] ได้มีการปรับปรุงสมบัติในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LLDPE ด้วย EVA และซีโอไลต์เอ โดยศึกษาความสามารถในการซึมผ่านก๊าซ CO<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/EVA พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซ CO<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> ไม่แตกต่างกัน และมีค่าเพิ่มขึ้นในฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์เอ (25% โดยน้ำหนัก) เนื่องจากก๊าซจะซึมผ่านทางส่วนที่เป็นวัฏภาคอสัณฐานของพอลิเมอร์ และซึมผ่านรูพรุนของซีโอไลต์เอ และช่องว่างระหว่างอนุภาคที่เกิดจากการรวมกลุ่มของซีโอไลต์เอได้ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความสามารถในการเลือกผ่าน (Permselectivity, P) ระหว่างก๊าซ CO<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> (PCO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>) ของฟิล์มที่เตรียมได้นั้นไม่มีความเฉพาะเจาะจงสำหรับก๊าซทั้ง 2 ชนิดนี้ เนื่องจากฟิล์มสูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอมีช่องว่างที่เกิดจากการรวมตัวกันของซีโอไลต์เอ จึงส่งผลให้ความสามารถในการเลือกผ่านก๊าซ CO<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> ของฟิล์มลดลง อย่างไรก็ตามจากการทดลอง พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ในทุกสูตรมีค่า PCO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> อยู่ในช่วง 2-3 เท่า ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการทำเป็นบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพลาสติกประเภทที่ไม่มีการเจาะรู [21-22]

โดยงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มจาก LDPE/EMA, LDPE/EEA และ LDPE/EVA ซึ่งเป็นระบบการใช้พอลิเมอร์ร่วมของเอทิลีนที่มีขั้วมาปรับเพิ่มสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE คล้ายๆ กับระบบของ LLDPE/EVA [8] ดังนั้นจึงคาดว่าฟิล์มที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้น่าจะมีค่า PCO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> อยู่ในช่วง 2-3 เท่า ด้วยเช่นกัน

โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน 4 สูตร เพื่อนำมาใช้งานเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุพริกขี้หนูสด โดยทำการเลือกฟิล์มสูตร LDPE เพื่อใช้ในการควบคุม ฟิล์มสูตร L80M20 เพื่อศึกษาผลของการมีโคพอลิเมอร์ที่มีขั้ว ฟิล์มสูตร L100Z20 เพื่อศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอ และฟิล์มสูตร L80M20Z20 เพื่อศึกษาผลของเติมโคพอลิเมอร์ที่มีขั้วร่วมกับการใช้ซีโอไลต์เอ

ในขั้นตอนการทดสอบนี้ได้เลือกพริกมาทำการทดสอบการเก็บรักษาผลิตผลสด โดยทำการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5°C เป็นเวลา 20 วัน ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40% จากรูปที่ 4.23 แสดงพริกที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ก่อนและหลังการเก็บรักษา พบว่าหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 20 วัน พริกยังคงมีสีเขียวเหมือนเดิม เนื่องจากพริกเป็นผลิตผลสดที่จัดอยู่ในประเภท Non-climacteric คือไม่มีการสุกหลังการเก็บเกี่ยว แต่จะเกิดอาการคล้ำที่บริเวณขั้ว และมี

ความแน่นเนื้อลดลง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการเกิดอาการสะท้านหนาว (Chilling injury) ได้แก่ การมีสีคล้ำลงของผลผลิต (Darkening) และการเหี่ยว (Wilting) [13]



LDPE (ก่อนเก็บรักษา)



LDPE (หลังเก็บรักษา)



L80Z20 (ก่อนเก็บรักษา)



L80Z20 (หลังเก็บรักษา)



L80M20 (ก่อนเก็บรักษา)



L80M20 (หลังเก็บรักษา)



L80M20Z20 (ก่อนเก็บรักษา)



L80M20Z20 (หลังเก็บรักษา)

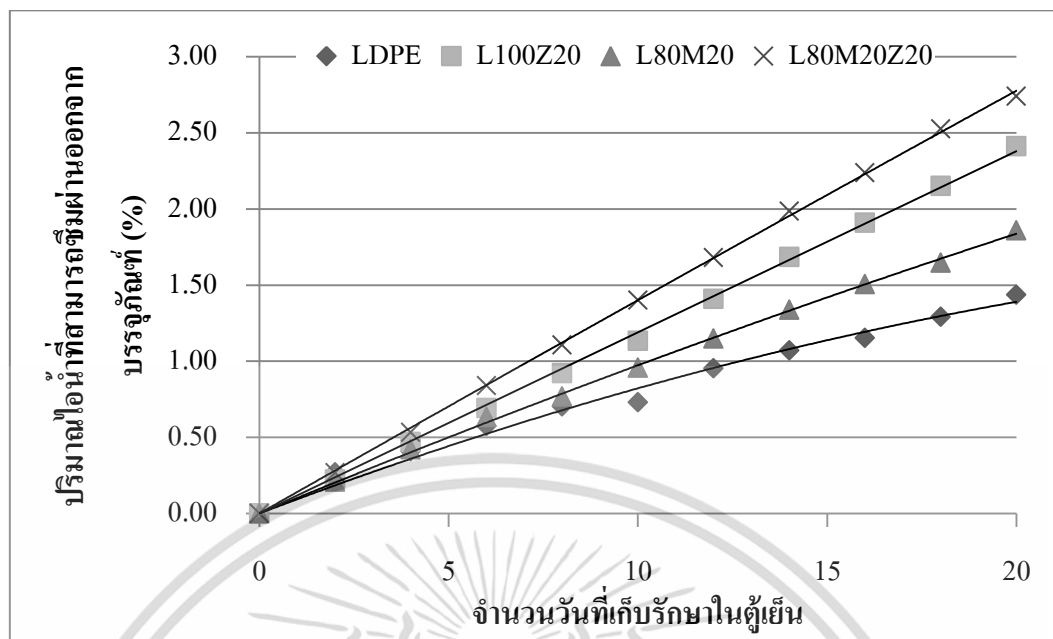
**รูปที่ 4.23** ภาพการทดสอบการใช้ฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์ที่เก็บรักษาพริกก่อนและหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 20 วัน ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5°C ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในขณะที่เก็บรักษาพริกชี้หนูสดในบรรจุภัณฑ์ พริกชี้หนูสดยังคงมีการหายใจและการคายน้ำ ซึ่งไอน้ำที่เกิดจากการหายใจส่วนหนึ่งจะสามารถระเหยออกจากบรรจุภัณฑ์ได้ และไอน้ำส่วนที่เหลือจะถูกกักเก็บไว้ภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งอัตราการถ่ายเทจะมากหรือน้อยขึ้นกับอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของถุงบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นหยดน้ำที่พบในบรรจุภัณฑ์จึงแสดงถึงไอน้ำส่วนที่เหลือจากการถ่ายเทออกนอกถุงบรรจุภัณฑ์แล้วควบแน่นเป็นหยดน้ำ หากมีหยดน้ำเกิดขึ้นในบรรจุภัณฑ์มากจะส่งผลให้ผลผลิตเกิดการเน่าเสียได้ งานวิจัยนี้จึงมีการหาปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกบรรจุภัณฑ์ และปริมาณไอน้ำกักเก็บในบรรจุภัณฑ์ เพื่อหาประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์

ในขณะที่เก็บรักษาบรรจุภัณฑ์ได้ทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปบรรจุภัณฑ์ทุกๆ 2 วัน จนครบ 20 วัน โดยน้ำหนักที่ลดลงของบรรจุภัณฑ์แสดงว่าพริกมีการหายใจได้ไอน้ำและมีไอน้ำส่วนหนึ่งสามารถซึมผ่านออกนอกบรรจุภัณฑ์ได้ จากรูปที่ 4.24 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20 สามารถระบายไอน้ำที่เกิดจากการหายใจของพืชได้มากกว่าฟิล์ม LDPE เนื่องจากฟิล์ม L80M20 มีความชอบน้ำมากกว่า โดยไอน้ำสามารถซึมผ่านวัฏภาคอสัณฐานที่มีขี้วได้ของ โคพอลิเมอร์ได้ดีกว่าวัฏภาคที่ไม่มีขี้วของ LDPE และฟิล์มสามารถระบายไอน้ำได้มากขึ้นเมื่อทำการเติมซีโอล์ตเอ (L80M20Z20) เนื่องจากการเติมซีโอล์ตเอช่วยเพิ่มความมีขี้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์

จะสังเกตได้ว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L100Z20 มีความสามารถในการระบายไอน้ำที่เกิดจากการหายใจได้น้อยกว่าฟิล์มสูตร L80M20Z20 เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L100Z20 มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติมซีโอล์ตเอที่มีขี้วและมีความชอบน้ำ แต่ฟิล์มสูตร L80M20Z20 มีการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติมซีโอล์ตเอและการมีวัฏภาคอสัณฐานที่มีขี้วของ โคพอลิเมอร์ จึงส่งผลให้ฟิล์มสูตรดังกล่าวมีความสามารถในการระบายไอน้ำสูงขึ้นอย่างชัดเจน



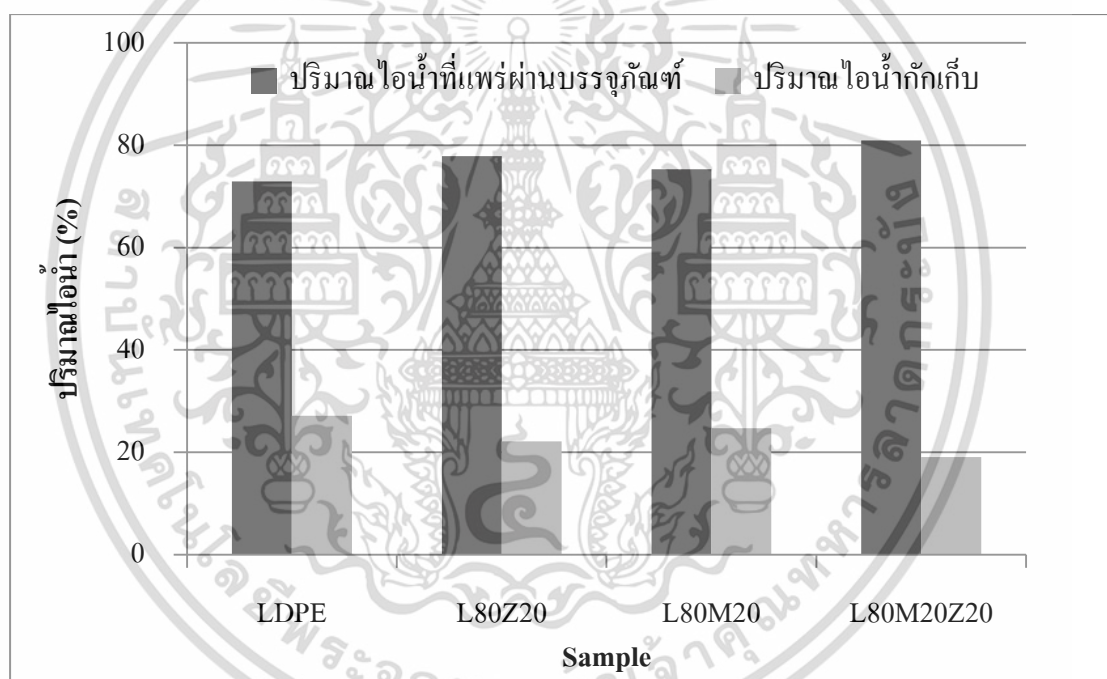
รูปที่ 4.24 ปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์ในระยะเวลา 20 วัน

จากการเก็บรักษาพริกที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ครบ 20 วัน สามารถคำนวณหาปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้จากปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์ร่วมกับปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง และแสดงค่าที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม

ตัวอย่าง	ปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (%) (ณ วันที่ 20)	ปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (%)	ปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (%)
LDPE	1.44	0.53	1.97
L80Z20	2.41	0.68	3.10
L80M20	1.86	0.61	2.47
L80M20Z20	2.74	0.65	3.39

จากตารางที่ 4.16 สามารถคิดเปอร์เซ็นต์ปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ และ ปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์เทียบกับปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม ภายหลังการเก็บรักษาพริกเป็นเวลา 20 วัน โดยแสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 สามารถระบายไอน้ำออกจากบรรจุภัณฑ์ได้มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเติม EMA ที่มี วิทยาศาสตร์ฐานที่มีซีวและซีโอโลสโตเอเป็นการเพิ่มความมีซีวให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ ซึ่งช่วยให้ฟิล์มพอลิเมอร์เกิดอันตรกิริยากับไอน้ำได้ดีและช่วยเหนียวนำไปให้ไอน้ำสามารถซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ได้มากที่สุด ในทำนองกลับกันฟิล์มพอลิเมอร์สูตรดังกล่าวมีปริมาณไอน้ำกักเก็บน้อยที่สุด ดังนั้นฟิล์มพอลิเมอร์สูตรดังกล่าวจึงน่าจะช่วยยืดอายุในการเก็บรักษาผักและผลไม้ได้



รูปที่ 4.25 ปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ และปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ เทียบกับปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ด้วยเอทิลีน โคพอลิเมอร์ และซีโอไลต์เอ เพื่องานบรรจุภัณฑ์ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ โดยงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE/EMA ศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำซึ่งพอลิเมอร์ที่เลือกใช้คือ EMA, EVA และ EEA นอกจากนี้ยังศึกษาผลของลำดับในการผสมและผลของการเติมซีโอไลต์เอ จากการทดสอบสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE/EMA พบว่า EMA กระจายตัวได้ดีในวัฏภาคของ LDPE โดย EMA ช่วยเพิ่มวัฏภาคอสัณฐานและควมมีขี้ให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม การเพิ่มปริมาณ EMA พบว่าค่าความหนืดของพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ให้ความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม, ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และยังมีมอดูลัสที่ลดลง ที่ปริมาณ EMA มีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่ามอดูลัสที่ลดลง

2. การศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำโดยมีการควบคุมให้ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้ให้ใกล้เคียงกัน พบว่า Copolymer ทุกตัว (EMA, EVA และ EVA) สามารถกระจายตัวได้ดีในวัฏภาค LDPE โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีปริมาณความเป็นผลึก, ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก, ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด, ยังมีมอดูลัส และความแข็งแรงดัดใกล้เคียงกันแต่ต่ำกว่าฟิล์ม LDPE ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L70E30 มีค่าการซึมผ่านไอน้ำที่สูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาณของโคพอลิเมอร์ที่เป็นอสัณฐานที่มีขี้มากกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

3. การศึกษาลำดับในการผสมและผลของการเติมซีโอไลต์เอ พบว่าลำดับในการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดในสภาวะการผสมที่ความเร็วโรเตอร์ 60 rpm ที่ 140°C ให้การกระจายตัวของซีโอไลต์เอและปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ในฟิล์มเท่ากัน จึงไม่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม และจากการศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก พบว่าซีโอไลต์เอที่เติมลงไปนั้นมีการกระจายตัวได้ดีในวัฏภาคที่มีขี้ของเอทิลีน โคพอลิเมอร์ แต่ไม่มีอันตรกิริยาที่ติดกับ

พอลิเมอร์ผสม จึงไม่รบกวนการเกิดผลึกของ LDPE เมื่อทำการเติมซีโอไลต์เอจะทำให้พอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผสมมีความหนืด, ยืดหยุ่น และความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้น แต่ไม่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดเปลี่ยนแปลงไป การเติมซีโอโลต์ทำให้ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมลดลง และเมื่อพิจารณาค่าซึมผ่านไอน้ำพบว่าฟิล์มที่การเติมซีโอโลต์นั้นมีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่สูงขึ้น

4. การทดสอบการใช้งานฟิล์มเพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด โดยทำการเก็บรักษาพริกชี้หนู ที่อุณหภูมิ 5°C เป็นเวลา 20 วัน พบว่าฟิล์มสูตร L80M20Z20 ซึ่งมีทั้ง EMA ที่มีความเป็นอสัณฐานที่มีขั้วสูงและมีซีโอโลต์เอทีที่มีความชอบน้ำสูง สามารถระบายไอน้ำที่เกิดจากการหายใจของพริกออกมาได้มาก ส่งผลให้มีไอน้ำกักเก็บในบรรจุภัณฑ์น้อยกว่าฟิล์มสูตรอื่นๆ

จากงานวิจัยนี้พบว่า ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มวิญญาคออสัณฐานที่มีขั้วและการเติมซีโอโลต์เอทีแก่ฟิล์มพอลิเมอร์ โดยพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์ม LDPE 180% และมีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาดที่ระบุว่าสามารถยืดอายุในการเก็บรักษาได้ 43%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์โดยใช้วิธีการขึ้นรูปแบบเป่า เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่สามารถนำมาใช้ได้จริงในเชิงพาณิชย์
2. ปรับปรุงความแข็งแรงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยการใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) เพื่อให้รอยต่อระหว่างวิญญาคอ (Interphase) มีความแข็งแรงขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] งามทิพย์ ภู่วโรดม. “การบรรจุอาหาร.” กรุงเทพฯ : เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์, 2550.
- [2] เนตรนภา ลามอ และเบญจวรรณ ดานนท์. “สมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอเททิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปรับปรุงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและซีโอไลต์เอ.” โครงการงานพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [3] สุภารัตน์ รักชลธิ, กังสาดล บัวบุตรา, ณิชฌนิชาซ์ ศิริเจียรนัยและกัญญาวีร์ สุวรรณชัย. “สมบัติของฟิล์มพอลิเอเททิลีนที่ผสมสารเติมแต่งซีโอไลต์เอ”. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 30(4) (2545) 262-270.
- [4] กัญญาวีร์ สุวรรณชัย. “การใช้ซีโอไลต์เอเพื่อปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มอัดรีดพอลิเอเททิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในงานบรรจุภัณฑ์ผักสด.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [5] พรพรรณ มั่นประสิทธิ์ และภาสินี แต้ดี. “การเตรียมและทดสอบสมบัติของเอทิลีนไวนิลอะซิเตดโคพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงด้วยซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ.” โครงการงานพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [6] C. Li, Q. Kong, J. Zhao, D. Zhao, Q. Fan and Y. Xia. “Crystallization of partially miscible linear low-density polyethylene/poly (ethylene-co-vinyl acetate) blends.” **Material Letters** 58 (2004) 3613-3617.
- [7] นันทวรรณ ม่วงมี. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลดีพีอีด้วยอีวีเอและซีโอไลต์เอ.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [8] ณิชฌริกา ใจสมบุญ. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลแอลดีพีอีด้วยอีวีเอและซีโอไลต์เอ.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] จิตรา ศักดาพิสุทธิ์, เมธาวิ อุตตสุรดี และรันตี บุญตา. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลดีพีอีด้วยอีวีไอเอชและซีโอล์ต์เอ.” ครงงานพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [10] R.W. Halle. “New Ethylene-Methyl Acrylate Copolymer for Multilayer Flexible Packaging Applications.” *Journal of Plastic Film and Sheeting* 5 (1989) 56-65
- [11] สมชาย ก่อหาญ. “วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวพืชสวน.” ภาควิชาพืชสวน คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [12] S. Dirim, A. Esin and A. Bayindirli. “A New Protective Polyethylene Based Film Containing Zeolite for the Packaging of Fruits and Vegetables : Film Preparation.” *Journal of Food Engineering* 63 (2004) 9-13.
- [13] ญาดา จันทสมบูรณ์. “ผลของการบรรจุที่มีต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาพริกชี้หูสด.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2549.
- [14] จิรา ณ หนองคาย. “เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและดอกไม้.” กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แมสพลับบลิชชิง. 2534.
- [15] ดนัย บุญเกียรติ. “สรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวผัก ผลไม้และดอกไม้.” คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2540.
- [16] E.B. Pantastico. “**Postharvest Physiology Handling and Utilization of tropical and Subtropical Fruits and Vegetables.**” Westport CT : The AVI Publishing Company Inc. 1975.
- [17] รุ่งนภา วิสฐอุดรการ. “เอกสารประกอบการสอนการประเมินอายุการเก็บรักษาของอาหาร.” ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2540.
- [18] D. Zagory and A.A. Kader. “Modified atmosphere packaging of fresh produce.” *Food Technology* 42 (1988) 70-77.
- [19] Paine F.A. and Paine H.Y. “**A Handbook of Food Packaging.**” London : Blackie Academic & Professional. 1992.
- [20] ดนัย บุญเกียรติ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. “การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้.” กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 2535.
- [21] N. Mir and R.M. Beaudry. “**Modified Atmosphere Packaging.**” 2012. [Online]. Available : <http://www.ba.ars.usda.gov/hb66/015map.pdf>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] R.T. Parry. **“Principles and applications of modified atmosphere packaging of food.”** London: Blackie Academic and Professional. 1993.
- [23] มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ **“เคมีพอลิเมอร์.”** กรุงเทพฯ: โครงการตำรา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [24] วันชาติ ปรีชาติวงศ์ **“พอลิเมอร์ (Polymer).”** สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์. 2554. [Online]. Available:<http://www.gocities.com/thaimafia/orchem/polymer.ppt>
- [25] Staff of Modern Plastics Magazine. **“Plastics Handbook.”** New York: McGraw-Hill. 1994.
- [26] SIGMA-ALDRICH®. **“Poly (ethylene-co-ethyl acrylate).”** 2013. [Online]. Available :<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/200581?lang=en&region=TH>.
- [27] eFunda, Inc. **“Ethylene/ethyl acrylate.”** 2013. [Online]. Available: [http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer\\_datasheet.cfm?MajorID=PE&MinorID=4](http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.cfm?MajorID=PE&MinorID=4).
- [28] SIGMA-ALDRICH®. **“Poly (ethylene-co-methyl acrylate).”** 2013. [Online]. Available: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/340502?lang=en&region=TH>.
- [29] eFunda, Inc. **“Ethylene/methyl acrylate.”** 2013. [Online]. Available: [http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer\\_datasheet.cfm?MajorID=PE&MinorID=5](http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.cfm?MajorID=PE&MinorID=5).
- [30] J.A. Brydson. **“Plastics Materials.”** 7<sup>th</sup> ed. Oxford: Butterworth Heinemann. 1999.
- [31] SIGMA-ALDRICH®. **“Poly (ethylene-co-vinyl acetate).”** 2013. [Online]. Available <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/340502?lang=en&region=TH>.
- [32] ตะวัน สุขน้อย. **“เอกสารประกอบการเรียนวิชาซีโพลีเอสเตอร์และสารประกอบที่มีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง.”** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [33] B.C. Gates. **“Catalytic Chemistry.”** New York: John Wiley & Sons. 1992.
- [34] P.M. Woodward. **“Solid State Chemistry.”** 2011. [Online]. Available: [http://www.Chemistry.ohio-state.edu/woodward/chem\\_754.htm](http://www.Chemistry.ohio-state.edu/woodward/chem_754.htm).
- [35] A.R Loiola, J.C.R.A. Andrade, J.M. Sasaki and L.R.D. da Silva. **“Structural analysis of zeolite NaA synthesized by a cost-effective hydrothermal method using kaolin and its use as water softener.”** *Journal of Colloid and Interface Science* 367 (2012) 34-39.
- [36] ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์. **“พอลิเมอร์ผสม.”** *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง* 10(1) (2543) 14-17.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. “สารปรับแต่งพอลิเมอร์.” กรุงเทพมหานคร: ปู้คเน็ท. 2547.
- [38] J.S. Borah and T.K. Chaki. “Dynamic rheological, morphology and mechanical properties of compatibilized LLDPE/EMA blends.” **Journal of Polymer Research** 18 (2011) 907-916.
- [39] A.E. Bishara and H.I. Shaban. “Thermal, Mechanical and Rheological Properties of Polypropylene/Poly (ethyl-co-methyl acrylate) blends.” **International Journal of Polymeric Material** 59 (2010) 134-149.
- [40] S.A. Mousavi, M. Gholizadeh, S. Sedghi, M.P. Chenar, M. Barmala and A. Soltani. “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.
- [41] S. Marais, E. Bureau, F. Gouanve, E.B. Salem, Y. Hirata, A. Andrio, C. Cabot and H. Atmani “Transport of water and gases through EVA/PVC blend films-permeation and DSC investigations.” **Polymer Testing** 23 (2004) 475-486.
- [42] K.G. Gravalos, J.K. Kallitsis and N.K. Kalfoglow. “In situ compatibilization of poly (ethylene terephthalate)/poly (ethylene-co-ethyl acrylate) blends.” **Polymer** 36(7) (1995) 1393-1399.
- [43] I.C. McNeill and M.H. Mohammed. “Thermal analysis and degradation mechanisms of blends of low density polyethylene, poly (ethylene acrylate) and ethylene ethyl acrylate copolymer with calcium carbonate.” **Polymer Degradation and Stability** 49 (1995) 263-274.
- [44] American Standard for Testing and Materials. “**Standard Test Method for Melting And Crystallization Temperatures by Thermal Analysis.**” ASTM E794-06. Annual Book of ASTM Standard 14.02. Philadelphia. 2012.
- [45] F.W. Billmeyer. “**Text book of Polymer Science.**” New York: John Wiley & Sons. 1984.
- [46] American Standard for Testing and Materials. “**Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet.**” ASTM D882-12. Annual Book of ASTM Standard 08.01. Philadelphia. 2012.
- [47] American Standard for Testing and Materials. “**Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer.**” ASTM D624-00. Annual Book of ASTM Standard 09.01. Philadelphia. 2012.

