

การศึกษาพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS/ZSM-5 เพื่อเพิ่ม
การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสำหรับฟิล์มบรรจุภัณฑ์

STUDY ON PP/SEBS/ZSM-5 BLENDS FOR IMPROVING
ETHYLENE PERMEATION OF PACKAGING FILM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS/ZSM-5 เพื่อเพิ่ม
การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสำหรับฟิล์มบรรจุภัณฑ์

STUDY ON PP/SEBS/ZSM-5 BLENDS FOR IMPROVING
ETHYLENE PERMEATION OF PACKAGING FILM

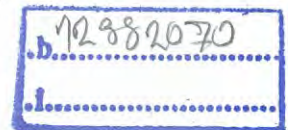


T149266

ชนิกันต์ สูดพวง
วิษชุดา เย็นใจมา
สิริ เกริกมณี

สพ.
25 49 17
2058

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149266
วันเดือนปี 30 ต.ค. 2561



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ปีการศึกษา 2558 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON PP/SEBS/ZSM-5 BLENDS FOR IMPROVING
ETHYLENE PERMEATION OF PACKAGING FILM



CHANIKAN SUDPOUNG
WITCHUDA YENJAIMA
SIRI KRIRKMANEE

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

ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS/ZSM-5 เพื่อเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสำหรับฟิล์มบรรจุภัณฑ์

Study on PP/SEBS/ZSM-5 Blends for Improving Ethylene Permeation of Packaging Film

ชื่อนักศึกษา

นางสาวชนิกานต์ สุดพวง

รหัสนักศึกษา 55050614

นางสาววิษชุดา เย็นใจมา

รหัสนักศึกษา 55050803

นายสิริ เกริกมณี

รหัสนักศึกษา 55050830

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา


ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย

ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักขลธิ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้ปัญหาพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษา	
รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักขลธิ กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS/ZSM-5 เพื่อเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสำหรับฟิล์มบรรจุภัณฑ์	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชนิกานต์ สุดพวง	รหัสนักศึกษา 55050614
	นางสาววิษชุดา เย็นใจมา	รหัสนักศึกษา 55050803
	นายสิริ เกริกมณี	รหัสนักศึกษา 55050830
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2558	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย ผศ.ดร.สุภรัตน์ รักชลธิ	

บทคัดย่อ

ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของพอลิโพรพิลีน (PP) / บล็อกโคพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน- สไตรีน (SEBS) ที่มีซีโอไลต์ ZSM-5 เตรียมขึ้นเพื่อเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนที่ดีขึ้น โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมของ PP/SEBS ที่อัตราส่วน 100/0, 95/5, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยน้ำหนัก และการศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์ (ZSM-5) 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก ในพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 50/50 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมใช้เครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิ 190°C ความเร็วรอบ 60 rpm เวลาในการผสม 20 นาที จากนั้นขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด นำฟิล์มที่ได้มาศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน จากผลการทดสอบ พบว่าการเติม SEBS และปริมาณซีโอไลต์ ZSM-5 ไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของ PP จากสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าในพอลิเมอร์ผสมที่มี SEBS เพิ่มขึ้น พบว่าขนาดวิภาคกระจายของ SEBS มีขนาดใหญ่ขึ้น และเปลี่ยนจากรูปร่างทรงกลม (Spherical shape) เป็นรูปร่างทรงกระบอก (Cylindrical shape) และพบว่าฟิล์มมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังลดลง แต่ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มเพิ่มสูงขึ้นจากการศึกษาพบว่าซีโอไลต์ส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ในวิภาคกระจายของ SEBS โดยซีโอไลต์บางส่วนมีการรวมกลุ่มกันเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ และพบว่าฟิล์มมีค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสของยังไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าต่ำลงอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มปริมาณของ SEBS และซีโอไลต์ ZSM-5 ทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเพิ่มขึ้น และพบว่าฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 15% โดยน้ำหนัก ให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนได้สูงถึง 8,422-9,144 cm³/m².day.atm เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PP ที่มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน 60 cm³/m².day.atm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : ซีโอไลต์ ZSM-5 พอลิพรพิลีน พอลิเมอร์ผสม พอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน
อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Study on PP/SEBS/ZSM-5 Blends for Improving Ethylene Permeation of Packaging Film	
Students	Miss. Chanikan Sudpoung	Student ID 55050614
	Miss. Witchuda Yenjaima	Student ID 55050803
	Mr. Siri Krirkmanee	Student ID 55050830
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2015	
Advisor	Asst.Prof.Dr. Chonlada Ritvirulh	
Co-advisors	Assoc.Prof.Dr. Tawan Sooknoi Asst.Prof.Dr. Suparat Rukchonlatee	

Abstract

PP/SEBS-zeolite ZSM-5 blend films were prepared for packaging films with improved ethylene permeability. Polymer blends were compounded with blend ratios of PP/SEBS at 100/0, 95/5, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 and 50/50. Effect of zeolite ZSM-5 loadings (5, 10 and 15 wt%) was tested in a blend ratio of 50/50. The blends were mixed by an internal mixer at temperature 190°C with a rotor speed of 60 rpm and mixing time for 20 minutes. The films were then fabricated using a compression molding process. The film characteristics including mechanical and thermal properties, morphology and ethylene permeability were examined. It was found that the SEBS and zeolite content did not affect crystallinity of PP. Morphological study suggested that the blends with high SEBS contents generally exhibited relatively larger SEBS dispersed phase size. In addition, shape of the dispersed phase was changed from spherical to cylindrical, as SEBS content was increased. Tensile strength and Young's modulus were decreased with SEBS contents, while elongation at break of the film was increased. From extraction experiment also indicated that zeolite was preferential dispersed in SEBS phase. Besides, an agglomerate of zeolite was observed as the zeolite content was increased. Tensile strength and Young's modulus were not significantly affect by the zeolite content. However, elongation at break was noticeably decreased. The ethylene permeability of the film was increased with SEBS and zeolite content. The film filled with zeolite ZSM-5 15 wt% was provided as high as 8,422-9,144 $\text{cm}^3/\text{m}^2.\text{day}.\text{atm}$ of ethylene transmission rate, when compared to 60 $\text{cm}^3/\text{m}^2.\text{day}.\text{atm}$ of the parent PP film.

Keywords : Zeolite ZSM-5, Polypropylene, Polymer blend, Polystyrene-ethylene/
butylene-styrene, Ethylene transmission rate



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุก ๆ ท่าน ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ รศ.ดร. ตะวันสุขน้อย และ ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร และ ผศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขโครงการพิเศษให้ถูกต้องและสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณา มรรคผล และคุณณัฐพงศ์ มากมีทรัพย์ นักศึกษาปริญญาโท และเอก ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุจิต สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อน ๆ และบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ชนิกานต์ สุดพวง
วิษชุดา เย็นใจมา
สิริ เกริกมณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การเปลี่ยนแปลงผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว.....	4
2.1.1 การหายใจ	4
2.1.2 การสุก	5
2.2 บทบาทหน้าที่ของก๊าซเอทิลีน.....	6
2.3 เทคโนโลยีการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน	7
2.3.1 การแยกด้วยเมมเบรน	7
2.3.2 กระบวนการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน	8
2.3.3 สมรรถนะของกระบวนการ	10
2.3.4 สมบัติของเมมเบรนในการแยกก๊าซ	10
2.4 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend)	12
2.4.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม	12
2.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม	14
2.5 พอลิโพรพิลีน	14
2.5.1 การสังเคราะห์ PP	14
2.5.2 ลักษณะทั่วไปของพอลิโพรพิลีน	15
2.5.3 สมบัติของพอลิโพรพิลีน	16
2.5.4 การนำไปใช้งานของพอลิโพรพิลีน	17
2.6 พอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน	17
2.7 ซีโอไลต์	18
2.7.1 สมบัติทั่วไป	18
2.7.2 ซีโอไลต์ ZSM-5	19
2.7.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์ในชีวิตประจำวัน	20
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	24
3.1 สารเคมี	24
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	25
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	25
3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม	25
3.3.2 การเตรียมฟิล์ม	27
3.3.3 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม	27
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	32
4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วน PP/SEBS ต่อสมบัติของฟิล์ม	32
4.1.1 พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม PP/SEBS	32
4.1.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม PP/SEBS	33
4.1.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/SEBS.....	36
4.1.4 การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม PP/SEBS	40
4.2 การศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์ต่อสมบัติของฟิล์ม PP/SEBS/ZSM-5	40
4.2.1 พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม PP/SEBS/ZSM-5	40
4.2.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม PP/SEBS/ZSM-5	44
4.2.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/SEBS/Zeolite ZSM-5	46
4.2.4 การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม PP/SEBS/ZSM-5	48
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุปผลการวิจัย	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	55
ภาคผนวก ก การคำนวณ	56
ภาคผนวก ข DSC เทอร์โมแกรม.....	59
ภาคผนวก ค TGA เทอร์โมแกรม.....	64
ภาคผนวก ง โครมาโทแกรม	67
ภาคผนวก จ สมบัติเชิงกล	73
ภาคผนวก ฉ การซึมผ่านก๊าซเอทิลีน	74

