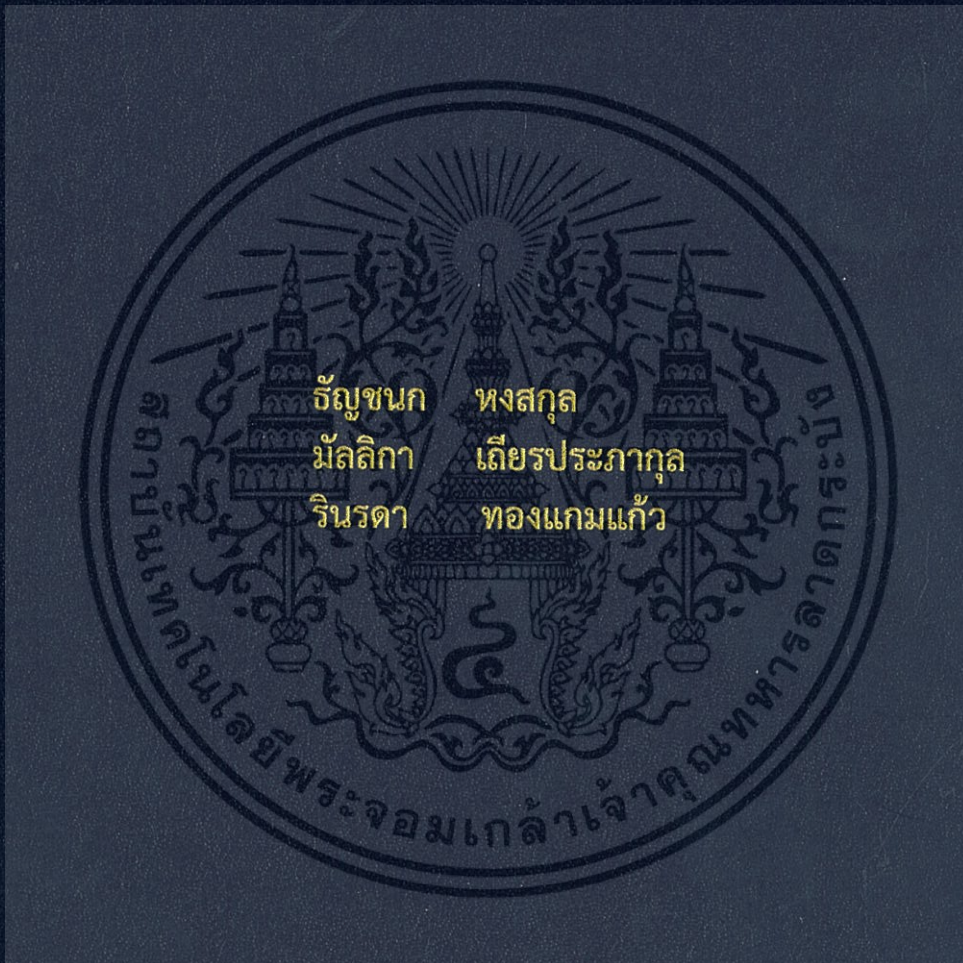


การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิโพรพิลีน

PROPERTY MODIFICATION ON WATER VAPOR
PERMEATION OF PP FILM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิโพรพิลีน

PROPERTY MODIFICATION ON WATER VAPOR
PERMEATION OF PP FILM



T149503



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149503
ปีพิมพ์ - 8 อ.พ. 2561

b. 12884972
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTY MODIFICATION ON WATER VAPOR
PERMEATION OF PP FILM



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนการสอนเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิโพรพิลีน
Property Modification of PP Film for Better Water Vapor Permeation

ชื่อนักศึกษา นางสาวธัญชนก หงสกุล รหัสนักศึกษา 56050503
นางสาวมัลลิกา เกียรติประภากุล รหัสนักศึกษา 56050574
นางสาวรินรดา ทองแกมแก้ว รหัสนักศึกษา 56050583

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)


ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ภัทธารุธ มนต์วิเศษ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน กรรมการ	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิพรอพิลีน		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธัญชนก หงสกุล	รหัสนักศึกษา	56050503
	นางสาวมัลลิกา เกียรติประภากุล	รหัสนักศึกษา	56050574
	นางสาวรินรดา ทองแกมแก้ว	รหัสนักศึกษา	56050583
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2559		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพอลิพรอพิลีน (PP) เพื่อเพิ่มการซึมผ่านของไอน้ำด้วยเอทิลีนเอทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) โดยศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม PP/EEA เป็น 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 45/55, 30/70, 20/80 และ 0/100 โดยน้ำหนักสูตรพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดที่ 210°C ความเร็วรอบ 80 rpm เป็นเวลา 15 นาที และขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด นำฟิล์มที่ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ พบว่า PP/EEA เป็นพอลิเมอร์ผสมชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) วัฏภาคกระจาย EEA มีรูปร่างทรงกลม (Spherical shape) กระจายตัวทั่วในวัฏภาคต่อเนื่อง PP เมื่อมีปริมาณ EEA มาก (PP30EA70 และ PP20EA80) จะเกิดการสลับวัฏภาคโดย EEA กลายเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง โดยเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP มีค่าประมาณร้อยละ 50 ในสูตรที่ PP เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และมีค่าลดลงเมื่อ EEA กลายเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ส่วนเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ EEA ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรไม่เกินร้อยละ 12 การเพิ่มปริมาณ EEA ทำให้ฟิล์มมีความเป็นอสัณฐานเพิ่มขึ้นและมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเพิ่มขึ้น ยืนยันได้จากค่าดรรชนีการบดสีที่สูงขึ้นสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสที่พื้นผิวมีค่าลดลง แสดงว่าฟิล์มมีความสามารถในการเปียกที่พื้นผิวเพิ่มขึ้นดังนั้นอัตรา การซึมผ่านไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์ม PP/EEA จึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามความแข็งแรงดึงและแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP/EEA ให้แนวโน้มตรงข้าม เนื่องจาก EEA มีความยืดหยุ่นและความนิ่มที่มากกว่า PP โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/EEA ที่อัตราส่วน 50/50 (PP50EA50) พบว่า EEA การกระจายตัวดี มีอัตราการซึมผ่านไอน้ำสูง (3.9 g/m².day) และมีความแข็งแรงดึงที่ดี (11.11 MPa) ดังนั้นฟิล์มสูตร PP50EA50 จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อการใช้งานด้านเกษตรกรรมต่อไป

คำสำคัญ : ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ, พอลิพรอพิลีน, พอลิเมอร์ผสม, เอทิลีนเอทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์

Title	Property Modification of PP Film for Better Water Vapor Permeation	
Students	Miss Thunchanok Hongsakul	Student ID 56050503
	Miss Mullika Tianprapakul	Student ID 56050574
	Miss Rinrada Thongkamkaew	Student ID 56050583
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2016	
Advisor	Asst.Prof.Dr. Suparat Rukchonlatee	
Co-advisor	Assoc.Prof.Dr. Tawan Sooknoi	

Abstract

This research focused on the improvement of the water vapor permeation property of polypropylene (PP) film with ethylene ethyl acrylate copolymer (EEA). The PP/EEA ratios studied were 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 45/55, 30/70, 20/80 and 0/100 by weight. The compounds were mixed using an internal mixer at 210°C with a rotor speed of 80 rpm for 15 minutes and the films were fabricated using a compression molding process. Then, all films were characterized and tested. It was found that PP/EEA was an immiscible blend. When PP was a continuous phase, the dispersed EEA presented a spherical shape with good distribution. In the films with high EEA contents (PP30EA70 and PP20EA820), EEA became a continuous phase. Crystallinity of PP was approximately 50% when PP was the continuous phase and reduced when the continuous phase was EEA. In addition, crystallinity of EEA in all films was low (not exceeding 12%). An increase in EEA content in the film enhanced the film amorphous morphology and also the polar functional group, as confirmed by increasing carbonyl index value. This agreed with lowering contact angle which indicates better surface wettability. As a result, the water vapor permeation rate (WVTR) of PP/EEA blend film was increased with increasing EEA. However, an opposite trend was found in tensile and tear strengths of PP/EEA films due to more flexibility and softness of EEA as compared with PP. The PP/EEA blend film at the ratio of 50/50 (PP50EA50) had a good distribution of EEA with a high WVTR (3.9 g/m².day) and good tensile strength (11.11 MPa). Therefore, PP50EA50 film is suitable to be developed for further agricultural uses.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keywords : Water Vapor Permeation, Polypropylene, Polymer blend, Ethylene ethyl acrylate copolymer



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือ คำแนะนำและความกรุณาเป็นอย่างดีจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่านดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุภรัตน์ รักชลธี และรศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ที่ได้ให้คำปรึกษา จัดหาสารเคมีที่ใช้สำหรับดำเนินงาน อีกทั้งดูแลอย่างใกล้ชิด และให้ข้อเสนอแนะที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ ผศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์อนันท์ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำในประเด็นต่าง ๆ เพื่อเพิ่มและแก้ไขโครงการพิเศษให้ถูกต้องและสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณา มรรคผล นักศึกษาปริญญาโท คุณณัฐพงศ์ มากมีทรัพย์ และคุณปรัชญา วาทะสิทธิ์ นักศึกษาปริญญาเอก ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาเป็นอย่างดีในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จ

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์ สารเคมี ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ครอบครัว ที่เป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อน ๆ และบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ SCG Performance chemicals Co.,Ltd. ที่สนับสนุนเม็ดพอลิเมอร์เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ธัญชนก หงสกุล

มัลลิกา เกียรติประภากุล

รินรดา ทองแกมแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว	4
2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้	9
2.3 บรรจุภัณฑ์ยืดอายุ	11
2.4 เทคโนโลยีการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน	12
2.4.1 หลักการแยกด้วยเมมเบรน	12
2.4.2 กระบวนการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน	13
2.4.3 วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน	14
2.5 พอลิพรพิลีน	15
2.6 เอทิลีนเอทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์	16
2.7 พอลิเมอร์ผสม	18
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	23
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	23
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	24
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	24
3.4 การเตรียมฟิล์ม	25
3.5 การศึกษาการกระจายตัวของ EEA	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึกและปริมาณผลึก	26
3.7 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี	27
3.8 การทดสอบมุมสัมผัส	27
3.9 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ	28
3.10 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ	30
3.10.1 สมบัติการรับแรงดึง	30
3.10.2 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด	31
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	32
4.1 ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PP/EEA	32
4.2 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก ...	34
4.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันในฟิล์ม PP/EEA	35
4.4 การทดสอบวัดมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA	36
4.5 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/EEA	37
4.6 การทดสอบสมบัติการรับแรงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/EEA	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	42
5.1 สรุปผลการวิจัย	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก	48
ภาคผนวก ก การคำนวณ	49
ภาคผนวก ข DSC เทอร์โมแกรม	53
ภาคผนวก ค โครมาโทแกรมจากเครื่อง Gas Chromatography ในการทดสอบการซึม ผ่านไอน้ำ	68
ภาคผนวก ง สมบัติเชิงกล	70
ภาคผนวก จ การซึมผ่านไอน้ำ	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างของผลไม้พวก Climacteric และ Non-climacteric	6
2.2	อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Climacteric	7
2.3	อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Non-climacteric	7
2.4	ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ	10
2.5	ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์ม พลาสติกชนิดต่าง ๆ	11
2.6	การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์แอคทีฟให้เหมาะกับอาหารที่ต้องการบรรจุ	12
2.7	คุณสมบัติของ PP	16
2.8	สมบัติบางประการของ EEA	17
3.1	สมบัติบางประการของ PP	23
3.2	สมบัติบางประการของ EEA	23
3.3	พอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมดโดยน้ำหนัก	25
4.1	ค่า T_m , T_c และความเป็นผลึกของ PP ในฟิล์ม PP/EEA	34
4.2	ค่า T_m , T_c และความเป็นผลึกของ EEA ในฟิล์ม PP/EEA	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การหายใจแบบใช้ออกซิเจน	5
2.2	อัตราการหายใจและการผลิตเอทีเอ็นเทียบกับสีของผลิตภัณฑ์	6
2.3	หลักการแยกด้วยเมมเบรน	12
2.4	กลไกของก๊าซดิวฟิวชัน (Gas diffusion)	13
2.5	โครงสร้างของ PP	15
2.6	ประเภทตามโครงสร้างทางเคมีของ PP	15
2.7	โครงสร้างของ EEA	17
2.8	สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเข้ากันได้ (Miscible)	18
2.9	สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีไม่ผสมเข้ากันได้ (Immiscible)	19
3.1	เซลล์เมมเบรน	28
3.2	แผนภาพแสดงการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ	29
3.3	แผนภาพแบบทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ	29
3.4	ลักษณะชิ้นงานตัวอย่าง	30
3.5	ลักษณะชิ้นงานตัวอย่าง	31
4.1	สัณฐานวิทยาภาพตัดขวางของฟิล์ม PP/EEA ในอัตราส่วนต่าง ๆ หลังสกัดด้วยตัวทำละลายโทลูอีนที่กำลังขยาย 1000 เท่า	33
4.2	สัณฐานวิทยาภาพตัดขวางของฟิล์ม P20E80 หลังสกัดด้วยตัวทำละลายโทลูอีนที่กำลังขยาย 100 เท่า	33
4.3	FTIR Spectra ของฟิล์มสูตรต่างๆ	35
4.4	กราฟแสดงค่าดัชนีการหักเหกับปริมาณ EEA ที่เพิ่มขึ้นของฟิล์ม PP/EEA	36
4.5	ค่าวัดมุมสัมผัสของน้ำกับชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ	37
4.6	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/EEA สูตรต่าง ๆ	38
4.7	ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ	38
4.8	ผลการทดสอบการรับแรงดึงของฟิล์ม PP/EEA สูตรต่าง ๆ	39
	(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดของฟิล์ม PP/EEA	39
	(b) ย้งมอดุลัสของฟิล์ม PP/EEA	40
	(c) ความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP/EEA	40
	(d) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม PP/EEA	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ประเทศไทยมีรายได้ที่สำคัญจากการส่งออกผักและผลไม้ ซึ่งปัญหาที่สำคัญของอุตสาหกรรมผักและผลไม้สดเขตร้อนในประเทศไทยคือ การขาดการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมและขาดความรู้ หรือการใช้เทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อยืดอายุของผลผลิตสดและรักษาคุณภาพให้คงเดิม การสูญเสียของผักและผลไม้สดหลังจากการเก็บเกี่ยวจึงมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 30-40 ของมูลค่าโดยรวมผลผลิตสดในเขตร้อนมีอายุสั้น ทำให้ผู้ประกอบการไม่สามารถส่งออกไปยังประเทศที่มีระยะทางห่างไกลจากประเทศ ดังนั้นจึงต้องทำการลดความร้อนภายหลังการเก็บเกี่ยว ลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์และแมลงที่ติดมา รวมทั้งการควบคุมการหายใจของผลผลิต เพื่อชะลอการสุกและทำการเก็บรักษาอย่างถูกต้อง [1]

การสูญเสียของผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยวนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ และปริมาณก๊าซออกซิเจน เนื่องจากผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังมีชีวิตอยู่ กระบวนการต่าง ๆ ทั้งทางสรีระและชีวเคมียังคงดำเนินอยู่เช่นเดียวกับที่ยังติดอยู่กับต้น ดังนั้นผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวจึงยังคงมีการหายใจต่อไป จึงต้องอาศัยอาหารที่สะสมไว้และความชื้นในเนื้อเยื่อที่มีอยู่ การสูญเสียอาหารและน้ำที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อของผลผลิตจะไม่ได้รับการชดเชย เป็นสาเหตุให้เกิดกระบวนการเน่าเสียขึ้นกับผักและผลไม้ [1] หากต้องการชะลอการสุกและการชราของพืชผล ควรทำให้บรรยากาศมีแก๊สออกซิเจนต่ำ อุณหภูมิต่ำ โดยที่ปริมาณแก๊สออกซิเจนต้องไม่น้อยเกินไป เพราะอาจทำให้พืชผลเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้เกิดการหมักจะส่งผลต่อพืชผลที่จัดเก็บคือ มีกลิ่นที่เปลี่ยนไป หนทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การพัฒนาเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์ ที่ใช้ในการบรรจุผลผลิตการเกษตร เพื่อยืดอายุผลผลิตให้นานมากขึ้น โดยบรรจุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพจะต้องป้องกันการสูญเสียน้ำ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ไม่สูญเสียน้ำหนักมากเกินไป นอกจากนี้ต้องมีการถ่ายเทน้ำและอากาศเพียงพอเพื่อความสดให้อยู่ได้นาน ดังนั้นควรเลือกบรรจุภัณฑ์ฟิล์มที่มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเหมาะสมกับผักผลไม้ที่ต้องการเก็บรักษา [2]

บรรจุภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เก็บรักษาผักผลไม้สดในปัจจุบันคือ บรรจุภัณฑ์พลาสติกกลุ่มพอลิเอทิลีน เนื่องจากมีข้อดีคือ ราคาถูก ปลอดภัยกับอาหาร เพราะเฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง แต่มีข้อเสียคือ มีการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ จึงต้องทำการเจาะรูที่บรรจุภัณฑ์ เพื่อช่วยระบายไอน้ำ แต่การเจาะรูทำให้บรรจุภัณฑ์เกิดการฉีกขาดได้ง่าย ขาดความสวยงามและอาจทำให้จุลินทรีย์ในอากาศสัมผัสกับผักผลไม้ได้ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเพื่อออกแบบบรรจุภัณฑ์ให้มีสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำได้โดยไม่ต้องเจาะรูที่ตัวบรรจุภัณฑ์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นันทวรรณ ม่วงมี [4] ได้ปรับปรุงความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจากการทดลองเตรียมฟิล์ม LDPE โดยมีการเติมซีโอไลต์เอ (Zeolite A) ที่มีขั้วสูงและมีสมบัติในการดูดซับน้ำที่ดี แต่การนำซีโอไลต์เอซึ่งมีขั้วมาผสมกับ LDPE ซึ่งไม่มีขั้ว ทำให้เกิดปัญหาด้านการกระจายตัวที่ไม่ดีของซีโอไลต์เอ และไม่สามารถใส่ซีโอไลต์เอได้ในปริมาณที่มาก จึงนำเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) มาผสม เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์ม LDPE เนื่องจาก EVA มีส่วนของเอทิลีนที่ผสมเข้ากันได้ดีกับ LDPE และส่วนที่มีขั้วของหมู่อะซิเตต ซึ่งสามารถเข้ากับซีโอไลต์เอได้ดีเช่นกัน จากผลการทดลองพบว่า ฟิล์ม LDPE/EVA ที่มีการเติมซีโอไลต์เอปริมาณสูงสุดที่วิจัย 25% มีค่าการซึมผ่านของไอน้ำที่สูงที่สุด ในขณะที่ฟิล์ม LDPE/EVA และฟิล์ม LDPE มีค่าการซึมผ่านของไอน้ำต่ำกว่าตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นอสัณฐานและความมีขั้วของ EVA และซีโอไลต์เอช่วยเพิ่มความสามารถการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มเป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่าสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่มีการผสม EVA และเติมซีโอไลต์เอมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์ม LDPE

จิตินันท์ ศิริจันทนันท์ [5] ได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพื่อใช้งานบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด จากการทดลองเตรียมฟิล์ม LDPE ผสมกับเอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene methyl acrylate copolymer, EMA) และซีโอไลต์เอ เนื่องจาก EMA มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า EVA ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่า EVA และ EMA มีการกระจายตัวในวิฏภาคของ LDPE ได้ดี โดย EMA ช่วยเพิ่มวิฏภาคอสัณฐานและความมีขั้วได้ดีเช่นเดียวกับ EVA จึงทำให้การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มดีขึ้น

ต่อมางานวิจัยของ นิสากร วัชระ และคณะ [6] ทำการปรับปรุงความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม โดยใช้พอลิโพรพิลีน (PP) เป็นพอลิเมอร์แทน LDPE เนื่องจาก PP มีความคงรูปที่ดีกว่าในงานวิจัยนี้ใช้ PP/EMA และซีโอไลต์เอในการเตรียมฟิล์ม พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำสูงขึ้น เมื่อมีการเติม EMA ซึ่งเป็นวิฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วในปริมาณมากขึ้น แต่การกระจายตัวของ EMA ในวิฏภาคต่อเนื่อง PP ไม่ดี เกิดจากวิฏภาคทั้งสองมีความเข้ากันต่ำ

สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของบรรจุภัณฑ์ฟิล์มที่ใช้ในการเก็บรักษาผักผลไม้สด โดยใช้ PP เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นวัสดุสำหรับทำบรรจุภัณฑ์ โดยสมบัติเด่นของ PP คือ มีความใส ไม่ติดฝุ่นง่าย ทนต่อความร้อนและสารเคมี ปลอดภัยสามารถใช้กับอาหารและยาได้ดี โดยนำมาผสมกับเอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) แทนพอลิเมอร์ EMA จากงานวิจัยก่อนหน้า เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์อสัณฐานที่มีขั้วและมีหมู่เอทิล ซึ่งเพิ่มความเกาะกั่มากกว่า EMA โดยเพิ่มความเร็วยวอบในการผสมให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของ EEA ในวิฏภาคต่อเนื่อง PP ที่ดีขึ้น ช่วยให้การซึมผ่านของไอน้ำดีขึ้น โดยทำแผ่นฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP และ EEA ด้วยกระบวนการกดอัด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของ PP/EEA ที่มีผลต่อสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PP/EEA ในอัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 45/55, 30/70, 20/80 และ 0/100 โดยน้ำหนัก
- 2) ขึ้นรูปฟิล์มในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยกระบวนการกดอัด (Compression)
- 3) ศึกษาสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
- 4) ศึกษาสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)
- 5) ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของแผ่นฟิล์มด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)
- 6) ศึกษาสมบัติพื้นผิวจากการทดสอบมุมสัมผัส ด้วยเครื่องทดสอบมุมสัมผัส
- 7) ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มในแต่ละสูตร
- 8) ศึกษาความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องทดสอบแรงกดแรงดึง (Universal testing machine, UTM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจถึงอิทธิพลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP/EEA ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม
- 2) สามารถผลิตฟิล์มที่มีสมบัติในการซึมผ่านน้ำได้ดี เพื่อนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับห่อผักและผลไม้ทางการเกษตร โดยช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้นานยิ่งขึ้น
- 3) นำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการปรับปรุงพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังเก็บเกี่ยว

ผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว เป็นผลผลิตที่ยังคงมีชีวิตอยู่ กระบวนการต่าง ๆ ที่เคยดำเนินอยู่ภายในเนื้อเยื่อของผลผลิต (Metabolic activities) ขณะที่ยังติดอยู่บนต้น ยังคงมีอยู่ต่อไป อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดกระบวนการช้าหรือเร็ว ขึ้นกับชนิดของพืชและสภาพแวดล้อม อาจจะมีกระบวนการใหม่เกิดขึ้น กระบวนการต่างๆทางสรีระและชีวเคมีที่เกิดขึ้น ภายในเนื้อเยื่อของผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว มีส่วนเกี่ยวข้องกับการสูญเสียของผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในผลผลิตก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อที่จะได้หาวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการลดหรือป้องกันความเสียหาย ของผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว [7]

การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของผลผลิต (ผักและผลไม้) ผักและผลไม้ต่างกันเป็นสิ่งมีชีวิตด้วยกันทั้งสิ้น หลังการเก็บเกี่ยวยังมีสิ่งมีชีวิตอยู่ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการต่าง ๆ ทั้งทางกายภาพและชีวเคมีตลอดเวลา ดังนั้นผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยวจะดำรงสภาพอยู่เหมือนเดิมนั้นจึงเป็นไปได้ เพราะมีทั้งปัจจัยภายในของผลผลิตเอง เช่น การหายใจ โดยหลังการเก็บเกี่ยว ผลผลิตยังคงหายใจต่อไป โดยใช้ก๊าซออกซิเจน (O_2) ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และคายความร้อนออกมา มีการคายน้ำและสูญเสียน้ำหนัก และปัจจัยภายนอกที่ส่งเสริมให้ผลผลิตนั้น ๆ เสื่อมสภาพลงได้แก่ อุณหภูมิและความชื้น [8]

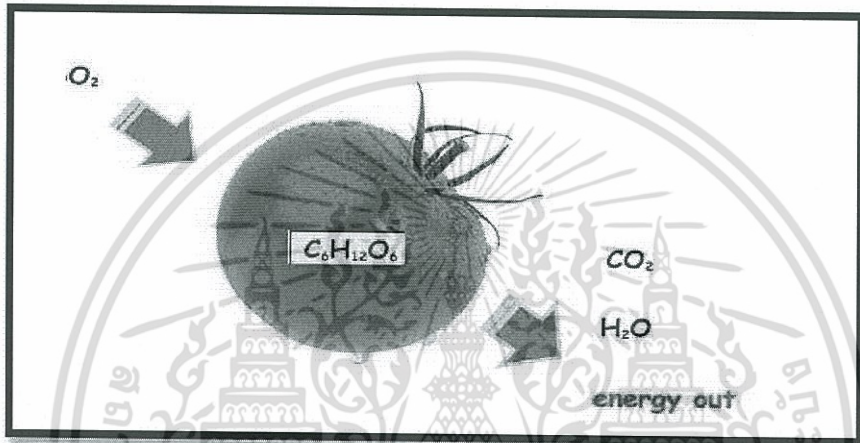
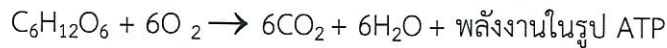
ปัจจัยภายในที่มีผลต่อการสูญเสียของผลิตผล

1. การหายใจ

การหายใจเป็นกระบวนการเผาผลาญอาหารสะสมในรูปต่าง ๆ เช่น น้ำตาลหรือแป้งไปเป็นพลังงาน ทำให้อาหารสะสมลดลง ส่งผลให้คุณภาพในการบริโภคลดลง นอกจากนั้นพลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาในระหว่างการหายใจ มีผลทำให้ผลผลิตมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเสื่อมสภาพเร็วขึ้นด้วย โดยทั่วไปผลผลิตที่เป็นส่วนของพืชที่กำลังเจริญเติบโต เช่น ยอดอ่อนของผักจะมีอัตราการหายใจสูง และผลผลิตที่อยู่ระหว่างการพักตัวมักมีอัตราการหายใจต่ำ เช่น หัวของมันชนิดต่าง ๆ ผลไม้ส่วนใหญ่มีอัตราการหายใจระดับปานกลาง แต่ผลไม้บางชนิดเมื่อสุกจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก และมีอัตราการหายใจเพิ่มมากขึ้นด้วย เช่น กัลย มะม่วง ผลไม้ประเภทนี้ มีการสูญเสียมาก และเก็บรักษาได้สั้นกว่าผลไม้ที่มีอัตราการหายใจต่ำและไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เช่น ส้ม ดังนั้นภายหลังการเก็บเกี่ยว จึงควรจัดให้ผักและผลไม้มีอัตราการหายใจต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ [9]

การหายใจของผลิตภัณฑ์มี 3 ขั้นตอน คือ

1. การย่อยคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลาย ๆ โมเลกุลให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว
 2. ขั้นตอนการเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นให้เป็นกรดไพรูวิก
 3. ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไพรูวิกและกรดอินทรีย์อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานซึ่งเกิดในการหายใจของผลิตภัณฑ์หรือสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ
- สรุปได้เป็นสมการอย่างง่ายคือ



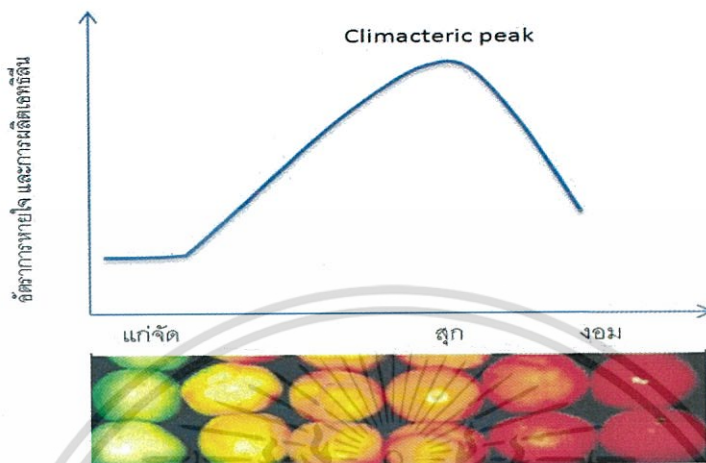
รูปที่ 2.1 การหายใจแบบใช้ออกซิเจน [10]

โดยที่การหายใจในสภาพที่มีออกซิเจนสมบูรณ์จะได้ปริมาณ ATP ต่อโมเลกุลมากกว่าการหายใจในสภาพที่มีออกซิเจนน้อยหรือไม่มีออกซิเจน [11]

รูปแบบการหายใจ (Respiratory pattern) ของผลไม้หลังเก็บเกี่ยวจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ผลที่มีรูปแบบการหายใจแบบ Climacteric และผลที่มีรูปแบบการหายใจแบบ Non-climacteric