- [48] 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 F1249-06. Annual Book of ASTM Standard 15.10. Philadelphia. 2006.
- [49] American Standard for Testing and Materials. “**Standard Test Method for Corona-Treated Polymer Films Using Water Contact Angle Measurements**” ASTM D5946-09. Annual Book of ASTM Standard 14.02. Philadelphia. 2009.
- [50] รุจิเรข วิวัฒน์านุกูล. “การศึกษาพอลิเมอร์ผสมของแอลดีพีอี/เอสอีบีเอส เพื่อเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การคำนวณ

ก.1 การเทียบเทียบอัตราส่วนของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วระหว่าง LDPE/EMA และ LDPE/EEA

EMA เกรด AC 1224 มีปริมาณ MA = 24%      ซึ่ง MA มีน้ำหนักโมเลกุล = 86 g/mol

EEA เกรด EA 101 มีปริมาณ EA = 18.5%      ซึ่ง EA มีน้ำหนักโมเลกุล = 100 g/mol

โดยทำการผสม LDPE/EMA ในอัตราส่วน 80/20 ทำการผสมครั้งละ 300 กรัม ดังนั้นจะมีปริมาณ LDPE = 240 กรัม และปริมาณ EMA = 60 กรัม

โดย EMA 100 กรัม      มีปริมาณ MA = 24 กรัม

ถ้า EMA 60 กรัม      มีปริมาณ MA = 14.40 กรัม (คิดเป็น 0.167 mol)

ดังนั้นสูตร L80M20 มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วของ MA คิดเป็น 0.167 mol

โดยงานวิจัยนี้มีการควบคุมปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วของ LDPE/EMA กับ LDPE/EEA ให้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการหาอัตราส่วน LDPE/EEA จึงต้องใช้ปริมาณ EA = 0.167 mol

โดย EA 0.167 mol คิดเป็น 16.7 กรัม

ซึ่งปริมาณ EA 18.5 กรัม      มาจาก EEA 100 กรัม

ถ้าปริมาณ EA 16.7 กรัม      มาจาก EEA 90.27 กรัม

ในการทดลองนี้ทำการผสมครั้งละ 300 กรัม จึงต้องใช้ EEA 90.27 กรัม

ถ้าผสมสาร 100 กรัม จะมี EEA อยู่ 30.09 กรัม

ดังนั้นอัตราส่วนของ LDPE/EEA คือ 70/30 ซึ่งเขียนสูตร L70V30

## ก.2 การเทียบเทียบอัตราส่วนของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วระหว่าง LDPE/EMA และ LDPE/EVA

EMA เกรด AC 1224 มีปริมาณ MA = 24%      ซึ่ง MA มีน้ำหนักโมเลกุล = 86 g/mol

EVA เกรด UL 00728CC มีปริมาณ VA = 27.5%      ซึ่ง VA มีน้ำหนักโมเลกุล = 86 g/mol

โดยทำการผสม LDPE/EMA ในอัตราส่วน 80/20 ทำการผสมครั้งละ 300 กรัม ดังนั้นจะมีปริมาณ LDPE = 240 กรัม และปริมาณ EMA = 60 กรัม

โดย EMA 100 กรัม มีปริมาณ MA 24 กรัม

ถ้า EMA 60 กรัม มีปริมาณ MA 14.40 กรัม (คิดเป็น 0.167 mol)

ดังนั้นสูตร L80M20 มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วของ MA คิดเป็น 0.167 mol

โดยงานวิจัยนี้มีการควบคุมปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วของ LDPE/EMA กับ LDPE/EVA ให้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการหาอัตราส่วน LDPE/EVA จึงต้องใช้ปริมาณ VA = 0.167 mol

โดย VA 0.167 mol คิดเป็น 14.362 กรัม

ซึ่งปริมาณ VA 27.50 กรัม มาจาก EVA 100 กรัม

ถ้าปริมาณ VA 14.36 กรัม มาจาก EVA 52.23 กรัม

ในการทดลองนี้ทำการผสมครั้งละ 300 กรัม จึงต้องใช้ EVA 52.23 กรัม

ถ้าผสมสาร 100 กรัม จะมี EVA อยู่ 17.41 กรัม

ดังนั้นอัตราส่วนของ LDPE/EVA คือ 83/17 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสูตร L80V20

### ก.3 การคำนวณน้ำหนักสารที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 ผ่านสูตรเข้มข้น

ในการเตรียมพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 ที่มีการผสมผ่านสูตรเข้มข้น EMA/Zeolite A โดยในการผสมใช้ปริมาณสารรวม 300 กรัม ซึ่งจะต้องมีปริมาณโดยรวมขององค์ประกอบทั้งหมด ดังนี้

LDPE	=	192 กรัม
EMA	=	48 กรัม
Zeolite A	=	60 กรัม

ดังนั้นจึงคำนวณหาปริมาณของสูตรเข้มข้นที่ต้องใช้ และหาปริมาณ EMA และ Zeolite A ที่มีอยู่ในสูตรเข้มข้น โดยคำนวณจาก

ในสูตรเข้มข้นมีปริมาณ EMA 50 กรัม จากสูตรเข้มข้น 100 กรัม

ถ้าต้องการปริมาณ EMA 48 กรัม ต้องชั่งสูตรเข้มข้น 96 กรัม

ซึ่งสูตรเข้มข้น 96 กรัม มี Zeolite A อยู่ 48 กรัม

แต่พอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 ต้องมีปริมาณ Zeolite A ในพอลิเมอร์ 60 กรัม

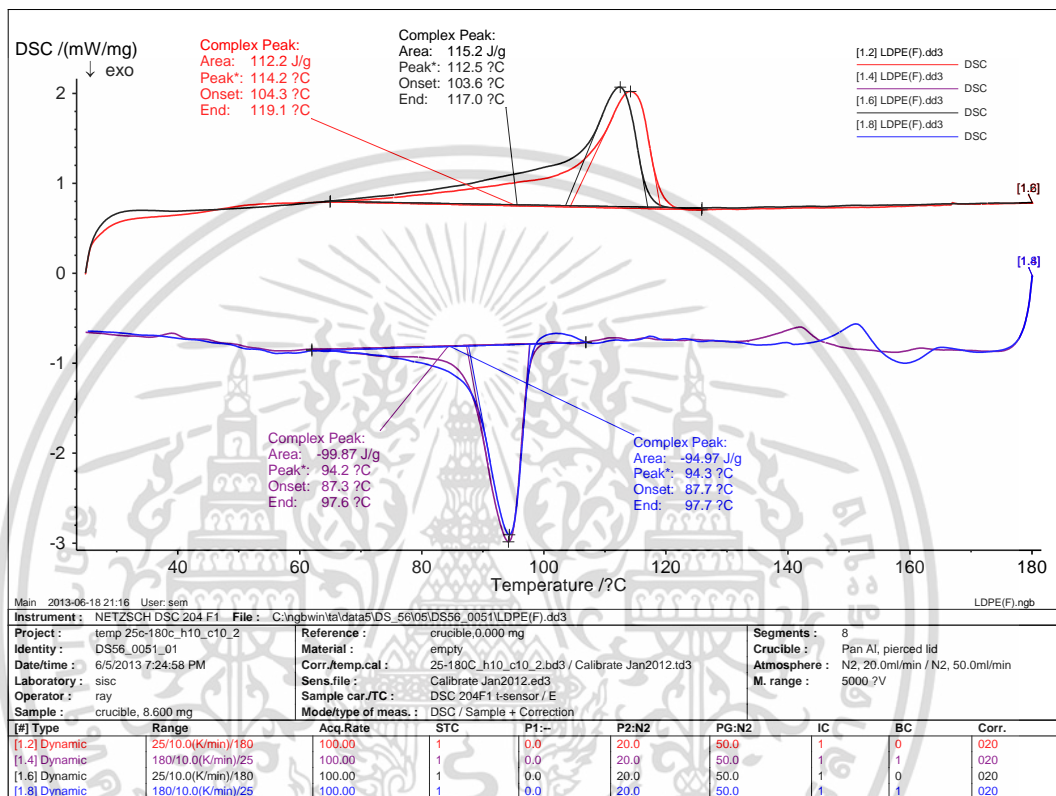
ดังนั้นจึงต้องเติม Zeolite A เพิ่มในขั้นตอนผสม 12 กรัม

ดังนั้นเมื่อผสมพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 โดยการผสมผ่านสูตรเข้มข้นของ EMA/Zeolite A ซึ่งในการผสมแต่ละครั้งมีการควบคุมปริมาณของสารผสมรวม 300 กรัม จึงต้องชั่งองค์ประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

LDPE	=	192 กรัม
สูตรเข้มข้นของ EMA/Zeolite A	=	96 กรัม
Zeolite A (เติมเพิ่ม)	=	12 กรัม