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อัตราการหายใจของผลผลิตชนิดต่าง ๆ.....	5
2.2 ตัวอย่างของผลไม้ Climacteric และ Non-climacteric บางชนิด	6
2.3 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการสุกของผลผลิต	6
2.4 การตอบสนองต่อก๊าซเอทิลีนของผลผลิตแบบ Climacteric และ Non-climacteric	7
2.5 สมบัติบางประการของพอลิโพรพิลีน	17
2.6 Si/Al ratio ของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ.....	19
3.1 สมบัติบางประการของ PP	24
3.2 สมบัติบางประการของ SEBS Kraton® G1657	24
3.3 สูตรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP และ SEBS	26
3.4 สูตรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP และ SEBS ที่อัตราส่วน 50:50 ที่มีการเติม Zeolite ZSM-5.....	26
4.1 ค่า T_m , T_c และความเป็นผลึกของ PP ในฟิล์ม PP/SEBS	32
4.2 ค่า T_m , T_c และความเป็นผลึกของ PP ในฟิล์ม PP/SEBS/ZSM-5	41
4.3 ปริมาณซีโอไลต์ในฟิล์ม PP/SEBS/ZSM-5.....	41
4.4 ค่า T_g ของ PP, SEBS และพอลิเมอร์ผสมสูตร PP50S50 ที่เติมและไม่เติมซีโอไลต์ ZSM-5	44
ก.1 ความเป็นผลึก (% Crystallinity)	56
จ.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มตัวอย่างในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	73
ฉ.1 อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มตัวอย่าง	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	หลักการของกระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรน 8
2.2	กลไกการแยกก๊าซผ่านรูพรุนของเมมเบรนแบบมีรูพรุน..... 9
2.3	การแยกก๊าซโดยการใช้เมมเบรนเนื้อแน่น กลไกการละลาย-การแพร่..... 10
2.4	สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน 13
2.5	สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน 13
2.6	เตาปฏิกรณ์แบบลูป (Loop reactor) 15
2.7	กระบวนการสังเคราะห์ในสถานะก๊าซ (Gas phase polymerization) 15
2.8	โครงสร้างของพอลิพรพิลีน 16
2.9	สูตรโครงสร้างของ SEBS 18
2.10	โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 19
3.1	ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 28
3.2	เซลล์เมมเบรน 29
3.3	แผนภาพแสดงการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน 30
3.4	แผนภาพแบบทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน 30
4.1	สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม PP หลังสกัดด้วยตัวทำละลายไซลีนที่กำลังขยาย 3500 เท่า 33
4.2	สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม PP/SEBS ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่สกัด SEBS ด้วย ไซลีนกำลังขยาย 3500 เท่า 34
4.3	ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP และ SEBS 36
4.4	มอดุลัสของยังของฟิล์ม PP และ SEBS 37
4.5	ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม PP และ SEBS 37
4.6	ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP/SEBS 38
4.7	มอดุลัสของยังของฟิล์ม PP/SEBS 38
4.8	ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม PP/SEBS 39
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับ %ความเครียดของฟิล์ม PP/SEBS 39
4.10	อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม PP/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่าง ๆ 40
4.11	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม (E') กับอุณหภูมิของ PP, SEBS, PP50S50, PP50S50Z5, PP50S50Z10 และ PP50S50Z15 42
4.12	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสูญเสีย (E") กับอุณหภูมิของ PP, SEBS, PP50S50, PP50S50Z5, PP50S50Z10 และ PP50S50Z15 43
4.13	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง tan δ กับอุณหภูมิของ PP, SEBS, PP50S50, PP50S50Z5, PP50S50Z10 และ PP50S50Z15 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14	45
4.15	46
4.16	47
4.17	47
4.18	48
4.19	49
ข.1	59
ข.2	59
ข.3	60
ข.4	60
ข.5	61
ข.6	61
ข.7	62
ข.8	62
ข.9	63
ข.10	63
ค.1	64
ค.2	65
ค.3	65
ค.4	66
ง.1	67
ง.2	67
ง.3	68
ง.4	68
ง.5	69
ง.6	69
ง.7	70
ง.8	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
จ.9	โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP50S50Z5	71
จ.10	โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP50S50Z10.....	71
จ.11	โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP50S50Z15	72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ผลไม้ นับเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญประเภทหนึ่งของประเทศไทย โดยผลไม้ไม่สามารถทำรายได้เข้าประเทศปีละหลายพันล้านบาท และผลไม้ไทยยังเป็นที่นิยมบริโภคกันทั่วไปทั้งในประเทศและต่างประเทศ นอกจากนี้ความต้องการในการบริโภคผลไม้ นับวันยิ่งเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากสาเหตุหลักคือจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นและความสนใจในสุขภาพที่มีมากขึ้นด้วย [1] อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญในการส่งออกผลไม้สดของไทย ได้แก่ การเน่าเสีย การสูญเสียคุณภาพของผลผลิตผลก่อนที่จะส่งถึงตลาดปลายทาง เช่น ระหว่างการขนส่งของประเทศผู้นำเข้า เป็นต้น เนื่องจากผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวนั้นยังคงมีชีวิตอยู่มีกระบวนการทางชีววิทยาเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา โดยผลไม้เกิดกระบวนการหายใจ รับก๊าซออกซิเจนจากสิ่งแวดล้อมเข้าไปเพื่อเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตที่สะสมไว้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และพลังงานความร้อน แต่ในผลไม้บางชนิด เช่น ผลไม้กลุ่ม Climacteric ในช่วงระหว่างกระบวนการสุก มีการผลิตก๊าซเอทิลีนเกิดขึ้น ซึ่งสามารถไปกระตุ้นกระบวนการต่าง ๆ ให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น การสุก การเปลี่ยนสีเขียวเป็นสีเหลือง การหลุดร่วงของดอกและใบ และเป็นตัวเร่งกระบวนการหายใจ ทำให้มีอัตราการหายใจสูง ผลไม้จึงเกิดการสุกและนำไปสู่การเน่าเสียตามมา ดังนั้นการวางผลไม้ในที่ปิดโล่งทำให้มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก ส่งผลให้ผลไม้ได้รับก๊าซออกซิเจนเพียงพอต่อการหายใจอย่างต่อเนื่อง เกิดการสุกตามปกติ ซึ่งปัญหานี้เป็นปัจจัยสำคัญในการเก็บรักษาผลผลิตสดหลังการเก็บเกี่ยว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องใช้เวลาในการขนส่งเป็นระยะเวลาอันยาวนานไปยังประเทศต่าง ๆ [2-3] ดังนั้นจึงมีวิธีการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้หลายวิธี เช่น การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ การใช้สารเคลือบผิว การเก็บรักษาในสภาพบรรยากาศดัดแปลง (Modified atmosphere) และการใช้สารดูดซับก๊าซเอทิลีน เป็นต้น [4] ในปัจจุบันฟิล์มบรรจุภัณฑ์พลาสติกตามท้องตลาดมีมากมายหลายชนิดโดยที่นิยมใช้ ได้แก่ ฟิล์มพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP), ฟิล์มพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE), ฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC), ฟิล์มพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) และฟิล์มพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) [5] โดยจากความรู้เรื่องผักและผลไม้ หลังการเก็บเกี่ยวยังคงมีการหายใจและการผลิตก๊าซเอทิลีนอยู่ ดังนั้นการบรรจุผักและผลไม้สดในฟิล์มบรรจุภัณฑ์พลาสติก ทั่วไปตามท้องตลาด หรือบรรจุในบรรจุภัณฑ์พลาสติกเจาะรูทำให้ก๊าซออกซิเจนเข้า-ออกได้น้อยลง เนื่องจากมีถุงพลาสติกเป็นตัวกั้น (Barrier) แต่ยังคงมีก๊าซเอทิลีนเกิดขึ้น โดยก๊าซเอทิลีนที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นที่ต่ำ ทำให้ซึมผ่านออกไปได้ยาก จึงยังคงสะสมอยู่ในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งเป็นการเร่งให้ผลไม้สุกเร็วขึ้น [2] ดังนั้นจึงมีการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่มีความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีน ทำให้ชั้นฟิล์มมีความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนสูงขึ้น จึงเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเพื่อลดกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยาของผลไม้ ยืดอายุของผลไม้ ชะลอการเน่าเสีย และรักษาความสดใหม่ของผลผลิต

จากงานวิจัยของพรพรรณ มั่นประสิทธิ์ [6] ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับฟิล์มคอมโพสิตสองชั้นของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) กับบล็อกโคพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (Poly(styrene-ethylene/butylene-styrene), SEBS) ที่มีค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ปริมาณ 5-30% โดยน้ำหนัก ลงใน SEBS การเตรียมฟิล์มให้ซีโอไลต์มีการกระจายตัว 2 แบบ คือการทำให้ซีโอไลต์กระจายตัวอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของฟิล์มเรียกว่า Surface-rich และทำให้ซีโอไลต์กระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อฟิล์ม เรียกว่า Well-dispersed พบว่าการเติมซีโอไลต์ในปริมาณ 5-10% โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน แต่ถ้าเติมในปริมาณที่มากเกินไป 10% โดยน้ำหนัก ทำให้การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ส่วนการกระจายตัวที่ต่างกันของซีโอไลต์ ไม่ส่งผลต่อการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนในฟิล์มคอมโพสิตสองชั้น เนื่องจากชั้น LDPE ที่มีความเป็นผลึก (Crystallinity) ขัดขวางการซึมผ่านของก๊าซ (Gas barrier) ทำให้การซึมผ่านได้ช้า จากปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยของกนกวรรณ หงส์ทอง และคณะ [7] ได้มีการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และ SEBS Kraton® G1657 ด้วยวิธีผสมแบบหลอมเหลว (Melt blending) ซึ่งเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนยุ่งยากน้อยกว่าการทำฟิล์มสองชั้น โดยเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วน 100/0, 80/20, 75/25 และ 70/30 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงสุดเนื่องจาก SEBS มีโครงสร้างเป็นอสัณฐานมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ มีปริมาตรอิสระสูง (Free volume) เมื่ออัตราส่วน SEBS เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ก๊าซเอทิลีนสามารถซึมผ่านได้ดีมากขึ้น นอกจากนี้ยังทำการศึกษาลักษณะของปริมาณซีโอไลต์ ZSM-5 ต่อสมบัติของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก ในปริมาณ 5-15% โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณซีโอไลต์ 15% โดยน้ำหนัก ทำให้ฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงสุด เนื่องจากซีโอไลต์ ZSM-5 มีความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีนรวมถึงมีโครงสร้างเป็นรูพรุน เมื่อก๊าซเอทิลีนถูกดูดซับทำให้เกิดความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนสูงที่ชั้นของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมและเกิดการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนไปยังบรรยากาศซึ่งมีความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนต่ำกว่า ดังนั้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเพิ่มมากขึ้นด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเติม SEBS และซีโอไลต์ ZSM-5 ช่วยเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาและพัฒนาฟิล์มที่มีการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนได้ดีด้วยการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว (Melt blending) โดยเปลี่ยนมาเลือกใช้พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์อีกชนิดที่นิยมใช้เป็นวัสดุสำหรับทำบรรจุภัณฑ์ ด้วยสมบัติเด่นของ PP คือมีความใส ผิวหน้ามันวาว ไม่ติดฝุ่นง่าย มีความเหนียวสูง ทนต่อความร้อนและสารเคมี ปลอดภัยสามารถใช้กับอาหารและยาได้ดี [4] นอกจากนี้ PP ยังมีสมบัติบางประการที่เด่นกว่า LLDPE โดยมีความสามารถในการทนต่อแรงดึงรวมถึงมีความคงรูปที่มากกว่า และ PP มีความสามารถในการพิมพ์ดีดที่ดีกว่า LLDPE จึงเหมาะแก่การนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาและเข้าใจถึงปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS และปริมาณการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ส่งผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS ในอัตราส่วน 100/0, 95/5, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)
2. ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด (Compression molding process)
3. ศึกษาปริมาณซีโอไลต์ (ZSM-5) 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ที่เติมในพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS ในอัตราส่วนที่มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนมากที่สุด
4. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC), Thermogravimetric analyzer (TGA) และ Dynamic mechanical analyzer (DMA)
5. ศึกษาการกระจายตัวของ SEBS และซีโอไลต์ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS/Zeolite ZSM-5 ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
6. ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์มในแต่ละสูตร
7. ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มในสูตรต่าง ๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การสร้างความเข้าใจผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS และการเติมซีโอไลต์ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม เช่น ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน สมบัติเชิงกลของฟิล์ม เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาฟิล์มบรรจุผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้ยาวนานมากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเปลี่ยนแปลงผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว [8]

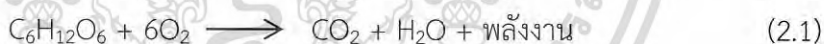
ผลผลิตสดของพืชหลังจากเก็บเกี่ยวจากต้นแล้วยังคงมีการเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับสรีรวิทยา และชีวเคมี โดยเฉพาะกระบวนการหายใจที่ยังคงดำเนินต่อไปจนสิ้นอายุขัยของเซลล์ มีผลทำให้คุณภาพด้านต่าง ๆ ของผลผลิต เช่น สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส รวมทั้งคุณค่าทางโภชนาการเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

2.1.1 การหายใจ (Respiration)

อัตราการหายใจเป็นดัชนีที่ชี้ให้เห็นถึงอัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอาหารในเมทาโบลิซึมที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ หรือเนื้อเยื่อของผลผลิต และสามารถบอกถึงอายุการเก็บรักษาของผลผลิตด้วยว่าสามารถเก็บรักษาได้นานเท่าไร ผลผลิตที่มีอัตราการหายใจสูงไม่สามารถเก็บรักษาได้นาน ในทางตรงกันข้ามผลผลิตที่มีอัตราการหายใจต่ำสามารถเก็บรักษาได้ระยะเวลาที่นานกว่า

การหายใจแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic respiration)

กระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจน คือ กระบวนการให้พลังงานจากกลูโคส โดยกลูโคสทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจน เพื่อเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตที่สะสมไว้ในเซลล์พืชในรูปของแป้งและน้ำตาล ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานในรูปของพลังงานความร้อน ดังสมการที่ 2.1



พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการหายใจของพืช เรียกว่า Vital heat หรือ Respiration heat ทำให้เกิดการเน่าเสียได้ง่าย ซึ่งผลผลิตที่มีอัตราการหายใจสูงสามารถผลิตความร้อนออกมามากกว่าผลผลิตที่มีอัตราการหายใจต่ำ เนื่องจากมีอัตราการสลายโมเลกุลของสารอาหารมากกว่า และเสื่อมคุณภาพเร็วกว่า อัตราการหายใจจึงมีความสำคัญต่อการพิจารณาเลือกใช้เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม เช่น การออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลผลิต ผลผลิตที่มีอัตราการหายใจสูงกว่ามีแนวโน้มที่มีอายุการเก็บรักษาที่สั้นกว่าผลผลิตที่มีอัตราการหายใจที่ต่ำกว่า ผลผลิตสดสามารถจำแนกตามการหายใจดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อัตราการหายใจของผลิตผลชนิดต่าง ๆ [8]