1. Climacteric fruit หมายถึง ผลไม้ที่มีอัตราการหายใจเปลี่ยนแปลงตามอายุ นับจากที่ผลไม้แก่จัด หรือ ผลบริบูรณ์ (Maturity) อัตราการหายใจจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุด (Climacteric peak) จากนั้นอัตราการหายใจจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อผลไม้เริ่มสุกจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพภายใน เช่น มีการเปลี่ยนสีของเปลือก การเปลี่ยนแป้งให้เป็นน้ำตาล ทำให้ผลไม้สุกมีรสหวาน เนื้อนิ่ม กลิ่นหอมมากกว่าผลไม้ดิบ และผลไม้ประเภทนี้ในระยะดิบมีการสังเคราะห์เอทิลีน (Ethylene) น้อยมากแล้วกลับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะที่ผลไม้บริบูรณ์ (Mature) มีการสังเคราะห์เอทิลีน และมีอัตราการหายใจสูงสุดเมื่อผลไม้สุก (Fruit ripening) เอทิลีนมีผลเร่งให้ผลไม้สุกเร็วขึ้น ดังนั้นการควบคุมความเข้มข้นของเอทิลีนร่วมกับปัจจัยอื่น ๆ จะสามารถควบคุมระยะเวลาในการนำผลไม้ไปใช้ประโยชน์ เช่น อาจใช้ชะลอหรือเร่งให้เกิดการสุกเร็ว ผลไม้ประเภท Climacteric fruit จะต้องเก็บมา
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากต้น เมื่อผลแก่จัด แล้วจึงปล่อยให้สุกต่อ หรือบ่มให้สุกได้โดยใช้ก๊าซเอทิลีน (Ethylene) หรือใช้แคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide) จะได้ผลไม้สุกที่มีระยะเวลาการสุกสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.2 อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนเทียบกับสีของผลผลิตผล [10]

2. Non-climacteric fruit หมายถึง ผลไม้ที่มีอัตราการหายใจต่ำ ค่อย ๆ ลดลงเมื่อผลไม้อายุมากขึ้น และเมื่อผลไม้สุกอัตราการหายใจจะไม่เพิ่มขึ้น เมื่อเก็บเกี่ยวมาจากต้นแล้วจะไม่สุกต่อ และไม่สามารถบ่มให้สุกได้โดยใช้ก๊าซเอทิลีน (Ethylene) ดังนั้นควรเก็บเกี่ยวเมื่อผลสุก (Ripe) เต็มที่พร้อมบริโภค [10]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของผลไม้พวก Climacteric และ Non-climacteric [7]

Climacteric	Non-climacteric
กล้วย ท้อ สาลี่ มะละกอ สาเก พลับ ฝรั่ง น้อยหน่า ขนุน มะเขือเทศ มะเดื่อฝรั่ง ละมุด แตงโม มะม่วง แอปเปิล แอปริคอต เนคทารีน กีวีฟรุต พลัม อะโวคาโด พาสชันฟรุต แตง ลาย (Muskmelon) บลูเบอร์รี่ (Blueberry)	ส้ม พริก ทับทิม ผลมะม่วงหิมพานต์ สับปะรด แตงกวา มะเขือ ส้มเขียวหวาน องุ่น มะนาว ลิ้นจี่ ลำไย มะกอก พุทรา เซอร์รี่ โกโก้ สตรอเบอร์รี่ เกรฟฟรุต ราสป์เบอร์รี่ (Raspberry) แบลคเบอร์รี่ (Blackberry)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Climacteric [12]

ผลไม้	พันธุ์	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการหายใจ (mg. CO ₂ /kg.hr)	
			ต่ำสุด	สูงสุด
แอปเปิล	Barnley Seeding	23	10	16
อะโวคาโด	Fuerte	20	35	155
กล้วย	Gros Michel	20	20	60
มะเดื่อ	Mission	20	22	40
มะม่วง	Kent	20	15	22
ท้อ	Alberta	20	25	35
สาลี่	Bartlett	20	8	23
มะเขือเทศ	Grand Rapids	18	8	20

ตารางที่ 2.3 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Non-climacteric [12]

ผลไม้	พันธุ์	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการหายใจ (mg.CO ₂ kg.hr)	
			Non-climacteric ตลอดเวลาการแก่และสุก	
องุ่น	Vi 5061	20	15	
มะนาว	Eureka	20	5	
ส้ม	Valencia	21	13	
สับประรด	Cayenne	15	21	

2. การคายน้ำ

ผักและผลไม้ต้องคายน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อระบายความร้อนที่เกิดจากการหายใจ ประกอบกับปริมาณความชื้นภายในผลผลิตที่มีสูงกว่าความชื้นของอากาศภายนอก น้ำภายในผักและผลไม้ จึงพยายามเคลื่อนตัวออกสู่ภายนอกตลอดเวลา แม้ว่าผักและผลไม้จะมีโครงสร้างต่าง ๆ เช่น ชั้นของไข (Wax) และคอร์ก (Cork) ที่ปกคลุมผิวอยู่ เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ แต่ผักและผลไม้เหล่านั้นก็มีช่องเปิดที่ยอมให้น้ำและอากาศผ่านออกได้ เช่น ปากใบ (Stoma) และช่องอากาศ (Lenticel) รวมทั้งบาดแผลต่าง ๆ จึงทำให้มีการสูญเสียน้ำอยู่ตลอดเวลา ส่งผลให้น้ำหนักที่จะจำหน่ายและคุณภาพในการรับประทานลดลง โดยเฉพาะในแง่ของเนื้อสัมผัส (Texture) คือ ทำให้ผักและผลไม้ไม่กรอบและผิวเหี่ยวยุ่น ถ้าเป็นผลผลิตที่มีพื้นที่ผิวมาก เช่น ผักรับประทานใบ จะเห็นอาการเหี่ยวได้ในเวลาอันสั้น จึงต้องป้องกันการสูญเสียน้ำให้มากที่สุด

3. การผลิตเอทิลีน

เอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชชนิดเดียวที่มีสถานะเป็นก๊าซ ซึ่งเนื้อเยื่อพืชทุกชนิดสามารถสร้างขึ้นได้ และมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของผักและผลไม้ค่อนข้างมาก โดยปกติมีการสร้างในปริมาณน้อย แต่เมื่อผักและผลไม้สุก หรือมีการกระทบกระเทือน เช่น เกิดบาดแผล จะมีการสร้างสารเอทิลีนขึ้นอย่างมาก และไปกระตุ้นกระบวนการต่างๆ ให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น การสุก การเปลี่ยนสีเขียวเป็นสีเหลือง การหลุดร่วงของดอกและใบ และเร่งให้มีการหายใจมากขึ้น นอกจากนี้ เอทิลีนยังอาจเกิดขึ้นได้จากการเผาไหม้ ที่ไม่สมบูรณ์ เช่น การเผาขยะ การจุดธูป การทำงานของเครื่องยนต์ต่าง ๆ ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และพบสะสมอยู่ใต้พื้นดินหรือมหาสมุทร ซึ่งก๊าซเอทิลีนนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับผักและผลไม้ได้เช่นกัน ภายหลังการเก็บเกี่ยว จึงต้องป้องกันไม่ให้ผักและผลไม้ผลิตสารเอทิลีนออกมา และไม่ให้สัมผัสกับก๊าซเอทิลีนจากภายนอก ยกเว้นในกรณีที่ต้องการบ่มผลไม้ให้สุก [9]

ปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อการสูญเสียของผลผลิต

1. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิสูงมีผลในการเร่งกระบวนการต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการหายใจ การคายน้ำ การผลิตเอทิลีน การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี การเจริญเติบโตและพัฒนาตลอดจนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้ผลิตผลเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วส่งผลให้อายุการเก็บรักษาสั้น ในขณะที่อุณหภูมิต่ำให้ผลตรงข้ามกัน ดังนั้นการเก็บรักษาจึงต้องใช้อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่ต้องไม่ต่ำจนเกินไปเพราะในบางกรณีอุณหภูมิต่ำก็อาจก่อให้เกิดอันตราย โดยเฉพาะกับผลิตผลในเขตร้อนอาจเกิดอาการผิดปกติที่เรียกว่าอาการสะท้านหนาว (Chilling injury) นอกจากนี้อุณหภูมียังมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนผลิตผล และปริมาณความชื้นของอากาศรอบผลิตผลด้วย

2. ความชื้นสัมพัทธ์

ในอากาศมีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่เสมอ แต่ส่วนใหญ่จะเกิดการสูญเสียอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ปริมาณไอน้ำในอากาศหรือความชื้นสัมพัทธ์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นส่วนสำคัญ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอากาศจะรับไอน้ำจะรับไอน้ำได้มากขึ้น (ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลง) ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิต่ำลงอากาศรับน้ำได้น้อยลง (ความชื้นสัมพัทธ์สูง) ดังนั้นนอกจากอุณหภูมิต่ำจะช่วยลดการเสื่อมสภาพของผลิตผลแล้วยังช่วยลดการสูญเสียด้วย นอกจากนี้การสูญเสียน้ำออกจากผลิตผลยังขึ้นอยู่กับการเคลื่อนไหวของอากาศ ผลิตผลที่เก็บรักษาภายในสภาพที่บรรยากาศที่มีการเคลื่อนไหวน้อยจะสูญเสียไอน้ำน้อยกว่าในสภาพที่มีอากาศเคลื่อนไหวมาก ทั้งนี้เพราะการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากผลิตผลเป็นกระบวนการแพร่กระจายจากที่ๆมีความเข้มข้นของน้ำสูงไปยังที่ ๆ มีความเข้มข้นของน้ำต่ำ การเคลื่อนที่ของน้ำจึงเกิดค่อนข้างช้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. บรรยากาศ

ออกซิเจนในบรรยากาศเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการหายใจและการสร้างเอทิลีนในพืช ถ้าความเข้มข้นของออกซิเจนลดต่ำลง จะทำให้ทั้งอัตราการหายใจและการสร้างเอทิลีนลดลง ส่งผลให้การเสื่อมสภาพของผลิตผลหลังเก็บเกี่ยวเกิดช้าลงด้วย สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ได้จากการหายใจ ถ้ามีการสะสมมากในสภาพแวดล้อมของการเก็บรักษา จะทำให้ทั้งการหายใจและการผลิตเอทิลีนลดต่ำลงและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลออกไป อย่างไรก็ตามถ้าปริมาณก๊าซออกซิเจนลดลงต่ำเกินไป (น้อยกว่า 5-10%) หรือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศสูงมากเกินไป (มากกว่า 10-15%) จะกระตุ้นให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน หรือเกิดกระบวนการหมักขึ้นในผักและผลไม้ ทำให้เกิดการสะสมแอลกอฮอล์และมีผลให้ผักและผลไม้มีกลิ่นรสผิดปกติ และตายในที่สุด ส่วนก๊าซเอทิลีนที่พืชสร้างขึ้น ถ้าไม่กำจัดออกไปจากสภาพแวดล้อมที่เก็บรักษาผลิตผลจะกระตุ้นให้ผักและผลไม้เสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็ว [13]

2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้

ฟิล์มสำหรับบรรจุภัณฑ์ ที่ใช้ในการบรรจุในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด ชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ขึ้นกับการนำไปใช้ในงานต่าง ๆ ที่นิยมใช้มีหลายชนิด เช่น

- พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นฟิล์มที่ยอมให้ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่าน ป้องกันการผ่านของไอน้ำได้
- พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) มีลักษณะโปร่งใสมากกว่า LDPE สามารถใช้ทำเป็นถุงและทำเป็นถาดได้ และยังสามารถใช้ความร้อนในการปิดผนึกได้
- พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC) ฟิล์มประเภทนี้สามารถให้ไอน้ำและก๊าซผ่านไปได้ นิยมใช้กันมากในการปิดด้านบนของถาดโฟมที่ใช้ใส่ผลิตผลสด แต่ฟิล์มชนิดนี้ไม่เหมาะกับการทำถุง
- Rubber Hydrochloride หรือ Pliofilm เป็นฟิล์มที่มีความแข็งแรงมาก ใช้เป็นถุงที่บรรจุผักและผลไม้ที่มีน้ำหนักมาก อากาศและความชื้นผ่านได้ยากมาก ถ้าใช้จะต้องมีการเจาะรูเพื่อระบายอากาศและความชื้น ป้องกันการผ่านของไอน้ำได้ดี
- เซลโลเฟน (Cellophane) มีใช้กันอยู่หลายชนิด อาจใช้เป็นด้านบนปิดถาดโฟม ทำเป็นถุง มีลักษณะโปร่งแสง ไม่สามารถทำให้ติดกันด้วยความร้อนได้ และที่ยอมให้ความชื้นผ่านได้

ในปัจจุบันมีการใช้พลาสติกในการห่อผลิตผลสดมากขึ้น โดยแผ่นพลาสติกจะช่วยให้เกิดการป้องกัน และรักษาผลิตผลให้อยู่ได้นาน โดยทั่วไปแผ่นพลาสติกจะช่วยให้เกิดสภาพแวดล้อมรอบ ๆ ผลิตผล (Microclimate) เหมาะสมต่อการเก็บรักษา ซึ่งต้องคำนึงถึงสมบัติด้านการซึมผ่าน

สมบัติด้านการซึมผ่านของฟิล์มขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผลิต พอลิเมอร์ที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline) ในส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือส่วนผลึก (Crystalline) จะเป็นส่วนที่ไม่ยอมให้ก๊าซ หรือไอน้ำซึมผ่าน ส่วนที่เป็นเอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อสัณฐาน (Amorphous) สายโซ่พอลิเมอร์จะอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้ว (Glass transition temperature) การเคลื่อนที่จะถูกจำกัด ปริมาตรอิสระ (Free volume) จะถูกจำกัดเช่นกัน แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว สายโซ่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระมากขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอิสระ การเปลี่ยนแปลงนี้มีความสำคัญมากต่อความสามารถของโมเลกุลที่จะแพร่ผ่านวัสดุ

ความแตกต่างของความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของพอลิเมอร์

1. ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการซึมผ่านก๊าซ
2. ความสามารถในการเคลื่อนที่ ๆ ต่างกันของสายโซ่พอลิเมอร์
3. อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ต่อการละลายได้ของก๊าซในส่วนที่เป็นอสัณฐานของสายโซ่พอลิเมอร์

ความสามารถในการซึมผ่านจะลดลง ถ้าส่วนของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่วนการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์โดยการยืด (Stretching) फिल्मเป็นการเพิ่มปริมาณความเป็นผลึก ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านลดลง [14]

- อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

การเลือกวัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์จากค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ต้องระมัดระวังปัญหาที่เกิดจากหยดน้ำภายในภาชนะบรรจุและปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันไอน้ำได้ดีช่วยลดปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่มักเกิดปัญหาหยดน้ำภายในภาชนะ และในทางกลับกันวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้ไอน้ำผ่านได้มักเกิดปัญหาผลิตภัณฑ์แห้งเพราะสูญเสียความชื้น การแก้ไขปัญหาอาจทำได้โดยการเติมสารป้องกันการเกิดหยดน้ำ (Antifogging agent) ในฟิล์มพลาสติกหรือการเจาะรูเล็ก ๆ เพื่อช่วยระบายไอน้ำบางส่วนออกจากภาชนะ [12]

ตารางที่ 2.4 ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ [15]

ชนิดของพลาสติก	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (g. 25 μ m/m ² .day ที่ 38°C, 90%RH)
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)	16 –20
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	80 –500
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	4.7
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	16 –24
พอลิพรอพิลีน (PP)	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การซึมผ่านของก๊าซ

การกำหนดการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) เพื่อเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิดคือ ชนิดของผลิตภัณฑ์ อายุการเก็บรักษาและสภาวะการเก็บรักษา โดยทั่วไปเมื่อต้องการใช้วัสดุที่ป้องกันก๊าซได้ดีมาก ควรเลือกวัสดุที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่เกิน $2 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ ส่วนวัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านก๊าซดีพอควรจะมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่เกิน $20\text{-}30 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ สำหรับผักและผลไม้ที่ต้องใช้วัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านก๊าซได้ดี ควรมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่เกิน $2000 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ [12]

ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ [16]

ชนิดของพลาสติก	ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ($\text{cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$)	ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($\text{cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$)
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)	52 – 130	180 – 390
พอลิสไตรีน (PS)	10,000 – 260,000	2,600 – 7,700
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	620 – 2,248	4,263 – 8,138
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	3,900 – 13,000	7,000 – 77,000
พอลิพรอพิลีน (PP)	1,300 – 6,400	7,700 – 21,000

2.3 บรรจุภัณฑ์ยืดอายุ

บรรจุภัณฑ์ยืดอายุ (Active Packaging) เป็นนวัตกรรมการควบคุมองค์ประกอบของบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งโดยมากใช้สารประกอบเคมี ที่มีสมบัติพิเศษในการดูดหรือคายก๊าซบางชนิด ได้แก่ สารดูดออกซิเจน สารดูดเอทิลีน สารดูดกลิ่น สารควบคุมความชื้น สารคายคาร์บอนไดออกไซด์ หรือสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ให้มีความเหมาะสมตามความต้องการของอาหารหรือ ผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เพื่อยืดอายุและรักษาคุณภาพ

ประเภทของบรรจุภัณฑ์ยืดอายุ

การพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสามารถแบ่งตามลักษณะเทคโนโลยีได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. Sachet-based technology คือ การใช้สารดูดหรือคายก๊าซ โดยบรรจุในซองเล็ก ๆ (Sachet) และ Sachet จะถูกใส่เพิ่มในภาชนะบรรจุหลักของอาหาร ซึ่งใช้งานแพร่หลายในอาหารอบแห้งต่าง ๆ ขนมเค้ก หรือเนยแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Plastic packaging as media คือ การผสมสารดูดหรือคายก๊าซในพลาสติกหรือฟิล์มที่เป็นบรรจุภัณฑ์โดยตรง ได้แก่ ฟิล์มที่มีสารผสมเพื่อยับยั้งหรือทำลายเชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรียในอาหาร หรือการใช้ฟิล์มพลาสติกผสมด้วยสารดูดออกซิเจนเป็นซีล (Seal) อยู่ในฝาปิดด้านในของฝาขวดเปียร์ [17]

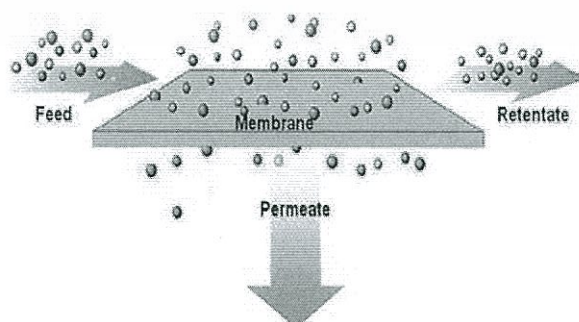
ตารางที่ 2.6 การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์แอคทีฟให้เหมาะกับอาหารที่ต้องการบรรจุ [17]

ประเภทของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ	ประโยชน์การใช้งาน
ดูดหรือลดปริมาณออกซิเจน	อาหารทั่วไป และอาหารที่ผ่านการอบ
เพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์	อาหารที่เกิดราได้ง่าย
ควบคุมความชื้น	ผลิตผลจากพืชสวน และอาหารแห้ง
ดูดหรือลดเอทิลีน	ผลิตผลจากพืชสวน
เพิ่มเอทานอล	อาหารที่ผ่านการอบ

2.4 เทคโนโลยีการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน

2.4.1 หลักการแยกด้วยเมมเบรน [18-19]

เมมเบรน (Membrane) คือ เยื่อแผ่นสังเคราะห์บาง ๆ ของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ที่ทำให้เกิดการแยกสารออกจากกัน อาจอยู่ในรูปก๊าซกับของเหลว ของแข็งกับของเหลว หรือของเหลวกับของเหลว หลักการของกระบวนการเมมเบรนที่ใช้แรงดันเป็นแรงขับเคลื่อน คือสารละลายที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลเล็กจะผ่านเมมเบรนโดยอาศัยแรงดันขับ เคลื่อนสารเนื่องจากความต่างของความดันระหว่างเมมเบรน (Transmembrane pressure, TMP) ส่วนตัวถูกละลายจะถูกเมมเบรนกักไว้เรียกว่า “รีเทนเตท (Retentate)” หรือ “สารละลายเข้มข้น (Concentrate)” ส่วนตัวทำละลายและถูกละลายบางส่วนที่ประกอบด้วยสารขนาดเล็กที่ผ่านเมมเบรนไปได้เรียกว่า “เพอมีเอท (Permeate)” ซึ่งส่วนที่ต้องการนำไปใช้ประโยชน์อาจเป็นส่วนรีเทนเตทหรือเพอมีเอทได้



รูปที่ 2.3 หลักการแยกด้วยเมมเบรน [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

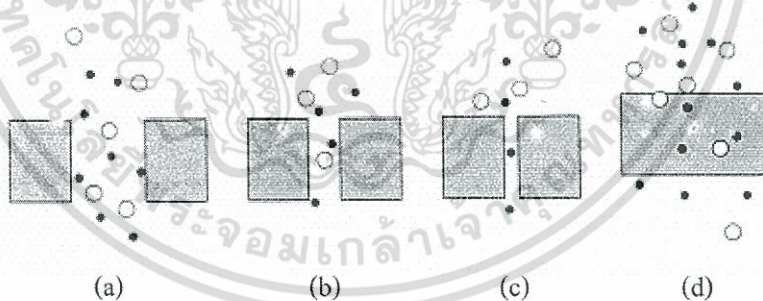
2.4.2 กระบวนการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน [18-19]

กระบวนการแยกของผสมโดยใช้เมมเบรนที่แตกต่างจากกระบวนการอื่น ๆ แบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้

1. กลไกของก๊าซดิฟฟิวชัน (Gas diffusion)

การแยกก๊าซโดยใช้เยื่อแผ่นรูพรุน ความแตกต่างของศักย์เคมีภายในเมมเบรน (Chemical potential gradient) ทำหน้าที่เป็นแรงผลักดัน โดยศักย์เคมีอาจอยู่ในรูปของความเข้มข้น ความดันย่อย สนามไฟฟ้า หรืออุณหภูมิ แบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

- ถ้ารูพรุนของเมมเบรนใหญ่กว่าโมเลกุลของก๊าซมาก โมเลกุลของก๊าซภายใต้ความดันสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนโดยการพามวล ทำให้โมเลกุลของก๊าซทุกชนิดผ่านเมมเบรนได้เท่า ๆ กัน และจะไม่เกิดการแยก
- ถ้ารูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กกว่าระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ได้โดยไม่ชนกัน โมเลกุลจะเคลื่อนที่ผ่านรูด้วยกลไก Knudsen diffusion โดยจะชนกับผนังมากกว่าที่จะชนกันเอง จากกลไกดังกล่าวทำให้ก๊าซที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะแพร่ผ่านเมมเบรนได้เร็วกว่าก๊าซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้เกิดการแยกขึ้น
- รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กมาก ทำให้ก๊าซที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้จึงเกิดการแยกขึ้น และเรียกกลไกนี้ว่าการคัดขนาด หรือ molecular sieving



รูปที่ 2.4 กลไกของก๊าซดิฟฟิวชัน (Gas diffusion) (a) รูพรุนของเมมเบรนใหญ่กว่าโมเลกุลของก๊าซ (b) รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กกว่าระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลของก๊าซ (c) รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กมาก (d) กลไกการซีมผ่านของก๊าซ [19]

2. กลไกการซีมผ่านของก๊าซ (Gas permeation)

กลไกการซีมผ่านของก๊าซเป็นการแยกก๊าซโดยเมมเบรนเนื้อแน่น (Dense membrane) โดยใช้แรงขับเคลื่อนในการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน สามารถอธิบายด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ (Solution-diffusion mechanism) กล่าวคือสารที่ต้องการแยกหรือเพอมีเอทต้องละลายเข้าไปในเมมเบรนก่อน แล้วซีมผ่านโดยใช้แรงขับเคลื่อนจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร (Concentration gradient) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสารที่ละลายในเนื้อเมมเบรนสามารถเกิดการแพร่จากตำแหน่งที่มีความเข้มข้นสูงไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ความสามารถในการคัดกรองแยกสารเกิดจากความแตกต่างของความสามารถในการละลายของสารและความเร็วในการซึมผ่านของสารเข้าไปในเนื้อเมมเบรนแต่ละชนิด ทำให้สารแต่ละชนิดมีการซึมผ่านเมมเบรนได้ต่างกัน ซึ่งหลักการนี้ต้องอยู่ภายใต้สมมติฐานต่อไปนี้

- ที่ผิวสัมผัสของสารละลายกับผิวหน้าเมมเบรนของทั้ง 2 ด้านของเมมเบรน ต้องอยู่ในสภาวะสมดุล
- ศักย์ทางเคมีของสารละลายที่ซึมผ่านเมมเบรนต้องต่อเนื่อง เป็นการบ่งบอกถึงการดูดซึมที่ผิวหน้าเมมเบรนสูงกว่าอัตราการซึมผ่านของสารภายในเนื้อวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน
- ความดันที่ใช้ทั้งสองข้างของเมมเบรนคงที่ อัตราการซึมผ่านของสารแต่ละชนิดผ่านเมมเบรนขึ้นอยู่กับความต่างของความเข้มข้น ถ้าความเข้มข้นสูงทำให้อัตราการซึมผ่านเมมเบรนสูง และความหนามีผลกับระยะเวลาในการซึมผ่านถ้าความหนาของเมมเบรนน้อยทำให้การซึมผ่านเร็วขึ้น

2.4.3 วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน [20]

เมมเบรนส่วนใหญ่ทำการผลิตมาจากสารอินทรีย์ที่ทำจากพอลิเมอร์ มีดังนี้

- เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เป็นพลาสติกที่มีจุดหลอมเหลว และมีจุดอ่อนตัว มีโครงสร้างแบบสายยาวหรือแบบกิ่ง เทอร์โมพลาสติกจะเกิดการอ่อนตัวและหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน และจะแข็งตัวเมื่อทำให้เย็นลงดังกล่าวสามารถเกิดกลับไปกลับมาได้โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ หรือโครงสร้างของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงมากนัก
- เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) เป็นพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษ คือทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี คงรูปหลังการผ่านความร้อนหรือแรงดันเพียงครั้งเดียว เมื่อเย็นลงจะแข็งมาก ทนความร้อนและความดัน ไม่อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างไม่ได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงก็จะแตกและไหม้เป็นขี้เถ้าสีดำ พลาสติกประเภทนี้โมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหจับกันแน่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมาก จึงไม่สามารถนำมาหลอมเหลวได้
- พอลิเมอร์คล้ายยาง (Rubber polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียว ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูง และสามารถทนต่อการรับแรงกระแทก

ลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์มีผลต่อสมบัติของเมมเบรนที่เตรียมได้ ด้านเสถียรภาพทางเคมี ทางความร้อน (Chemical and thermal stability) ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) ค่าการซึมผ่าน/การเลือกผ่านของเมมเบรน (Membrane permeability /selectivity) และค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรน (Membrane electrical conductivity) ดังนั้นจึงต้องเลือกชนิดของพอลิเมอร์ให้มีสมบัติเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้

2.5 พอลิโพรพิลีน [21-22]

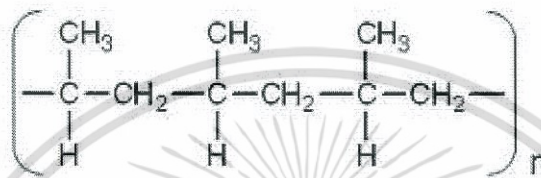
ลักษณะทั่วไปของพอลิโพรพิลีน (PP)

ชื่อทางเคมี (Chemical Name) : poly(1-methylethylene)

ชื่อพ้อง (Synonyms) : Polypropylene, Polipropene 25 [USAN],
Propylene polymers, 1-Propene homopolymer

สูตรเคมีคือ : $(C_3H_6)_n$

โครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure)



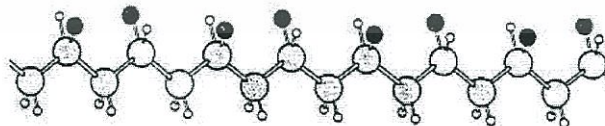
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ PP [23]

พอลิโพรพิลีน เป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน เป็นของแข็ง ไม่มีสี มีทั้งโปร่งใสและโปร่งแสง ผิวเป็นมันเงา ทนกรด เบส และสารเคมีต่าง ๆ ยกเว้นไฮโดรคาร์บอนและคลอรีเนเทต ไฮโดรคาร์บอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน ได้แก่

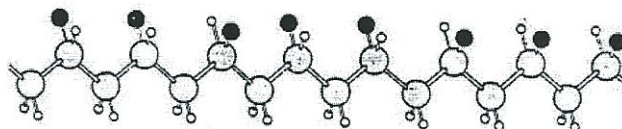
1. Isotactic



2. Syndiotactic



3. Atactic



รูปที่ 2.6 ประเภทตามโครงสร้างทางเคมีของ PP [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิโพรพิลีนชนิด Isotactic นำมาผลิตเป็นพลาสติกใช้อยู่โดยทั่วไป เนื่องจากโครงสร้างมีการจัดเรียงของหมู่เมทิลอยู่ด้านเดียวกันอย่างเป็นระเบียบจึงมีความเป็นผลึกสูง ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรง ทนทาน ชนิด Atactic ที่จะมีความเหนียวมากกว่าเนื่องจากหมู่เมทิลมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ส่วนชนิด Syndiotactic หมู่เมทิลจัดเรียงตรงข้ามกันมีความแข็งแรงน้อยกว่า แต่จะทนทานมากกว่าชนิด Isotactic [22]

สมบัติของพอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกมีสมบัติโปร่งแสง ต้านทานสารเคมี ต้านทานความร้อน และต้านทานความล้าได้ดี

ตารางที่ 2.7 สมบัติของ PP

สมบัติ	PP	หน่วย
ค่าความหนาแน่น	905	Kg/m ³
ค่ามอดุลัส (Modulus)	1.4	GPa
ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	33	MPa
ค่าความแข็งแรงกด (Hardness)	90	Rockwell "R" Scale
ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)	150-300	%
ค่าทนแรงกระแทก (Notched Izod Impact)	0.07	kJ/m ¹
ค่าดรรชนีออกซิเจน (Volume Resistivity)	17	%

ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิโพรพิลีน

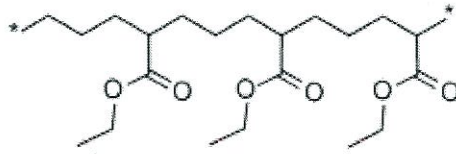
ผลิตภัณฑ์ที่พบเสมอคือ ก่อของของเด็ก โคมไฟ เต็ม พรม แผ่นรองพรม ผ้าใบกันน้ำ เชือก สายรัดบรรจุภัณฑ์ ถังร้อน ปลอกหุ้มสายไฟและสายเคเบิล งานเคลือบกระดาษ ก่อบรรจุอาหาร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กระจองน้ำมันเครื่องกระสอบข้าว และถุงบรรจุปุ๋ย ภาชนะที่ทำจาก PP ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติก ได้รับการจำแนกชนิดของพลาสติก เพื่อนำกลับไปเวียนทำใหม่ (Recycle) มีสัญลักษณ์เป็นเลข 5 ซึ่งหมายถึง Resin Identification Code 5

2.6 เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ [24-25]

ลักษณะทั่วไปของเอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EEA)

เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับเอทิลอะคริเลต (Ethyl acrylate, EA) โดยทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันผ่านกลไกอนุกรมอิสระ ในเครื่องปฏิกรณ์พอลิ-เอทิลีนเอทิลอะคริเลตที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอทิลีนความดันสูง (High pressure polyethylene reactor) โดยเอทิลอะคริเลตเป็นส่วนที่ให้ความมีขั้วและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ เมื่อเพิ่มปริมาณ EA จะทำให้ EEA มีขั้ว ความยืดหยุ่น ความเหนียว และความหยุ่นตัว (Resilient) ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความมีขั้วที่มากขึ้นของ EEA ช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติดและการรับหมึกของพื้นผิว



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ EEA [25]

ตารางที่ 2.8 สมบัติบางประการของ EEA

สมบัติ	EEA	หน่วย
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	0.93	-
มอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus)	28-52	MPa
ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)	11-14	MPa
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	700-750	%
ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) โดยชั้นงานไม่มีรอยบากหนา 1/8 นิ้ว	450-550	v/mil
ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption)	0.04	% โดยน้ำหนัก
ค่าความแข็งแรงกด (Hardness) Shore D	27.38	-

การประยุกต์ใช้งาน

EEA เข้ากันได้ดีกับพอลิโอเลฟิน เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (VLDPE), LDPE, LLDPE, HDPE และ PP เป็นต้น ซึ่งสามารถขึ้นรูปด้วยเทคนิคอัดรีด (Extrusion), กระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) EEA มีการประยุกต์ใช้งานหลาย ๆ ด้าน เช่น ใช้เป็นชั้นยึดติด (Tie layer) ในฟิล์มแบบหลายชั้น (Multilayer films), วัสดุยาแนวรอยต่อ (Sealants) และกาวแบบหลอมขณะร้อน (Hot-melt adhesive)

2.7 พอลิเมอร์ผสม [26-27]

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เป็นการผสมพอลิเมอร์โดยอาจจะผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติที่ไม่สามารถได้จากพอลิเมอร์ชนิดเดียว ซึ่งพอลิเมอร์ผสมมีประโยชน์หลายประการด้วยกันคือ

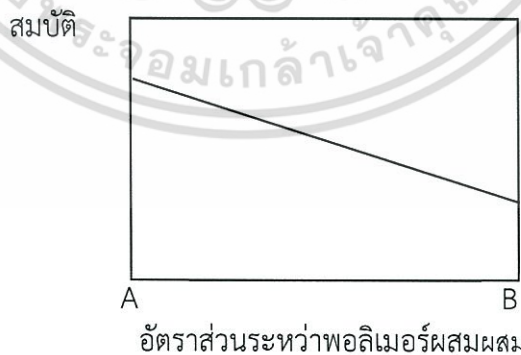
- หลีกเลี่ยงปัญหาของความยุ่งยากจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์ใหม่
- ไม่ต้องลงทุนผลิตพอลิเมอร์ใหม่เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง
- สามารถนำพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นแต่ละชนิดมาผสมกัน เช่นการทำพอลิเมอร์ผสมของ

เทอร์โมพลาสติกซึ่งมีความเปราะ และมีความทนทานแรงกระแทกได้สูง กับอีลาสโตเมอร์ซึ่งไม่เปราะ แต่มีความแข็งแรงต่ำ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ใหม่ที่มีสมบัติรวมของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม

ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม คือ ความเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์สองชนิดหรือมากกว่าในระดับโมเลกุล โดยไม่แสดงการแยกตัวเมื่อทำการผสม ซึ่งความเข้ากันได้จะขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ มวลโมเลกุล สัดส่วนของพอลิเมอร์ที่มาผสมกัน และสภาวะของการผสมโดยขึ้นกับวิธีการผสม อุณหภูมิ และเวลา

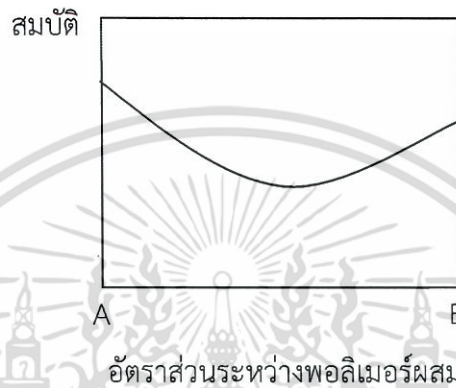
พอลิเมอร์ผสมแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ (Miscible blend) หมายถึง พอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter) ใกล้เคียงกัน เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นวัฏภาคเดียวกัน สมบัติจะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมทั้งสองในพอลิเมอร์ผสม ทำให้กราฟที่ได้เป็นเส้นตรงหรืออย่างน้อยที่สุดเป็นเส้นโค้งสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเข้ากันได้ (Miscible blend)

2. พอลิเมอร์ที่ไม่ผสมเข้ากัน (Immiscible blend) หมายถึง พอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นบ่งชี้ความสามารถในการละลายต่างกัน ทำให้พอลิเมอร์สองชนิดไม่ผสมเข้ากันได้ และแยกออกเป็นแต่ละวัฏภาคโดยแต่ละวัฏภาคจะมีการดึงดูดกันเพียงเล็กน้อย ทำให้เกิดบริเวณที่อ่อนแอด้วยเหตุนี้ จึงเกิดการเสียหายได้แม้ในกรณีที่มีความเค้นต่ำมาก ๆ ทั้งทางกล ทางความร้อน และทางเคมี จากนั้นสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะลดต่ำลงมากกว่าพอลิเมอร์แต่ละตัวที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีไม่ผสมเข้ากันได้ (Immiscible blend)

การทำให้เข้ากันได้ (Compatibilisation) [6]

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียว ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีข้อบกพร่องดังนี้

- มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคที่ไม่ดี
- มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค (Interfacial tension) สูง
- มีสัณฐานวิทยา (Morphology) ที่ไม่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

1. Non-reactive Blending คือการเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการผสมแล้ว ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสูตรโครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม

2. Reactive Blending เป็นวิธีการที่ไม่มีการแยกขั้นตอนของการเติมสารช่วยผสม เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสม

สารช่วยผสมสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการคือ

- โครงสร้าง พบว่าสารช่วยผสมที่มีโครงสร้างต่างกัน เป็นผลให้มีจำนวนครั้งของการเชื่อมโยงระหว่างภูมิภาคต่างกัน
- น้ำหนักโมเลกุล โดยสารผสมควรมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับหรือมากกว่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์หลักที่นำมาผสม เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพันที่มีประสิทธิภาพ

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Marais และคณะ [28] ได้ศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจนของแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนโคไวนิลอะซิเตต (EVA) ซึ่งมีปริมาณไวนิลอะซิเตตที่แตกต่างกัน นำมาหล่อแบบสารละลาย (Casting solution) พบว่าเมื่อปริมาณของไวนิลอะซิเตตเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซึมไอน้ำของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มหมู่ที่มีขั้วของคาร์บอนิลกรุป จากนั้นได้ทำการผสมพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) กับพอลิเอทิลีนโคไวนิลอะซิเตต จากการศึกษาเมื่อเทียบกับปริมาณไวนิลอะซิเตตพบว่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากหมู่ที่มีขั้วได้เข้าไปสร้างพันธะกับพอลิไวนิลคลอไรด์ สรุปได้ว่าไวนิลอะซิเตตเป็นตัวแปรสำคัญในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเพราะไปเพิ่มความเป็นอสัณฐานให้กับฟิล์มทำให้ความเป็นผลึกลดลง ส่งผลให้การซึมผ่านไอน้ำดีขึ้น

F.A.K.Hamim และคณะ [29] ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดรีไซเคิล (RHDPE) ผสมกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA) และผลจากอัตราส่วนผสม และความเข้ากันได้ โดยผสม RHDPE กับ EVA ด้วยเครื่องผสมบราเบนเดอร์ พลาสติกออร์เดอร์ (Brabender Plastic order) ที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วการผสม 50 rpm เป็นเวลา 10 นาที นำพอลิเมอร์ผสม RHDPE/EVA มาตอกลงด้วยพอลิเอทิลีนกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MAH) และคาโพรแล็ก-แทมมาลิกแอนไฮไดรด์ (CL-MAH) ผลจากการศึกษาพบว่าสมบัติความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และมอดุลัส จะลดลงเมื่ออัตราส่วนของ EVA เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของ EVA มีความเป็นอสัณฐานซึ่งขัดขวางการจัดเรียงสายโซ่ของ RHDPE จึงทำให้ความเป็นผลึกลดลง แต่ค่าการดึงยึด ณ จุดขาดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของ EVA

S.A. Mousavi และคณะ [30] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการซึมผ่านก๊าซ (Gas permeation) ของฟิล์ม PE และฟิล์ม EVA ที่มีปริมาณไวนิลอะซิเตต (VA) เท่ากับ 18 และ 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์ม PE จะทำให้การซึมผ่านของก๊าซลดลง แต่มีการแพร่ของก๊าซ (Gas diffusivity) ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบการซึมผ่านก๊าซ CO₂ กับ O₂ พบว่าก๊าซ CO₂ มีความสามารถในการซึมผ่านมากกว่าก๊าซ O₂ เนื่องจากว่าก๊าซ CO₂ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางจลนศาสตร์ (Kinetic diameter) ที่เล็กกว่า และจากการศึกษาฟิล์ม EVA พบว่าการซึมผ่านของก๊าซ CO₂ มีค่ามากขึ้น เมื่อปริมาณของ VA เพิ่มขึ้นเนื่องจาก VA เป็นหมู่ที่มีขั้วทำให้ส่งผ่านก๊าซ CO₂ ที่มีขั้วได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นันทวรรณ ม่วงมี [4] ทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVA และ ซีโอไลต์เอ นำมาผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน คือ 100/0, 85/25, 80/20 และ 75/25 โดยใช้ซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติม 0-25% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปขึ้นรูป โดยกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยใช้อุณหภูมิที่บริเวณหัวตาย 170 °C จากการศึกษาพบว่าการกระจายตัวของซีโอไลต์เอเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ ดีกว่าฟิล์มที่มีการผสม LDPE, EVA และซีโอไลต์เอพร้อมกัน เมื่อ EVA ซึ่งมีสมบัติคล้ายยาง ทำให้เกิดความยืดหยุ่นมากมีปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และยังมีมอดุลัสมีแนวโน้มลดลง ในทางเดียวกันกับเมื่อเติมซีโอไลต์เอเพิ่มมากขึ้น เกิดแรงกระทำระหว่างซีโอไลต์เอกับวัฏภาค EVA ที่พื้นผิวเท่านั้นทำให้การยึดเกาะไม่ดี ส่งผลให้การรับแรงดึงลดลงและขาดง่ายขึ้น นอกจากนี้พบว่า การเติมซีโอไลต์เอและ EVA ในปริมาณสูง ทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) สูงด้วย

ฐิตินันท์ ศิริจันท์ [5] ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA/ซีโอไลต์เอ เพื่อใช้งานบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด ทำการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด ในอัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 และขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดจาก การศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA มีการกระจายตัวของ EMA ที่ดี ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและค่ายังมีมอดุลัสลดลงเมื่อปริมาณEMA ที่เป็นวัฏภาคอสัณฐานเพิ่มขึ้นส่วนค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) มีค่ามากขึ้นตามปริมาณ EMA ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก EMA เป็นวัฏภาคอสัณฐานที่มีขี้ ทำให้ไอน้ำชอบที่จะมาเกาะและซึมผ่านฟิล์มมากขึ้น การศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ โดยควบคุมให้ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้ให้ใกล้เคียงกัน พบว่า โคอพอลิเมอร์ทุกตัว (เอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (EMA), เอทิลีนเอทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (EEA), เอทิลีนวินิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ผลจากการเติมซีโอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก พบว่าซีโอไลต์ที่เติมไปมีการกระจายตัวดีในวัฏภาคที่มีขี้ของเอทิลีนโคพอลิเมอร์ โดยฟิล์มที่เติมหรือไม่เติมซีโอไลต์มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากที่ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาค่า WVP พบว่าฟิล์มที่เติมซีโอไลต์เอมีค่าสูงขึ้น เพราะซีโอไลต์เอมีขี้และมีช่องว่างในโครงสร้างมาก ทำให้น้ำเข้าไปแทนที่ในช่องว่างและซึมผ่านออกไป และจากการทดสอบการใช้ฟิล์มเพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสดพบว่า ฟิล์มสูตร L80M20Z20 สามารถระบายไอน้ำที่เกิดจากการหายใจของพริก ออกมาได้มากกว่าสูตรอื่น

A. Lasagaba'ster และคณะ [31] งานวิจัยนี้ศึกษาการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มผสม PP/EVOH โดยอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม PP/EVOH ได้แก่ 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 เมื่อศึกษาฐานฐาน วิทยาพบว่า EVOH มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีรูพรุนบริเวณผิวของฟิล์ม PP/EVOH เมื่อปริมาณของ EVOH เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากความเป็นผลึกที่แตกต่างกัน ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการซึมผ่านไอน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของน้ำที่แทรกในฟิล์มมีค่ามากขึ้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงเป็นผลมาจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลของ EVOH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิสากร วัชร และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาปรับปรุงความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิโพรพิลีน (PP) ด้วยเอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (EMA) มีซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติม โดยศึกษาอัตราส่วนผสมพอลิเมอร์ผสม PP/EMA เป็น 100/0, 90/10, 82/20, 70/30, 60/40, 55/45, และ 50/50 โดยการนำ PP/EMA มาผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด และทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด จากนั้นนำมาทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณ EMA ทำให้วัฏภาคของ EMA มีการกระจายที่ดี (Good distribution) ในวัฏภาคต่อเนื่องของ PP แต่มีการกระจายตัวที่ไม่ดี (Poor dispersion) เนื่องจากทั้งสองวัฏภาคมีความเข้ากันได้ต่ำ EMA จึงไม่รบกวนการเกิดผลึกของ PP ในพอลิเมอร์ผสม สมบัติเชิงกลการเพิ่มปริมาณ EMA ทำให้ฟิล์มมีค่าความแข็งแรงดึงและค่า Young's Modulus ลดลง เนื่องจาก EMA มีโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานสูงและยืดหยุ่นคล้ายยาง และผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้นเมื่อเติม EMA ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ลดลง จากการศึกษาผลของการมีอยู่ของซีโอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก (PP50MA50Z20) พบว่าซีโอไลต์เอส่วนใหญ่มีการกระจายตัวที่ดีในวัฏภาคที่มีซีโอไลต์เอ ทำให้คุณสมบัติการหลอมผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP ในสูตรที่เติมซีโอไลต์เอมีค่าใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่เติมซีโอไลต์เอ นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงดึง, Young's Modulus และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของสูตรที่เติมซีโอไลต์เอมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์เอ และการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PP50MA50Z20 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีซีโอไลต์เอ

A.E. Bishara และ H.I. Shaban [32] ทำการศึกษสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA ในอัตราส่วน 75/25 w/w ทำการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) พบว่าเมื่อเติม EEA ใน PP ความเสถียรภาพทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PP จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัว (Initial degradation temperature, IDT) และพบว่าความหนืดขณะหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบกว้างของ PP เมื่อเติม EMA ที่มีความหนืดสูงใน PP ทำให้ความหนืดขณะหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความแข็งแรงดึงที่จุดคราก และ Young's Modulus มีค่าลดลง แต่ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก EMA เป็นวัฏภาคที่นิ่ม และเป็นอสัณฐาน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของบรรจุภัณฑ์ฟิล์มที่ใช้ในการเก็บรักษาผักผลไม้สด เพื่อยืดอายุของผลผลิตสดและรักษาคุณภาพให้คงเดิมหลังจากการเก็บเกี่ยว โดยใช้ PP เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นวัสดุสำหรับทำบรรจุภัณฑ์ โดยสมบัติเด่นของ PP คือมีความใส ไม่ติดฝุ่นง่าย ทนต่อความร้อนและสารเคมี ปลอดภัย สามารถใช้กับอาหารและยาได้ดี โดยนำมาผสมกับเอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) แทนพอลิเมอร์ EMA จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีความกะทัดรัดมากกว่าและความไม่สมมาตรของโครงสร้าง ทำให้มีความเป็นอสัณฐานสูง EMA โดยเพิ่มความเร็วรอบในการผสมให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของ EEA ในวัฏภาคต่อเนื่อง PP ที่ดีขึ้น ช่วยให้การซึมผ่านของไอน้ำดีขึ้น เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของ PP/EEA ที่มีผลต่อสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) PP1125NA จากบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน)

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ PP

สมบัติ	PP	หน่วย
ดรรรชนีการไหล (Melt flow rate) (2.16 kg/230°C)	11.2	g/10min
Tensile Strength at Yield	36	MPa
Elongation at Yield	25	%

2. เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene ethyl acrylate copolymer, EEA) เกรด AMPLIFY™ EA 101 จาก Dow Chemical (Thailand) Co.,Ltd.

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ EEA

สมบัติ	EEA	หน่วย
ดรรรชนีการไหล (Melt flow rate) (2.16 kg/190°C)	6.0	g/10min
ความหนาแน่น (Density)	0.931	g/cm ³
ร้อยละการแทนที่ของหมู่เอทิลอะคริเลต (%Ethyl Acrylate)	18.5	%wt

หมายเหตุ ข้อมูลจากตารางที่ 3.1 และ 3.2 เป็นข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3. เอทานอล (Ethanol) เกรดการค้า
4. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N₂)
5. โทลูอีน (Toluene) เกรดการค้า
6. ก๊าซฮีเลียม (Helium gas) ความบริสุทธิ์อย่างน้อย 99.9% จากบริษัท ไทยอินดัสเตรียล

แก๊ส จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer, รุ่น PL 2000/PL 2001; C. Melchers Co., Ltd.)
2. เครื่องบดพลาสติก
3. เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding machine, รุ่น LP 20; Lab tech engineering Co., Ltd.)
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM รุ่น EVO[®]MA10; Carl Zeiss Co., Ltd.)
5. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC, รุ่น DSC7; PerkinElmer Co., Ltd.)
6. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR รุ่น Becthai spectrum Gx; PerkinElmer Co., Ltd)
7. เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle system, รุ่น OCA20; Dataphysic Co., Ltd.)
8. เครื่องทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ (เครื่องประกอบ Home-made)
9. เครื่องโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, รุ่น TCDZ-NIFED; Fortune scientific Co., Ltd.)
10. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM รุ่น LR 5K; LLOYD Instrument Co., Ltd.)
11. เครื่องชั่งละเอียด
12. ไมโครมิเตอร์
13. คีม
14. ตู้อบลมร้อน
15. กระบอกใสไนโตรเจน
16. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว
17. อ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner, รุ่น 136H; Densply neytech Co., Ltd.)
18. แผ่นใสชนิดถ่ายเอกสาร
19. ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม

เตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตร เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนผสม โดยทำการผสมดังตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 พอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมดโดยน้ำหนัก

สูตร	ปริมาณสาร (% โดยน้ำหนัก)		ปริมาณสาร (กรัม)	
	PP	EEA	PP	EEA
PP100EA0	100	-	40	-
PP90EA10	90	10	36	4
PP80EA20	80	20	32	8
PP70EA30	70	30	28	12
PP60EA40	60	40	24	16
PP50EA50	50	50	20	20
PP45EA55	45	55	18	22
PP30EA70	30	70	12	28
PP20EA80	20	80	8	32
PP0EA100	-	100	-	40

การเตรียมพอลิเมอร์ผสม PP/EEA

ซึ่งส่วนผสมของ PP และ EEA ให้ได้ตามอัตราส่วนตามตารางที่ 3.3 ขยำเพื่อให้เกิดการผสมของเม็ดพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด จากนั้นทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- ปริมาณสารรวม 300 g
- อุณหภูมิ 210°C
- ความเร็วรอบ 80 rpm
- เวลาในการผสม 15 min

จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาบดให้เป็นชิ้นเล็กละเอียด เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมสำหรับการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีกดอัดต่อไป

3.4 การเตรียมแผ่นฟิล์ม

การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการกดอัด

นำพอลิเมอร์ผสมที่บดละเอียด มาทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการกดอัด โดยกดอัด 2 รอบต่อฟิล์ม 1 แผ่น (เนื่องจากการกดอัดเพียงครั้งเดียวไม่สามารถทำให้ได้แผ่นฟิล์มที่บางและความหนาสม่ำเสมอได้) โดยใช้สภาวะของเครื่องดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกดอัดครั้งที่ 1 ใช้กรอบโลหะหนา 2 mm เพื่อให้แผ่นฟิล์มมีความหนาที่ 2 mm

- อุณหภูมิในการกดอัด 200°C
- อุณหภูมิในการหล่อเย็น 14-18°C
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์ 7 min
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์ 10 min
- เวลาในการกดอัด 7 min
- เวลาในการหล่อเย็น 7 min
- ความดันในการกดอัด 1500 psi

การกดอัดครั้งที่ 2 เพื่อให้แผ่นฟิล์มที่มีความหนา 2 mm เป็นฟิล์มที่มีความหนา 30-60 μm

- อุณหภูมิในการกดอัด 200°C
- อุณหภูมิในการหล่อเย็น 14-18°C
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์ 5 min
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์ 8 min
- เวลาในการกดอัด 5 min
- เวลาในการหล่อเย็น 5 min
- ความดันในการกดอัด 1500 psi

3.5 การศึกษาการกระจายตัวของ EEA

นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ได้จากวิธีกดอัดมาตัดให้มีขนาด $1 \times 3 \text{ cm}^3$ แฉ่ฟิล์มในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานเย็น นำแผ่นฟิล์มที่หักแล้วมาแช่ในตัวทำละลายโทลูอีน ปริมาตร 25 มิลลิลิตรในขวดรูปชมพู่ เขย่าภายในอ่างอัตราไซคลิกควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อสกัด EEA ออกจากชิ้นงาน ทำการอบแผ่นฟิล์มในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นฟิล์มไปเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำพื้นที่ตัดขวางไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของ EEA ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.6 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึกและปริมาณผลึก

ทำการตรวจสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกด้วยเครื่อง DSC โดยทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 2 ครั้งที่อุณหภูมิในช่วง 50-220°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน ความเย็น 10°C ต่อนาที ในบรรยากาศไนโตรเจน (N_2) น้ำหนักตัวอย่าง 5-10 มิลลิกรัม นำข้อมูลที่ได้มาหาค่า T_m , T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ ตามมาตรฐาน ASTM E794 [33] นำค่า Heat of fusion (ΔH_f) มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสามารถหาได้จากสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\Delta H_f) (J/g) = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (J)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (g)}} \quad (3.1)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^\circ} \times \frac{100}{(\% \text{ โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่มีอยู่จริง})} \quad (3.2)$$

เมื่อ ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

ΔH_f° คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PP ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่า 207 J/g และของ EEA (ใช้ค่าของ PE) ที่มีค่าเท่ากับ 293 J/g [34]

3.7 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

นำแผ่นฟิล์มที่เตรียมมาทำการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) โดยใช้ Transmission mode ในช่วงเลขคลื่น 400 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1} จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นอัตราส่วนระหว่าง Absorbance ของพีค C=O Stretching ที่ 1734 cm^{-1} กับพีค Absorbance ของ $-\text{CH}_2$ Bending ที่ 1463 cm^{-1}

3.8 การทดสอบมุมสัมผัส

นำพอลิเมอร์ผสมมาทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดโดยใช้แม่พิมพ์ขนาด $40 \times 40 \times 6 \text{ mm}^3$ และใช้สภาวะในเครื่องกดอัดดังนี้

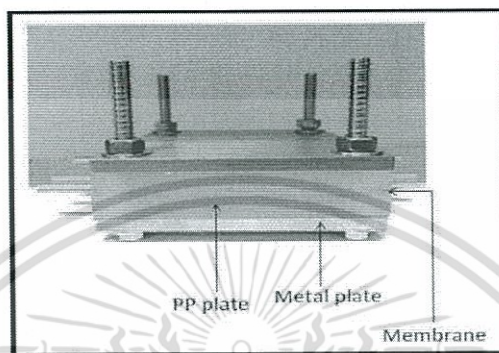
- อุณหภูมิการกดอัด	220°C
- อุณหภูมิในการหล่อเย็น	14-18°C
- ความดันในการกดอัด	2400 psi
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์	7 min
- เวลาในการอุ่นในการอุ่นพอลิเมอร์	7 min
- เวลาในการกดอัด	15 min
- เวลาในการหล่อเย็น	15 min

จากนั้นตัดชิ้นงานเพื่อทดสอบบริเวณพื้นที่ผิวตัดขวางของชิ้นงาน ใช้ปริมาณหยดน้ำ $2 \mu\text{L}$ ทำการบันทึกค่ามุมสัมผัสเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที วัดมุมที่หยดน้ำกระทำกับผิววัสดุ ตามมาตรฐาน ASTM D5946 [35] ด้วยเครื่อง Contact angle system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

นำฟิล์มขนาด $6 \times 6 \text{ cm}^2$ ใส่ในเซลล์เมมเบรนที่มีพื้นที่การซึมผ่านของก๊าซ $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ซึ่งเป็นแผ่นพลาสติก 2 ชั้นประกบกัน และประกบแผ่นโลหะอีก 1 ชั้น ดังรูปที่ 3.1 โดยส่วนประกอบทั้งหมดถูกยึดไว้ด้วยสกรูที่มุมทั้ง 4 ซึ่งส่วนประกอบนี้เรียกว่า เซลล์เมมเบรน (Membrane cell) การทดสอบการซึมผ่านก๊าซไอน้ำทำตามลำดับขั้นตอนดังนี้ [36]



รูปที่ 3.1 เซลล์เมมเบรน [36]

1. ปรับอัตราการไหลของก๊าซ

อัตราการไหล (Flow rate) ของสารป้อน (Feed, ไอน้ำ) ถูกควบคุมด้วยโรตاميเตอร์ (Rotameter) และก๊าซพา (Carrier gas, ก๊าซฮีเลียม) ถูกควบคุมด้วยเครื่องวัดอัตราการไหล (Mass flow controller) ให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 30 ml/min

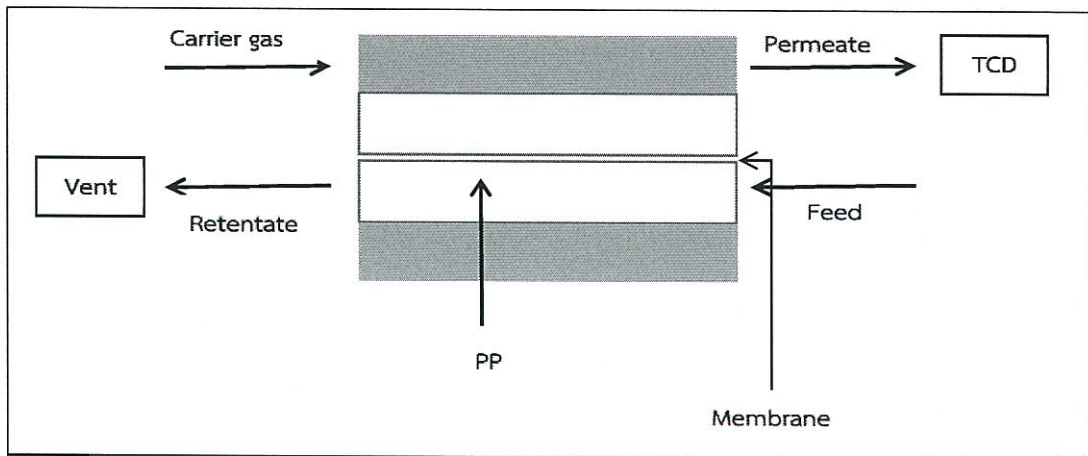
2. ปรับความดันของก๊าซ

วัดความดันของก๊าซที่ไหลเข้าสู่เครื่อง TCD (Thermal conductivity detector) โดยตรงโดยไม่ผ่าน Cell membrane และผ่าน Cell membrane (ฝั่ง Permeate) ด้วย U-tube โดยวัดความแตกต่างของระดับน้ำ เมื่อก๊าซไหลผ่าน โดยความดันของก๊าซที่ผ่านและไม่ผ่าน Cell membrane ต้องมีความดันเท่ากัน จากนั้นวัดความดันของก๊าซฝั่ง Feed และปรับ Needle valve ให้มีความแตกต่างของระดับน้ำใน U-tube ให้มีค่าเท่ากับฝั่ง Permeate เพื่อเป็นการปรับความดันขาเข้า-ออกให้เท่ากัน