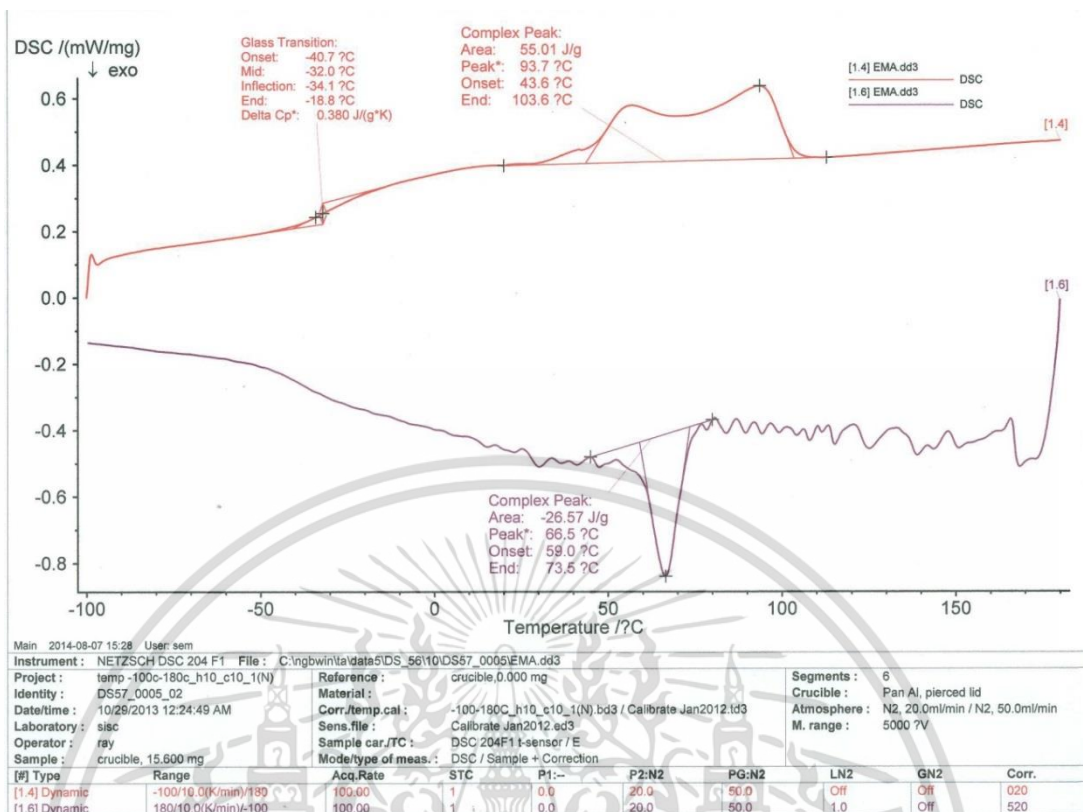
## ภาคผนวก ข

### เทอร์โมแกรม DSC

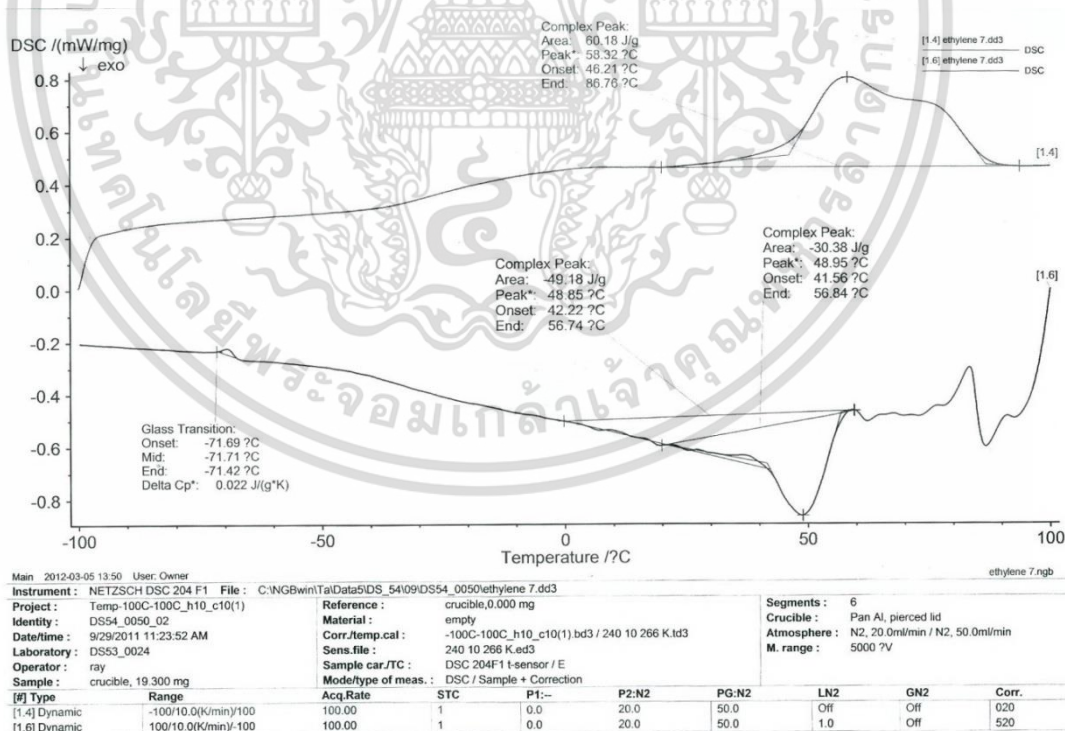


รูปที่ ข.1 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

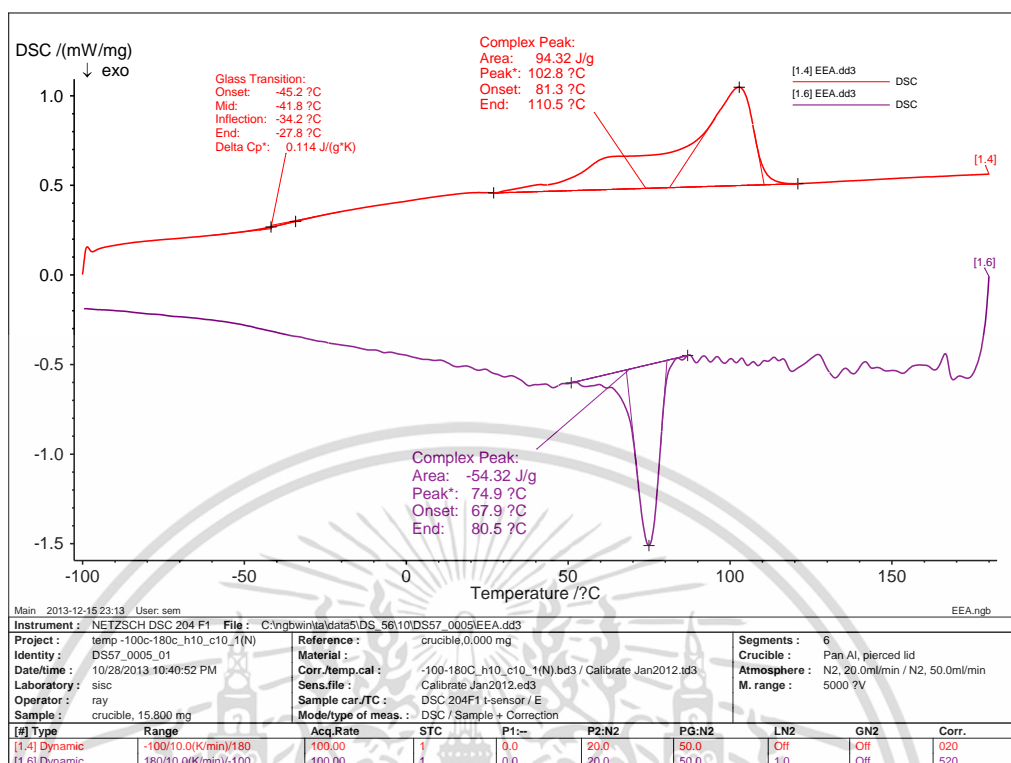


รูปที่ ข.2 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม EMA

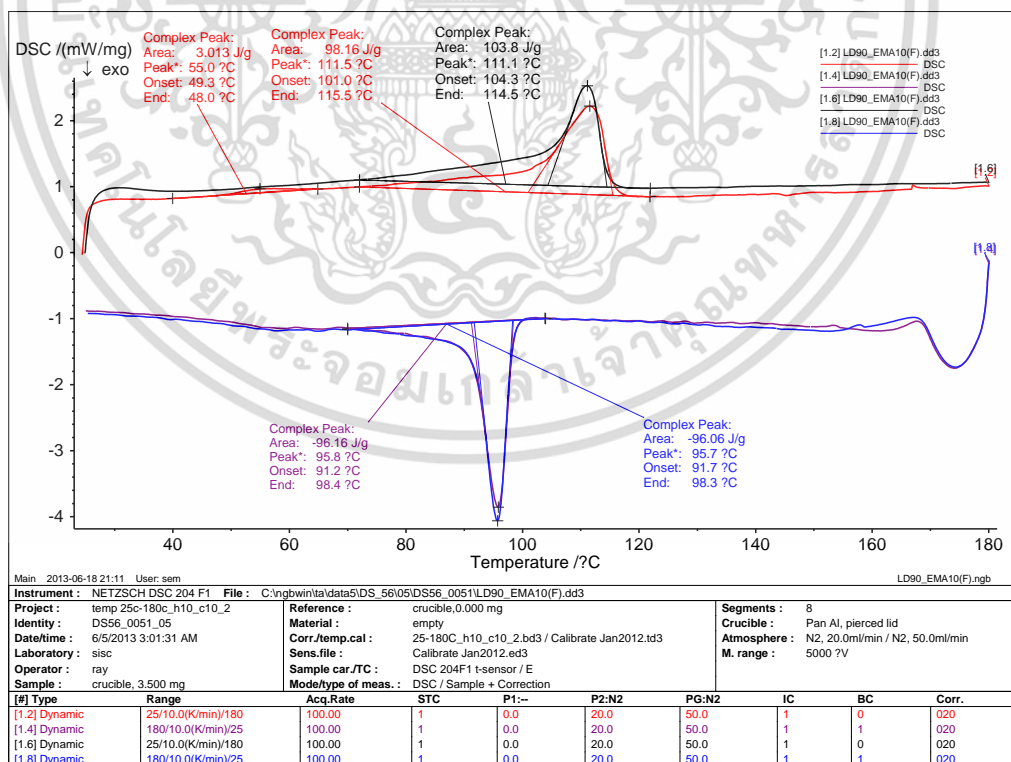


รูปที่ ข.3 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม EVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