อัตราการหายใจ	ปริมาณการหายใจที่อุณหภูมิ 5 °C (mg CO ₂ /Kg-hr)	Vital heat (Btu/ton/24 hrs)	ตัวอย่างผักและผลไม้
ต่ำมาก	< 5	< 1100	ผลแห้ง เช่น ถั่วเมล็ดแห้ง, นัท, อินทผลัม
ต่ำ	5-10	1100-2200	แอปเปิ้ล, ผลไม้ตระกูลส้ม, กีวี, องุ่น, กระเทียม, หอมหัวใหญ่, มันฝรั่ง, มันเทศ
ปานกลาง	10-20	2200-4400	กล้วย, เชอร์รี่, ท้อ, แคนทาริน, สาลี่, พลัม, มะเดื่อ, กะหล่ำปลี, แครอท, มะเขือเทศ, พริก
สูง	20-40	4400-8800	สตอเบอรี่, แบลคเบอรี่, ราสเบอรี่, กะหล่ำดอก, อะโวคาโด
สูงมาก	40-60	8800-13200	Artichoke, Snap bean, ต้นหอม, Brussels sprouts, ไม้ตัดดอก
สูงมากที่สุด	> 60	> 13200	หน่อไม้ฝรั่ง, บรอกโคลี, Spinach, ข้าวโพดหวาน

Vital heat (Btu/ton/24 hrs) = mgCO₂/Kg-hr X 220

การหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration)

การหายใจชนิดนี้อาจเรียกว่าการหมัก (Fermentation) ซึ่งเป็นการหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจน หรือใช้ในจำนวนจำกัด ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นเป็นการสลายน้ำตาลกลูโคสผ่านกระบวนการไกลโคไลซิสเช่นเดียวกัน แต่กรดไพรูวิกถูกเปลี่ยนต่อเป็นกรดแลคติกหรือเป็นสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ เช่น อะซิทิลดีไฮด์และเอทิลแอลกอฮอล์ การหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจนให้พลังงานน้อยกว่าการหายใจที่ใช้ออกซิเจน ซึ่งโดยปกติผลิตผลทุกชนิดมีการหายใจที่ใช้ออกซิเจน แต่ในการเก็บรักษาบางสภาวะที่มีการลดปริมาณออกซิเจนลงต่ำกว่าปกติ ทำให้ออกซิเจนในบรรยากาศอาจมีไม่เพียงพอที่รักษาระดับของการหายใจที่ใช้ออกซิเจนได้จนเกิดการหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจน การหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจนนั้นผันแปรไปตามชนิดของเนื้อเยื่อพันธุ์ ความแก่อ่อน และอุณหภูมิ

2.1.2 การสุก [9]

การสุก (Ripening) เป็นกระบวนการที่ผลิตผลเข้าสู่ระยะชราภาพ โดยมีการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างภายในผลิตผล เช่น ผลอ่อนนุ่ม เกิดกลิ่นตามชนิดของผลไม้ นั้น รสชาติหวานขึ้น เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล ปริมาณกรดลดลง ผิวเปลี่ยนสีเป็นสีแดงเหลืองหรือสีอื่น ๆ ตามชนิดของผลิตผล การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ เหล่านี้เกิดขึ้นได้ต้องใช้พลังงานอย่างมาก ซึ่งพลังงานนี้ได้มาจากการหายใจที่เกิดขึ้นภายในผลิตผล การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นรวดเร็วมาก ผลิตผลเกิดการเปลี่ยนสภาพจากผลิตผลดิบกลายเป็นผลิตผลสุกภายในเวลาไม่กี่วัน ในช่วงที่ผลิตผลสุกมีการหายใจสูงมากและเพิ่มสูงขึ้นระหว่างผลิตผลสุกจึงเรียกผลิตผลเหล่านี้ว่า Climacteric fruit ส่วนผลไม้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สว่นไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูตให้นำไปไซประโยชน์ดานการคําไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกประเภทหนึ่ง เมื่อผลแก่จัดแล้วไม่มีการสุกเกิดขึ้น การหายใจในผลติดผลอยู่ในระดับต่ำ หรืออัตราการหายใจไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างที่ผลิตผลสุก เมื่อเก็บเกี่ยวมาแล้วเกิดมีการเปลี่ยนแปลงภายในผลิตผลน้อยมาก รสชาติของผลิตผลคงที่ตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนกระทั่งหมดอายุ เรียกผลิตผลดังกล่าวว่า Non-climacteric fruit ตัวอย่างของผลไม้ Climacteric fruit และ Non-climacteric fruit แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของผลไม้ Climacteric และ Non-climacteric บางชนิด [10]

Climacteric fruit	Non-climacteric fruit
แอปเปิ้ล, สาลี่, พลับ, ท้อ, ทูเรียน, อะโวคาโด, กีวี, ฝรั่ง, มะเดื่อ, น้อยหน่า, มะม่วง, มะละกอ, กล้วย, มะเขือเทศ, ขนุน, แดงโม, ละมุด	พริกหวาน, บลูเบอร์รี่, เชอร์รี่, องุ่น, เงาะ, มังคุด, ลิ้นจี่, ลำไย, มะไฟ, ลองกอง, สับปะรด, สตรอเบอร์รี่, ส้ม, ส้มโอ, มะนาว

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าการสุกของผลิตผลเกิดขึ้นกับผลไม้พวก Climacteric ผลไม้จำพวกนี้มีการหายใจสูงมากในช่วงที่สุก และยังพบว่าในช่วงนี้มีการผลิตเอทิลีนขึ้นภายในผลิตผลเป็นจำนวนมากเช่นกัน ดังนั้นอัตราการหายใจและปริมาณเอทิลีนจึงมีความสัมพันธ์กัน เมื่อปริมาณเอทิลีนสูงทำให้เร่งการหายใจมากขึ้น ซึ่งสามารถเร่งให้มีการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสุกเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ เอทิลีนจึงเป็นฮอร์โมนที่จำเป็นอย่างมากต่อการสุกของผลไม้ อาจเรียกเอทิลีนได้ว่าเป็นฮอร์โมนเร่งการสุก (Ripening hormone) ในระหว่างที่เกิดกระบวนการสุก ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างเกิดขึ้นภายในผลิตผล พอสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการสุกของผลิตผล [11]

กระบวนการ	การเปลี่ยนแปลงในผลิตผล
การเปลี่ยน (Methionine) ไปเป็นเอทิลีน	เอทิลีนถูกสร้างมากขึ้นและการหายใจมากขึ้น
การเปลี่ยนแป้งไปเป็นน้ำตาล	รสชาติหวานขึ้น
การลดปริมาณกรด	ความเปรี้ยวลดลง
การเปลี่ยนสารเพกติกจากรูปที่ไม่ละลายน้ำเป็นสารละลายน้ำ	ผลอ่อนนุ่ม
การสังเคราะห์สารระเหย (Volatile substances)	เกิดกลิ่นของผลไม้
การสลายตัวของคลอโรฟิลล์และการสังเคราะห์เม็ดสีอื่น ๆ	สีเขียวของเปลือกเปลี่ยนเป็นสีเหลือง, แดง และอื่น ๆ
การสลายตัวของแทนนิน (Tannin)	ความฝาดลดลง

2.2 บทบาทหน้าที่ของก๊าซเอทิลีน [11]

เอทิลีนเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลเล็ก เกิดจากการเผาไหม้และผลิตได้ตามธรรมชาติ ระหว่างการสุกของผลิตผล บทบาทที่สำคัญของก๊าซเอทิลีนคือเป็นฮอร์โมนที่พืชสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อควบคุมการเจริญเติบโต การสุกและการเน่าเสีย ซึ่งก๊าซเอทิลีนสามารถเร่งการหายใจและการสุกของเนื้อเยื่อเป็นเนื้อเยื่อที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต เมื่อเนื้อเยื่อที่เน่าเปื่อยหรือเน่าเสียนี้ถูกนำเข้าไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พืชได้แม้มีความเข้มข้นต่ำมากระดับ 0.1 ppm เมื่อผลิตผลได้รับก๊าซเอทิลีนปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดการสุกเร็วเกินไป ทำให้ไม่สามารถเก็บผลิตผลให้อยู่ในสภาพดิบได้นาน เรียกก๊าซเอทิลีนที่เกิดจากการสุกของผลิตผลหลังเก็บเกี่ยวว่า Ripening hormone หรือ Ripening gas โดยผลิตผลที่มีรูปแบบการหายใจแบบ Climacteric และ Non-climacteric มีการตอบสนองต่อก๊าซเอทิลีนแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การตอบสนองต่อก๊าซเอทิลีนของผลิตผลแบบ Climacteric และ Non-climacteric [11]

อิทธิพลของก๊าซเอทิลีน	Climacteric	Non-climacteric
1. การตอบสนองต่อการใช้เอทิลีนในการเพิ่มการหายใจ	กระตุ้นเพียงครั้งเดียว	ต้องกระตุ้นตลอดระยะหลังการเก็บเกี่ยว
2. อิทธิพลของเอทิลีนในการเพิ่มการหายใจ	ขึ้นกับความเข้มข้น	ไม่ขึ้นกับความเข้มข้น
3. การย้อนกิจกรรมกลับในการเพิ่มการหายใจโดยเอทิลีน	ไม่ย้อนกลับ การเพิ่มการหายใจเกิดขึ้นต่อไป	ย้อนกลับ การเพิ่มการหายใจเกิดขึ้นต่อไปยังคงมีการใช้เอทิลีนอยู่
4. การสร้างเอทิลีนต่อเนื่อง	มีการสร้างอย่างต่อเนื่อง	ไม่มีการสร้าง
5. ความเข้มข้นของเอทิลีนภายใน	แปรปรวนมากตั้งแต่ต่ำไปยั้งสูง	ความเข้มข้นต่ำ

บทบาทหน้าที่ของก๊าซเอทิลีนมีความสัมพันธ์ต่อความเสียหายทางกายภาพของผลิตผลสด เช่น การทำให้เกิดบาดแผล ซึ่งเกิดจากกระบวนการสุกด้วยเช่นกัน ฉะนั้นการระบายอากาศป้องกัน การสะสมของก๊าซเอทิลีนจากผลิตผลสามารถลดความเสียหาย และชะลอการสุก ก๊าซเอทิลีนจึงถือได้ว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาอย่างรอบคอบในระหว่างการเก็บเกี่ยว ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับบรรพบุรุษที่หีบห่อของผลิตผลด้วย

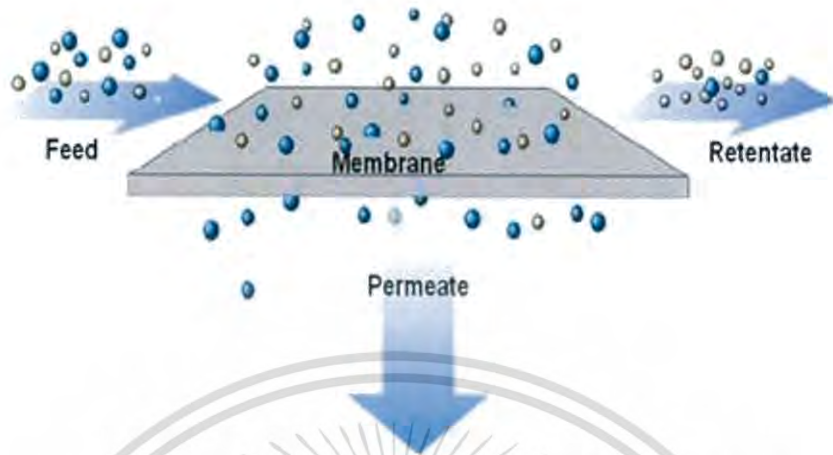
2.3 เทคโนโลยีการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน [12]

2.3.1 การแยกด้วยเมมเบรน

เมมเบรน (Membrane) คือ เยื่อแผ่นสังเคราะห์บาง ๆ ของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ที่ทำให้เกิดการแยกสารออกจากกัน อาจอยู่ในรูปก๊าซกับของเหลว ของแข็งกับของเหลว หรือของเหลวกับของเหลว เทคโนโลยีการแยกก๊าซด้วยเมมเบรนมีหลักการแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีการป้อนสารละลาย (Feed) ไหลผ่านเมมเบรนโดยแรงขับเคลื่อน (Driving force) ได้แก่ ความดัน ความเข้มข้น หรือแรงเคลื่อนทางไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการถ่ายมวล ตัวถูกละลายที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าเมมเบรนหรือละลายในเนื้อเมมเบรนได้น้อยถูกกักไว้ สารที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ เรียกว่า รีเทนเตต (Retentate) หรือสารละลายเข้มข้น (Concentrate) ส่วนตัวทำละลายหรือสารโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือละลายในเนื้อเมมเบรนได้ดีสามารถผ่านเมมเบรนได้ เรียกว่า เพอร์มิเอต (Permeate) ซึ่งส่วนที่ต้องการนำไปใช้ประโยชน์อาจเป็นส่วนรีเทนเตตหรือเพอร์มิเอตได้