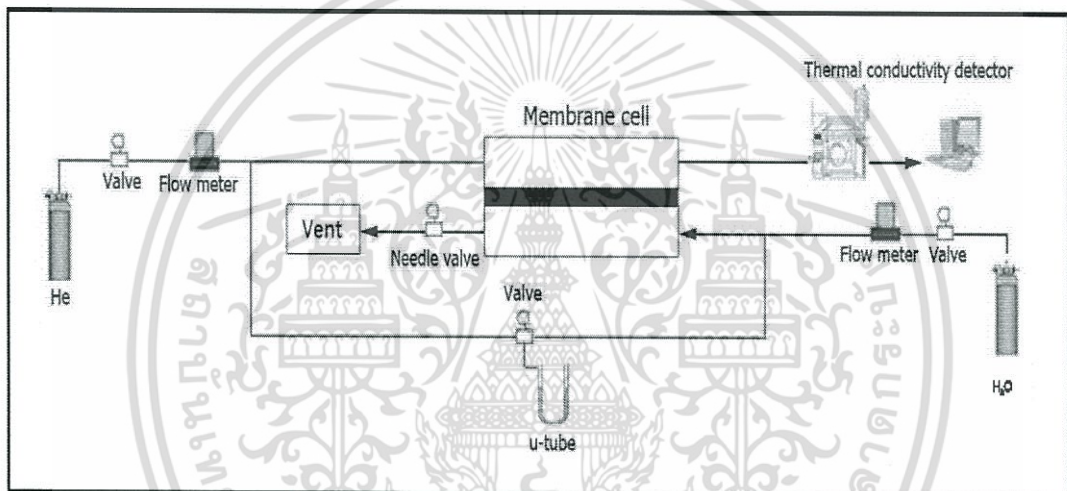
3. การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง

นำเซลล์เมมเบรนมาทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ โดยก๊าซไอน้ำไหลเข้าทางแผ่นพลาสติกด้านล่าง ในขณะที่ก๊าซฮีเลียมไหลเข้าทางแผ่นพลาสติกด้านบนของเซลล์เมมเบรน ซึ่งทิศทางการไหลของสารป้อนและก๊าซพาไหลในทิศทางตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เมื่อสารป้อนไหลผ่านฟิล์มก๊าซบางส่วนซึมผ่านฟิล์มในเซลล์เมมเบรนไปยังฝั่งเพอร์มิเอต โดยมีก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซพาเข้าสู่เครื่อง TCD เพื่อตรวจวัดค่าการซึมผ่าน (Permeability) สำหรับก๊าซที่ไม่สามารถซึมผ่านไปได้ ไหลสู่ช่องระบายทิ้ง (Vent) [36] ดังแสดงในรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ



รูปที่ 3.3 แผนภาพแบบทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ [36]

การซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มที่ทดสอบสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟ TCD ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.3)

$$\text{อัตราเร็วการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR)} = J / A_F \quad (3.3)$$

เมื่อ J = อัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่อเวลา (ml/min)

A_F = พื้นที่ของฟิล์มตัวอย่าง (m^2)

สารป้อนที่ไหลเข้าสู่ระบบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

$$J = 10^{-3} \times CE \times F_x \quad (3.4)$$

เมื่อ CE = ความเข้มข้นของไอน้ำที่ซึมผ่าน (ppm)

F_x = อัตราการไหลของก๊าซ (ml/min)

ความเข้มข้นของไอน้ำที่ซึมผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.5)

$$CE = CS \times (AE / AS) \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ CS = ความเข้มข้นของไอ้ น้ำมาตรฐาน (ppm)

AE = พื้นที่ใต้กราฟของไอ้ น้ำที่ซึมผ่าน (V.s)

AS = พื้นที่ของไอ้ น้ำมาตรฐาน

$$\text{การซึมผ่านของไอ้ น้ำ (WVP)} = \frac{J \times \Delta x}{A} \quad (3.6)$$

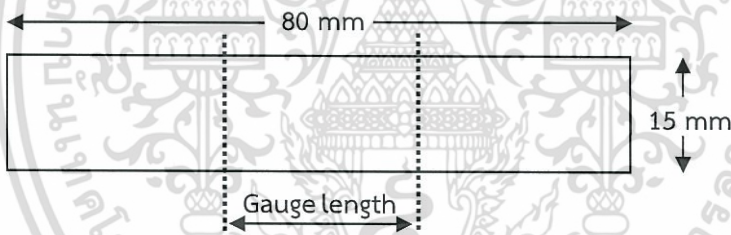
เมื่อ Δx = ความหนาของฟิล์ม

3.10 การศึกษาสมบัติเชิงกล

3.10.1 สมบัติการรับแรงดึง

การทดสอบการรับแรงดึงเพื่อหาความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break) ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่า Young's modulus ตามมาตรฐาน ASTM D882 [37] โดยใช้เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ ใช้สภาวะในการทดสอบดังนี้

- โหลดเซลล์ 1 kN
- ความเร็วในการดึง 100 mm/min
- ระยะในการจับชิ้นงาน (Gauge length) 25 mm



รูปที่ 3.4 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่าง

ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด , ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และค่า Young's modulus สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)} = F_{\text{at break}}/A \quad (3.6)$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ $F_{at\ break}$ = แรงดึงยึดชิ้นงาน ณ จุดขาด
 A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง
 $l_{at\ break}$ = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด
 l_0 = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 25 mm
- หมายเหตุ ค่ายังมอดุลัสคำนวณที่ความเครียด 0.5 และ 0.9%

3.10.2 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด

การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาดเพื่อศึกษาความแข็งแรงของฟิล์ม ตามมาตรฐาน ASTM D1938 [38] โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ใช้สภาวะในการทดสอบดังนี้

- โหลดเซลล์ 1 kN
- ความเร็วในการดึง 100 mm/min



รูปที่ 3.5 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่าง

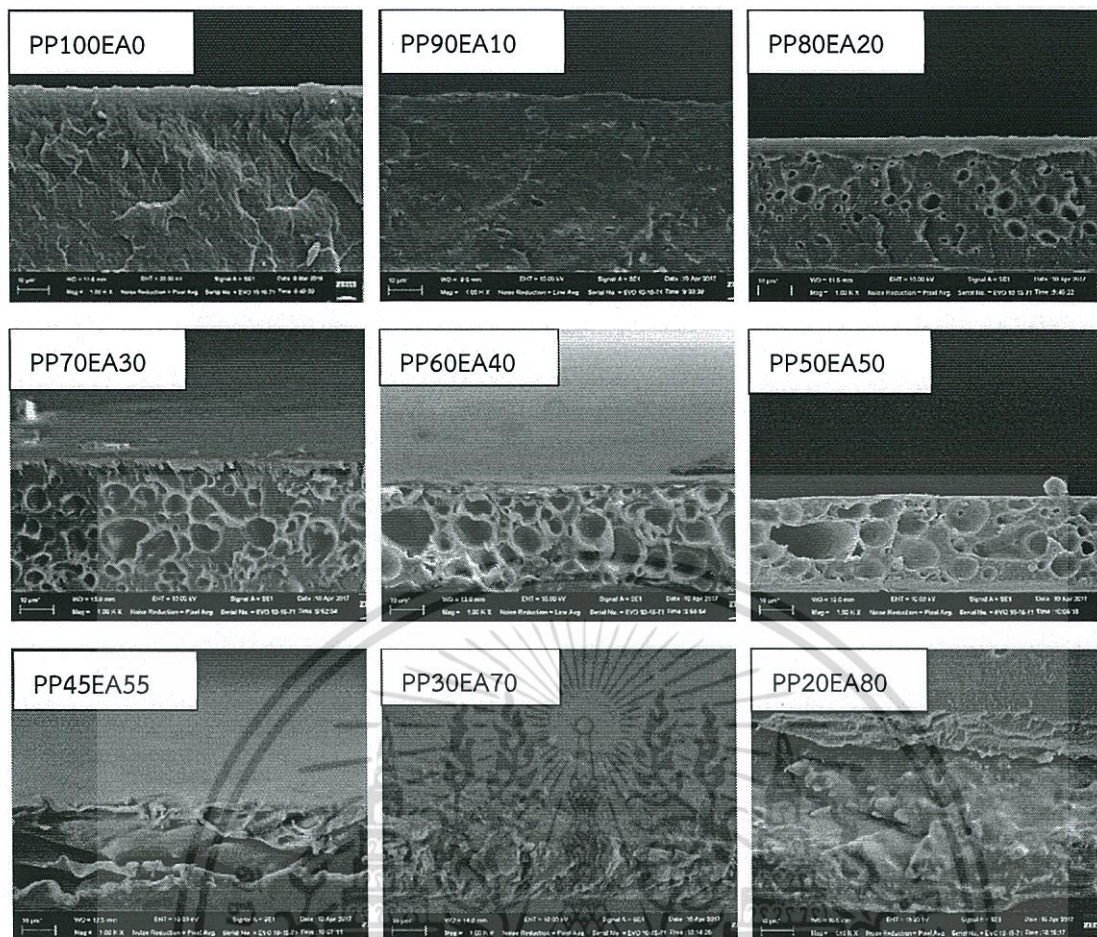
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

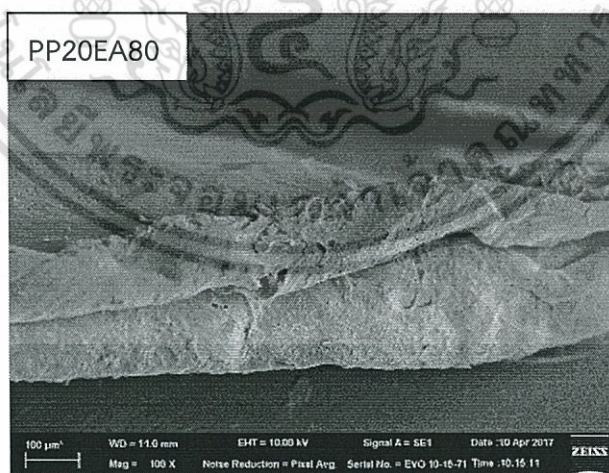
งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิโพรพิลีน (PP) โดยนำมาผสมกับเอทิลีนเอทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) เพื่อยืดอายุของผลิตภัณฑ์ผลผลิตและรักษาคุณภาพให้คงเดิมหลังจากการเก็บเกี่ยวโดยศึกษาอัตราส่วนที่แตกต่างกันของฟิล์ม PP/EEA โดยผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PP/EEA

ฟิล์ม PP/EEA เป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) เห็นได้จากการแบ่งส่วนของวัฏภาคต่อเนื่อง (Matrix, Continuous phase) และวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) [26] เมื่อนำฟิล์มไปสกัดวัฏภาคของ EEA ด้วยตัวทำละลายโทลูอีน จากรูปที่ 4.1 แสดงสัณฐานวิทยาภาพตัดขวางของฟิล์มในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่สกัด EEA ออกที่กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่าฟิล์ม PP (PP100EA0) มีผิวเรียบและไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น แสดงว่าไม่มีการละลายออกของ PP ในตัวทำละลายโทลูอีน เนื่องจาก PP เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกที่ไม่มีขั้ว และไม่สามารถละลายในตัวทำละลายใด ๆ ที่อุณหภูมิห้อง [22] และอุณหภูมิในการสกัดที่ 40°C จากภาพจะเห็น EEA ที่กระจายตัวมีลักษณะเป็นทรงกลม (Spherical shape) โดยจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณ EEA เพิ่มขึ้น จนถึงฟิล์ม PP45EA55 วัฏภาคของ EEA มีความต่อเนื่องมากขึ้น เนื่องจากวัฏภาคกระจายที่มีปริมาณมากขึ้น ทำให้รูปร่างทรงกลมเกิดการรวมกัน และเมื่อเพิ่มปริมาณ EEA มากขึ้นจะเกิดการสลับวัฏภาคโดย EEA กลายเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง จากการสังเกตพบว่าฟิล์ม PP30EA70 และ PP20EA80 หลังจากสกัดฟิล์มมีลักษณะทั้งที่เป็นแผ่นบางและแผ่นยุ่ย แต่นำชิ้นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางมาส่อง SEM ซึ่ง EEA ในแผ่นอาจจะถูกสกัดออกไม่หมด จากภาพจึงเห็นเนื้อฟิล์มที่มีลักษณะขรุขระและมีรูเกิดขึ้นที่พื้นผิว นอกจากนี้รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์ม PP20EA80 ที่กำลังขยาย 100 เท่า วัฏภาคของ EEA มีมากจนฟิล์มหลังการสกัดมีความนิ่ม ทำให้เกิดการม้วนตัวของฟิล์มขึ้น



รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาภาพตัดขวางของฟิล์ม PP/EEA ในอัตราส่วนต่าง ๆ หลังสกัดด้วยตัวทำละลายโทลูอินที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาภาพตัดขวางของฟิล์ม PP20EA80 หลังสกัดด้วยตัวทำละลายโทลูอินที่กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก

การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค DSC ตรวจสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m), อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และค่าพื้นที่ใต้กราฟของอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (ΔH) (เทอร์โมแกรมในภาคผนวก ข) เพื่อนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP และ EEA ในฟิล์ม PP/EEA ในอัตราส่วนต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่า T_m , T_c และความเป็นผลึกของ PP ในฟิล์ม PP/EEA

สูตร	T_m (°C)	T_c (°C)	ความเป็นผลึก (%)
PP100EA0	163.3	118.0	48.5
PP90EA10	160.6	116.7	47.5
PP80EA20	159.8	116.0	48.7
PP70EA30	159.5	116.0	50.1
PP60EA40	159.3	114.1	52.5
PP50EA50	157.5	114.1	53.7
PP45EA55	158.0	113.8	48.7
PP30EA70	158.7	114.3	39.7
PP20EA80	162.9	114.7	38.6
PP0EA100	-	-	-

ตารางที่ 4.2 ค่า T_m , T_c และความเป็นผลึกของ EEA ในฟิล์ม PP/EEA

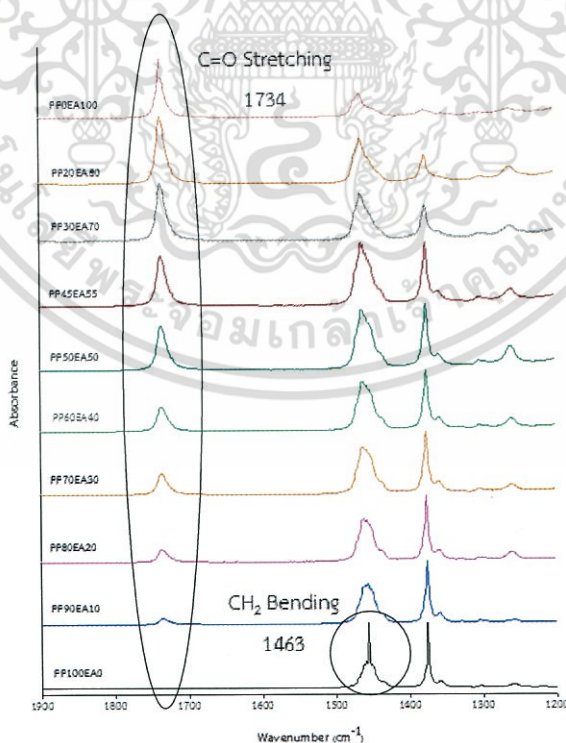
สูตร	T_m (°C)	T_c (°C)	ความเป็นผลึก (%)
PP100EA0	-	-	-
PP90EA10	94.3	81.9	3.4
PP80EA20	97.6	81.8	5.9
PP70EA30	98.9	82.0	3.8
PP60EA40	97.7	82.0	5.2
PP50EA50	97.6	82.2	4.9
PP45EA55	97.7	82.6	5.0
PP30EA70	99.4	83.6	11.6
PP20EA80	99.6	83.6	12.8
PP0EA100	99.9	80.1	6.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบพบว่า T_m และ T_c ของ PP และ EEA ในฟิล์มพอลิเมอร์เดี่ยวและในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะพอลิเมอร์ผสมคู่นี้เป็น Immiscible blend [26] พบว่าในฟิล์มที่มี PP เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (อัตราส่วนของ PP มากกว่าร้อยละ 45) เเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP ใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 50 โดยประมาณ) จนกระทั่ง EEA กลายเป็นวัฏภาคต่อเนื่องแทน PP (EEA มากกว่าร้อยละ 55) เเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP มีค่าลดลง เพราะมีความต่อเนื่องของวัฏภาค PP ลดลง ส่วนเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ EEA ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรถือได้ว่าอยู่ในช่วงต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 12) เนื่องจาก EEA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความกะกาะและความไม่สมมาตรของโครงสร้าง [25] ทำให้มีความเป็นอสัณฐานสูง และแสดงให้เห็นว่าปริมาณของ EEA ที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความเป็นอสัณฐานเพิ่มขึ้น

4.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันในฟิล์ม PP/EEA

การตรวจสอบปริมาณหมู่ฟังก์ชันในฟิล์ม PP/EEA โดยขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มแล้วนำไปทดสอบโดยใช้เทคนิค FTIR จากรูปที่ 4.3 แสดง FTIR Spectra ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ แสดงให้เห็นพีคของ C=O Stretching ที่ 1734 cm^{-1} ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ EEA มีความเข้มของการดูดกลืนตามปริมาณของ EEA ที่เพิ่มขึ้น และพีค -CH_2 Bending ที่ 1463 cm^{-1} เป็นองค์ประกอบของทั้ง PP และ EEA



รูปที่ 4.3 FTIR Spectra ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

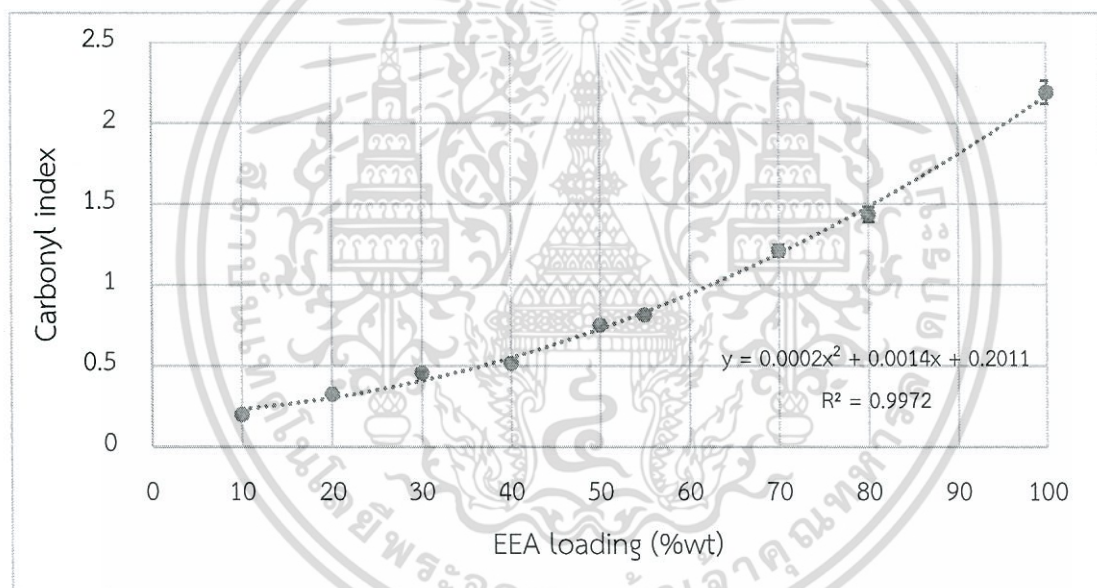
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในฟิล์มแต่ละสูตรโดยใช้การคำนวณจากค่าดัชนีคาร์บอนิลแสดงดังสมการที่ 4.1

$$\text{ดัชนีคาร์บอนิล} = \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C=O Stretching ที่ } 1734\text{cm}^{-1}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ } -\text{CH}_2 \text{ Bending ที่ } 1463 \text{ cm}^{-1}} \quad (4.1)$$

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าดัชนีคาร์บอนิลของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA จะพบว่าเมื่อปริมาณของ EEA เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีคาร์บอนิลมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณ EEA ที่ผสมในแต่ละสูตร

จากสมการของกราฟไม่เป็นสมการเชิงเส้น เนื่องจากหมู่เมทิลีนใน PP และ EEA ไม่เท่ากัน ทำให้ค่าดูดกลืนแสงของหมู่ $-\text{CH}_2$ Bending ในแต่ละฟิล์มมีค่าไม่คงที่ อย่างไรก็ตามพีค $-\text{CH}_2$ Bending เป็นตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด



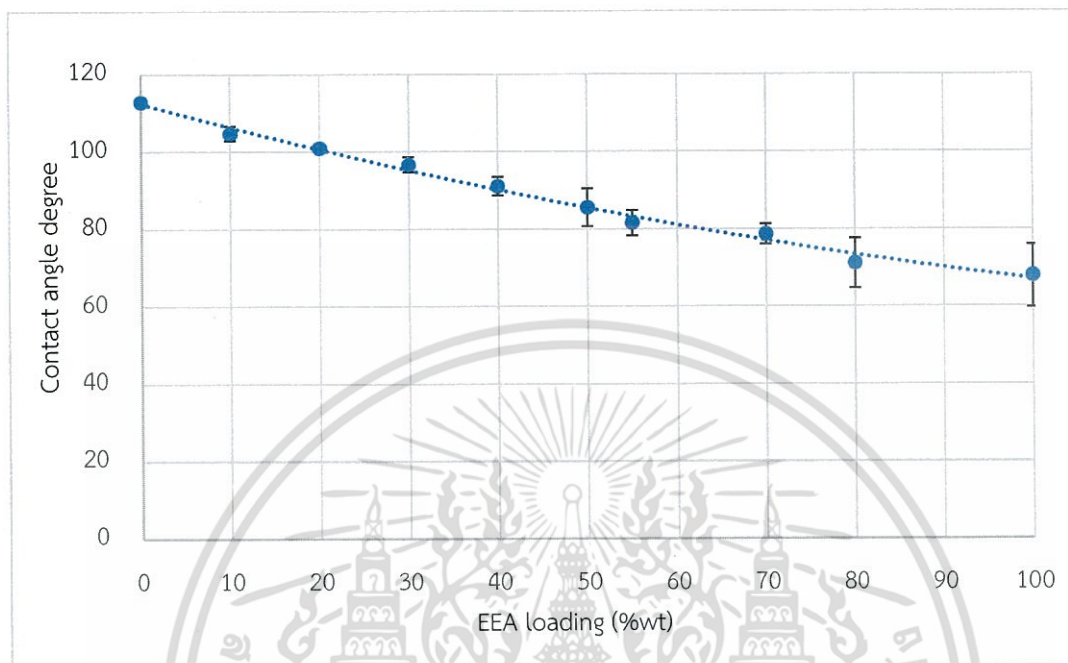
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าดัชนีคาร์บอนิลกับปริมาณ EEA ที่เพิ่มขึ้นของฟิล์ม PP/EEA

4.4 การทดสอบวัดมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA

การวัดมุมสัมผัสเป็นการวัดเพื่อทดสอบความมีขี้ของพอลิเมอร์ผสมทางอ้อม โดยการวัดมุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิวหน้าตัดขวางของชิ้นงาน เพื่อวัดความสามารถในการเปียกผิว (Wettability) ของชิ้นงาน ซึ่งหากค่ามุมสัมผัสที่วัดได้มีค่าต่ำแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานนั้นมีความสามารถในการเปียกผิวหรือชอบน้ำได้ดีกว่าชิ้นงานที่มีค่ามุมสัมผัสสูง ผลการทดสอบการวัดมุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิวหน้าตัดขวางของชิ้นงานสูตรต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีปริมาณ EEA เพิ่มขึ้นจะมีค่ามุมสัมผัสของน้ำลดลง เนื่องจาก EEA มีหมู่ EA (Ethyl acrylate) [26] ทำให้มีขี้มากกว่า PP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

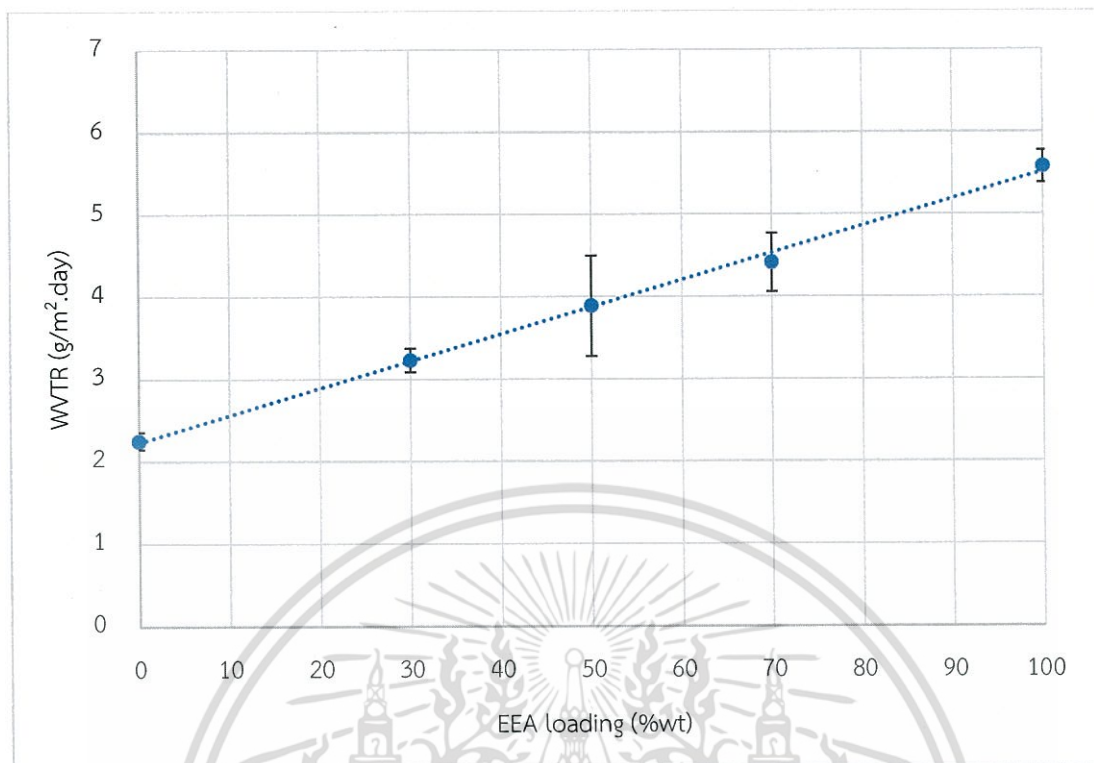
สูตรที่มีปริมาณ EEA สูง จึงมีค่ามุมสัมผัสที่วัดได้ลดลงสอดคล้องกับผลการวัดค่าดัชนีคาร์บอนิลที่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของ EEA



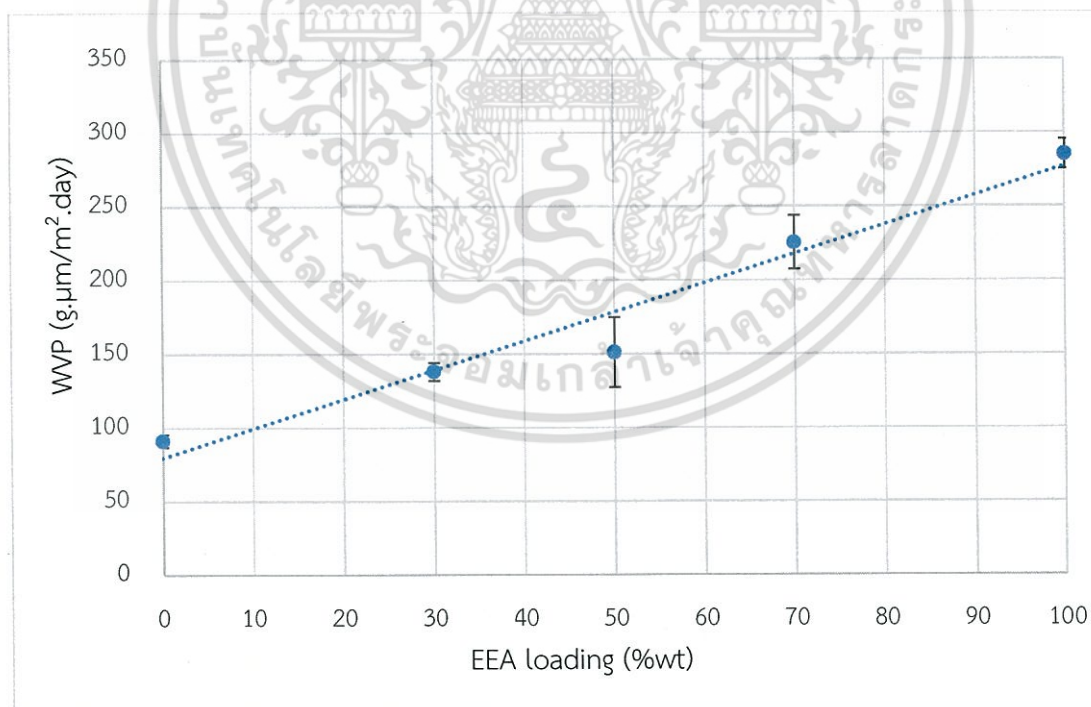
รูปที่ 4.5 ค่ามุมสัมผัสของน้ำกับชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ

4.5 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/EEA

การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม โดยใช้เครื่องทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ ภายใต้อุณหภูมิ 25°C จากรูปที่ 4.6 แสดงอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/EEA สูตรต่าง ๆ และรูปที่ 4.7 แสดงความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/EEA สูตรต่าง ๆ พบว่าฟิล์มที่มีการเติม EEA มีอัตราการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์ม PP (PP100EA0) เนื่องจากอัตราการแพร่ผ่าน (Diffusion pathway) ของไอน้ำในวัฏภาคที่เป็นอสัณฐานของ EEA เร็วกว่าในวัฏภาคของ PP ซึ่งเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกที่มีสมบัติต้านทานการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor barrier) และความมีขั้วของ EEA ทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) [19] ของไอน้ำแพร่ผ่านฟิล์มเพิ่มขึ้น จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ค่า WVTR และ WVP มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณ EEA ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/EEA สูตรต่าง ๆ