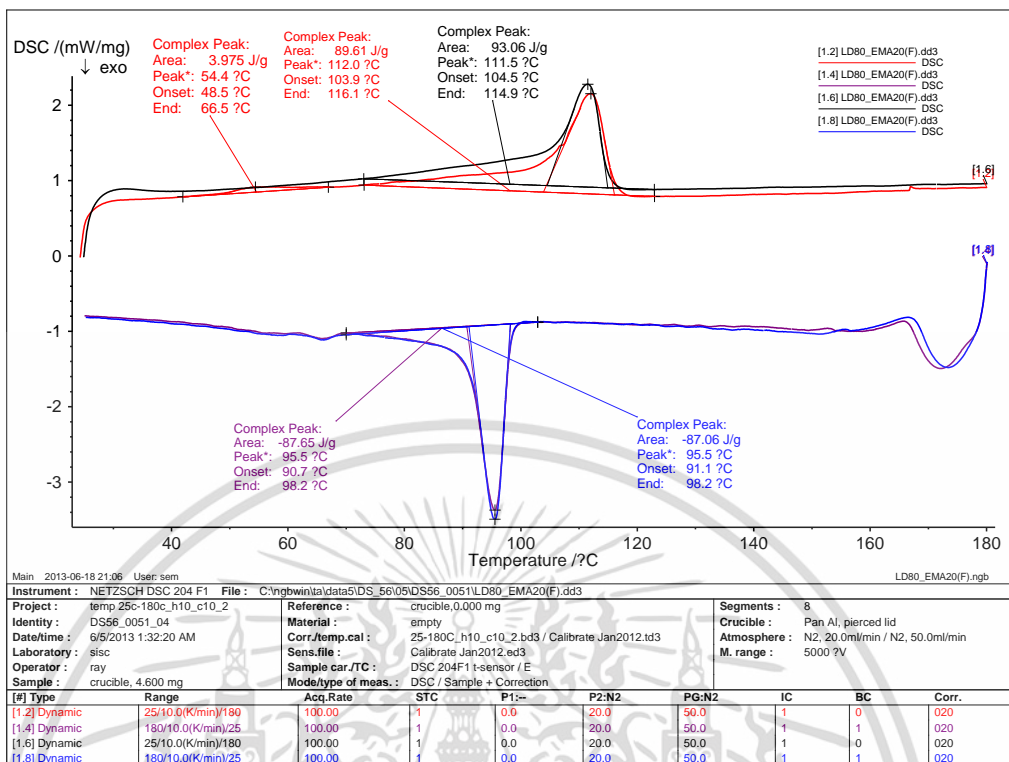


รูปที่ ข.4 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม EEA

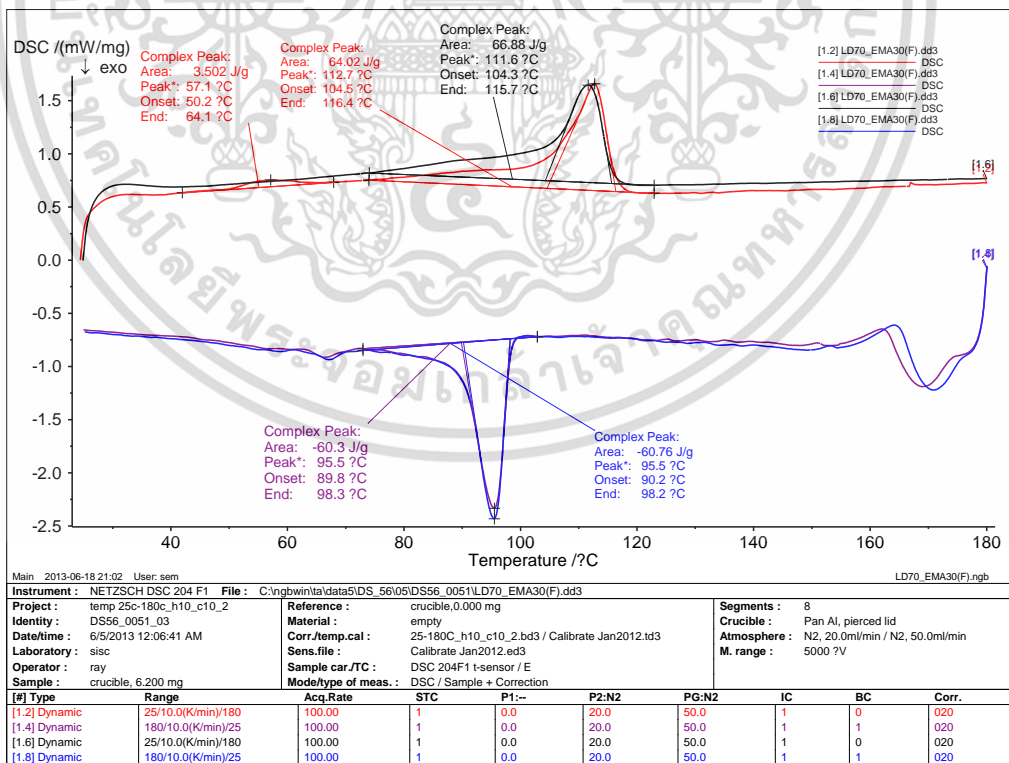


รูปที่ ข.5 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L90M10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

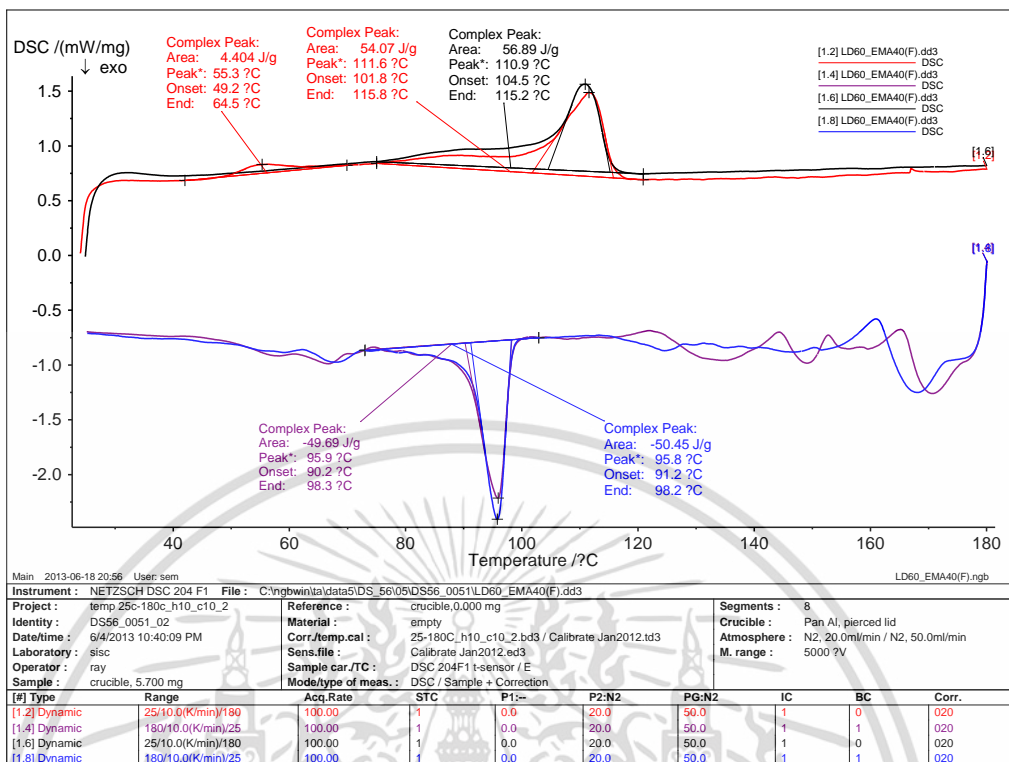


รูปที่ ข.6 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L80M20

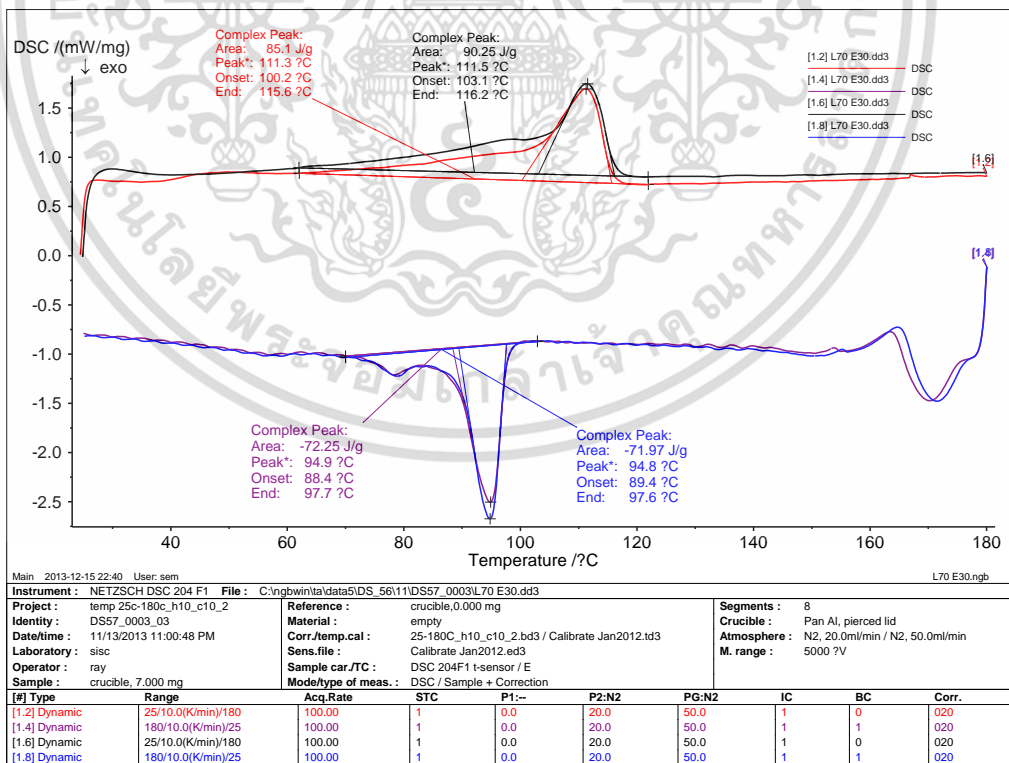


รูปที่ ข.7 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L70M30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