รูปที่ 2.1 หลักการของกระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรน [13]

2.3.2 กระบวนการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน

Gas separation คือ ความสามารถในการแยกสารโดยใช้เมมเบรน ซึ่งมีกลไกการแยกแบ่งเป็น 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 กลไกการแพร่ผ่านของก๊าซ (Gas diffusion) เกิดขึ้นในเมมเบรนแบบมีรูพรุน (Porous membranes) ที่มีรูพรุนกระจายตัวอย่างต่อเนื่อง (Inter-connected pores) อยู่ในเมมเบรน ความแตกต่างของศักย์เคมีภายในเมมเบรน (Chemical potential gradient) ทำหน้าที่เป็นแรงผลักดัน ทำให้ก๊าซเคลื่อนที่แพร่ผ่านเมมเบรนไปได้ โดยศักย์เคมีที่ให้อาจอยู่ในรูปของความเข้มข้น ความดันย่อย (Partial pressure) สนามไฟฟ้า (Electric field) หรืออุณหภูมิ แบ่งเป็น 3 กรณีได้แก่

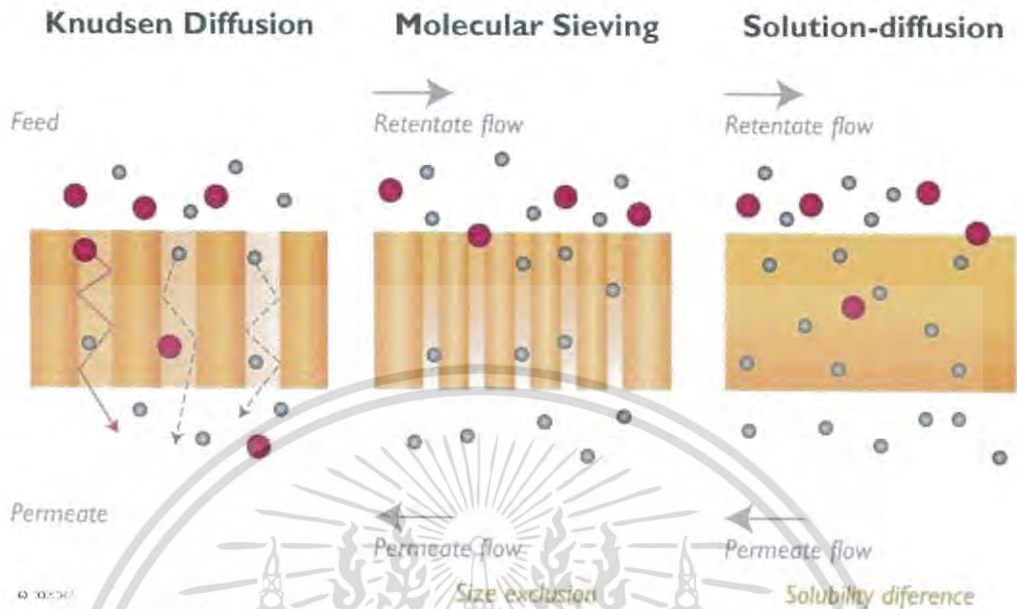
1) การแยกโดยการแพร่แบบนูดเซน (Knudsen diffusion) การแยกแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรน ซึ่งเป็นระยะที่โมเลกุลของก๊าซสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่ชนกัน ทำให้โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ชนผนังรูพรุนมากกว่าชนกันเอง ดังนั้นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กและเบากว่าจึงสามารถซึมผ่านเมมเบรนออกมาได้มากกว่า

2) การแยกโดยการคัดขนาดโมเลกุล (Molecular sieving) เป็นการแยกก๊าซตามขนาดโมเลกุลที่แตกต่างกัน โดยการใช้เมมเบรนเป็นตัวคัดขนาด ดังนั้นเฉพาะก๊าซที่มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่ารูพรุนเท่านั้นที่สามารถซึมผ่านเมมเบรนออกมาได้

3) การแยกโดยการแพร่บนพื้นผิว (Surface diffusion) เป็นการแยกที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของก๊าซถูกดูดซับบนพื้นผิวของรูพรุน แล้วเกิดการแพร่เคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวของรูพรุน เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น โดยก๊าซที่ดูดซับบนพื้นผิวของรูพรุนได้ดีกว่าสามารถซึมผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมมเบรนออกมาได้มากกว่า กลไกการแยกก๊าซของเมมเบรนแบบมีรูพรุนทั้ง 3 ลักษณะแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกการแยกก๊าซผ่านรูพรุนของเมมเบรนแบบมีรูพรุน [14]

แบบที่ 2 กลไกการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeation) กลไกการซึมผ่านของก๊าซเป็นการแยกก๊าซโดยใช้เมมเบรนเนื้อแน่น (Dense membrane) มีความหนาแน่นมากกว่าร้อยละ 96 ของความหนาแน่นทางทฤษฎีของวัสดุแต่ละชนิด โดยใช้แรงขับเคลื่อนในการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน สามารถอธิบายด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ (Solution-diffusion mechanism) แสดงกลไกที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.3 กล่าวคือสารที่ต้องการแยกหรือเพอร์มิเอตต้องละลายเข้าไปในเมมเบรนก่อนแล้วซึมผ่าน โดยใช้แรงขับเคลื่อนจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร (Concentration gradient) โดยสารที่ละลายในเนื้อเมมเบรนสามารถเกิดการแพร่จากตำแหน่งที่มีความเข้มข้นสูงไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ความสามารถในการคัดกรองแยกสารเกิดจากความแตกต่างของความสามารถในการละลายของสารและความเร็วในการซึมผ่านของสารเข้าไปในเนื้อเมมเบรนแต่ละชนิด ทำให้สารแต่ละชนิดมีการซึมผ่านเมมเบรนได้ต่างกัน ซึ่งหลักการนี้ต้องอยู่ภายใต้สมมติฐานต่อไปนี้

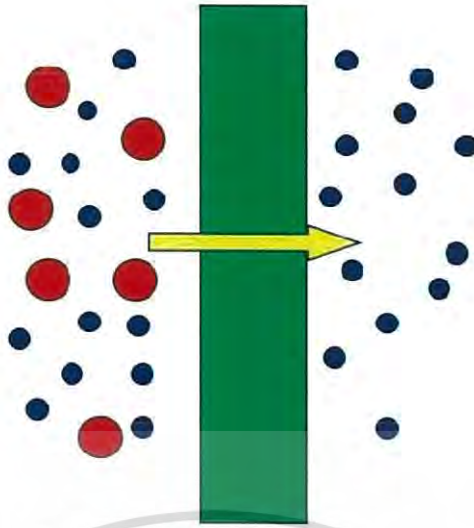
1) ที่ผิวสัมผัสของสารละลายกับผิวหน้าเมมเบรนของทั้ง 2 ด้านของเมมเบรน ต้องอยู่ในสภาวะสมดุล

2) ศักย์ทางเคมีของสารละลายที่ซึมผ่านเมมเบรนต้องต่อเนื่อง เป็นการบ่งบอกถึงการดูดซึมที่ผิวหน้าเมมเบรนสูงกว่าอัตราการซึมผ่านของสารภายในเนื้อวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน

3) ความดันที่ใช้ทั้งสองข้างของเมมเบรนคงที่

อัตราการซึมผ่านของสารแต่ละชนิดผ่านเมมเบรน ขึ้นอยู่กับความต่างของความเข้มข้น ถ้าความเข้มข้นสูง ทำให้อัตราการซึมผ่านเมมเบรนสูง ระยะเวลาในการซึมผ่านขึ้นกับความหนา ถ้าความหนาของเมมเบรนน้อย ทำให้การซึมผ่านเร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การแยกก๊าซโดยใช้เมมเบรนเนื้อแน่น กลไกการละลาย-การแพร่ [15]

2.3.3 สมรรถนะของกระบวนการ [16]

โดยทั่วไปการประเมินสมรรถนะของกระบวนการซึมผ่านของก๊าซ นิยมใช้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอตเป็นตัวบ่งชี้ ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอตคือ ปริมาณของเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรนต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$ หรือ $\text{U}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.2

$$J_v = V_p/A \cdot t \quad (2.2)$$

เมื่อ J_v คือ ฟลักซ์ของเพอร์มิเอตของตัวทำละลาย ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$)
 V_p คือ ปริมาตรของเพอร์มิเอต (m^3)
 A คือ พื้นที่ของเมมเบรน (m^2)
 t คือ เวลา (s)

2.3.4 สมบัติของเมมเบรนในการแยกก๊าซ [17]

พอลิเมอร์ที่นำมาทำเป็นเมมเบรน แบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก คือ

1) เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) พอลิเมอร์ประเภทนี้มีโครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นแบบเส้นตรง หรือแบบกึ่ง สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนทำให้เกิดการอ่อนตัว และหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่พันกันอยู่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับความร้อน และหากเย็นตัวลงเกิดการแข็งตัว ซึ่งการหลอมเหลวและเย็นตัวดังกล่าวสามารถเกิดกลับไปกลับมาได้โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ หรือโครงสร้างของพอลิเมอร์เปลี่ยนไปมากนัก

2) เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) พอลิเมอร์ประเภทนี้มีโครงสร้างเป็นแบบร่างแหหลอมเหลวได้ในขั้นตอนการขึ้นรูปครั้งแรกเท่านั้น ซึ่งในขั้นตอนนี้มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล พอลิเมอร์มีรูปร่างที่ถาวร แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถหลอมเหลวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกเมื่อได้รับความร้อน และหากได้รับความร้อนสูงเกินไปทำให้พันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลแตกออกคุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไปจากเดิม

3) พอลิเมอร์คล้ายยาง (Rubber polymer) เป็นทางเลือกหนึ่งในการนำมาผลิตเมมเบรน เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียว ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูง และสามารถทนต่อการรับแรงกระแทก

ลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ มีผลต่อสมบัติของเมมเบรนที่เตรียมได้ในด้านเสถียรภาพทางเคมีและทางความร้อน (Chemical and thermal stability) ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) ค่าการซึมผ่าน/การเลือกผ่านของเมมเบรน (Membrane permeability/selectivity) และค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรน (Membrane electrical conductivity) ดังนั้นจึงมีความสำคัญที่ต้องเลือกชนิดของพอลิเมอร์ให้มีสมบัติเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้

วัสดุที่ใช้เป็นเมมเบรนในการแยกก๊าซควรมีสมบัติดังนี้ คือ

- 1) มีฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านสูง (High flux and selectivity)
- 2) มีความแข็งแรงเชิงกล มีความเสถียรตัวทางเคมีและทางความร้อนที่ดี
- 3) มีแนวโน้มจับสิ่งสกปรกที่ผิวต่ำ (Low fouling tendency) ผลมาจากการเกาะสะสมของสารอินทรีย์ และอนุภาคสิ่งสกปรกต่าง ๆ ในรูช่องว่างของเมมเบรนที่บริเวณผิวหน้า (Surface fouling) ทำให้อัตราการซึมผ่านลดลง ความดันใช้งานเพิ่มขึ้น และไม่สามารถคืนสภาพให้กลับเหมือนใหม่ได้
- 4) มีราคาถูกและสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมากเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างแพร่หลาย (Cost effective)

สมรรถนะของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นขึ้นกันปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ [16]

- 1) ระยะห่างระหว่างสายโซ่ (Interchain distance) หรือปริมาตรอิสระของพอลิเมอร์ (Free volume) ที่มากมีผลต่อการซึมผ่านได้ของก๊าซ (Gas permeability) ดีขึ้น
- 2) อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) พอลิเมอร์ที่แสดงค่า T_g เป็นพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลแบบไม่เป็นระเบียบ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g พอลิเมอร์จะมีลักษณะเป็นของแข็งคล้ายแก้ว
- 3) องศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) เมมเบรนที่องค์ความเป็นผลึกมากส่งผลต่อการซึมผ่านของก๊าซที่แย่งลง เพราะการเคลื่อนที่ของก๊าซเกิดขึ้นได้น้อยในส่วนที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบของผลึก หรือส่วนที่มีความหนาแน่นสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) [18]