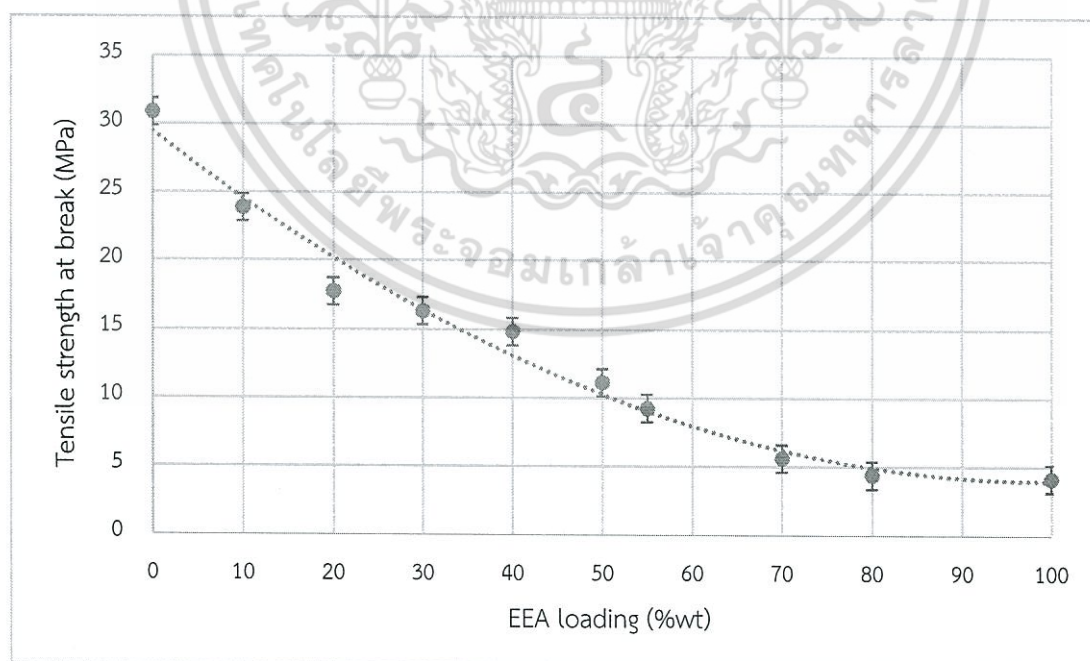


รูปที่ 4.7 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/EEA สูตรต่าง ๆ

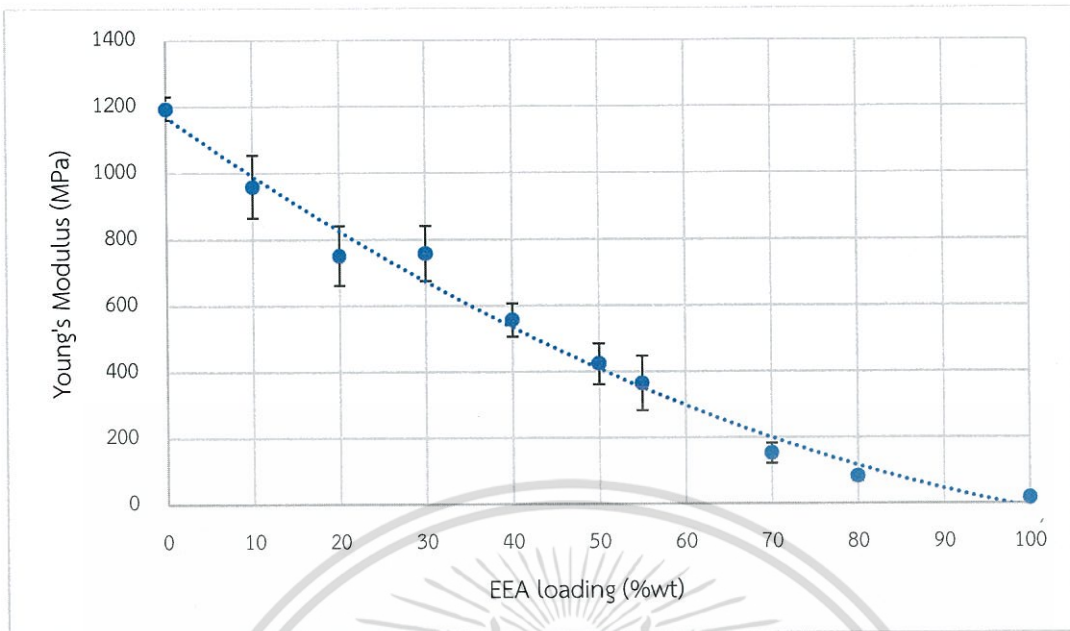
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การทดสอบสมบัติการรับแรงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/EEA

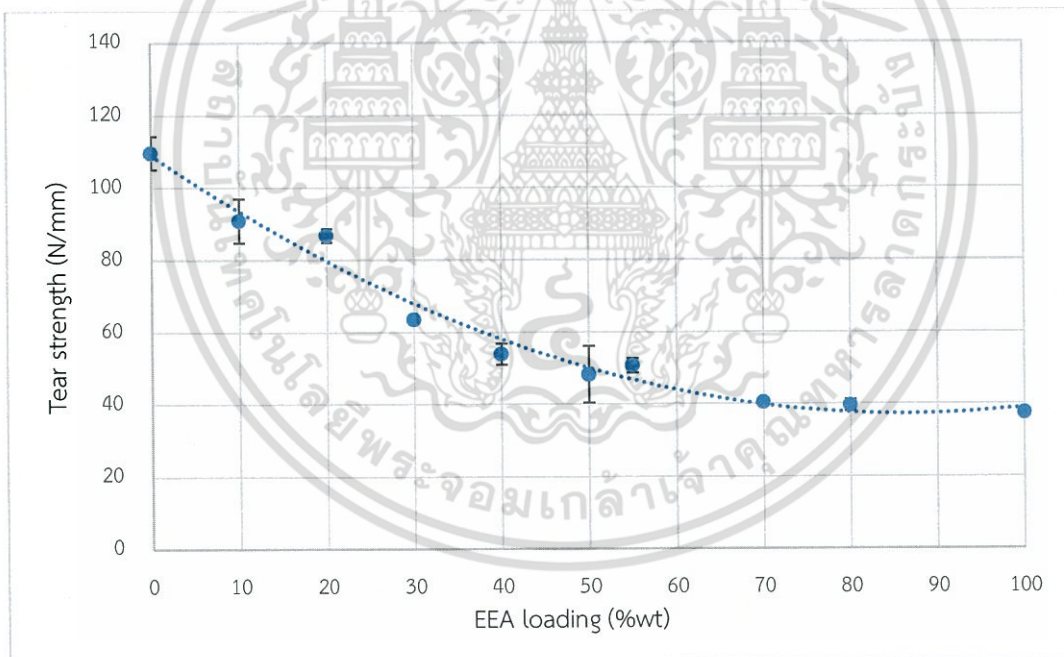
จากการทดสอบสมบัติการรับแรงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ดังรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบฟิล์ม PP กับฟิล์ม EEA ฟิล์ม PP มีความสามารถในการรับแรงที่ดีกว่า เพราะ PP เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึก มีร้อยละการเกิดผลึกสูงถึง 50 โดยประมาณ เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่เป็นระเบียบและมีหมู่เมทิล ($-CH_3$) [22] เป็นหมู่ข้างเคียงซึ่งมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับ EEA และพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ EEA ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/EEA มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด, ความแข็งแรงฉีกขาด และค่า Young's Modulus ลดลง เนื่องจาก EEA เป็นโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นอสัณฐานสูงเมื่ออยู่ในพอลิเมอร์ผสม EEA เกิดผลึกได้น้อย (จากหัวข้อที่ 4.2) อีกทั้งความสามารถในการเข้ากันได้ของ PP และ EEA ต่ำ สังเกตได้จากผลของการกระจายตัวของ EEA ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/EEA ด้วยเทคนิค SEM (รูปที่ 4.1) สำหรับร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของฟิล์ม ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในสูตรที่ PP ยังคงเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (ปริมาณ EEA น้อยกว่าร้อยละ 50-55) ของพอลิเมอร์ผสม (ใช้ความเร็วในการทดสอบ 100 mm/min) เพราะวัฏภาคหลักเป็น PP ที่มีโครงสร้างแข็งแรงและมีความสามารถในการยึดตัวต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่า T_g ของ PP ($0-25^\circ C$) [39] สายโซ่ของ PP จึงยังไม่เข้าสู่สถานะยืดหยุ่นคล้ายยาง เมื่อเพิ่มปริมาณ EEA ของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น ทำให้ EEA กลายเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง พบว่าค่าร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เพราะสมบัติความยืดหยุ่นคล้ายยางของ EEA ณ อุณหภูมิทดสอบที่สูงกว่า T_g ของ EEA [39]



(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดของฟิล์ม PP/EEA

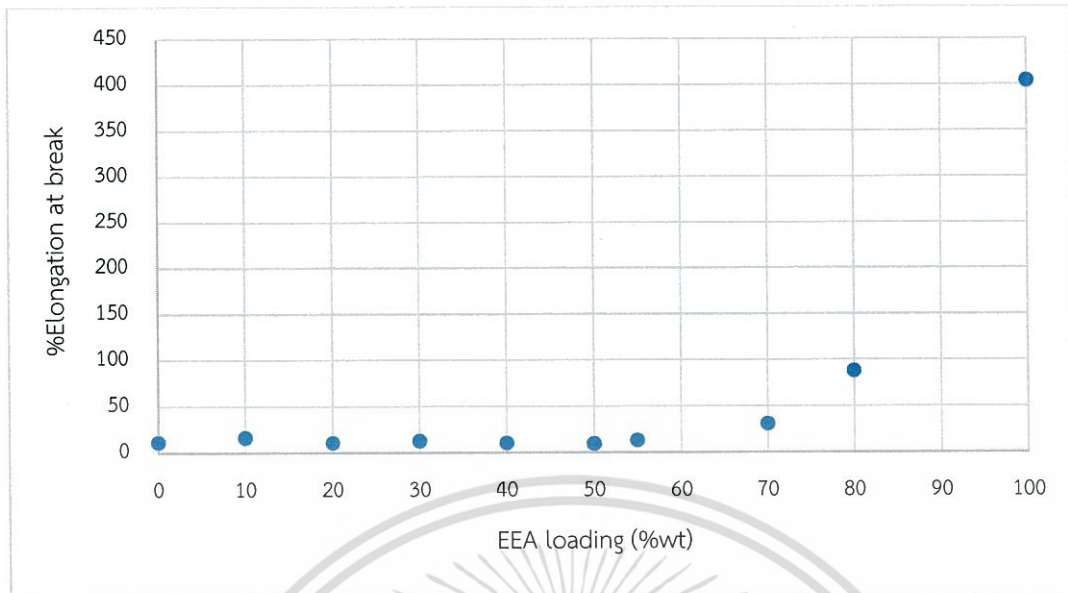


(b) ค่ายังมอดุลัสของฟิล์ม PP/EEA



(c) ความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP/EEA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม PP/EEA

รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบการรับแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมPP/EEA สูตรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพอลิโพรพิลีน (PP) โดยนำ PP มาผสมกับเอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) เพื่อเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของบรรจุภัณฑ์ฟิล์มจากการทดสอบสามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม PP/EEA (100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 45/55, 30/70, 20/80 และ 0/100) พบว่า พอลิเมอร์ผสม PP/EEA เป็นพอลิเมอร์ชนิดที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible) มีความเข้ากันได้ต่ำ วัฏภาคกระจาย EEA มีรูปร่างทรงกลม (Spherical shape) กระจายตัวทั่วในวัฏภาคต่อเนื่อง PP การเพิ่มปริมาณ EEA มาก เช่น ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP45EA55 วัฏภาคของ EEA มีลักษณะเป็นช่องว่างที่มีความต่อเนื่องมากขึ้น เนื่องจากวัฏภาคกระจายรูปร่างทรงกลมเกิดการรวมกันและเมื่อเพิ่มปริมาณ EEA มากขึ้นจนเกิดการสลับวัฏภาคโดย EEA กลายเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง สังเกตได้จากภาพ SEM ของฟิล์ม PP30EA70 และ PP20EA80 หลังการสกัด EEA บริเวณผิวของฟิล์มมีลักษณะขรุขระและมีรูเกิดขึ้น สำหรับสมบัติทางความร้อนพบว่า ค่าของอุณหภูมิการหลอมผลึก และอุณหภูมิตกผลึกของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์นั้น ๆ เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP ใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 50 โดยประมาณ) จนกระทั่ง EEA กลายเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP มีค่าลดลง ส่วนเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ EEA ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรอยู่ในช่วงต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 12) การเพิ่มปริมาณ EEA ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความเป็นอสัณฐานเพิ่มขึ้น ในการตรวจสอบปริมาณหมู่ฟังก์ชันในฟิล์ม PP/EEA พบว่าปริมาณ EEA ที่เพิ่มขึ้นจากการเตรียมฟิล์มในอัตราส่วนต่าง ๆ ให้ค่าดัชนีคาร์บอนิลมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณ EEA ซึ่งสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสที่มีค่าลดลงแสดงถึงความสามารถในการเปียกผิวเพิ่มขึ้น และผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ พบว่าการเพิ่มปริมาณ EEA ทำให้ฟิล์มมีการซึมผ่านไอน้ำดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ EEA ขึ้น สมบัติเชิงกล (ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด, ความแข็งแรงฉีกขาด และค่ายังมอดุลัส) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์ม PP (PP100EA0) เกิดจากพอลิเมอร์ผสม PP/EEA เป็นพอลิเมอร์ชนิดที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible) และ EEA มีความเป็นอสัณฐานสูงและยืดหยุ่นคล้ายยาง ทำให้มีความสามารถในการรับแรงน้อยลง ส่วนค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อ PP เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ EEA จน EEA กลายเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดจะมากขึ้น เนื่องมาจากความยืดหยุ่นของ EEA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาในเชิงเปรียบเทียบพบว่า สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/EEA ที่อัตราส่วน 50/50 (PP50EA50) PP ยังคงเป็นวัฏภาคต่อเนื่องที่มี EEA การกระจายตัวดี มีอัตราการซึมผ่านไอน้ำที่สูง ($3.9 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$) และมีค่าความสามารถในการรับแรงดึงที่ดี (11.11 MPa) ซึ่งไม่ต่ำกว่าค่ามอก.711-2530 [40] ดังนั้นฟิล์มสูตร PP50EA50 จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อการใช้งานด้านเกษตรกรรมต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การปรับปรุงสมบัติฟิล์ม PP/EEA ควรนำฟิล์มที่มีความสามารถในการรับแรงเหมาะสม มาทำการผสมกับสารตัวเติม อาทิเช่น ซีโอไลต์เอ เพื่อเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำให้มีค่ามากขึ้น
2. อาจใส่สารช่วยผสมต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความเข้ากันระหว่าง PP กับ EEA ช่วยให้สมบัติของฟิล์มดีขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2551. **บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ : สิ่งประดิษฐ์ไทย ยืดอายุผักผลไม้**. [Online]. Available : <https://blog.eduzones.com/jade/3518>.
- [2] เว็บไซต์รวบรวมผลงานวิจัยที่มีศักยภาพสูงจากฝีมือนักวิจัยไทย. 2558. **บรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพสำหรับยืดอายุผักและผลไม้**. [Online]. Available : <http://www.research2biz.com/PSD43211>.
- [3] เนตรนภา ลามอ และเบญจวรรณ ตานนท์. 2548. “สมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปรับปรุงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและซีโอไลต์โซเดียมเอ.”โครงการพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] นันทวรรณ ม่วงมี. 2554. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลดีพีอีด้วยอีวีเอและซีโอไลต์เอ.”วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] จูตินันท์ ศิริจันทน์. 2557. “สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแอลดีพีอี/อีเอ็มเอ/ซีโอไลต์เอเพื่อใช้งานบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด.”วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] นิสากร วัชรระ, นุชบา และไหม และณัฐราเนตร อธิฤทธิ์เฉลิม. “การเตรียมและสมบัติของฟิล์มPP/EMA ที่มีซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติมเพื่องานบรรจุภัณฑ์ผลิตผลสด.”โครงการพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] สังคม เตชะวงศ์เสถียร. 2552. **วิทยาการหลังเก็บเกี่ยวของพืช**. ขอนแก่น : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [8] จริงแท้ ศิริพานิช. 2541. **สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [9] โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2560. **การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้**. [Online]. Available : <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=26&chap=6&page=chap6.htm>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานนท์. 2558. การเปลี่ยนแปลงของผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com>.
- [11] E.B. Pantastico, 1975. *Postharvest Physiology Handling and Utilization of Tropical and Subtropical Fruits and Vegetables*. Westport CT : The AVI Publishing Company.
- [12] ดนัย บุญเกียรติ และนิธิยา รัตนานนท์. 2535. การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- [13] จริงแท้ ศิริพานิช และธีรนุต รมโพธิ์ภักดี. การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. นครปฐม : โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติดมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [14] รุ่งนภา วิสิฐอุตรการ. 2540. เอกสารประกอบการสอนการประเมินอายุการเก็บรักษาของอาหาร. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [15] F.A. Paine and H.Y. Paine. 1992. *A Handbook of Food Packaging*. Glasgow : Chapman&Hall.
- [16] D. Zagory and A.A. Kader. 1988. "Modified Atmosphere Packaging of Fresh Produce." *Food Technology*. 42 : 70-77.
- [17] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2558. นวัตกรรมยืดอายุผักผลไม้. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/84>.
- [18] S. Nadine, R Konietzny, D. Sieffert, P. Rolling and C. Staudt. 2010. "Functionalized Copolyimide Membranes for the Separation of Gaseous and Liquid Mixtures." *Journal of Organic Chemistry*. 6 : 789-800.
- [19] ชันทอง สุนทรภา. 2547. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [20] มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2560. กระบวนการเมมเบรน. [Online]. Available : http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2588/7/296259_ch1.
- [21] Staff of Modern Plastic Magazine. 1994. *Plastics Handbook*. New York : McGraw-Hill.
- [22] British Plastics Federation. 2017. *Polypropylene (PP)*. [Online]. Available : <http://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/PP.aspx>.
- [23] Freedom Bellejoes. 2555. *Polypropylene*. [Online]. Available : <http://arceehechan-freedom.blogspot.com/2012/10/polypropylene.html>.

- [24] SIGMA-ALDRICH®. 2013. **Poly (ethylene-co-ethyl acrylate)**. [Online]. Available :
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/200581lang=en®ion=TH>.
- [25] Chemicalbook. 2016. **ETHYLENE/ETHYL ACRYLATE COPOLYMER**. [Online]. Available :
http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB4296070_EN.htm.
- [26] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2558. **พอลิเมอร์เบลนด์**. [Online]. Available :
Archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2554/chem20954sg_ch1.pdf.2558.
- [27] ชลลดา ฤตวิรุฬห์. 2543. "พอลิเมอร์ผสม." วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 10(1) : 14-17.
- [28] S. Marais, E. Bureau, F. Gouanve, E.B. Salem, Y. hirata, A. Andrio, C. Cabot and H.Atmani. 2004. "Transport of water and gases through EVA/PVC blend films permeation and DSC investigations." J. Polymer Testing. 23 : 475-486.
- [29] F.A.R. Hamim, S.A. Ghani and F.Zainudin. 2016. "Properties of Recycled High Density Polyethylene (RHDPE)/Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Blends : The Effect of Blends Composition and Compatibilisers." Journal of Physical Science. 27 : 23- 29.
- [30] S.A. Mousavi, M. Gholizadeh, S. Sedghi, M.P. Chenar, M. Barmala, and A. Soltani. 2010. "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 : 1593-1598.
- [31] A. Lasagaba'ster, M.J. Abad, L. Barral, A. Ares and R. Bouza. 2009. "Application of FTIR spectroscopy to determine transport properties and water-polymer interactions in polypropylene (PP)/poly (ethylene-co-vinyl alcohol) (EVOH) blend films: Effect of poly(ethylene-co-vinyl alcohol) content and water activity." Polymer. 50 : 2981-2989.
- [32] A.E. Bishara and H.I. Shaban. 2010. "Thermal Mechanical and Rheological Properties of Polypropylene/Poly (ethyl-co-methyl acrylate) blends." International Journal of Polymeric Material. 59 : 134-149.
- [33] American Standard for Testing and Materials. 2006. **Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis.**

Annual Book ASTM standard 14.02., Philadelphia.

- [34] Brand Rawlings. 2015. Heat of Fusion of 100% crystalline polymer. [Online]. Available : <http://willson.cm.utexas.edu/./Crystallinity%20in%20polymer>.
- [35] American Standard for Testing and Materials. 2003. **Standard Test Method for Coronatreted Polymer Film Using Water Contact Angle Measurements.** ASTM D5946. Annual Book ASTM standard 14.02., Philadelphia.
- [36] ชนิกันต์ สุตพวง, วิชชุดา เย็นใจมา และสิริ เกริกมณี. 2558. “การศึกษาพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS/ZSM-5 เพื่อเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสำหรับฟิล์มบรรจุภัณฑ์.” โครงการงานพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [37] American Standard for Testing and Materials. 1998. **Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic sheeting.** Annual Book ASTM standard 14.02., Philadelphia.
- [38] American Standard for Testing and Materials. 2002. **Standard Test Method for Tear-Propagation Resistance (Trouser Tear) of Plastic Film and Thin Sheeting by a Single-Tear Method1.** ASTM D1938. Annual Book ASTM standard 14.02., United States.
- [39] Polymer Products from Aldrich. 2017. **Thermal Transitions of Homopolymers: Glass Transition & Melting Point.** [Online]. Available : https://www3.nd.edu/~hgao/thermal_transitions_of_homopolymers.pdf.
- [40] ณัฐริกา ใจสมบุญ. 2556. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVA และซีโอไลต์เอ.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

ก.1 ความเป็นผลึกของ PP

ตารางที่ ก.1 ความเป็นผลึก (% Crystallinity)

สูตร	%PP ที่มีในฟิล์มตัวอย่าง	ΔH_f (J/g)	ความเป็นผลึก (%)
PP100EA0	100	100.44	48.5
PP90EA10	90	88.50	47.5
PP80EA20	80	80.76	48.7
PP70EA30	70	72.73	50.1
PP60EA40	60	65.25	52.5
PP50EA50	50	55.65	53.7
PP45EA55	45	45.39	48.7
PP30EA70	30	24.71	39.7
PP20EA80	20	16.20	38.6
PP0EA100	0	-	-

$$\Delta H_f \text{ (J/g)} = 207 \text{ J/g (ความเป็นผลึกของ PP 100\%)}$$

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

ตัวอย่างการคำนวณความเป็นผลึกของ PP ในฟิล์มตัวอย่าง

$$\begin{aligned} &= \frac{100.44}{207} \times \frac{100}{100} \times 100 \\ &= 48.50 \% \end{aligned}$$

ก.2 ความเป็นผลึกของ EEA

ตารางที่ ก.2 ความเป็นผลึก (% Crystallinity)

สูตร	%EEA ที่มีในฟิล์มตัวอย่าง	ΔH_f (J/g)	ความเป็นผลึก (%)
PP100EA0	-	-	-
PP90EA10	10	1.01	3.4
PP80EA20	20	3.50	5.9
PP70EA30	30	3.38	3.8
PP60EA40	40	6.09	5.2
PP50EA50	50	7.24	4.9
PP45EA55	55	8.15	5.0
PP30EA70	70	23.81	11.6
PP20EA80	80	30.15	12.8
PP0EA100	100	19.27	6.5

$$\Delta H_f \text{ (J/g)} = 293 \text{ J/g (ความเป็นผลึกของ EEA 100\%)}$$

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

ตัวอย่างการคำนวณความเป็นผลึกของ EEA ใน

ฟิล์มตัวอย่าง PP0EA100

$$\begin{aligned} &= \frac{19.27}{293} \times \frac{100}{100} \times 100 \\ &= 6.57 \% \end{aligned}$$

ก.3 การซึมผ่านของไอน้ำ

การคำนวณ Pressure drop

จากความสัมพันธ์
$$P = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A}$$

m = มวลของน้ำที่เปลี่ยนแปลงในท่อรูปตัวยู

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2$$

A = พื้นที่หน้าตัด loop

หามวลของน้ำที่เปลี่ยนแปลงในท่อรูปตัวยู (m)

จากความสัมพันธ์
$$D = \frac{m}{V}$$

$$m = DV ; V = Ah$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} P_{\text{drop}} &= \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{DAhg}{A} = Dhg \\ &= (1000 \text{ kg/m}^3)(4.5 \times 10^{-2} \text{ m})(9.807 \text{ m/s}^2) \\ &= 408.6 \text{ kg/m.s}^2 \text{ or Pa} \\ &= 408.6 \text{ Pa} \times \frac{1}{101325} \text{ atm/Pa} \\ &= 0.004032568 \text{ atm} \end{aligned}$$

คำนวณความเข้มข้นไอน้ำมาตรฐาน

จากความสัมพันธ์
$$PV = nRT ; n = \frac{PV}{RT}$$

โดยที่ $P = 0.019817595 \text{ atm}$ (Water vapor pressure at $20^\circ\text{C} \times$ (Atmospheric pressure + Pressure drop)

$$V = 1 \times 10^{-3} \text{ L (ปริมาตรของท่อ)}$$

$$R = 0.082 \text{ atm.L/mol.K}$$

$$T = 298 \text{ K (อุณหภูมิ ณ ห้องปฏิบัติการ)}$$

หาปริมาณของไอน้ำ

จะได้
$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(0.019817595 \text{ atm})(1 \times 10^{-3} \text{ L})}{(0.082 \text{ atm.L/mol.K})(298 \text{ K})}$$

$$= 8.11 \times 10^{-7} \text{ mol}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนเป็นหน่วยความเข้มข้น (mol/L)

$$\begin{aligned} \text{จะได้ ปริมาตรต่อขนาด } 1 \times 10^{-3} \text{ L มีไอน้ำ} &= 8.11 \times 10^{-7} \text{ mol} \\ \text{ถ้าปริมาตรต่อขนาด } 1.00 \text{ L จะมีไอน้ำ} &= \frac{(1.00 \text{ L})(1 \times 10^{-7} \text{ mol})}{(1 \times 10^{-3} \text{ L})} \\ &= 8.11 \times 10^{-4} \text{ mol/L} \end{aligned}$$

เปลี่ยนเป็นหน่วย g/L

$$\text{จะได้ } (8.11 \times 10^{-4} \text{ mol/L})(18 \text{ g/mol}) = 0.014598 \text{ g/L}$$

คำนวณการซึมผ่านของไอน้ำ (ฟิล์ม PP)

พื้นที่ได้กราฟของไอน้ำมาตรฐานที่ความเข้มข้น 0.014598 g/L (A_s) 36.1375 mV.s

พื้นที่ได้กราฟของไอน้ำที่ซึมผ่าน (Permeate) (A_w) 0.33 mV.s

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของไอน้ำที่ซึมผ่าน} &= \frac{0.33 \text{ mV.s}}{36.1375 \text{ mV.s}} \times 0.014598 \text{ g/L} \\ &= 1.3331 \times 10^{-4} \text{ g/L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของก๊าซ } (F_x) &= 30 \text{ mL/min} \\ &= 0.03 \text{ L/min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่อเวลา (J)} &= 1.3331 \times 10^{-4} \text{ g/L} \times 0.03 \text{ L/min} \\ &= 3.9993 \times 10^{-6} \text{ g/min} \end{aligned}$$

$$\text{พื้นที่ของฟิล์มตัวอย่าง } (A_f) = 0.0025 \text{ m}^2$$

$$\text{ความหนาของฟิล์ม } (\Delta x) = 41 \text{ } \mu\text{m}$$

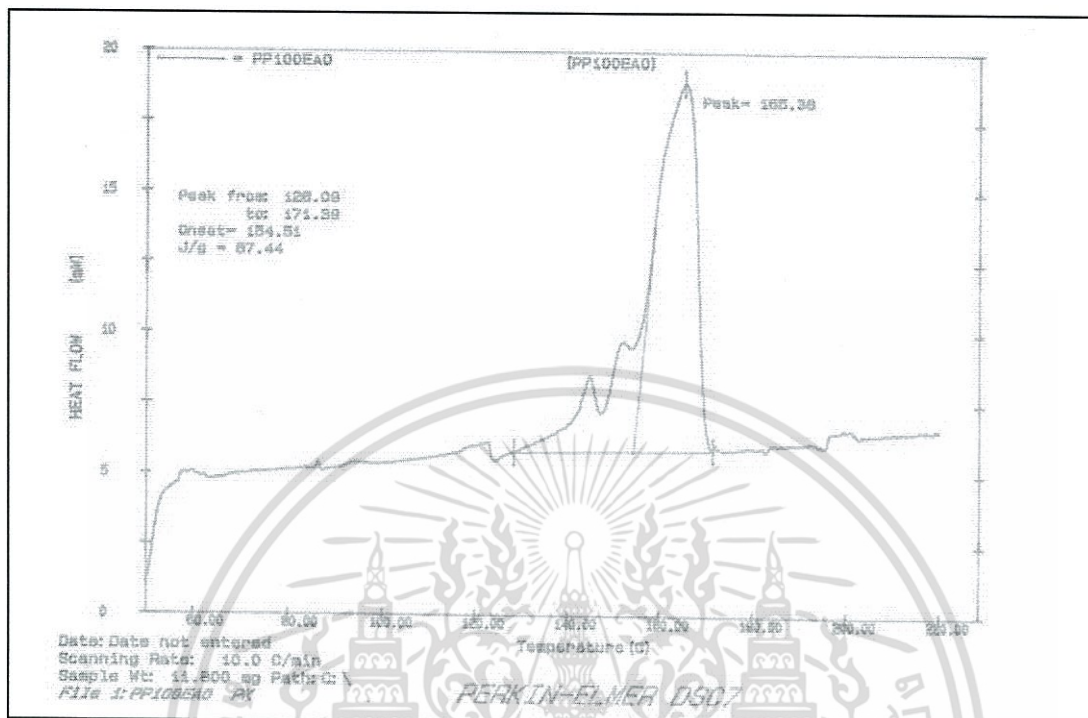
$$\begin{aligned} \text{อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR)} &= \frac{J}{A_f} \\ &= \frac{3.9993 \times 10^{-6} \text{ g/min}}{0.0025 \text{ m}^2} \\ &= 1.5997 \times 10^{-3} \text{ g/m}^2.\text{min} \\ &= 2.3036 \text{ g/m}^2.\text{day} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{การซึมผ่านของไอน้ำ} &= \frac{J \times \Delta x}{A_f} \\ &= \text{WVTR} \times \Delta x \\ &= (2.3036 \text{ g/m}^2.\text{day})(41 \text{ } \mu\text{m}) \\ &= 94.476 \text{ g}.\mu\text{m/m}^2.\text{day} \end{aligned}$$