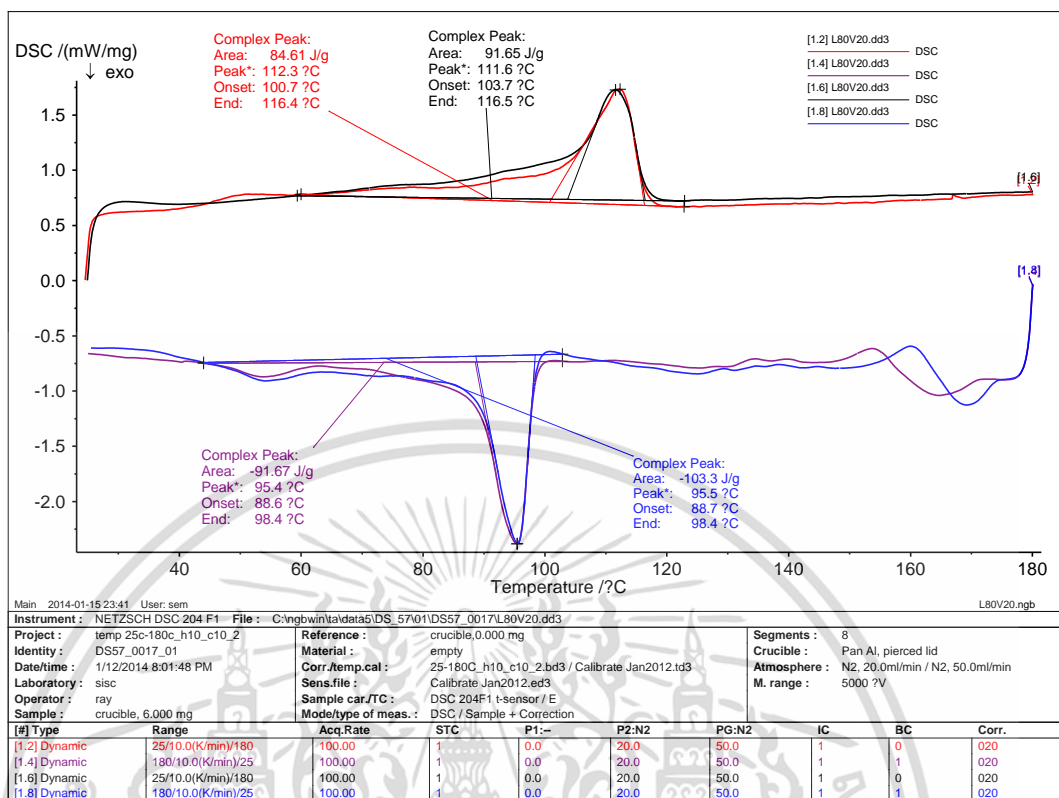


รูปที่ ข.8 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L60M40

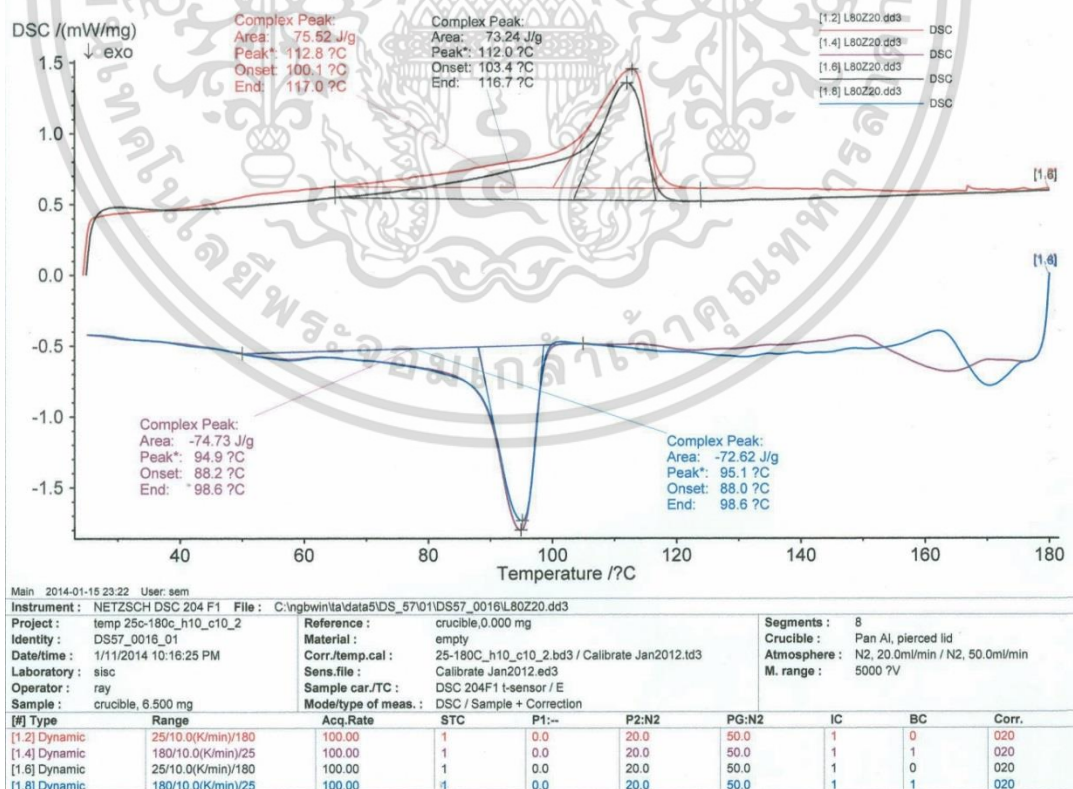


รูปที่ ข.9 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L70E30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

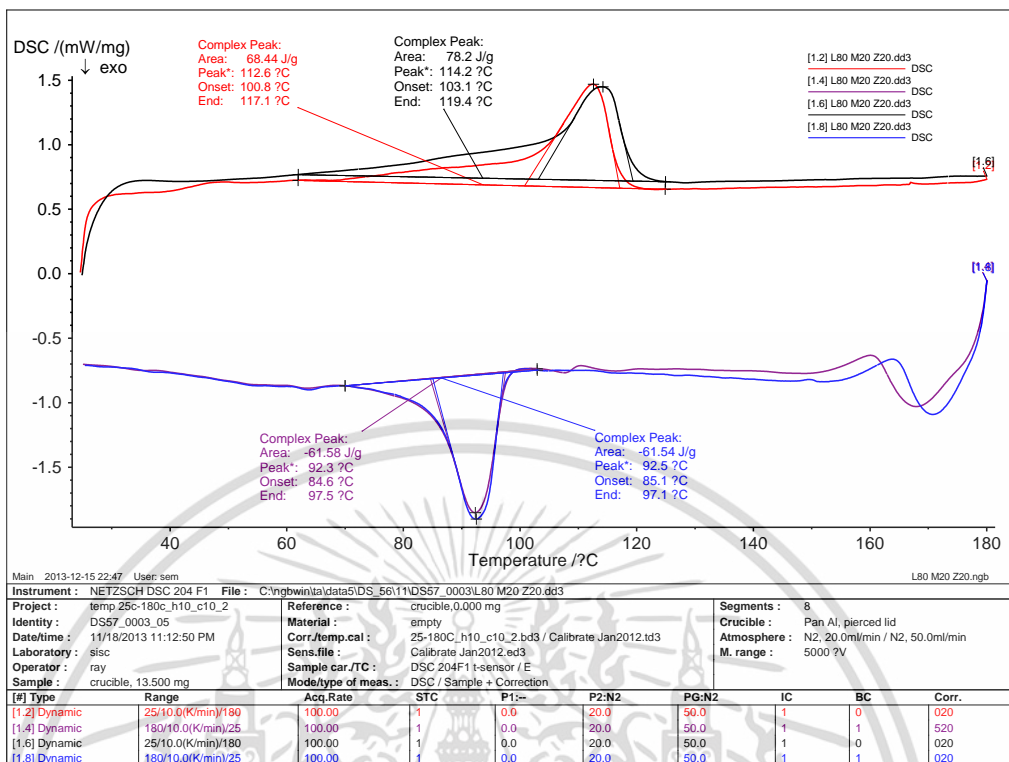


รูปที่ ข.10 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L80V20

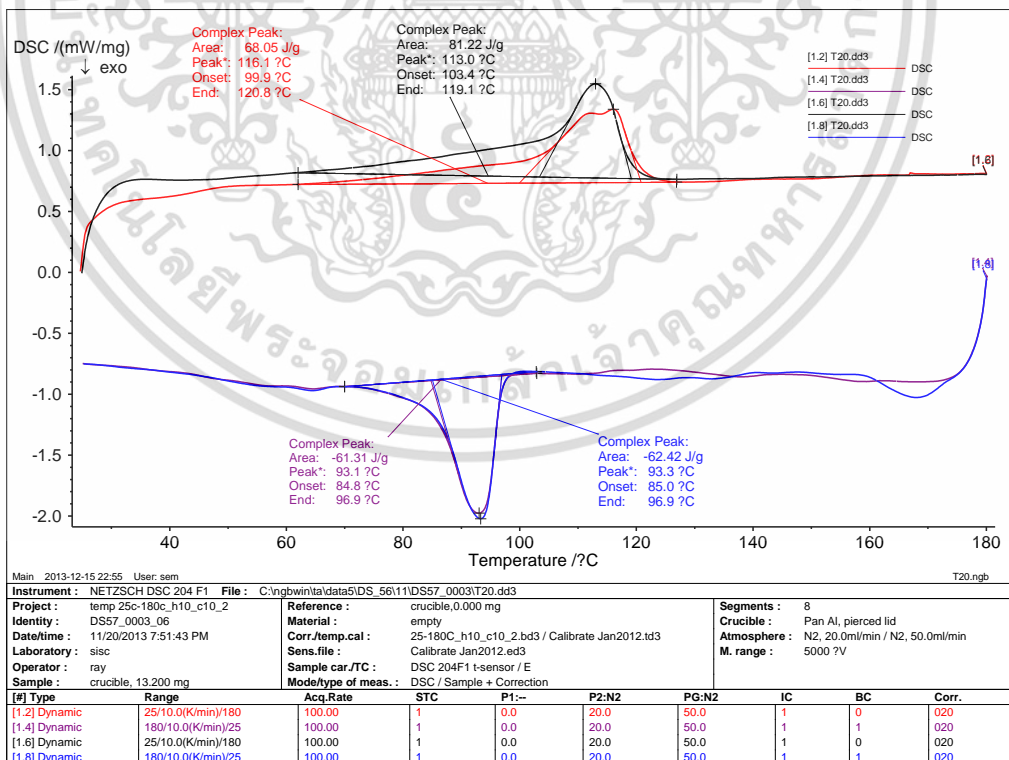


รูปที่ ข.11 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L80Z20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

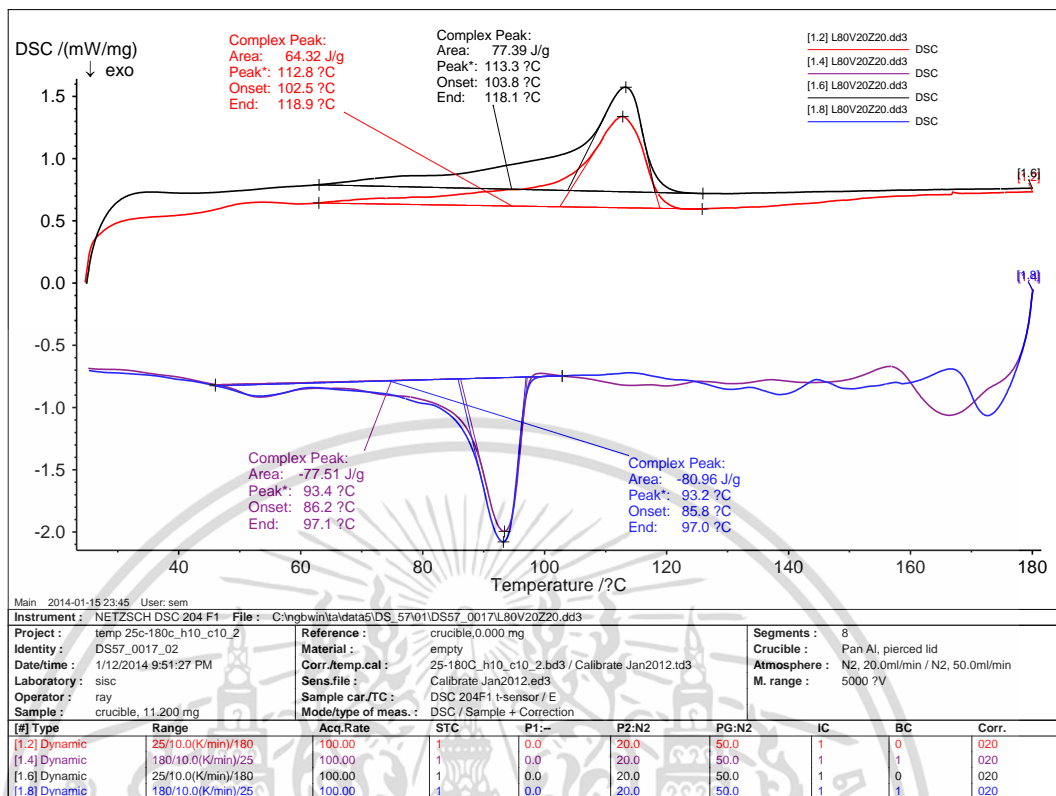


รูปที่ ข.12 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L80M20Z20 (via Masterbatch mixing)

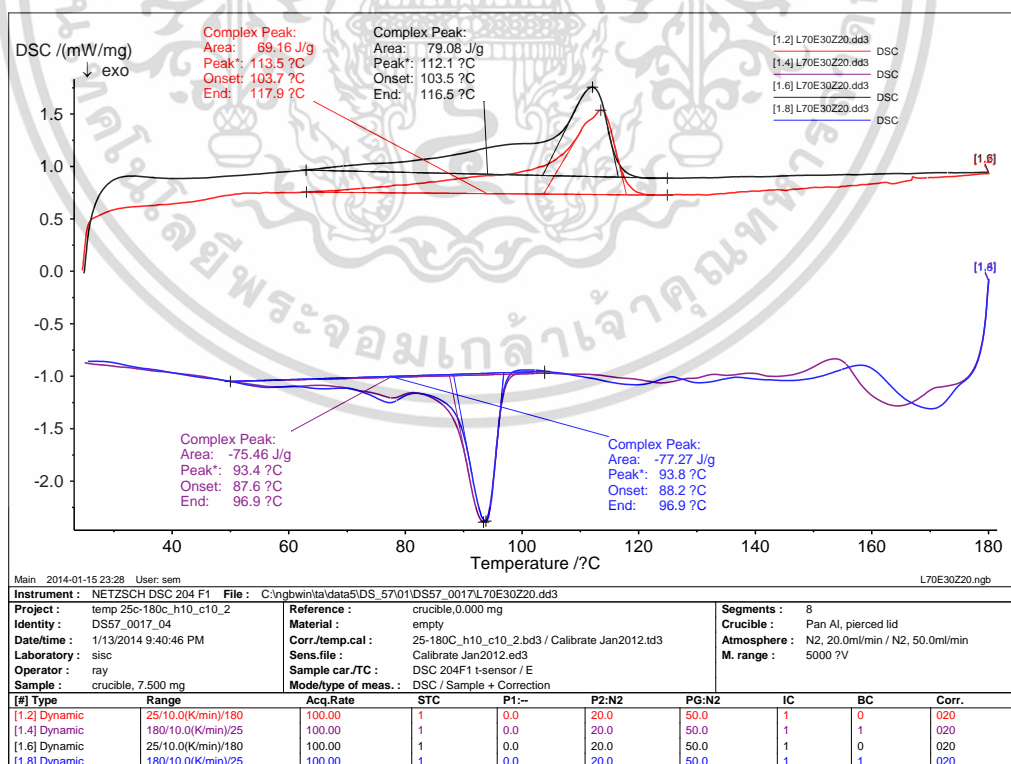


รูปที่ ข.13 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L80M20Z20 (via One shot mixing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.14 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L80V20Z20