การผสม (Blending) เป็นการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด ทำโดยผสมพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งเพื่อให้ได้สมบัติที่หลากหลายตามความต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้หลายด้านอีกทั้งเป็นการลดต้นทุนในการผลิต การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Molten) มาผสมได้เป็นพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน เกิดเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติแตกต่างไปจากเดิม โดยไม่ต้องเสียเวลาสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมาซึ่งต้องใช้เวลานานและอาจต้องใช้ต้นทุนสูง โดยปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมคือความเข้ากันได้ (Compatibility) โดยพอลิเมอร์ 2 ชนิดจะมีความเข้ากันได้ดีหรือไม่ขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ มวลโมเลกุล สัดส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสอง และสภาวะของการผสมโดยขึ้นกับวิธีการผสม อุณหภูมิและเวลา

จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน หรือไม่สามารผสมรวมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวได้ (Immiscible) ซึ่งสาเหตุที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน คือพลังงานอิสระในการผสม (Free energy of mixing) มีค่าเป็นบวก ทำให้เกิดการแยกของวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมกัน สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์จึงเป็นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาในการผลิตพอลิเมอร์ผสม ซึ่งความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมถูกกำหนดโดยสมดุลของเอนทัลปี (Enthalpy) และเอนโทรปี (Entropy) สำหรับสารที่โมเลกุลใหญ่อย่างพอลิเมอร์นั้นค่าเอนโทรปีเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้โอกาสที่พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ลดลง ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจึงถูกกำหนดโดยเอนทัลปีอย่างเดียว การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระในการผสมสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.3

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m \quad (2.3)$$

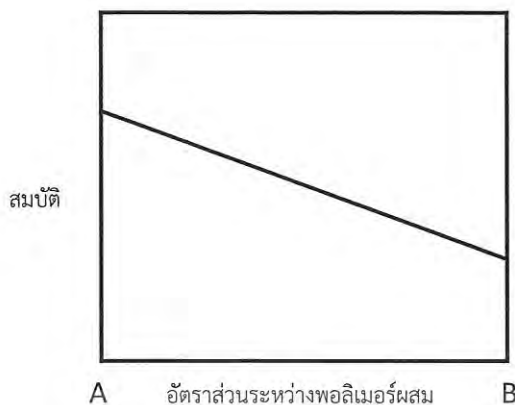
เมื่อ ΔG_m = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสม
 ΔH_m = การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการผสม
 ΔS_m = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม
 T = อุณหภูมิ (K) โดยหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์

2.4.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม [19]

เมื่อพิจารณาพลังงานอิสระในการผสมทำให้สามารถจำแนกประเภทพอลิเมอร์ผสมได้จากค่าความแตกต่างของพลังงานอิสระในการผสม (ΔG_m) แบ่งเป็น 2 กรณี คือ

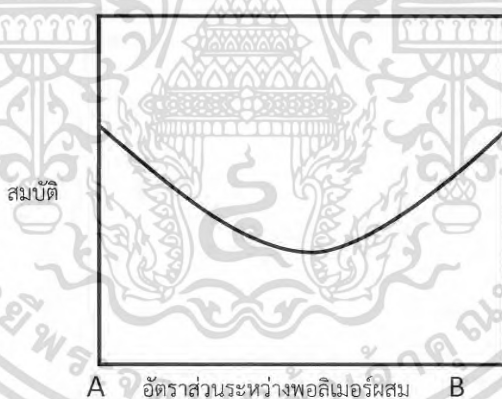
กรณีที่ 1 พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend) ซึ่งมีค่า ΔG_m เป็นลบ นั่นคือ $\Delta H_m - T\Delta S_m < 0$ เป็นผลทำให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) หมายถึงพอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) ใกล้เคียงกันเป็นผลทำให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นวัฏภาคเดียวกัน โดยทั่วไปสมบัติที่ได้เป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรงหรืออย่างน้อยที่สุดเป็นเส้นโค้งสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน [19]

กรณีที่ 2 พอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) ซึ่งมีค่า ΔG_m เป็นบวก นั่นคือ $\Delta H_m - T\Delta S_m > 0$ หมายถึง พอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลายต่างกันมาก ทำให้พอลิเมอร์ไม่สามารถผสมเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์และแยกออกเป็นสองวัฏภาค โดยรอยต่อของวัฏภาค (Interphases) มีแรงกระทำระหว่างวัฏภาคน้อยมาก ดังนั้นทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมลดต่ำลงมากกว่าพอลิเมอร์เดิม จึงทำให้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงายขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [19]

นอกจากการพิจารณาค่าพลังงานอิสระในการผสมแล้วยังสามารถพิจารณาความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมได้โดย

1) พิจารณาจากการศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) หากเห็นเป็นวัฏภาคเดียวแสดงว่าพอลิเมอร์ทั้งสองเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend) แต่ถ้าเป็นพอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) ทำให้มีการแยกวัฏภาคเป็นวัฏภาคหลัก (Matrix) และวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) พิจารณาจากค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) วิธีนี้นิยมมาก เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ไม่ยุ่งยาก เช่น วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค DSC เพื่อหาค่า T_g หากเป็นพอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันปรากฏค่า T_g สองค่า

3) การวัดสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ซึ่งอาจวัดได้จากความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ซึ่งวิธีนี้เป็นการทดสอบสมบัติหลังจากการผสม หากเป็นพอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเกิดการแยกวัฏภาคกันอาจทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่องของพอลิเมอร์เนื่องจากมีแรงกระทำระหว่างวัฏภาคที่ไม่ดี ทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลง

2.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม [18]

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งส่วนใหญ่นิยม 2 วิธี ได้แก่

วิธีที่ 1 การเตรียมในสภาวะสารละลาย (Solution blending) โดยละลายพอลิเมอร์ต่างชนิดกันในตัวทำละลายที่เหมาะสมชนิดเดียวกัน ทั้งไว้นตัวทำละลายระเหยออกจนหมดได้ พอลิเมอร์ผสมเป็นของแข็ง ซึ่งวิธีการนี้ใช้ตัวทำละลายปริมาณมาก อีกทั้งวิธีการระเหยตัวทำละลายปริมาณมากออกจากพอลิเมอร์ผสมทำได้ยาก ซึ่งผลของตัวทำละลายที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมและความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมาก จึงต้องมีระบบในการจัดเก็บตัวทำละลายที่ระเหยออกมาและนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งต้องเพิ่มในส่วนของการใช้จ่ายในการจัดการ

วิธีที่ 2 การเตรียมโดยการหลอมผสม (Melt blending) โดยการให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ในอุณหภูมิที่สูงกว่า T_m ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ณ อุณหภูมิดังกล่าวพอลิเมอร์อยู่ในสถานะที่หลอมเหลว ทำให้สามารถผสมพอลิเมอร์เข้าด้วยกันได้ ซึ่งวิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมผสมมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเตรียมในสภาวะสารละลาย คือสามารถเตรียมพอลิเมอร์ผสมในปริมาณมาก โดยปราศจากตัวทำละลาย และมีแรงเค้นเฉือนทำให้มีโอกาสผสมพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น

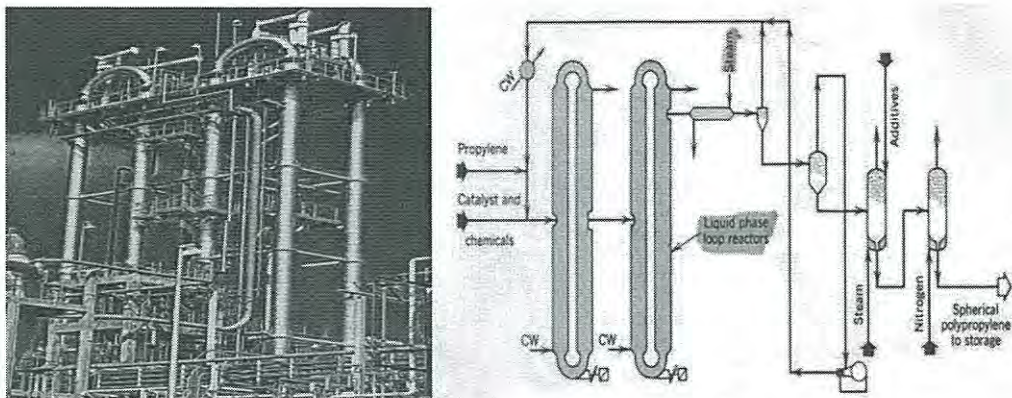
2.5 พอลิโพรพิลีน

2.5.1 การสังเคราะห์ PP [20]

PP เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถสังเคราะห์ได้หลายกระบวนการ ได้แก่ แบบบัลค์ (Bulk process), แบบสารละลาย (Solution process), และสังเคราะห์ในสถานะก๊าซ (Gas phase polymerization)

กระบวนการสังเคราะห์ PP แบบบัลค์ เป็นกระบวนการที่ไม่มีการใช้ตัวทำละลายเตาปฏิกรณ์ (Reactor) อาจเป็นแบบกวน (Stirred reactor) หรือแบบลูป (Loop reactor) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแบบลูป ดีในแง่ของการระบายความร้อนเพราะมีพื้นที่ผิวมาก ส่วนมากนิยมใช้ Reactors 2 ตัวในการสังเคราะห์ อุณหภูมิสังเคราะห์ประมาณ 45-80 °C ความดัน 34-40 บาร์ (Bar) ซึ่งความดันต้องสูงพอเพื่อทำให้อัดโพรพิลีนให้คงสภาพของเหลว นอกจากนี้ความดันสูงยังช่วยให้ PP มีความเป็นผลึกสูง

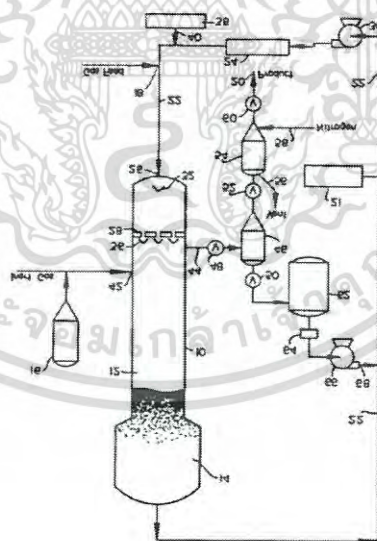
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 เตาปฏิกรณ์แบบลูป [20]

กระบวนการสังเคราะห์ PP แบบสารละลาย กระบวนการนี้ใช้เฮกเซน หรือเฮปเทนเป็นตัวทำละลาย เตาปฏิกรณ์เป็นแบบกวนอุณหภูมิประมาณ 50–80 °C ความดันที่ใช้ประมาณ 5-20 atm ทำการยุติปฏิกิริยาโดยการเติม H₂ ปัจจุบันเลิกใช้กระบวนการนี้ เนื่องจากปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายในการแยกตัวทำละลายออกและนำกลับไปใช้ใหม่

กระบวนการสังเคราะห์ PP ในสถานะก๊าซ การสังเคราะห์ในกระบวนการนี้ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งกับพอลิเมอร์ที่มีมอนอเมอร์ผสมอยู่ กระบวนการแบบก๊าซมีข้อดีคือ สังเคราะห์ง่ายกว่า ความดันที่ใช้ต่ำกว่า และราคาถูกกว่ากระบวนการแบบบัลค์ ระบบวิทยาศาสตร์ก๊าซ แสดงในรูปที่ 2.7

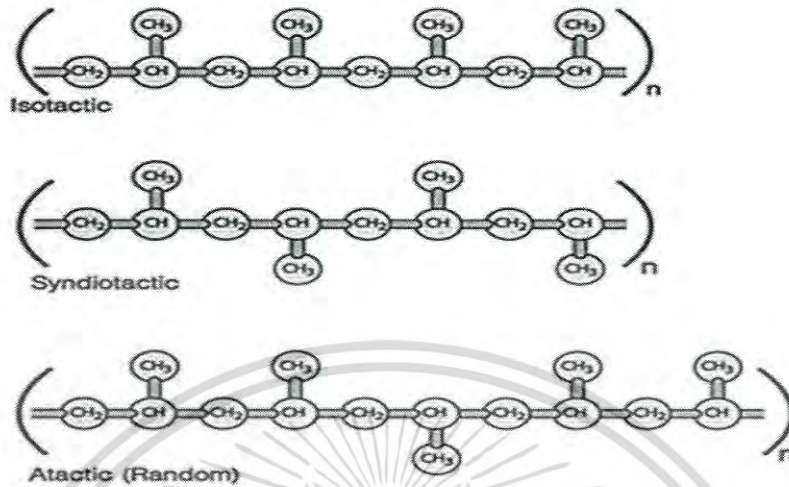


รูปที่ 2.7 กระบวนการสังเคราะห์ในสถานะก๊าซ [20]

2.5.2 ลักษณะทั่วไปของพอลิโพรพิลีน [21]