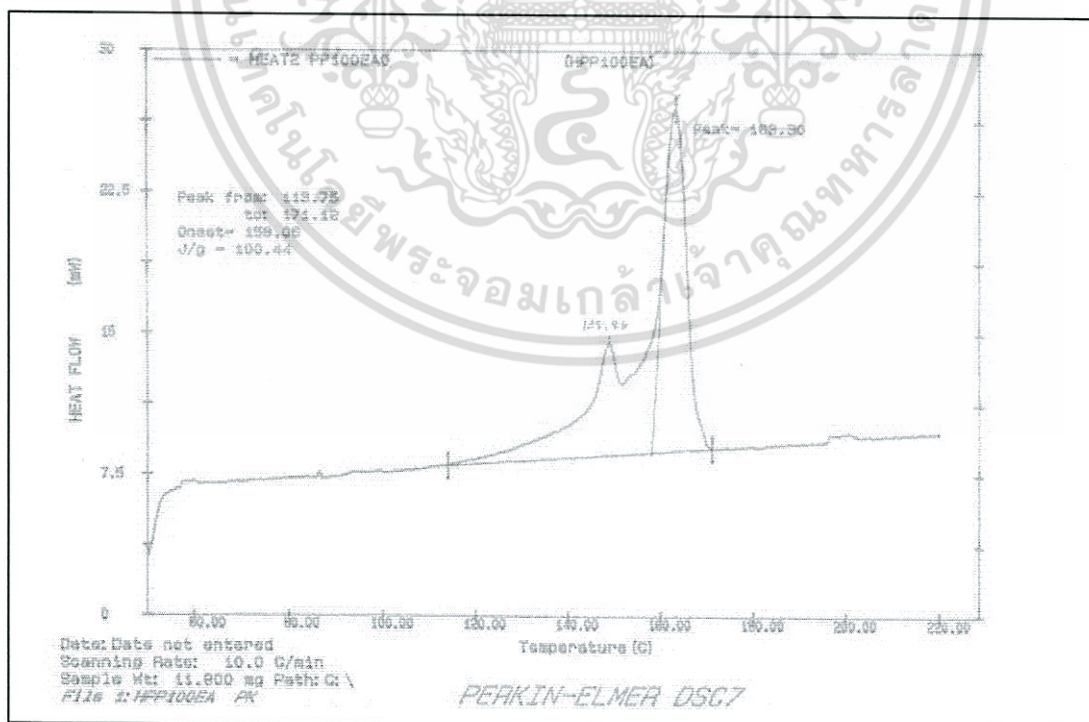
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

DSC เทอร์โมแกรม

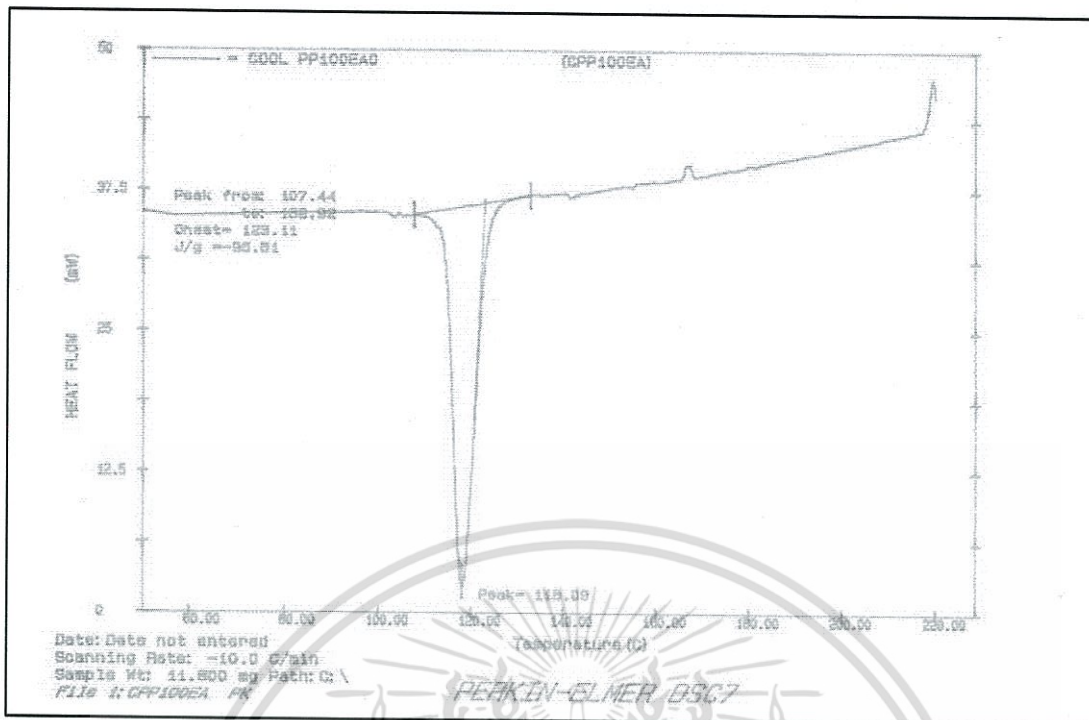


รูปที่ ข.1.1 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP100EA0 (First heating step)

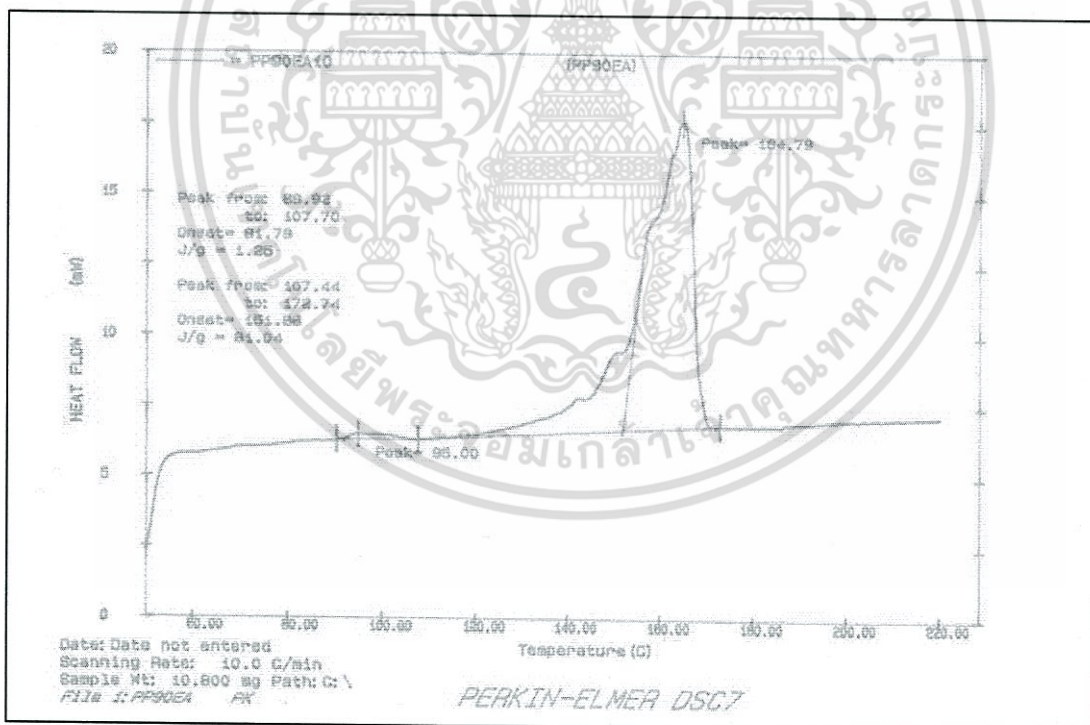


รูปที่ ข.1.2 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP100EA0 (Second heating step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

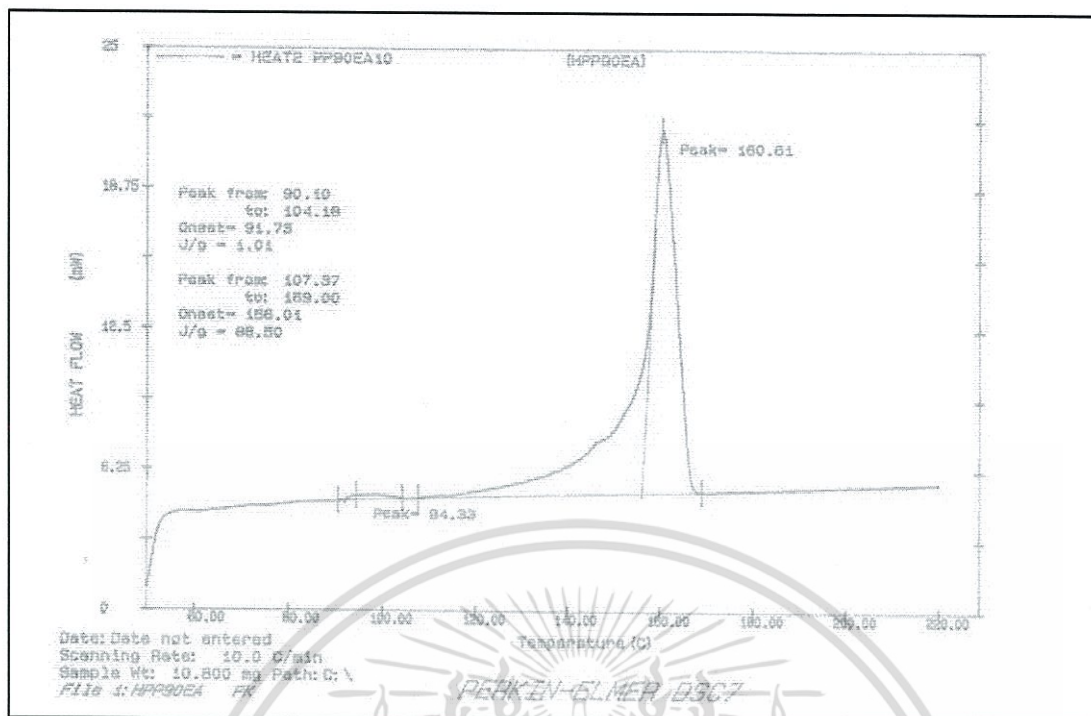


รูปที่ ข.1.3 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP100EA0 (Cooling step)

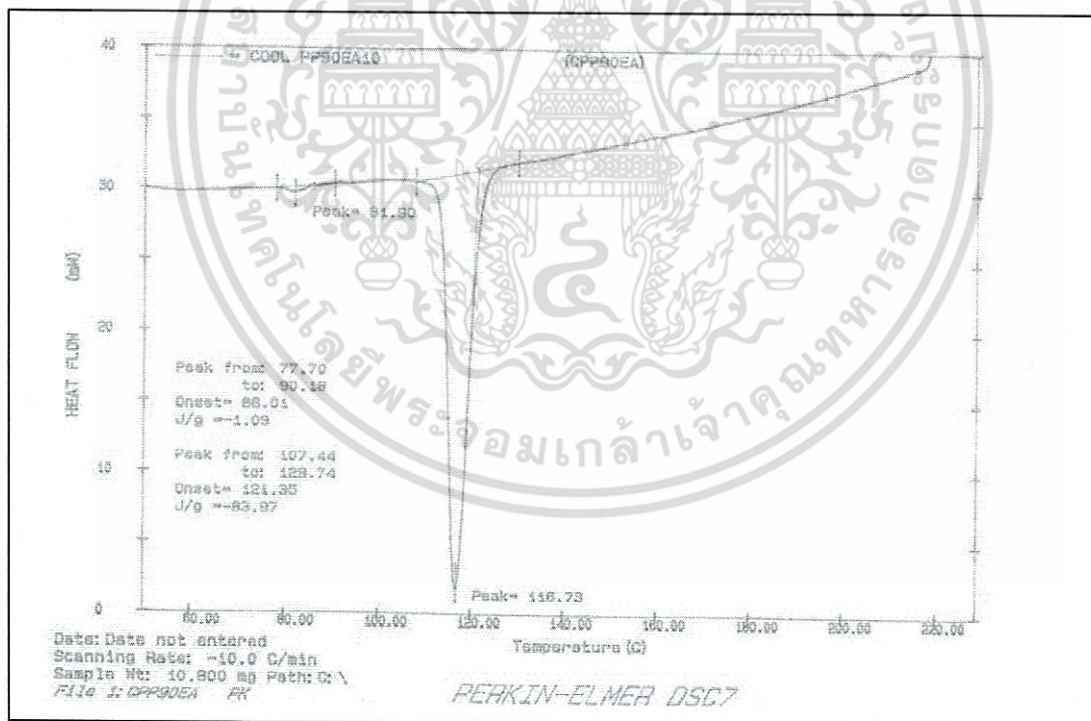


รูปที่ ข.2.1 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP90EA10 (First heating step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

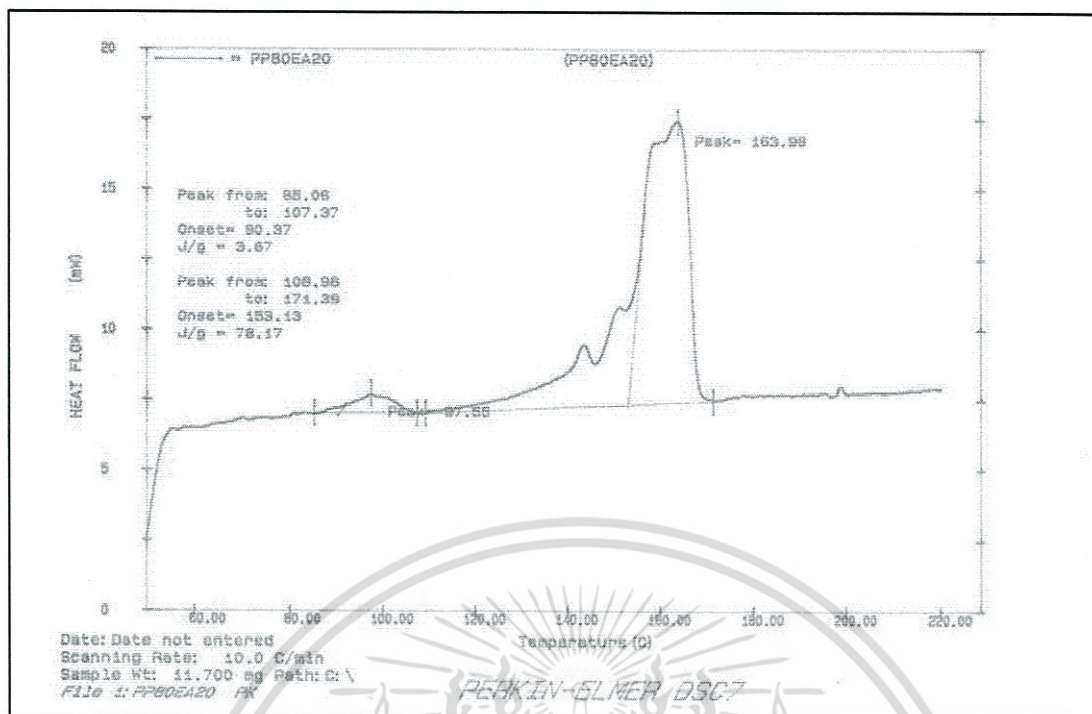


รูปที่ ข.2.2 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP90EA10 (Second heating step)

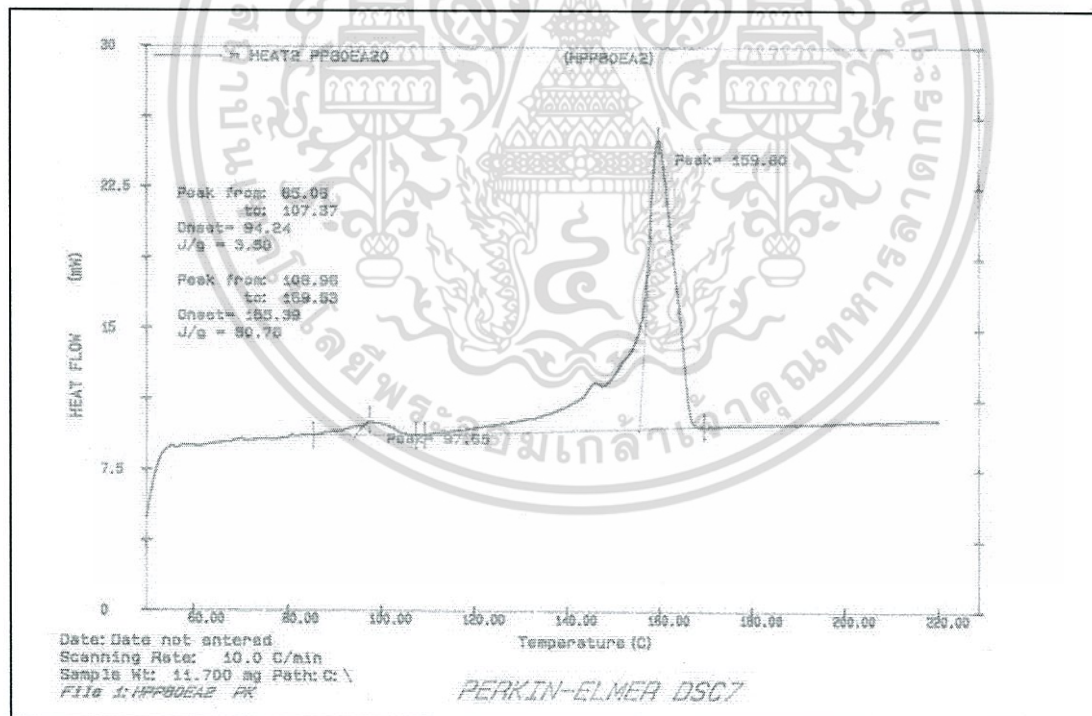


รูปที่ ข.2.3 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP90EA10 (Cooling step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

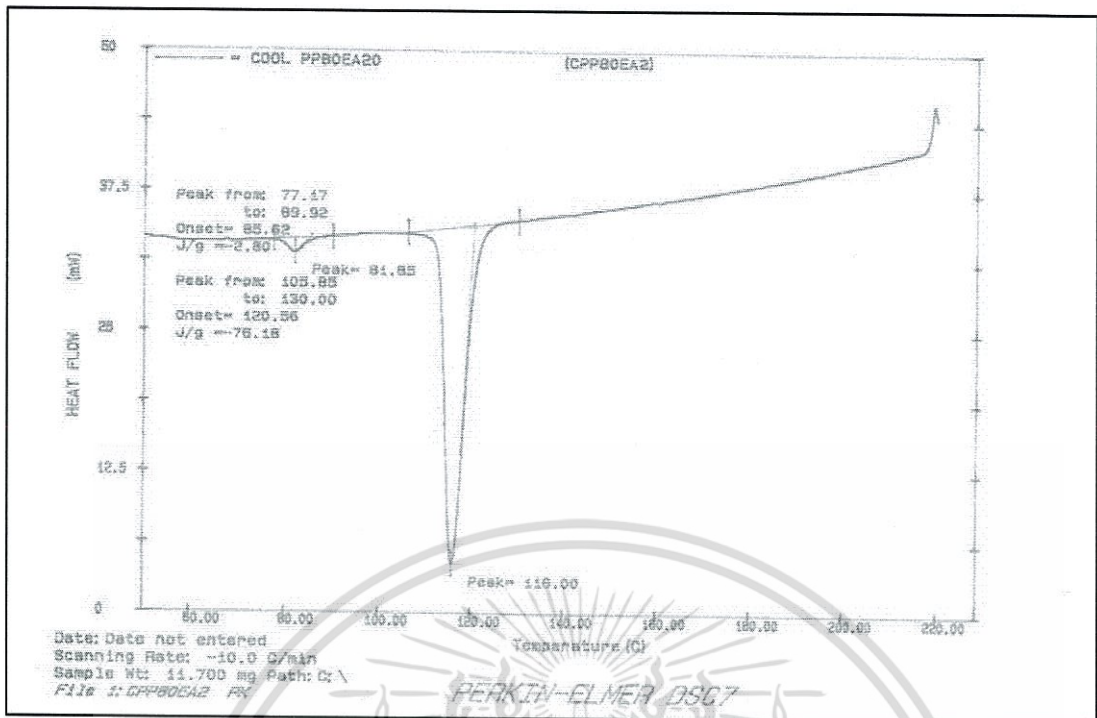


รูปที่ ข.3.1 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP80EA20 (First heating step)

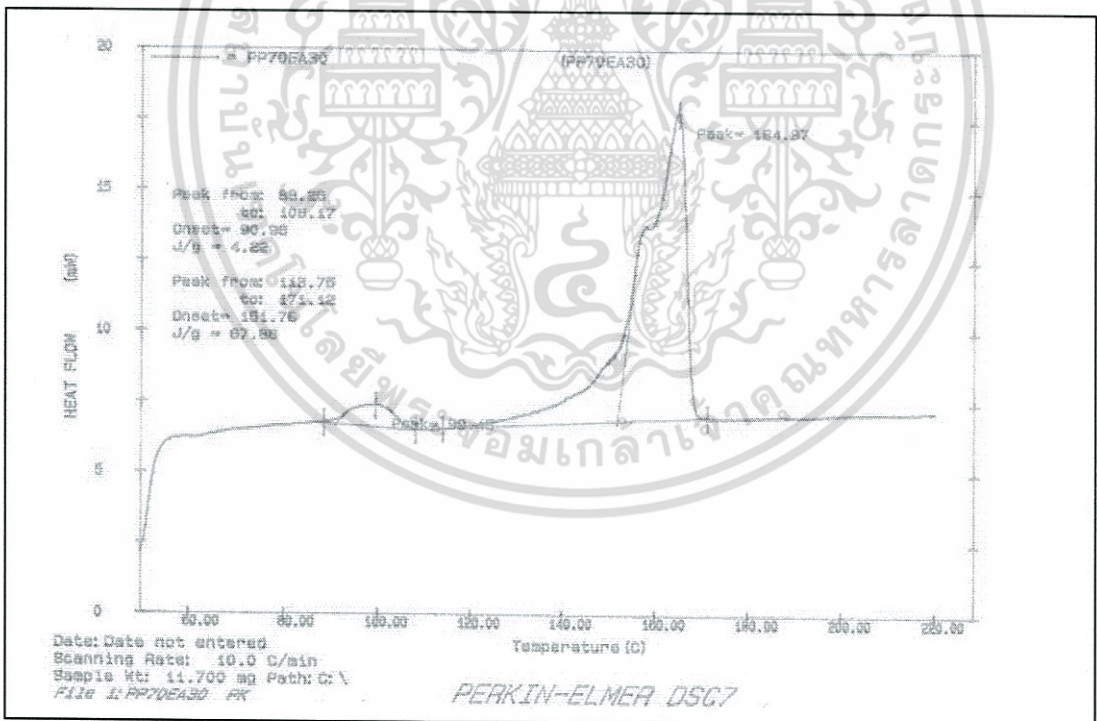


รูปที่ ข.3.2 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP80EA20 (Second heating step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

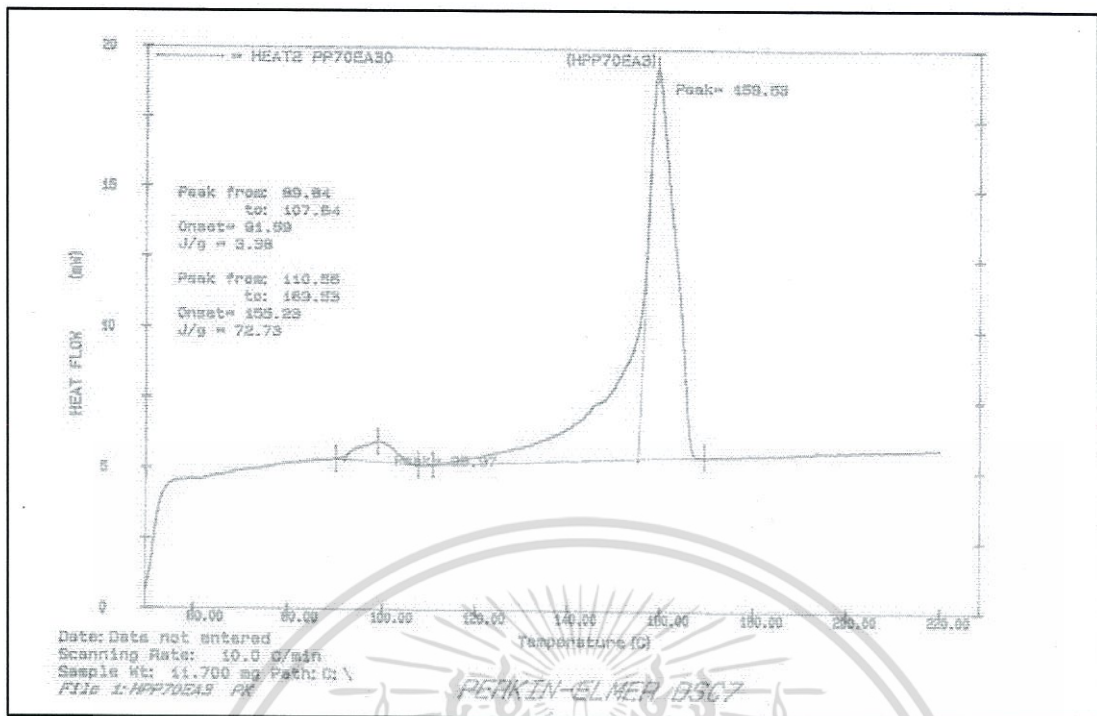


รูปที่ ข.3.3 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP80EA20 (Cooling step)

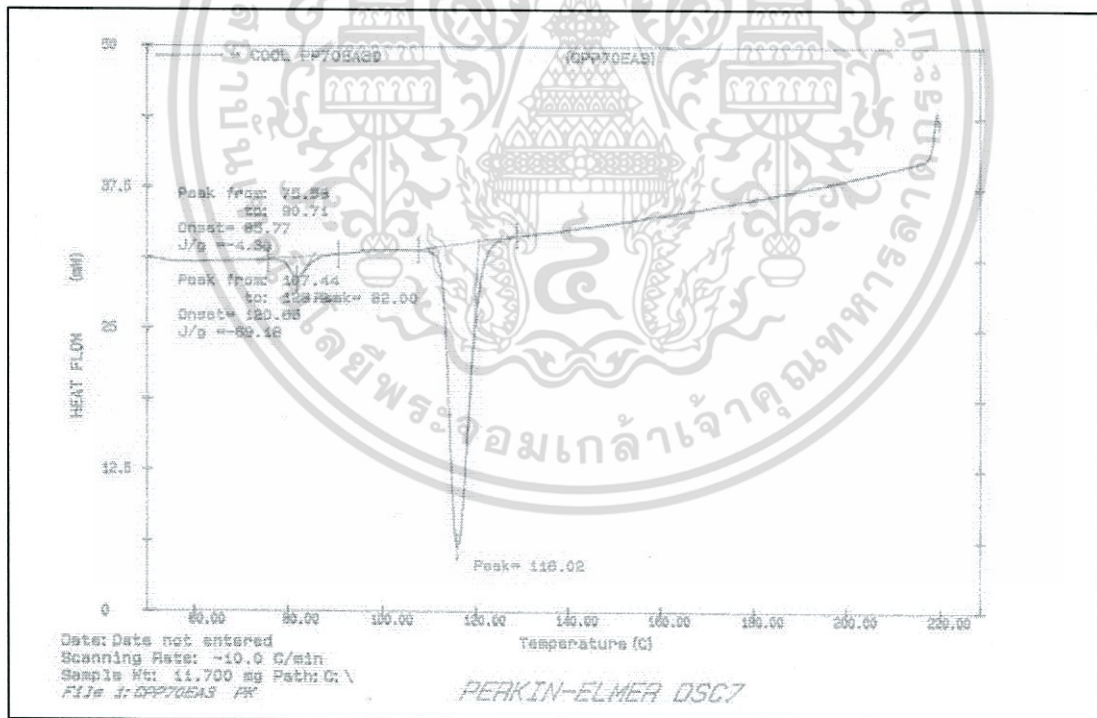


รูปที่ ข.4.1 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP70EA30 (First heating step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