รูปที่ ข.16 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม L70E30Z20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## ค่าการซึมผ่านไอน้ำ

ตารางที่ ค.1 ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์

ตัวอย่าง	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	WVTR ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ )	WVP ( $\text{g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2/\text{day}$ )
LDPE	49.5	6.52	0.32
	50.1	6.35	0.32
L90M10	49.9	9.79	0.49
	50.7	9.58	0.49
L80M20	48.9	10.8	0.53
	49.5	11.0	0.54
L70M30	50.3	15.8	0.79
	50.8	14.9	0.76
L60M40	58.0	15.86	0.91
	56.0	17.53	0.98
L80V20	58	9.15	0.53
	56	8.89	0.50
L70E30	57	13.2	0.75
	60.0	7.39	0.69
L80M20Z20 (One shot mixing)	59	14.4	0.85
	62	15.2	0.94
	58	17.63	1.02
	58	19.83	1.15
L80M20Z20 (Masterbatch mixing)	60	17.2	1.03
	60	17.1	1.02
	60	13.00	0.78
	60	12.50	0.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์

ตัวอย่าง	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	WVTR ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ )	WVP ( $\text{g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2/\text{day}$ )
L80Z20	58	9.71	0.57
	56	8.70	0.49
L80V20Z20	58	14.00	0.81
	57	13.80	0.79
L80E20Z20	59	12.00	0.71
	57	12.40	0.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร LDPE

ตัวอย่าง	ก่อนเก็บรักษา			หลังการเก็บรักษา			ปริมาณ ไอน้ำที่กักเก็บ (%)
	น้ำหนัก บรรจุภัณฑ์ (g)	น้ำหนัก พริก (g)	น้ำหนัก รวม (g)	น้ำหนัก บรรจุภัณฑ์ (g)	น้ำหนัก พริก (g)	น้ำหนัก รวม (g)	
LDPE-1	1.0508	5.0383	6.0891	1.0500	4.9389	6.0152	0.5200
LDPE-2	1.0528	5.0178	6.0706	1.0553	4.9190	6.0017	0.5500
			เฉลี่ย				0.5300

ตารางที่ ง.2 น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร LDPE และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์

จำนวน วันที่เก็บ รักษา (วัน)	น้ำหนักรวมของ บรรจุภัณฑ์ LDPE-1	น้ำหนักรวมของ บรรจุภัณฑ์ LDPE-2	ค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่ แพร่ออกจาก บรรจุภัณฑ์ (%)
0	6.0891	6.0706	0.0000
2	6.0750	6.0586	0.2700
4	6.0681	6.0511	0.4100
6	6.0597	6.0429	0.5700
8	6.0530	6.0371	0.7000
10	6.0530	6.0322	0.7300
12	6.0394	6.0266	0.9500
14	6.0340	6.0196	1.0700
16	6.0302	6.0140	1.1500
18	6.0234	6.0068	1.2900
20	6.0152	6.0017	1.4400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร L80Z20

ตัวอย่าง	ก่อนเก็บรักษา			หลังการเก็บรักษา			ปริมาณ ไอน้ำที่เก็บ (%)
	น้ำหนัก บรรจุภัณฑ์ (g)	น้ำหนัก พริก (g)	น้ำหนัก รวม (g)	น้ำหนัก บรรจุภัณฑ์ (g)	น้ำหนัก พริก (g)	น้ำหนัก รวม (g)	
L80Z20-1	1.2340	5.7236	6.9576	1.2369	5.5591	6.8336	0.6600
L80Z20-2	1.1593	5.1333	6.2855	1.1678	4.9517	6.1561	0.7100
เฉลี่ย							0.6800

ตารางที่ ง.4 น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร L80Z20 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่  
ออกจากบรรจุภัณฑ์

จำนวน วันที่เก็บ รักษา (วัน)	น้ำหนักรวมของ บรรจุภัณฑ์ L80Z20-1	น้ำหนักรวมของ บรรจุภัณฑ์ L80Z20-2	ค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำ ที่แพร่ออกจาก บรรจุภัณฑ์ (%)
0	6.9576	6.2926	0.0000
2	6.9425	6.2831	0.2200
4	6.9308	6.2684	0.4700
6	6.9184	6.2566	0.6900
8	6.9072	6.2432	0.9200
10	6.8958	6.2315	1.1400
12	6.8833	6.2144	1.4100
14	6.8683	6.1996	1.6900
16	6.8569	6.1868	1.9100
18	6.8460	6.1717	2.1500
20	6.8336	6.1561	2.4100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.5 ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร L80M20

ตัวอย่าง	ก่อนเก็บรักษา			หลังการเก็บรักษา			ปริมาณไอน้ำที่เก็บ (%)
	น้ำหนักบรรจุภัณฑ์ (g)	น้ำหนักพริก (g)	น้ำหนักรวม (g)	น้ำหนักบรรจุภัณฑ์ (g)	น้ำหนักพริก (g)	น้ำหนักรวม (g)	
L80M20 -1	1.2612	5.3563	6.6175	1.2615	5.2265	6.5106	0.4200
L80M20 -2	1.2079	5.8733	7.0812	1.2098	5.6440	6.8787	0.8000
เฉลี่ย							0.61

ตารางที่ ๓.6 น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร L80M20 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์

จำนวนวันที่เก็บรักษา (วัน)	น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ L80M20-1	น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ L80M20-2	ค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์ (%)
0	6.6175	7.0812	0.0000
2	6.6025	7.0573	0.2100
4	6.5908	7.0362	0.4200
6	6.5793	7.0111	0.6300
8	6.5729	6.9922	0.7700
10	6.5603	6.9726	0.9600
12	6.5488	6.9585	1.1500
14	6.5381	6.9359	1.3400
16	6.5286	6.9115	1.5100
18	6.5235	6.8975	1.6500
20	6.5106	6.8787	1.8600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗.7 ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร L80M20Z20

ตัวอย่าง	ก่อนเก็บรักษา			หลังการเก็บรักษา			ปริมาณไอน้ำที่เก็บ (%)
	น้ำหนักบรรจุภัณฑ์ (g)	น้ำหนักพริก (g)	น้ำหนักรวม (g)	น้ำหนักบรรจุภัณฑ์ (g)	น้ำหนักพริก (g)	น้ำหนักรวม (g)	
L80M20Z20 -1	1.2382	5.1247	6.3629	1.2401	4.9260	6.1985	0.6300
L80M20Z20 -2	1.2534	5.0218	6.2752	1.2543	4.8735	6.1601	0.6600
เฉลี่ย							0.6500

ตารางที่ ๗.8 น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร L80M20Z20 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์

จำนวนวันที่เก็บรักษา (วัน)	น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ L80M20Z20-1	น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ L80M20Z20-2	ค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์ (%)
0	6.3629	6.2752	0.0000
2	6.3445	6.2664	0.2700
4	6.3296	6.2543	0.5300
6	6.3108	6.2419	0.8400
8	6.2951	6.2304	1.1100
10	6.2767	6.2190	1.4000
12	6.2610	6.2062	1.6800
14	6.2424	6.1938	1.9900
16	6.2280	6.1825	2.2400
18	6.2098	6.1715	2.5300
20	6.1985	6.1610	2.7400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตัวอย่างในการคำนวณ

- หาปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (ในวันที่ 20) จากบรรจุภัณฑ์ LDPE-1 โดยหาได้จาก

ปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (ในแต่ละวัน)(%)

$$= \frac{[(\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น} + \text{น้ำหนักบรรจุภัณฑ์}) - \text{น้ำหนักรวมในแต่ละวัน}] \times 100}{\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น}}$$

$$= \frac{[(1.0508 + 5.0383) - 6.0152] \times 100}{5.0383}$$

$$= 1.47$$

- หาปริมาณไอน้ำที่กักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม จากบรรจุภัณฑ์ LDPE-1 โดยหาได้จาก

ปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (%)

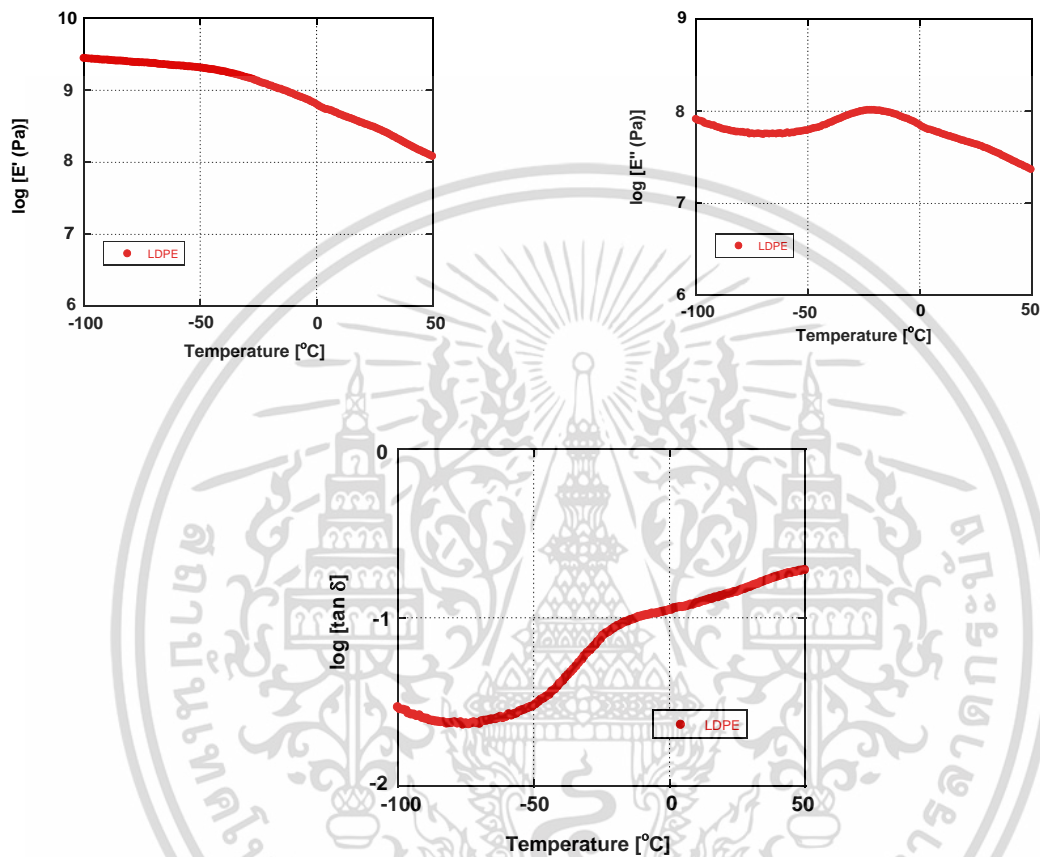
$$= \frac{[\text{น้ำหนักรวมหลังการเก็บรักษา} - (\text{น้ำหนักพริกหลังการเก็บรักษา} + \text{น้ำหนักบรรจุภัณฑ์})] \times 100}{\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น}}$$