พอลิโพรพิลีน เทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน ผลิตจากโพรพิลีน เป็นของแข็ง ไม่มีสี มีทั้งโปร่งใสและโปร่งแสง ผิวเป็นมันเงา ทนกรด เบส และสารเคมีต่าง ๆ ยกเว้นไฮโดรคาร์บอน และคลอรีนเตตไฮโดรคาร์บอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน ได้แก่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน และอะแทกติกพอลิโพรพิลีน ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของพอลิโพรพิลีน [21]

2.5.3 สมบัติของพอลิโพรพิลีน

- 1) มีความแข็งมากกว่า มีความเปราะและแตกง่ายกว่า HDPE และมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า LDPE มีผิวแข็ง ทนทานต่อการขีดข่วน คงตัวไม่เสีรูปร่างง่าย มีความทนทานมาก สามารถทำเป็นบานพับในตัว
- 2) เมื่อไม่ได้ผสมสีมีลักษณะขาวขุ่น ไม่ทึบแต่ไม่ใส ทึบแสงกว่าพอลิเอทิลีน (PE) แต่ไม่ใสเท่ากับพอลิสไตรีน (PS)
- 3) มีน้ำหนักเบา เนื่องจากมีความหนาแน่นน้อย ในช่วง 0.855 - 0.946 g/cm³ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถลอยน้ำได้เช่นเดียวกับพอลิเอทิลีน
- 4) มีจุดหลอมเหลวสูง 130–171 °C จึงสามารถทนอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ (Sterilization : 100 °C) ได้
- 5) เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก แม้ที่อุณหภูมิสูง
- 6) ทนทานต่อสารเคมี ได้แก่ กรด ต่าง แอลกอฮอล์ ตัวทำละลายอินทรีย์ แต่เกิดการบวมตัว อ่อนนิ่ม หรือพื้นผิวเป็นรอยได้ในสารเคมีที่มีองค์ประกอบเป็นคลอรีน หรือไฮโดรคาร์บอนทั้งชนิดอะโรมาติกและอะลิฟาติก เนื่องจากพอลิโพรพิลีนไม่มีขั้วสามารถดูดซึมสารที่ไม่มีขั้วได้ดี ดังนั้นจึงสามารถทนต่อสารที่มีขั้วได้ดีกว่า พอลิโพรพิลีนบวมตัวและสลายตัวได้ในสารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง เช่น ไกกรดไนตริก กรดซัลฟิวริกเข้มข้นและร้อน สมบัติบางประการของพอลิโพรพิลีนแสดงในตารางที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 สมบัติบางประการของพอลิโพรพิลีน [21]

Properties	Homopolymer	Copolymer
Density, kgm^{-3}	905	905
Tensile Strength, MPa	33	25
Elongation at Break, %	1.4	1.0
Hardness, Rockwell "R" Scale	150	300
Notched Izod Impact, kJm^{-1}	90	80
Heat Distortion Temp (HDT)@ 0.45 MPa, °C	0.07	0.1
Heat Distortion Temp (HDT)@ 1.80 MPa, °C	105	100
Volume Resistivity, $\log \mu\text{m}$	65	60
Oxygen Index, %	19	19

2.5.4 การนำไปใช้งานของพอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ คือ ก่อ่ง ของเล่นเด็ก ถุงปุ๋ย ไหมเทียม พรมและแผ่นรองพรม ผ้าใบกันน้ำ เชือก สายรัดบรรจุภัณฑ์ ถุงร้อน ขวดใส่เครื่องดื่ม ของขม ท่อ ปลอกหุ้มสายไฟและสายเคเบิล งานเคลือบกระดาษ วัสดุอุดรอยรั่ว อุปกรณ์ภายในรถยนต์ ก่อ่งเครื่องมือ กระเป่า ปกแพ้มเอกสาร ก่อ่งและตลับ เครื่องสำอาง เครื่องใช้ในครัวเรือน ก่อ่งบรรจุอาหาร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรม อุปกรณ์ทางการแพทย์ ขวดใส่สารเคมี กระจ่างน้ำมัน เครื่องกระสอบข้าว และถุงบรรจุปุ๋ย พลาสติกสำหรับใช้งานในทางการแพทย์หรือในห้องปฏิบัติการส่วนมากทำจาก PP ซึ่งมีข้อดีคือ ทนต่อความร้อนสูงได้สามารถนำไปอบฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งอัดความดัน (Autoclave) เมื่อทำเป็นภาชนะบรรจุอาหารสามารถนำเข้าเครื่องล้างจานอัตโนมัติได้ และภาชนะบรรจุอาหารสำหรับไมโครเวฟได้

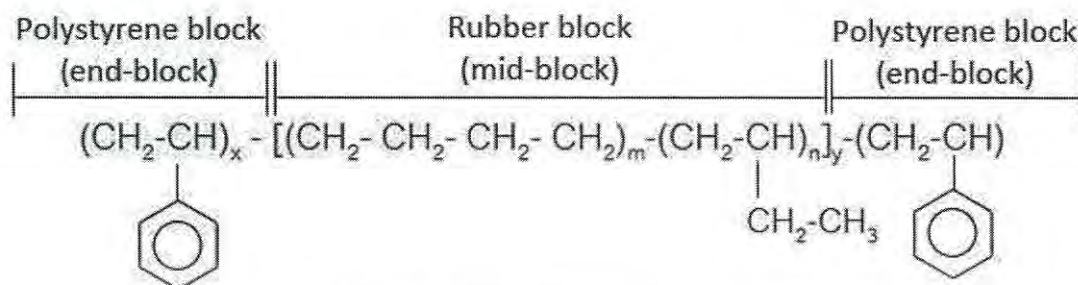
2.6 พอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน [22-24]

พอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (Poly(styrene-ethylenebutylene-styrene), SEBS) จัดเป็นยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomers, TPEs) ที่มีทั้งสมบัติของยางและพลาสติก คือ มีสมบัติเป็นอีลาสติกแบบยาง สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก พร้อมทั้งสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อแรงกระทำนั้นหมดไป และมีสมบัติของเทอร์โมพลาสติก สามารถนำมาขึ้นรูปได้ใหม่ โดยหลอมเมื่อได้รับความร้อนและกลับมาแข็งตัวเมื่อเย็นตัวลง SEBS ประกอบด้วยบล็อกของพอลิสไตรีน (Polystyrene block) และโคพอลิเมอร์เอทิลีนและบิวทิลีน (Ethylene-butylene copolymer) SEBS มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ที่ -55 °C ที่มาจากส่วนของ Ethylene-butylene (Soft segment) และที่ 95 °C มาจากส่วนของ Polystyrene (Hard segment) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จากสององค์ประกอบนี้ ส่งผลให้ SEBS มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อสารเคมี มีความเหนียว มีความสามารถในการรักษาสมบัติความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงได้ดี มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงยูวี ออกซิเจนและโอโซนสูง จึงเหมาะที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้งานกลางแจ้ง SEBS จึงสามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลากหลาย และสามารถขึ้นรูปได้โดยใช้กระบวนการต่าง ๆ เช่น กระบวนการอัดรีด (Extrusion process) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding process) เป็นต้น



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของ SEBS [25]

2.7 ซีโอไลต์ (Zeolite)

2.7.1 สมบัติทั่วไป [26-28]

Zeolite คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างเป็นผลึกรูพรุนแบบสามมิติ ประกอบด้วยโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของซิลิเกต ($[\text{SiO}_4]^{4-}$) และอะลูมิเนต ($[\text{AlO}_4]^{5-}$) ซึ่งอะตอมของซิลิกอนและอะลูมิเนียมเกิดการจัดเรียงตัว โดยเชื่อมต่อกันผ่านอะตอมออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ของโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้า ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) และเนื่องจากอะตอมอะลูมิเนียมในโครงผลึกออกไซด์ในโครงสร้างซีโอไลต์ มีการจัดเรียงตัวแบบสามเหลี่ยมสี่หน้า ทำให้เหลือออร์บิทัลว่างของอะลูมิเนียมจึงสามารถรับอิเล็กตรอนจากออกซิเจน ทำให้โครงสร้างของอะลูมิเนตที่ได้มีประจุลบเกิดขึ้น จึงต้องมีไอออนบวกมาดุลประจุลบ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม ทำให้รูพรุนของซีโอไลต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ มีความเป็นขั้ว ซีโอไลต์จึงสามารถดูดซับน้ำไว้ในรูพรุนได้ แต่ซีโอไลต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างน้อย ทำให้มีความเป็นขั้วต่ำ ดูดซับน้ำไม่ดี แต่สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ โดยเฉพาะสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

การจัดประเภทของซีโอไลต์สามารถจำแนกจากลักษณะโครงสร้างของรูพรุน (Pore structure) ขนาดของหน้าต่างรูพรุน (Window) และอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al ratio) แสดงดังตารางที่ 2.6

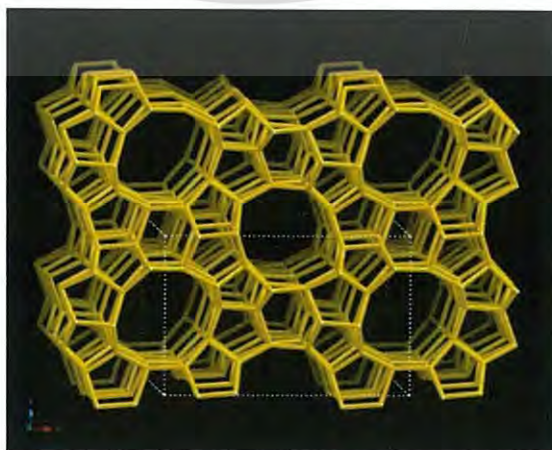
ตารางที่ 2.6 Si/Al ratio ของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ [26]

ชนิด	โครงสร้าง	Si/Al
Zeolite A	LTA	1-1.25
Alpha	LTA	2-3
Ferrierite	FER	6-12
Zeolite Y	FAU	1.5-3
Gmelinite GME 3-4	GME	3-4
ZSM-20	FAU	3.5-5
ZSM-5	MFI	15-Infinity
EU-1	Novel	50-2500
SSZ-23	CHA	250-750
Beta	BEA	12-Infinity

ซีโอไลต์ที่มีค่า Si/Al ratio ต่ำ มีขั้วสูง ในขณะที่ซีโอไลต์ที่มีค่า Si/Al ratio สูง มีขั้วน้อยมากหรือไม่มีขั้วเลย ซึ่งความมีขั้วนี้มีความสำคัญในการเลือกซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ในงานที่แตกต่างกัน

2.7.2 ซีโอไลต์ ZSM-5 [29, 30]

ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดกลาง มี Si/Al ratio สูงคือ 15-Infinity ซึ่ง Si/Al สูง ทำให้เกิดโครงสร้างแบบช่อง (Channel structure) แสดงดังรูปที่ 2.10 ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) ได้ดี ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 มีขนาดความกว้างของหน้าต่าง 5.4-5.6 อังสตรอม [31] ZSM-5 สามารถสังเคราะห์ได้จากหลายปฏิกิริยา เช่น การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากเพอร์ไลต์และเถ้าแกลบ [32] การสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ได้จากกากของเสียของโรงงานอุตสาหกรรมหล่อหลอมเหล็กและโรงงานชุบอะลูมิเนียม [33] การสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ [34] โดย ZSM-5 นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เช่น เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.10 โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 [35] นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์ในชีวิตประจำวัน

ลักษณะสำคัญที่ทำให้ซีโอไลต์กลายเป็นสารที่มีประโยชน์มากมายคือ โครงสร้างผลึกที่เป็นรูพรุนระดับจุลภาคและความเป็นขั้วที่แตกต่างกันของซีโอไลต์ รวมทั้งความสามารถในการปรับเปลี่ยนสมบัติได้หลากหลาย เช่น สมบัติการดูดซับน้ำ (Desiccant) สมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange) สมบัติการคัดแยกโมเลกุล (Molecular Sieving) ซีโอไลต์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งถูกกำหนดด้วยสมบัติพื้นฐานในระดับโมเลกุลของสาร ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์สามด้านหลัก ๆ ได้แก่ ตัวแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchanger) ตัวดูดซับ (Adsorber) และตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