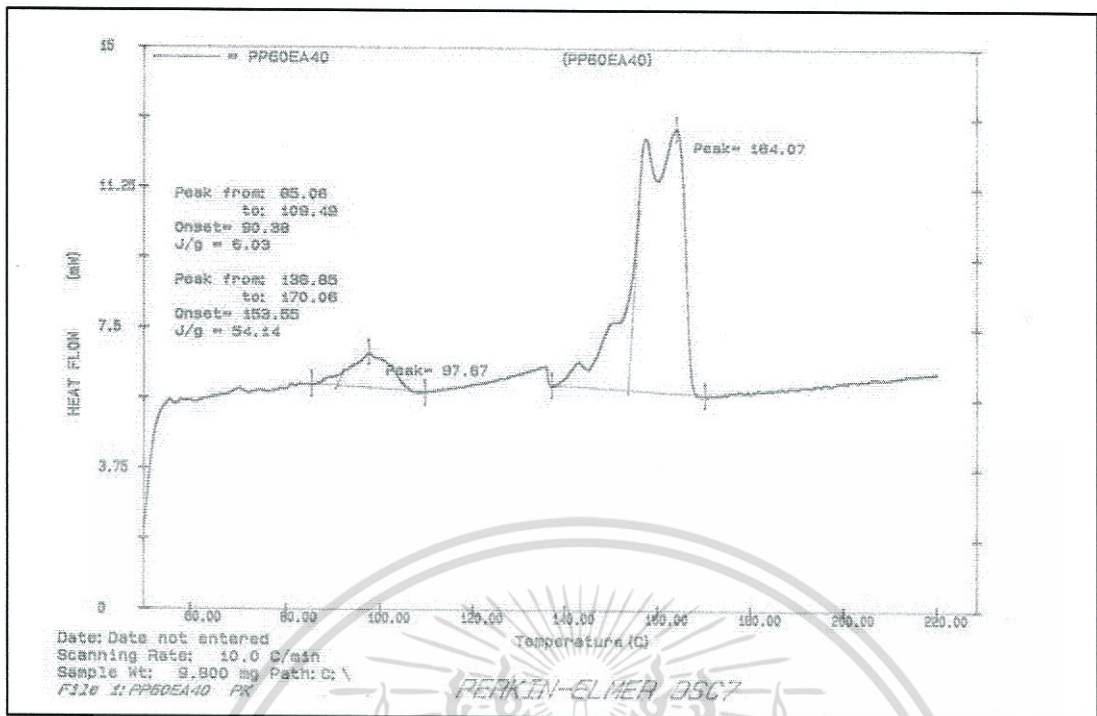


รูปที่ ข.4.2 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP70EA30 (Second heating step)

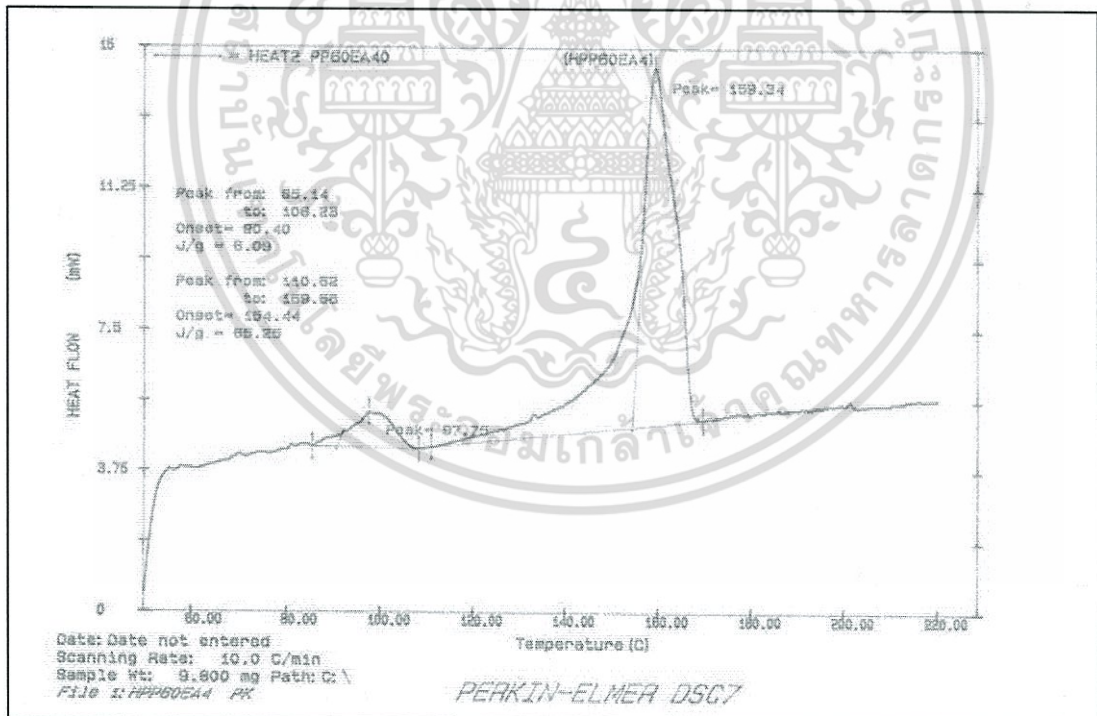


รูปที่ ข.4.3 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP70EA30 (Cooling step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

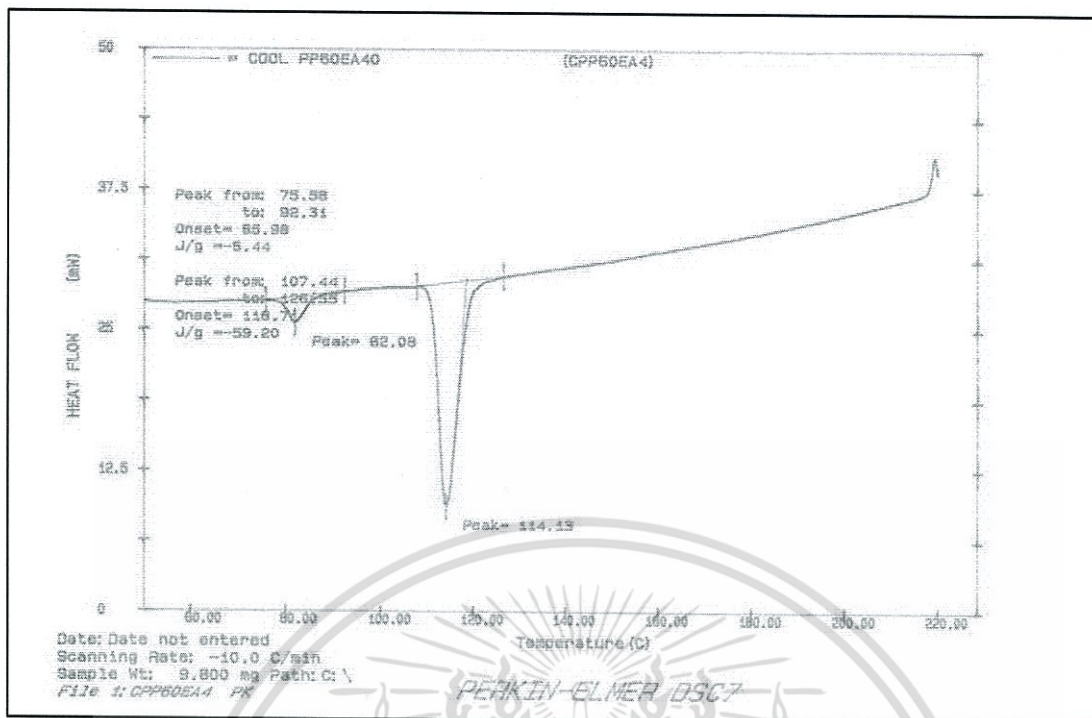


รูปที่ ข.5.1 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP60EA40 (First heating step)

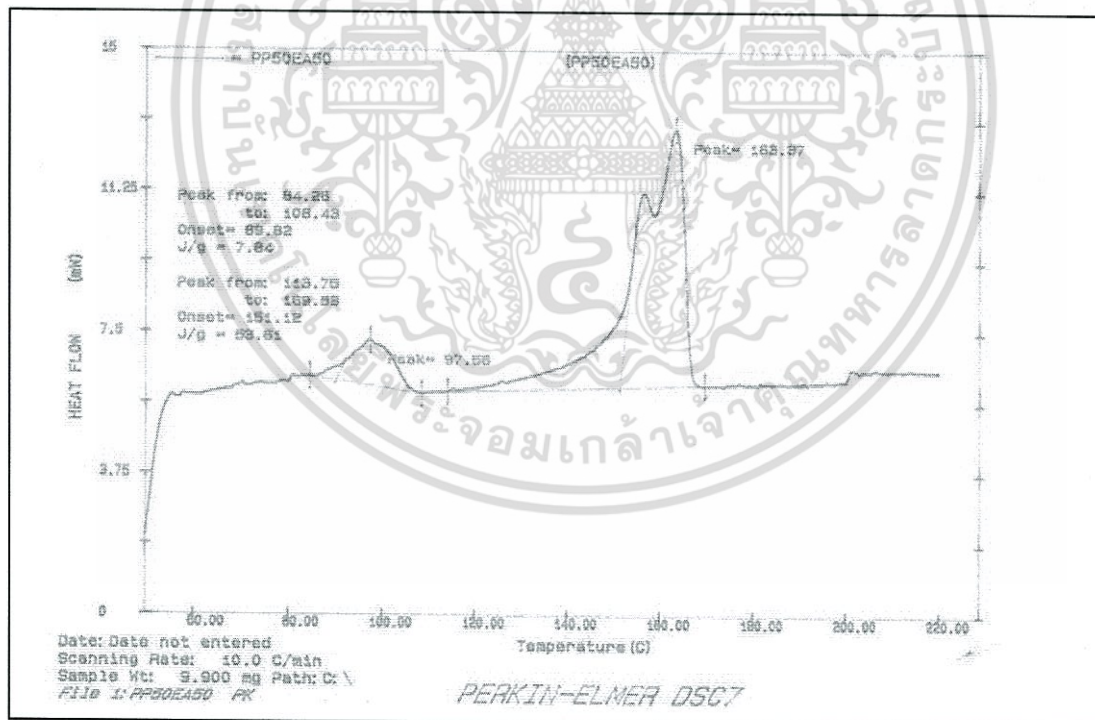


รูปที่ ข.5.2 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP60EA40 (Second heating step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

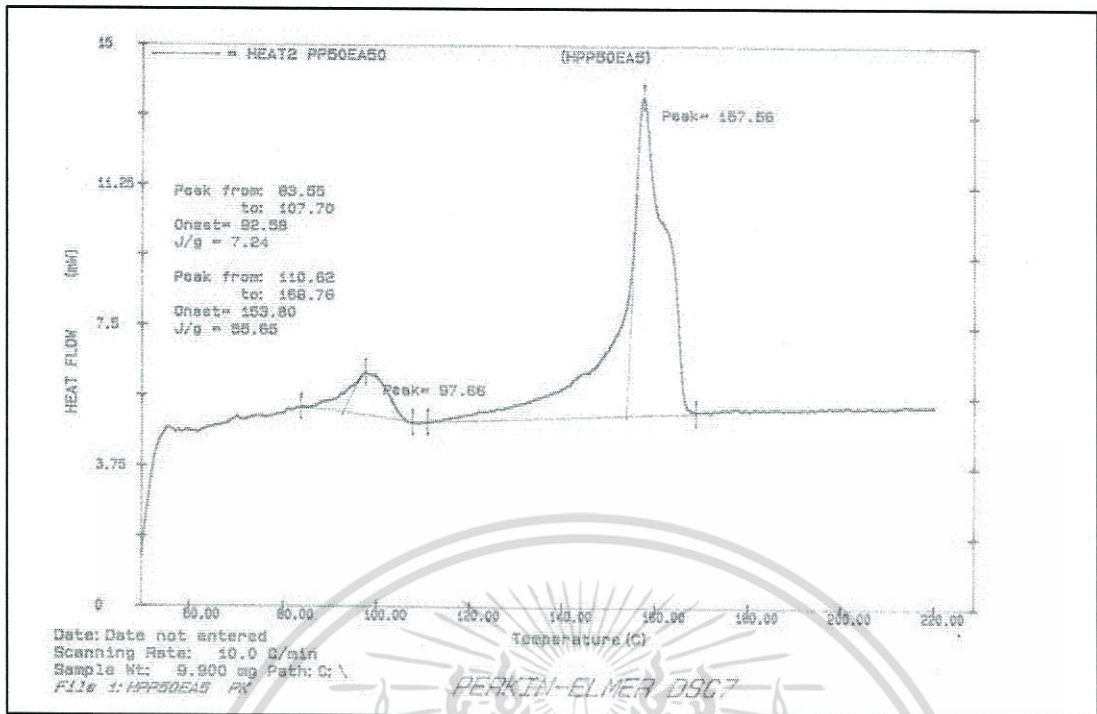


รูปที่ ข.5.3 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP60EA40 (Cooling step)

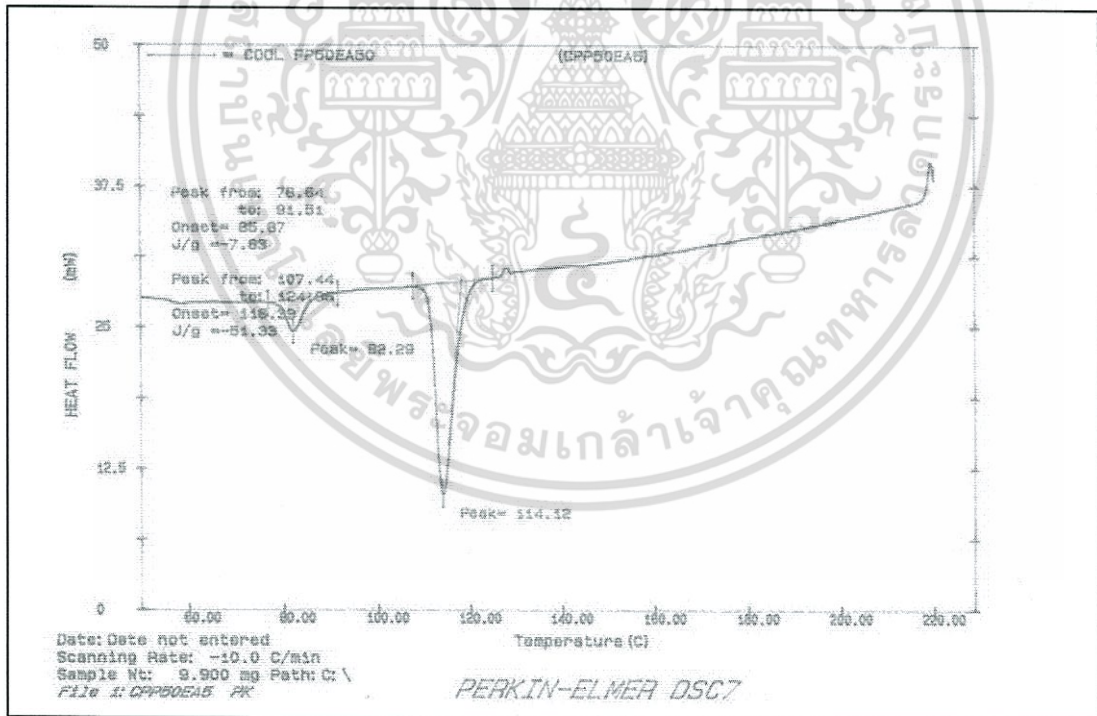


รูปที่ ข.6.1 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP50EA50 (First heating step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

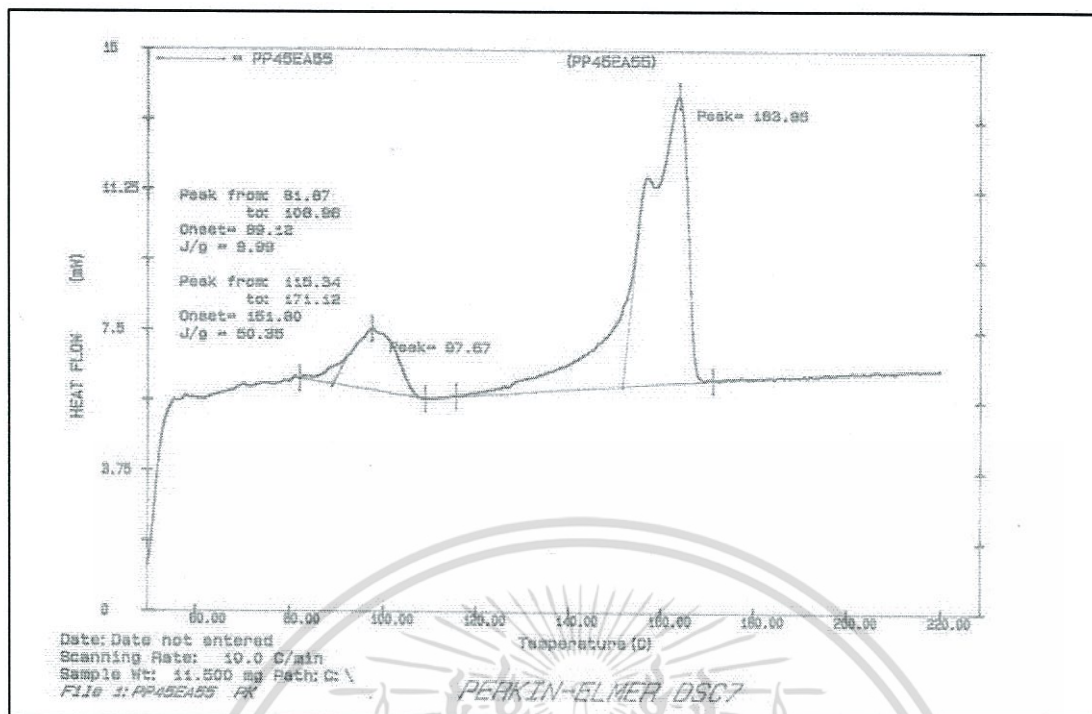


รูปที่ ข.6.2 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP50EA50 (Second heating step)

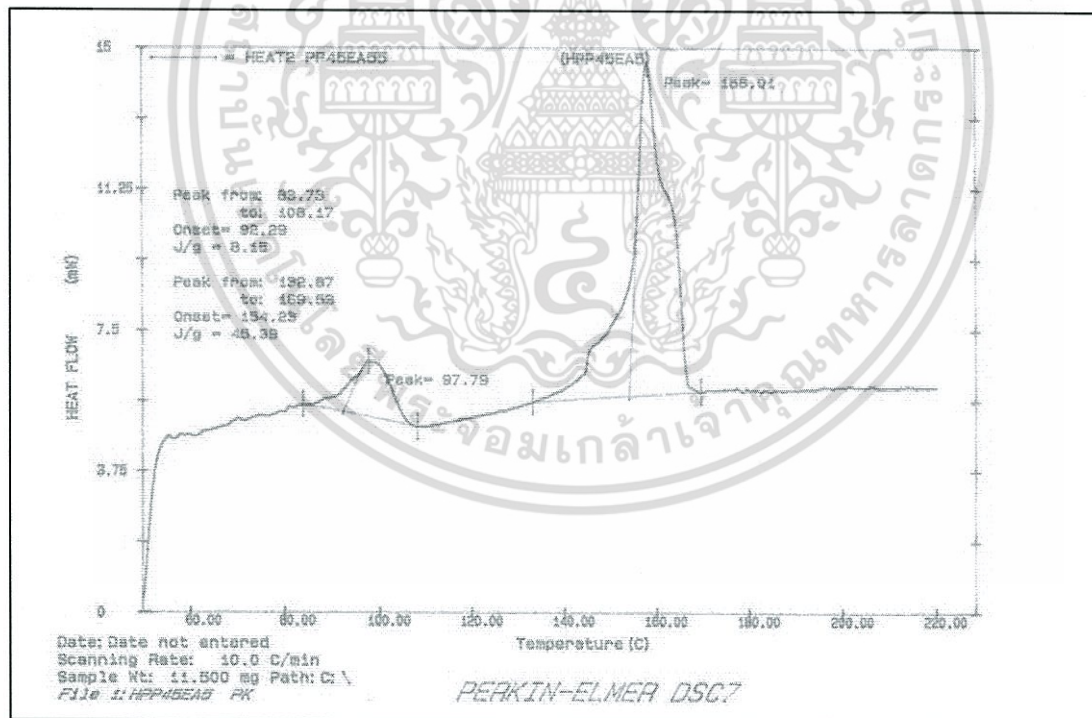


รูปที่ ข.6.3 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP50EA50 (Cooling step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

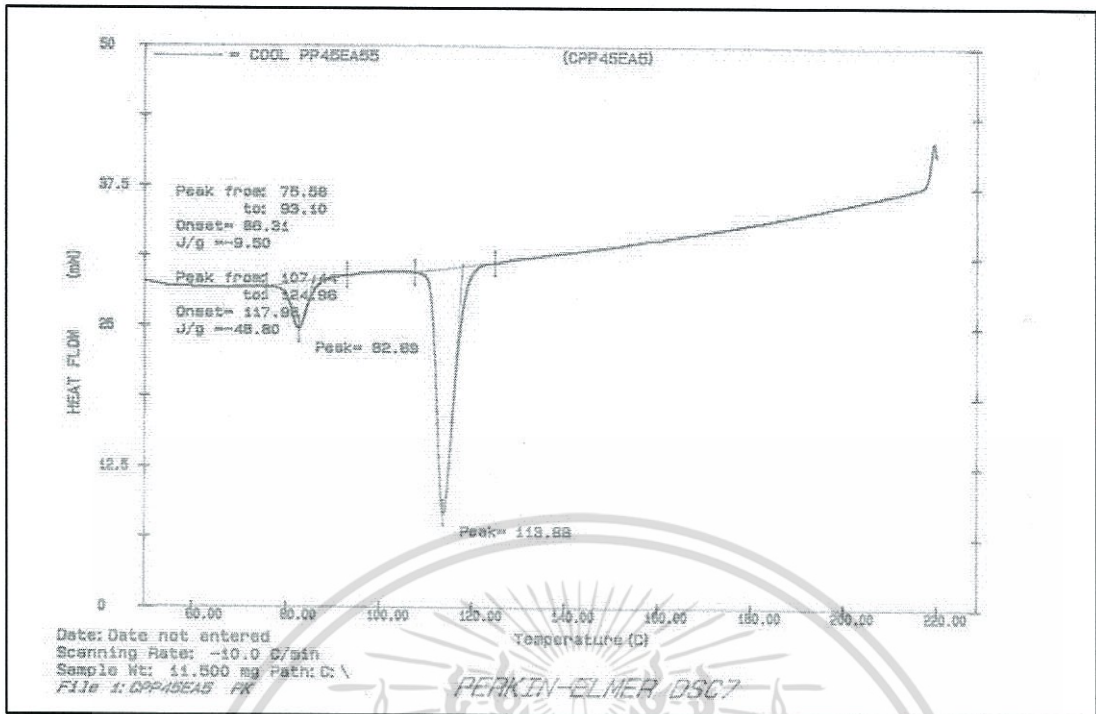


รูปที่ ข.7.1 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP45EA55 (First heating step)

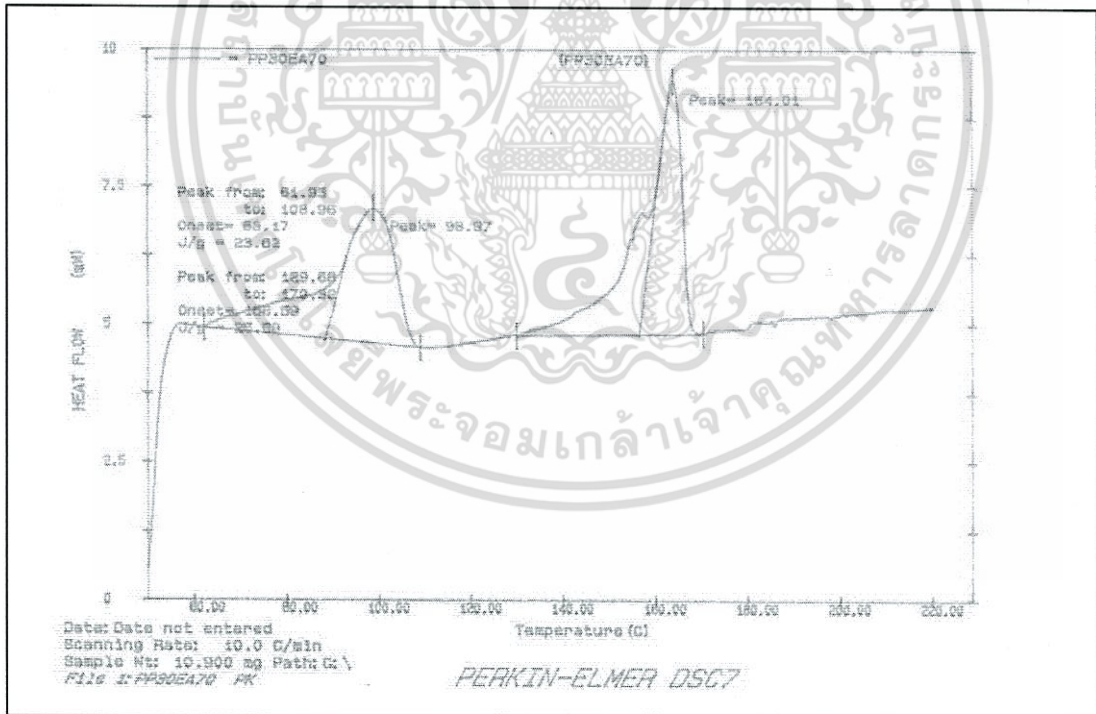


รูปที่ ข.7.2 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP45EA55 (Second heating step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

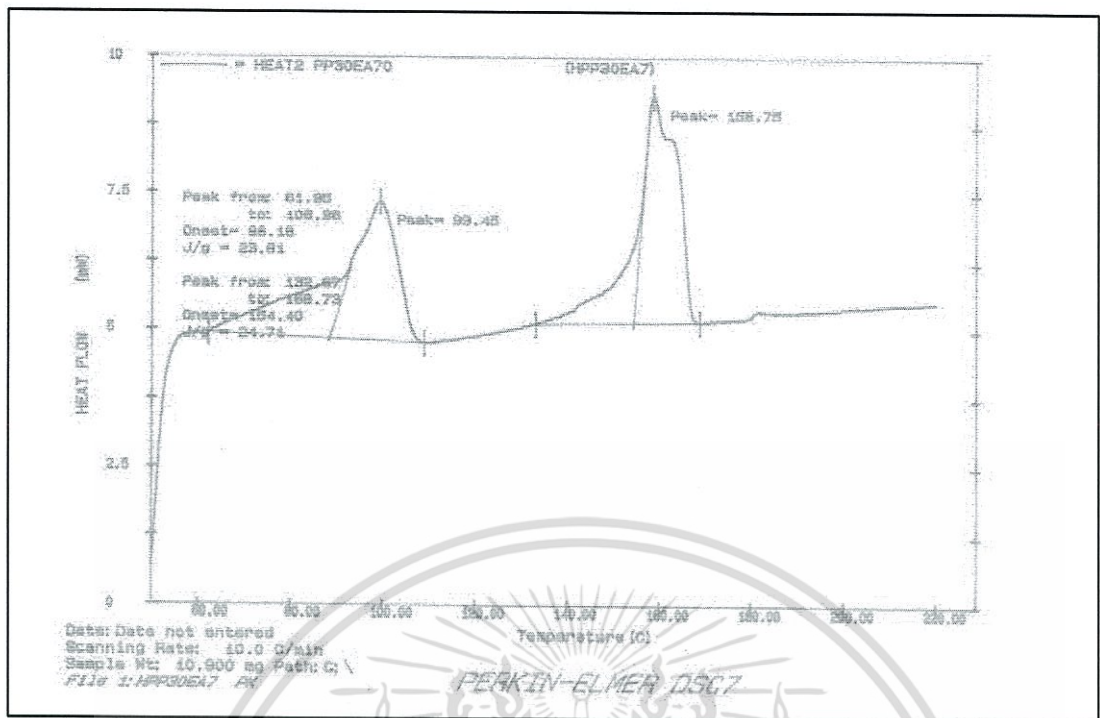


รูปที่ ข.7.3 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP45EA55 (Cooling step)

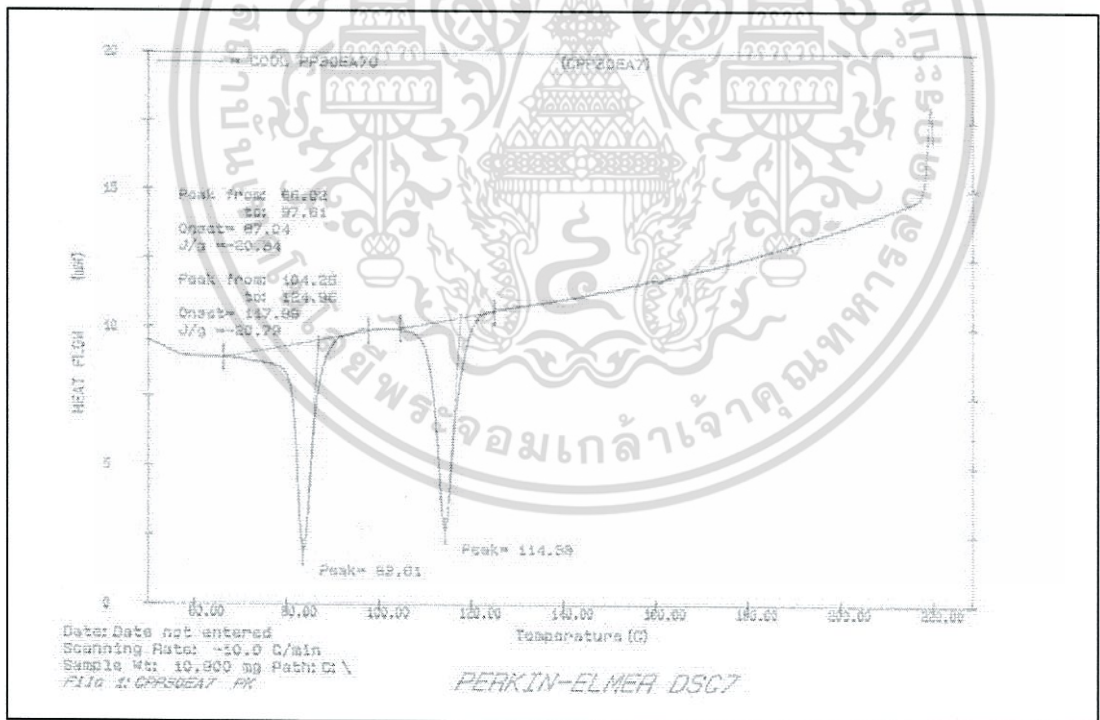


รูปที่ ข.8.1 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP30EA70 (First heating step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