$$= \frac{[6.0152 - (1.0500 + 4.9389)] \times 100}{5.0383}$$

$$= 0.52$$

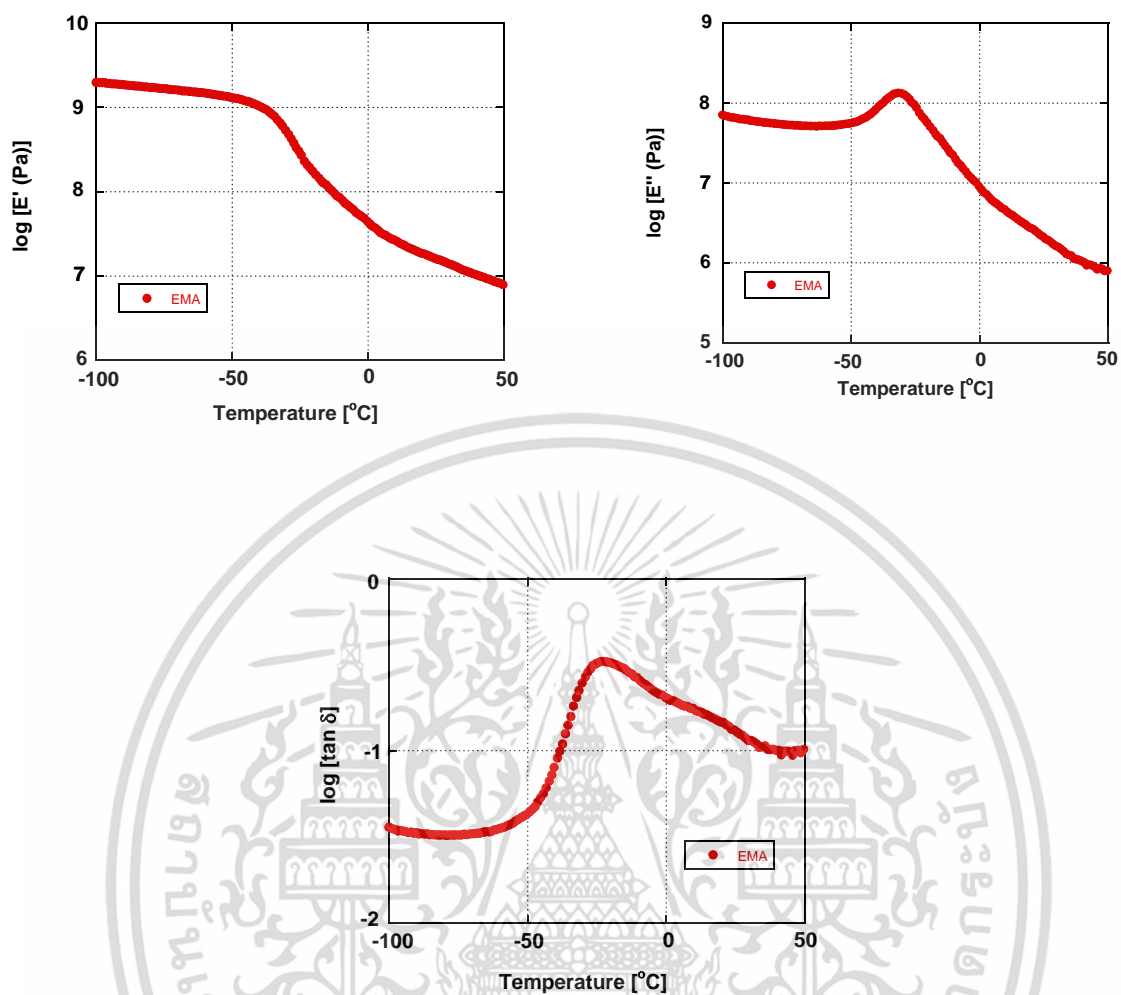
## ภาคผนวก จ

## เทอร์โมแกรมของ DMA



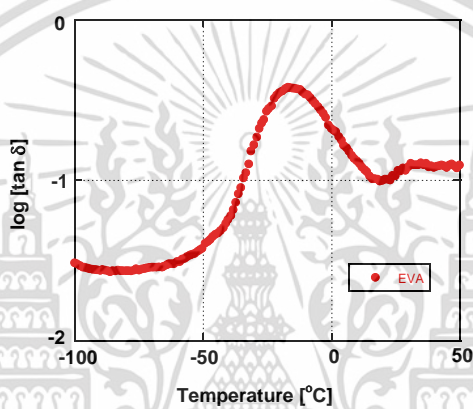
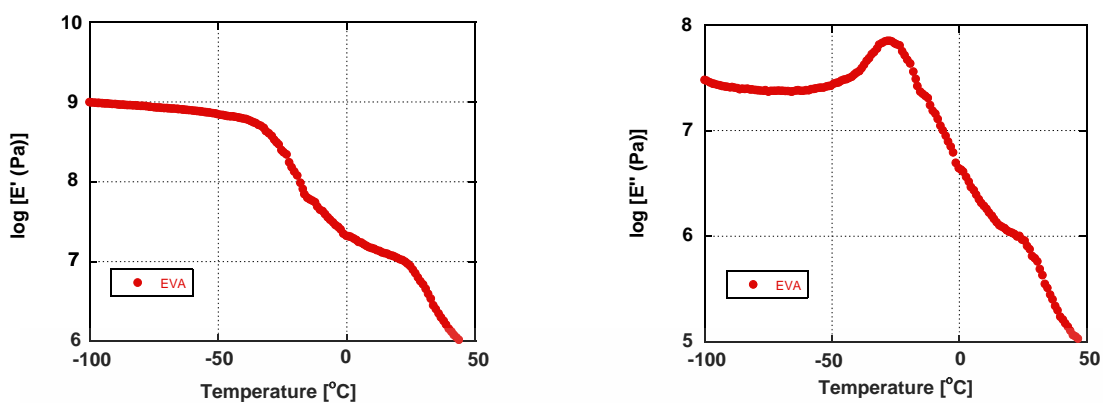
รูปที่ จ.1 เทอร์โมแกรมของ LDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



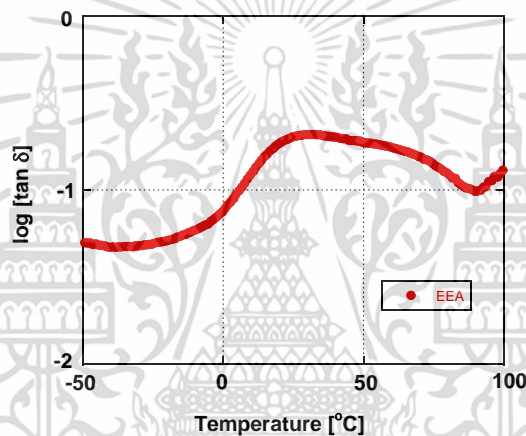
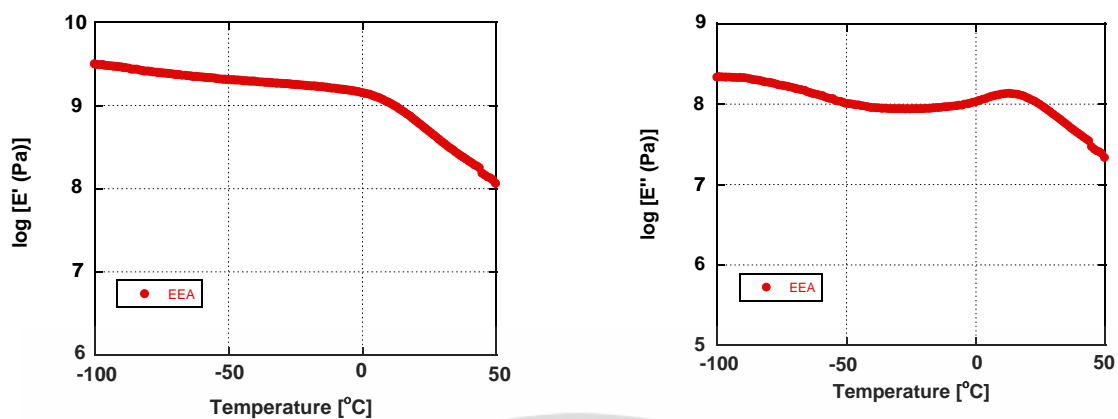
รูปที่ จ.2 เทอร์โมแกรมของ EMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.3 เทอร์โมแกรมของ EVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

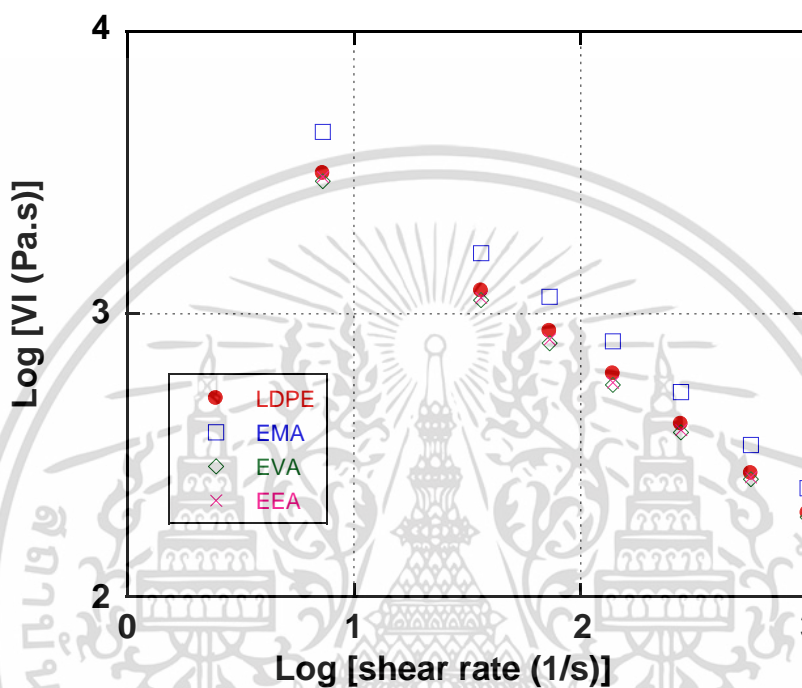


รูปที่ ๔.๔ เทอร์โมแกรมของ EEA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

## สมบัติการไหลที่สภาวะแรงเฉือนสูงของพอลิเมอร์



รูปที่ ฉ.1 สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ที่สภาวะแรงเฉือนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ข**  
**มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม**  
**ฟิล์มพลาสติกโพลีเอทิลีนสำหรับงานเกษตรกรรม**  
**(มอก. 711-2530)**

**ตารางที่ ข.1** มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฟิล์มพลาสติกโพลีเอทิลีนสำหรับงานเกษตรกรรม  
 (มอก. 711-2530)

คุณลักษณะ	ความหนา (mm)	
	0.05	0.07
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด มีค่าไม่น้อยกว่า (MPa)	5.0	7.0
การดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าไม่น้อยกว่า (%)	250	250
ความแข็งแรงฉีกขาด มีค่าไม่น้อยกว่า (N)	2.5	3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายฐิตินันท์ ศิริจันทนันท์  
วัน เดือน ปีเกิด 31 สิงหาคม 2533  
ที่อยู่ 103 หมู่ 9 ถ.ฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กทม. 10520  
ประวัติการศึกษา 2554 วิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ผลงานวิชาการ

1. Thitinan Sirichantanan, Tawan Sooknoi, Masayuki Yamaguchi and Suparat Rukchonlatee. Enhancement of Water Vapor Permeation of LDPE Film with EMA as Dispersed Phase, The 2014 IUPAC World Polymer Congress and MACRO 2014, Chiang Mai international convention and exhibition center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, July 6-11, 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้