นอกจากนี้ มีการใช้งานซีโอไลต์ในด้านอื่น ๆ อีก เช่น ใช้ในการเกษตรเป็นการลดการใช้ปุ๋ย โดยปุ๋ยที่เติมซีโอไลต์สามารถเก็บกักแร่ธาตุที่มีประโยชน์อยู่ในดินได้นาน พืชได้ใช้ประโยชน์จากปุ๋ยในดินได้อย่างเต็มที่และสามารถดูดซับสารพิษตกค้างในดิน ลดความเป็นพิษให้ดินที่มีสาเหตุจากสารตกค้างของยาฆ่าหญ้าและยาฆ่าแมลง รวมทั้งสามารถนำมาเป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ โดยซีโอไลต์ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณ แอมโมเนียและสารประกอบไนโตรเจนไม่ให้สะสมในสัตว์มากเกินไป อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดกลิ่นของมูลสัตว์ด้วย

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอทิลีนจัดเป็นฮอร์โมนพืชชนิดหนึ่งซึ่งกระตุ้น หรือเร่งให้ผลไม้เกิดกระบวนการสุกหอมเร็วขึ้น ดังนั้นในการขนส่งผลไม้ที่ใช้เวลานาน เช่น การขนส่งทางเรือสินค้า นอกจากการเก็บผลไม้ดิบไว้ในที่มีอุณหภูมิต่ำ เพื่อชะลอกระบวนการหายใจของพืชแล้ว ยังต้องหาวิธีการกำจัดก๊าซเอทิลีนที่ผลไม้ปล่อยออกมา เพื่อไม่ให้ผลไม้สุกก่อนกำหนด [10] ผลไม้ประเภท Climacteric มีการหายใจและเกิดเอทิลีนขึ้นในช่วงที่ผลสุกสูงกว่าผลไม้ประเภท Non-climacteric ส่งผลให้ผลไม้เกิดการเน่าเสียเร็วขึ้น [11] จึงได้มีการพัฒนามาเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีคุณสมบัติเด่นในการดูดหรือคายก๊าซบางชนิด เช่น สารควบคุมความชื้น สารดูดซับออกซิเจน [36]

ปัจจุบันฟิล์มบรรจุภัณฑ์พลาสติกตามท้องตลาดมีมากมายหลายชนิด โดยที่นิยมใช้ ได้แก่ ฟิล์มพอลิโพรพิลีน, ฟิล์มพอลิเอทิลีน, ฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์, ฟิล์มพอลิสไตรีนและฟิล์มพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต [4] ซึ่งมีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่ำ จึงมีการพัฒนาฟิล์มพลาสติกสำหรับบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงสภาวะบรรยากาศ ทำให้เกิดบรรยากาศดัดแปลงแบบสมดุล (Equilibrium Modified Atmosphere หรือ EMA) ขึ้น ในบรรจุภัณฑ์โดยทั่วไปประกอบด้วยก๊าซออกซิเจนในช่วง 2-10% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 2-10% ความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์อยู่ในช่วง 90-99% ส่งผลให้เกิดการชะลอการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ จึงสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดนานขึ้น 2-5 เท่า และผลิตผลยังคงมีคุณภาพและรสชาติที่ดี นอกจากนี้ฟิล์มยังมีความใส เกิดฝ้าน้อย และมีความแข็งแรงเหมาะสมสำหรับใช้งานจริงในอุตสาหกรรม [37]

ชัยสันต์ ณ ลำพูน และคณะ [38] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE กับ SEBS เพื่อเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนในฟิล์มที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ อัตราส่วน LLDPE/SEBS คือ 80/20 และ 70/30 เปอร์เซ็นต์ของสไตรีนใน SEBS (12 wt% และ 29 wt%) และค่าดัชนีการไหลของ SEBS (MFI คือ 1, 5 และ 22 g/10 min) จากนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงกล พบว่าพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ที่ใช้ SEBS ที่มีดัชนีการไหลต่ำคือความหนืดมาก ทำให้การกระจายตัวของวัฏภาค SEBS ในพอลิเมอร์ผสมไม่ดีและพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของ SEBS เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึง ความเค้น ณ จุดครากมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก SEBS มีพอลิสไตรีนเป็นส่วนประกอบ ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและสามารถรับแรงได้มากขึ้น แต่ค่ามอดูลัสของยังมีค่าลดลง เพราะมีส่วนเอทิลีน/บิวทีน ซึ่งมีความยืดหยุ่นคล้ายยางเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าการเพิ่มปริมาณ SEBS ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนเพิ่มขึ้นเนื่องจาก SEBS เป็นพอลิเมอร์ออสันฐาน มีปริมาตรอิสระมากและมีการเคลื่อนที่ของสายโซ่ได้ง่ายทำให้ก๊าซซึมผ่านได้ดี

รุจิเรข วิวัฒน์กุล [39] ได้พัฒนาฟิล์มที่มีการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนได้ดี โดยเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS โดยมีปัจจัยในการศึกษาคือ องค์ประกอบของฟิล์ม เช่น เกรดและปริมาณของ SEBS ปริมาณพลาสติกไซเซออร์ และความเร็วในการผสม โดยการเลือกใช้ SEBS เกรดที่มีปริมาณสไตรีนและเอทิลีน/บิวทีนต่างกันส่งผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน พบว่าการเลือกใช้ SEBS Kraton® G1657 ที่ประกอบด้วยปริมาณเอทิลีน/บิวทีนสูง (87 wt%) ทำให้ได้วัฏภาค SEBS ขนาดใหญ่และมีอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสูงกว่าการใช้งาน SEBS Kraton® G1652 ที่ประกอบด้วยปริมาณเอทิลีน/บิวทีนในปริมาณน้อยกว่า (70 wt%) ผลการศึกษาของปริมาณการเติม SEBS Kraton® G1652 ลงในฟิล์ม LLDPE/SEBS พบว่าการเพิ่มปริมาณ SEBS ทำให้ฟิล์มมีค่าความเค้น ณ จุดคราก ค่ามอดูลัสของยัง และร้อยละการยืด ณ จุดขาดลดลง แต่มีความแข็งแรงดึงสูงขึ้น ลักษณะของสันฐานวิทยาพบว่า ขนาดของวัฏภาคกระจายมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นและมีความต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความต่อเนื่องของวัฏภาคออสันฐาน SEBS สูง ก๊าซเอทิลีนจึงสามารถซึมผ่านฟิล์มได้มากขึ้น การปรับเปลี่ยนความเร็วโรเตอร์ในการผสมสูตร LLDPE/SEBS (55/45) เป็น 40, 60 และ 80 rpm พบว่าการผสมที่ความเร็วโรเตอร์ 40 rpm วัฏภาคกระจาย SEBS ที่ได้มีขนาดใหญ่และมีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงกว่าการผสมด้วยความเร็วโรเตอร์ 60 และ 80 rpm การเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LL72S28 (G1652) โดยการเติมพลาสติกไซเซออร์ Dioctyl Phthalate (DOP), Cereclor, Dibutyl phthalate (DBP), Tricresyl phosphate (TCP) และ Dioctyl adipate (DOA) ในปริมาณ 10 wt% พบว่าการเติม DOA สามารถเพิ่มการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนได้สูงสุด เพราะ DOA มีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter) ใกล้เคียงกับ SEBS มากที่สุดทำให้ DOA และ SEBS มีความเข้ากันได้ดี แต่การเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 10 wt% ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงดึงต่ำ จึงลดปริมาณลงเป็น 5 wt% พบว่าการเติม DOP ที่ปริมาณ 5 wt% ให้ความแข็งแรงดึงของฟิล์มเท่ากับ 11.9 MPa ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่ามาตรฐานของฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร มาตรฐานเลขที่ มอก. 1027-2553 (7 MPa)

กนกวรรณ หงส์ทอง และคณะ [7] ได้เตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS Kraton® G1657 ด้วยวิธีผสมแบบหลอมเหลว โดยเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วน 100/0, 80/20, 75/25 และ 70/30 โดยน้ำหนัก พบว่าที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงสุด และการเพิ่มปริมาณ SEBS ทำให้ได้ฟิล์มที่มีความแข็งแรงดึงและความเค้น ณ จุดคราก (6-7 MPa) ใกล้เคียงกัน ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่ามอดูลัสของยังมีค่าลดลง และความเป็นผลึกลดลงเนื่องจากมีวัฏภาคออสันฐาน (SEBS)

เข้ามาผสมกับวัฏภาค LLDPE จากสันฐานวิทยาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ SEBS ทำให้ขนาดวัฏภาคของเอกสารเป็นเอกสารที่สว่นไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SEBS มีแนวโน้มที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จากทรงกลมกลายเป็นทรงกระบอกซึ่งมีความต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความต่อเนื่องของวิฏภาคอสัณฐานสูง ก๊าซเอทิลีนจึงสามารถซึมผ่านฟิล์มได้มากขึ้น และได้มีการเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มโดยการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ในปริมาณ 5-15 wt% ในพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก พบว่าการเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของ LLDPE และจากสัญญาณวิทยาพบว่าซีโอไลต์มีการกระจายตัวอยู่ทั้งวิฏภาคของ LLDPE และ SEBS และพบว่ามีซีโอไลต์บางส่วนรวมกลุ่มกันเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ ฟิล์มมีค่าความเค้น ณ จุดครากและค่าความแข็งแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ค่ามอดุลัสของยังเพิ่มขึ้น สมบัติของฟิล์มที่ได้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าค่ามาตรฐานอุตสาหกรรมเลขที่ มอก. 1027-2553 (7 MPa) และเมื่อทดสอบการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน พบว่าฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 15% โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนได้ $212,581 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$

Sahassanon, T. [40] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE/SEBS และสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ เพื่อศึกษาความสามารถในการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนในงานฟิล์มบรรจุภัณฑ์ โดยชนิดของสารตัวเติม ได้แก่ ซิลิกา, แคลเซียมคาร์บอเนต และซีโอไลต์ววาย โดยทำการผสมพอลิเมอร์และสารตัวเติมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด และขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด จากการทดลองการเติมสารตัวเติมที่ 5 wt% พบว่าการเติมซิลิกาทำให้ฟิล์มเกิดจุดบกพร่อง เพราะซิลิกามีอนุภาคขนาดเล็ก กระจายตัวได้ค่อนข้างยาก จึงเกิดเป็นช่องว่างบริเวณพื้นผิวของฟิล์มทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสูงเกินจริง ฟิล์มที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนมีค่าต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่ได้ใส่สารตัวเติม เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมที่มีลักษณะเนื้อแน่น (Dense filler) จึงขัดขวางการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน ส่วนการเติมซีโอไลต์ววายในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากซีโอไลต์ววายมีลักษณะเป็นรูพรุน มีค่า Si/Al เท่ากับ 2.43 จึงมีความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีนได้ ทำให้มีความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนบริเวณพื้นผิวของฟิล์มสูง ส่งผลให้ก๊าซเอทิลีนซึมผ่านได้ดี

Balkan O. และคณะ [41] ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียด (Strain rate) ต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิด เกสียวหนอนคู่ (Twin Screw Extruder) ในการผสมพอลิเมอร์อัตราส่วน 100/0, 97.42/2.58, 94.85/5.15 และ 89.71/10.29 โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป ทดสอบชิ้นงานที่อัตราเร็ว (1.67 m/s) และอัตราเร็ว (16.67 m/s) พบว่าค่ามอดุลัสของยัง ค่าความเค้น ณ จุดครากมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ SEBS เนื่องจาก SEBS ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ มีความนิ่มคล้ายยาง เข้าไปแทรกในวิฏภาคของ PP ทำให้ความต่อเนื่องของวิฏภาค PP ลดลง ส่วนค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของชิ้นงาน เมื่อทดสอบที่อัตราเร็ว (1.67 m/s) ไม่สามารถวัดได้เนื่องจากชิ้นงานไม่เสียสภาพระหว่างการทดสอบ (ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมากกว่า 600) แต่เมื่อทดสอบชิ้นงานที่อัตราเร็ว (16.67 m/s) ชิ้นงานมีการเสียสภาพแบบเปราะ และพบค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น (ยืดได้มากขึ้น) เมื่อปริมาณ SEBS เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก SEBS ที่มีความยืดหยุ่นแทนที่ในวิฏภาค PP มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาและพัฒนาฟิล์มให้มีการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนได้ดีขึ้นจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยเลือกใช้ PP เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์อีกชนิดที่นิยมใช้เป็นวัสดุสำหรับทำบรรจุภัณฑ์ ด้วยสมบัติเด่นของ PP คือมีความใส ผิวหน้ามันวาว ไม่ติดฝุ่นง่าย มีความเหนียวสูง ทนต่อความร้อนและสารเคมี ปลอดภัยสามารถใช้กับอาหารและยาได้ดี และมีสมบัติบางประการที่เด่นกว่า LLDPE เช่น มีความสามารถในการทนต่อแรงดึง ความคงรูปที่มากกว่า อย่างไรก็ตามลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ PP มีความเป็นผลึกที่มากกว่า LLDPE ส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนต่ำ จึงทำการปรับปรุงการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนโดยเตรียมพอลิเมอร์ผสม PP และ SEBS โดยใช้อัตราส่วน PP/SEBS ที่สูงขึ้น คือ 60/40 และ 50/50 โดยน้ำหนัก เนื่องจากปริมาณ SEBS ที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยเพิ่มค่าการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนให้สูงขึ้น นอกจากนี้ศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์ ZSM-5 (5-15 wt%) ที่มีต่อสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกลและการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. พอลิโพรพิลีน (PP) เกรดเป่าฟิล์ม PP1125NA จากบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน)