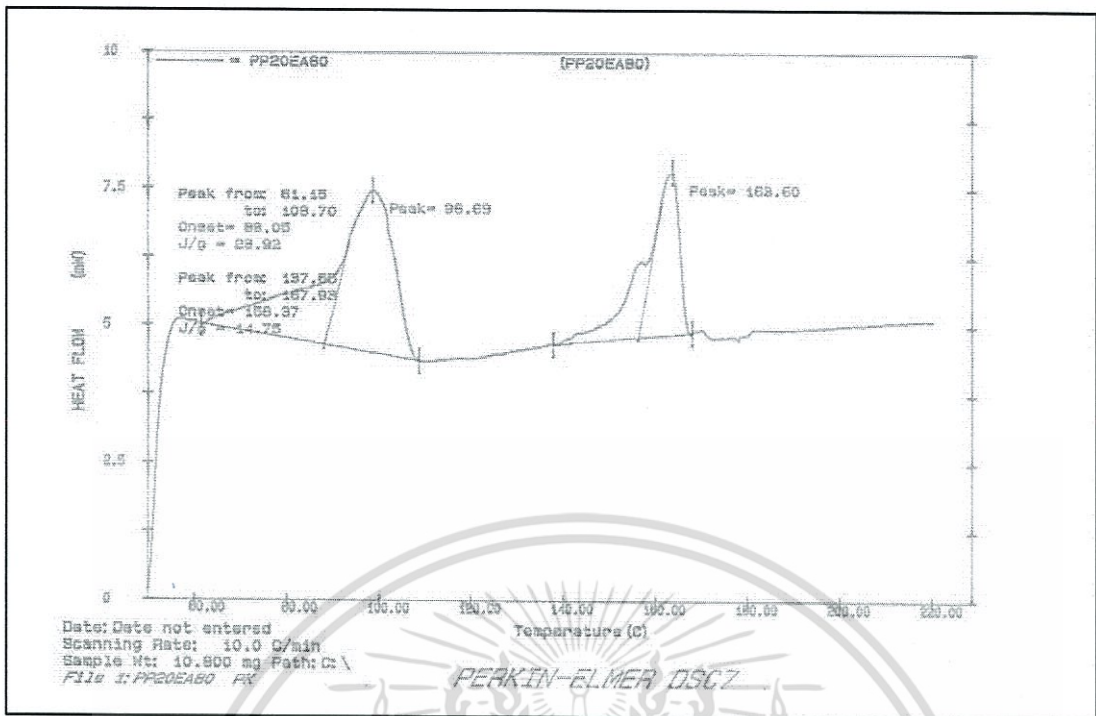


รูปที่ ข.8.2 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP30EA70 (Second heating step)

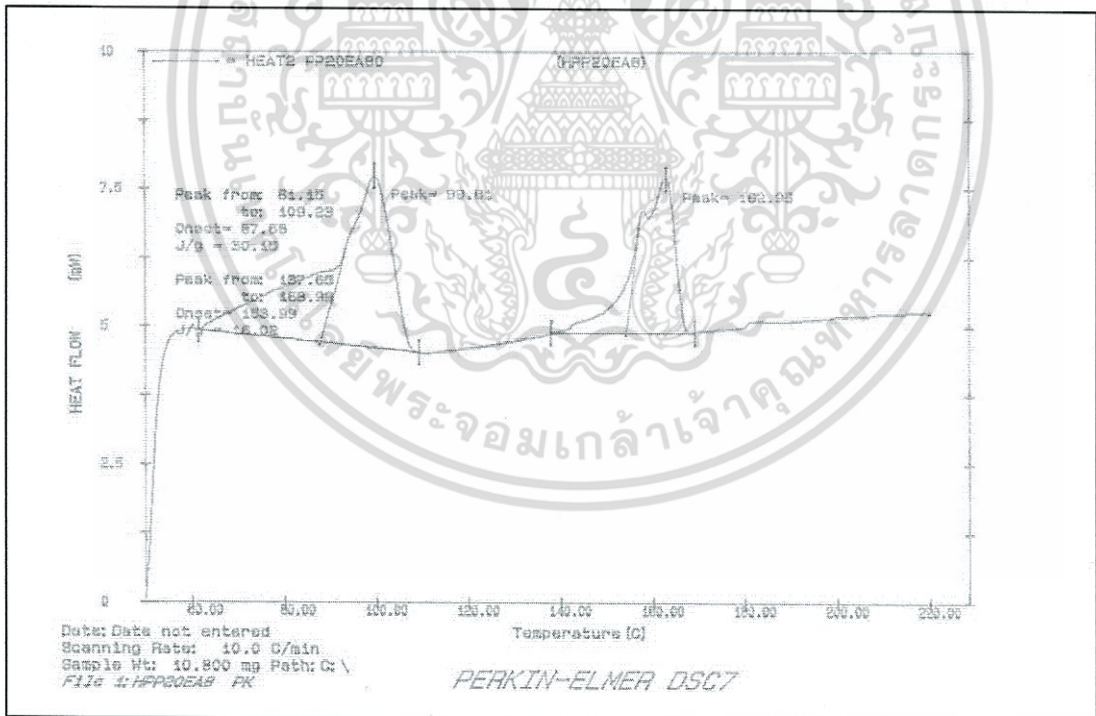


รูปที่ ข.8.3 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP30EA70 (Cooling step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

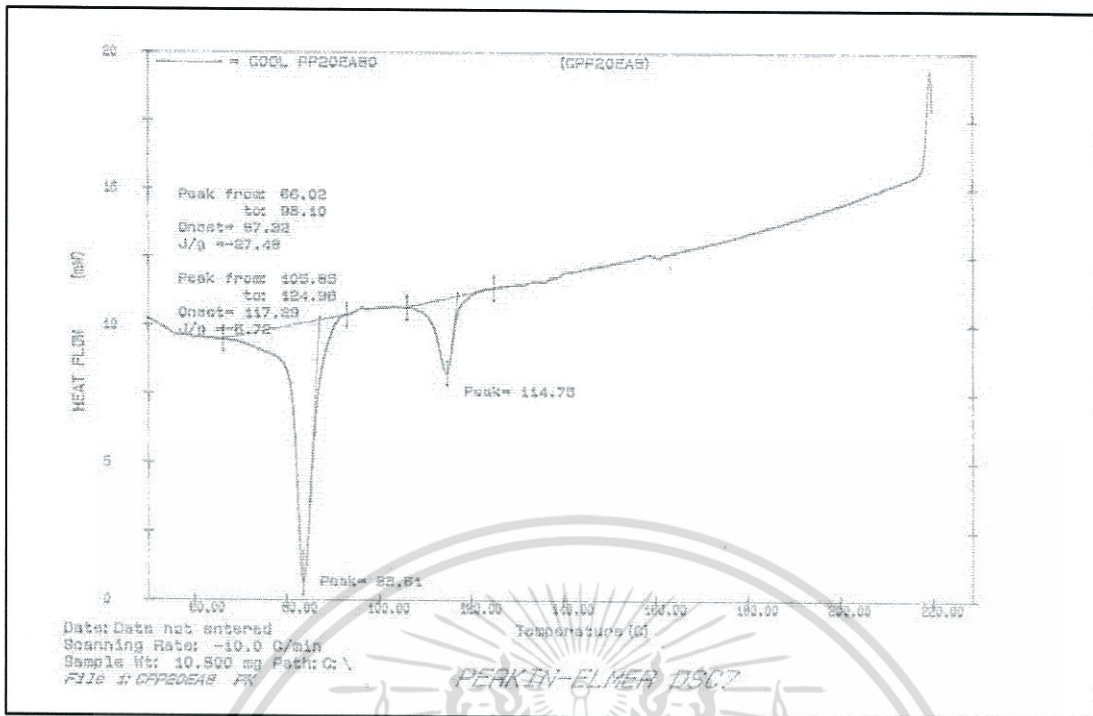


รูปที่ ข.9.1 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP20EA80 (First heating step)

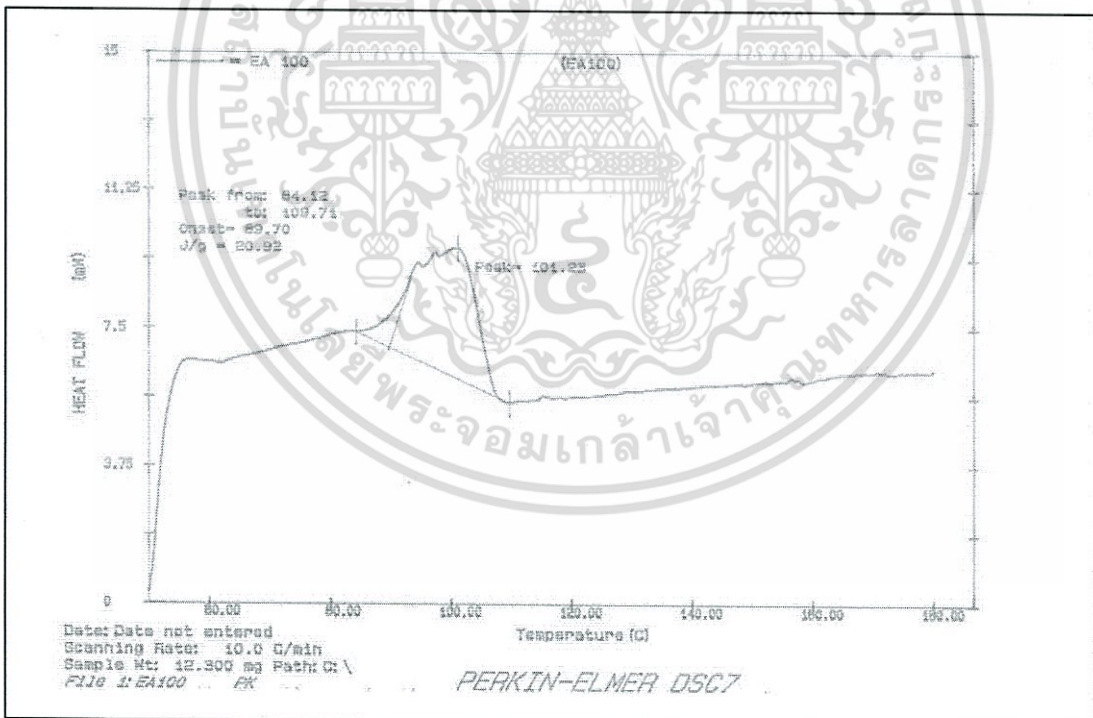


รูปที่ ข.9.2 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP20EA80 (Second heating step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

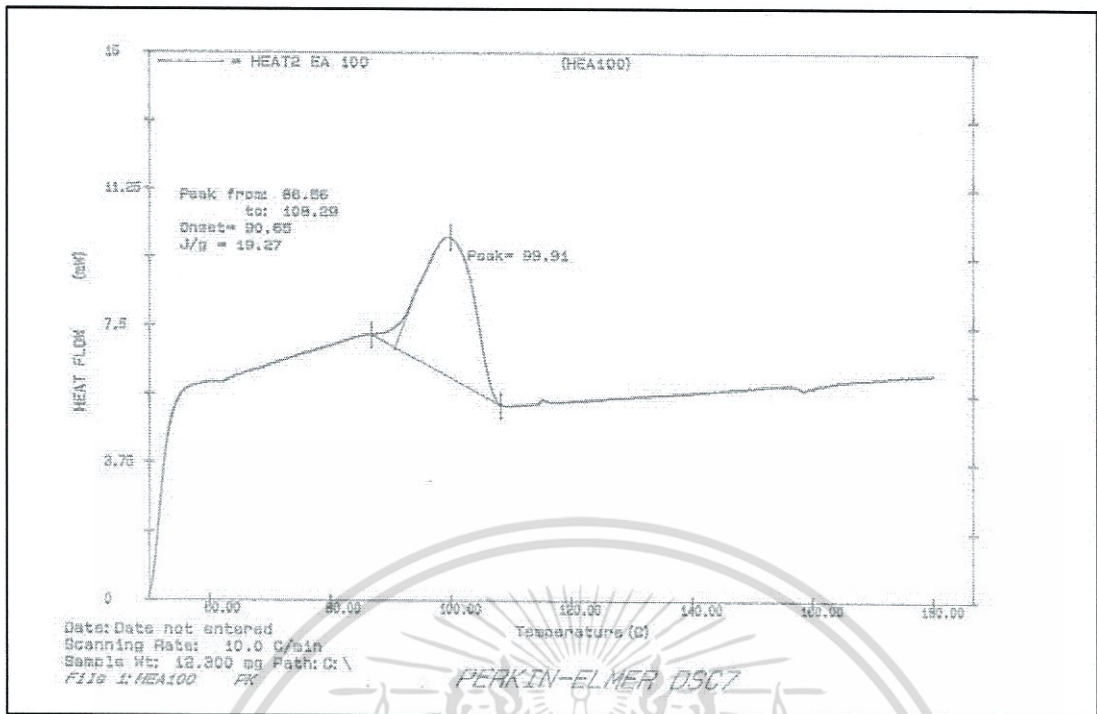


รูปที่ ข.9.3 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP20EA80 (Cooling step)

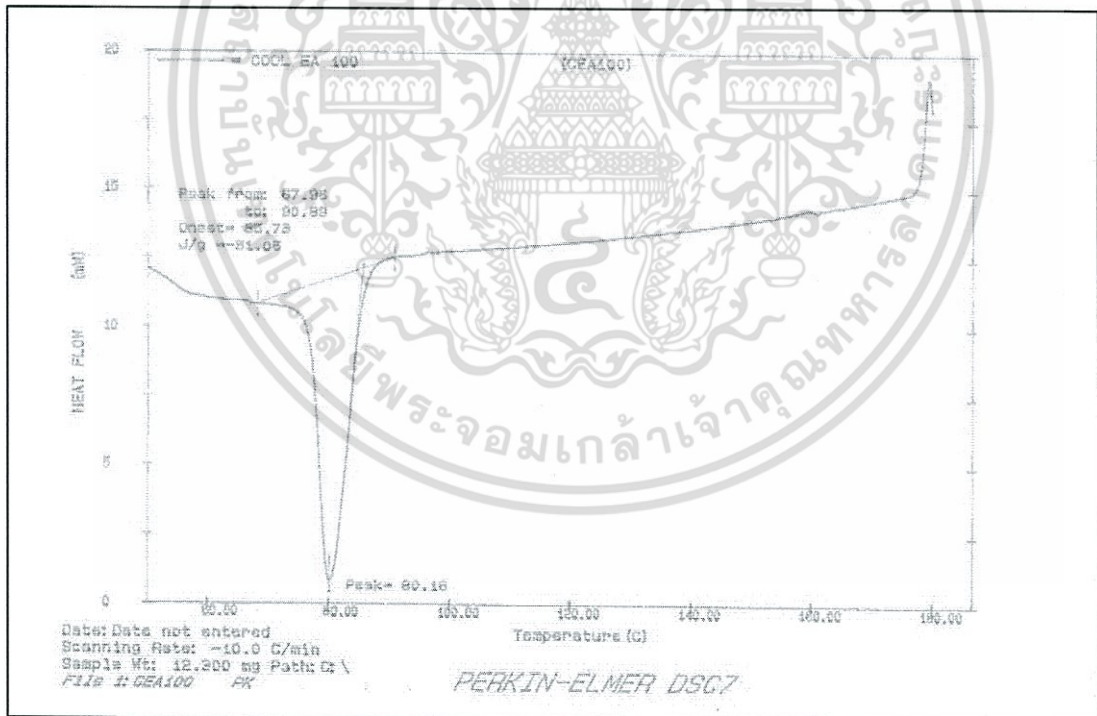


รูปที่ ข.10.1 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PP0EA100 (First heating step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



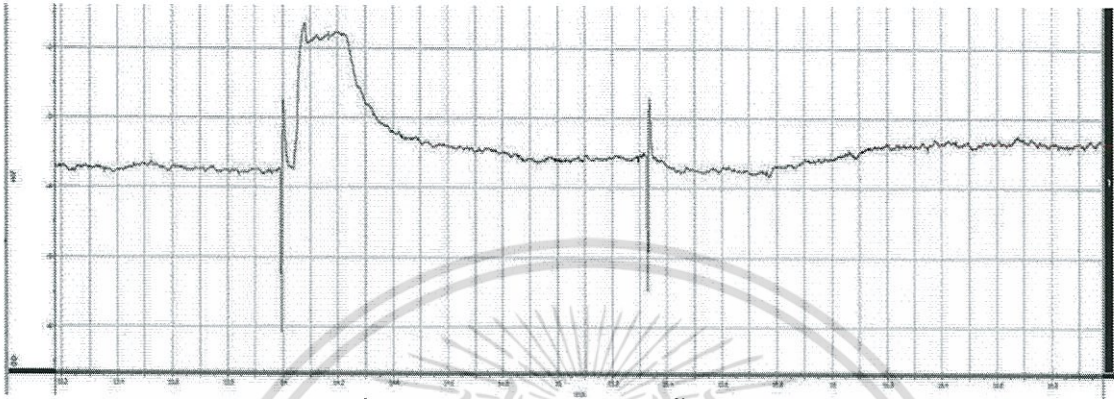
รูปที่ ข.10.2 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PPOEA100 (Second heating step)



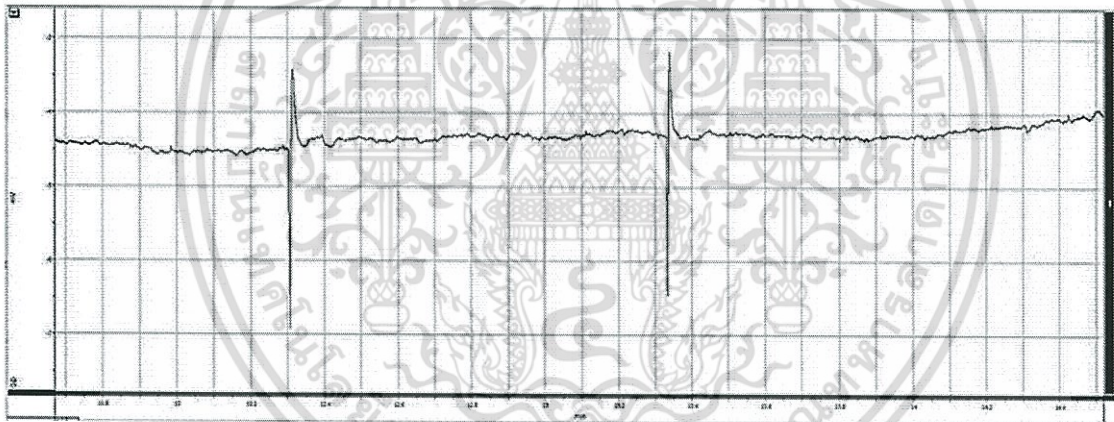
รูปที่ ข.10.3 DSC เทอร์โมแกรมฟิล์ม PPOEA100 (Cooling step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

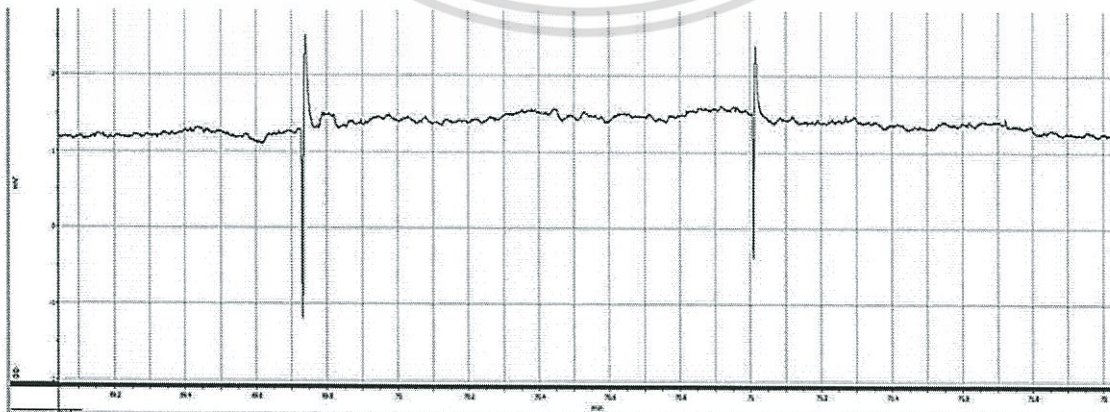
ภาคผนวก ค
โครมาโทแกรมจากเครื่อง Gas Chromatography
ในการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ



รูปที่ ค.1 โครมาโทแกรมของไอน้ำมาตรฐาน

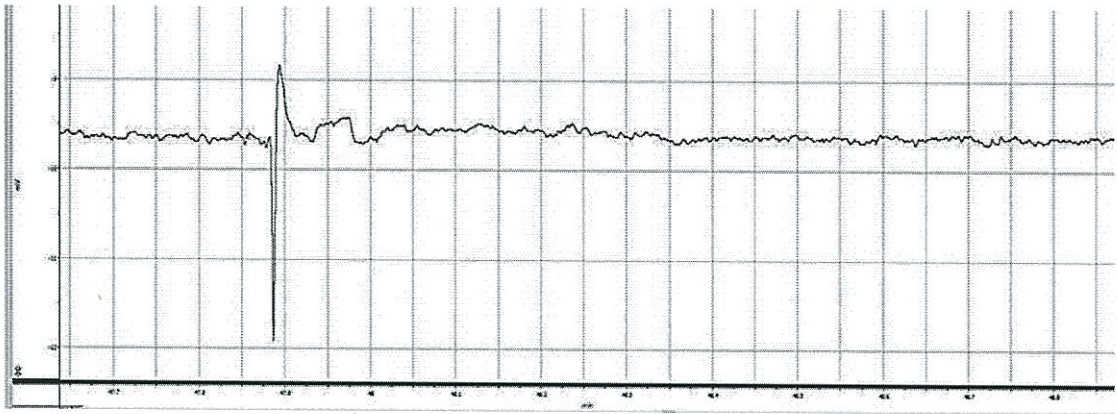


รูปที่ ค.2 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP100EA0

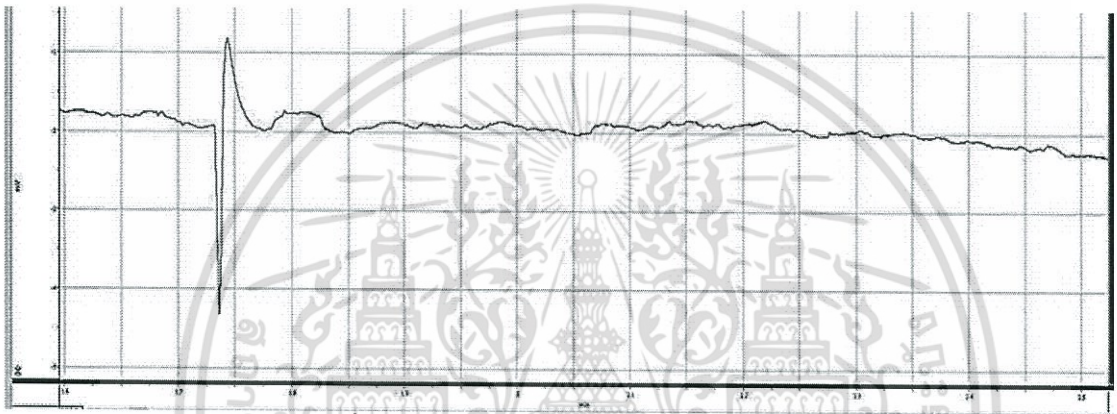


รูปที่ ค.3 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP70EA30

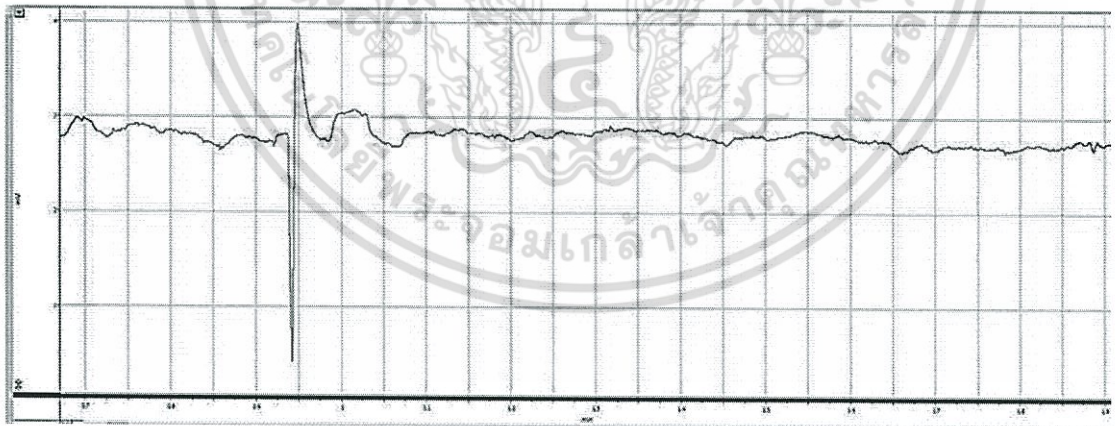
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.4 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP50EA50



รูปที่ ค.5 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP30EA70



รูปที่ ค.6 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PPOEA100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ง.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มตัวอย่างในอัตราส่วนต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ความหนา (μm)	ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (MPa)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด	ยังมอดุลัส (MPa)
PP100EA0	75 ± 13	30.9 ± 2.0	11.2 ± 2.0	1196 ± 35
PP90EA10	83 ± 11	23.9 ± 1.1	16.4 ± 2.7	960 ± 94
PP80EA20	77 ± 9	17.7 ± 1.0	10.6 ± 2.9	751 ± 90
PP70EA30	58 ± 8	16.3 ± 1.6	12.5 ± 1.8	758 ± 83
PP60EA40	71 ± 14	14.8 ± 1.1	10.2 ± 1.3	556 ± 50
PP50EA50	49 ± 19	11.1 ± 1.5	9.1 ± 1.1	424 ± 62
PP45EA55	52 ± 5	9.2 ± 0.8	12.8 ± 1.3	365 ± 81
PP30EA70	71 ± 16	5.6 ± 0.5	30.6 ± 10.2	152 ± 30
PP20EA80	66 ± 16	4.4 ± 0.2	88.2 ± 55.3	82 ± 13
PP0EA100	89 ± 15	4.1 ± 0.5	403.8 ± 117.9	16 ± 3

ตารางที่ ง.2 ความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ความหนา (μm)	ความแข็งแรงฉีกขาด (MPa)
PP100EA0	65 ± 13	109.7 ± 4.6
PP90EA10	72 ± 8	90.9 ± 6.1
PP80EA20	62 ± 13	86.8 ± 1.9
PP70EA30	40 ± 20	63.5 ± 1.1
PP60EA40	65 ± 5	53.9 ± 2.9
PP50EA50	43 ± 8	48.3 ± 7.9
PP45EA55	48 ± 3	50.7 ± 1.9
PP30EA70	57 ± 8	40.5 ± 0.6
PP20EA80	50 ± 6	39.6 ± 1.6
PP0EA100	55 ± 5	37.5 ± 0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฟิล์มพลาสติกโพลีเอทิลีนสำหรับงานเกษตรกรรม
(มอก. 711-2530) [40]

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



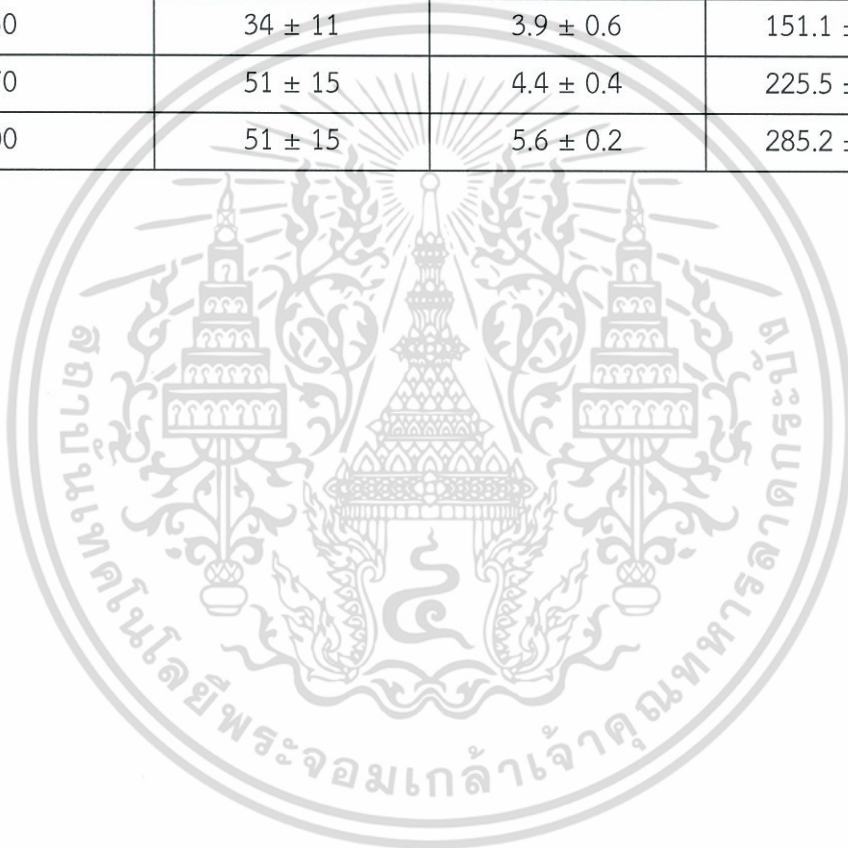
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การซึมผ่านไอน้ำ

ตารางที่ จ.1 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ความหนา (μm)	WVTR ($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$)	WVP ($\text{g}\cdot\mu\text{m}/\text{m}^2\cdot\text{day}$)
PP100EA0	41 ± 5	2.3 ± 0.1	91.3 ± 4.2
PP70EA30	43 ± 9	3.2 ± 0.1	138.1 ± 6.2
PP50EA50	34 ± 11	3.9 ± 0.6	151.1 ± 23.8
PP30EA70	51 ± 15	4.4 ± 0.4	225.5 ± 18.1
PP0EA100	51 ± 15	5.6 ± 0.2	285.2 ± 10.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