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ PP

สมบัติ	PP1125NA	หน่วย
ดรรชนีการไหล (Melt flow rate) (2.16 kg/230 °C)	11.2	g/10min
Flexural modulus	1517	MPa
Tensile strength at yield	36	N/mm ²
Elongation at yield	25	%

2. พอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (SEBS) Kraton® G1657 จากบริษัท Kraton Performance Polymer จำกัด

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ SEBS Kraton® G1657

สมบัติ	G1657	หน่วย
ปริมาณสไตรีน (Styrene content)	12.3 ถึง 14.3	wt%
ดรรชนีการไหล (5 kg/230 °C)	22	g/10min
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	0.90	-
ความหนืด (Viscosity)	1200 ถึง 1800	cP
การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)	750	%
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	3400	psi
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (300% Modulus)	350	psi
ความแข็งกด (Hardness)	47	Shore A, 10 s

หมายเหตุ ข้อมูลจากตารางที่ 3.1 และ 3.2 เป็นข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3. ซีโอไลต์ ZSM-5 ค่า Si/Al ratio 180 มีขนาดความกว้างของหน้าตาต่าง 5.5 Å จากบริษัท Star Petroleum จำกัด

4. ก๊าซเอทิลีน (Ethylene gas) ความบริสุทธิ์อย่างน้อย 99.9% จากบริษัท ไทยอินดัสเตรียล แก๊ส จำกัด

5. ก๊าซฮีเลียม (Helium gas) ความบริสุทธิ์อย่างน้อย 99.9% จากบริษัท ไทยอินดัสเตรียล แก๊ส จำกัด

6. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N₂)

7. ไซลีน (Xylene)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) บริษัท C. Melchers (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น PL 2000/PL 2001
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) บริษัท Bosco Engineering จำกัด รุ่น Bosco A600
3. เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression molding machine) บริษัท แมช กรุ๊ป (1992) จำกัด รุ่น MGLP 20 AT
4. เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) บริษัท LLOYD Instrument จำกัด รุ่น LR 5K
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท JEOL จำกัด รุ่น JSM-5410LV
6. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter) บริษัท Perkin Elmer จำกัด รุ่น DSC 7
7. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer) บริษัท Hetsch จำกัด รุ่น TG 209 F3 Taraus
8. เครื่องไดนามิกส์เมคานิคอลอะนาไลเซอร์ (Dynamic mechanical analyzer, DMA) บริษัท UBM จำกัด รุ่น E4000-DVE
9. เครื่องทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน (เครื่องประกอบ Home-made)
10. เซลล์เพอร์มิเอชัน (Permeation cell)
11. เครื่องชั่งแบบดิจิตอลความละเอียด 2 ตำแหน่ง
12. ไมโครมิเตอร์ (Micrometer)
13. อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า
14. กระจกไนโตรเจนเหลว
15. อ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath)
16. ตู้อบความร้อน บริษัท memmert จำกัด รุ่น UF260

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม

1) การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP และ SEBS ด้วยเครื่องผสมแบบปิด ดังตารางที่ 3.3 โดยทำการผสมในอัตราส่วนของวัสดุต่อความจุของห้องผสม (Fill Factor) เท่ากับ 0.8

ตารางที่ 3.3 สูตรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP และ SEBS

สูตรพอลิเมอร์ผสม	อัตราส่วน PP:SEBS	PP (g)	SEBS (g)
PP100	100:0	40	0
PP95S5	95:5	38	2
PP90S10	90:10	36	4
PP80S20	80:20	32	8
PP70S30	70:30	28	12
PP60S40	60:40	24	16
PP50S50	50:50	20	20

การผสมในเครื่องผสมแบบปิด ตั้งสภาวะของเครื่อง คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 190 °C ความเร็วรอบ 60 rpm เวลาที่ใช้ในการผสม 20 นาที จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาบดให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องบดพลาสติก

2) การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP, SEBS และ Zeolite ZSM-5 ด้วยเครื่องผสมแบบปิด ดังตารางที่ 3.4 โดยทำการผสมใช้สัดส่วนของวัสดุต่อความจุของห้องผสมเท่ากับ 0.8

ตารางที่ 3.4 สูตรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP และ SEBS ที่อัตราส่วน 50:50 ที่มีการเติม Zeolite ZSM-5

สูตรพอลิเมอร์ผสม	ปริมาณ Zeolite (%)	ปริมาณสารทั้งหมด (g)		
		PP	SEBS	Zeolite ZSM-5
PP50S50Z5	5	19	19	2
PP50S50Z10	10	18	18	4
PP50S50Z15	15	17	17	6

สภาวะและขั้นตอนในการผสม ดังนี้

1) สูตรพอลิเมอร์ผสม PP50S50Z5 โดยผสม PP 19 กรัม และ Zeolite ZSM-5 2 กรัม ที่อุณหภูมิ 170 °C ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 20 นาที

2) เติม SEBS 19 กรัม ลงในเครื่องผสมและทำการผสมโดยใช้อุณหภูมิ 190 °C ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาบดด้วยเครื่องบดพลาสติก

3) ผสมสูตร PP50S50Z10 และ PP50S50Z15 ดังวิธีที่กล่าวไว้ในข้อ 1 และ 2 โดยเพิ่มปริมาณ Zeolite ZSM-5 เป็น 10 wt% และ 15 wt% ตามลำดับ

3.3.2 การเตรียมฟิล์ม

เตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS ทั้งแบบที่เติมและไม่เติม Zeolite เตรียมโดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดฟิล์มที่เตรียมได้นั้นผ่านการกดอัด 2 รอบ เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาสม่ำเสมอมากขึ้น โดยรอบแรกนำเม็ดพลาสติกพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการบดมากดอัดให้ได้เป็นแผ่นซีทที่มีความหนาประมาณ 2 mm จากนั้นนำแผ่นซีทที่ได้ตัดให้มีน้ำหนักประมาณ 0.6 กรัม และกดอัดอีกรอบให้ได้ฟิล์มบางที่มีความหนาอยู่ในช่วง 40-60 μm โดยใช้สภาวะของเครื่องกดอัด ดังนี้

- ขนาดแม่พิมพ์แผ่นเรียบ 20x20x1 cm^3
- ความดันในการกดอัด 1800 psi
- อุณหภูมิในการกดอัด 215 $^{\circ}\text{C}$
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์ 7 นาที
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์ผสม 7 นาที
- เวลาในการกดอัดร้อน 5 นาที
- อุณหภูมิในการกดอัดเย็น 20 $^{\circ}\text{C}$
- เวลาในการกดอัดเย็น 5 นาที

3.3.3 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม

การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การตรวจสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของ PP โดยนำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC โดยชั่งน้ำหนักประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนในช่วง 50-220 $^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 10 $^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) นำข้อมูลที่ได้มาหาค่า T_m , T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP ตามมาตรฐาน ASTM E794 โดยนำค่า Heat of fusion (ΔH_f) มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\Delta H_f = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}} \quad (3.1)$$

$$\% \text{ความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{\% \text{ โดยน้ำหนักของ PP ที่มีอยู่จริง}} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ ΔH_f คือ พื้นที่ใต้กราฟของ T_m

ΔH_f^0 คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PP ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่า 207.1 J/g [42]

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร เพื่อหาปริมาณซีโอไลต์ที่มีอยู่จริงในสูตรพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง TGA โดยชั่งน้ำหนักประมาณ 10-20 mg นำมาให้ความร้อนตั้งแต่ 25-700 $^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 $^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที โดยที่อุณหภูมิ 25-500 $^{\circ}\text{C}$ ให้ความร้อนค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน เพื่อดูเสถียรภาพทางความร้อน และที่อุณหภูมิ 500-700 °C ให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน เพื่อดูการสลายตัวของพอลิเมอร์

การตรวจสอบค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus, E') ค่ามอดุลัสสูญเสีย (loss modulus, E'') และค่า $\tan \delta$ ของฟิล์ม PP/SEBS ด้วยเครื่อง Dynamic mechanical analyzer (DMA) ใน Tension mode สำหรับทำการทดสอบ ชิ้นงานที่ทดสอบมีขนาด $5 \times 20 \times 1 \text{ mm}^3$ โดยทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิในช่วง -100 °C ถึง 100 °C ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 2 °C ต่อหน้าที่ความถี่ในการทดสอบ 10 Hz

การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM

การเตรียมตัวอย่างฟิล์ม นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาตัดให้มีขนาด $1 \times 3 \text{ cm}^2$ แล้วนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทักชิ้นงานขณะเย็น (Cryogenic crack)

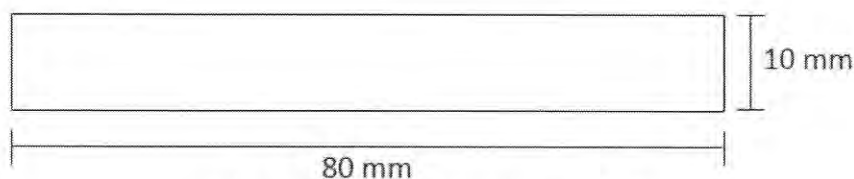
กรณีที่ 1 ทำการสกัดวัฏภาค SEBS ออกจากชิ้นงาน PP/SEBS/Zeolite โดยนำแผ่นฟิล์มใส่ในหลอดทดลองและแช่ด้วยตัวทำละลายไซลีน ใส่ในอ่างอัลตราโซนิค (Ultrasonic bath) ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงครึ่ง จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการสกัดตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดควันที่อุณหภูมิห้อง 12 ชั่วโมง และนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำไปศึกษาการกระจายตัวของ SEBS ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

กรณีที่ 2 ศึกษาการกระจายตัวของซีโอไลต์ในพอลิเมอร์ผสมโดยไม่ต้องทำการสกัด นำชิ้นงานที่หักเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำไปศึกษาการกระจายตัวของซีโอไลต์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) ของชิ้นงานโดยเตรียมฟิล์มตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D 882 และใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ตัดตัวอย่างให้มีขนาด $10 \times 80 \text{ mm}^2$ ดังรูปที่ 3.1 โดยใช้สภาวะในการทดสอบ ดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell)	100 N
- ความเร็วในการดึง (Test speed)	100 mm/min
- ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length)	30 mm

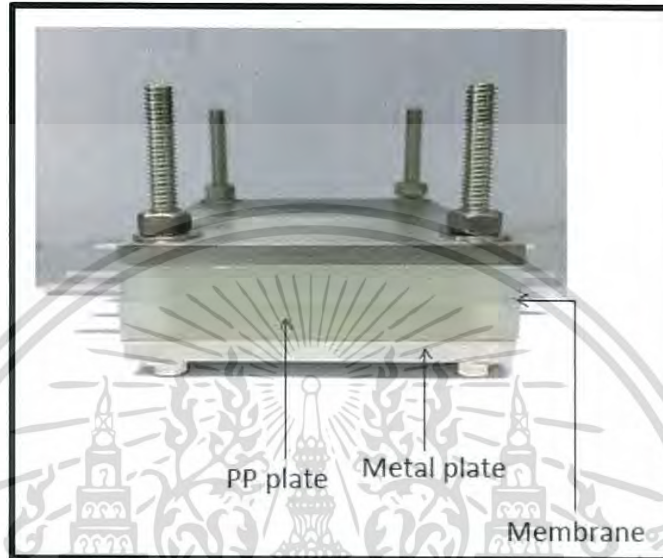


รูปที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน

นำฟิล์มขนาด $5.5 \times 5.5 \text{ cm}^2$ ใส่ในเซลล์เมมเบรนที่มีพื้นที่การซึมผ่านของก๊าซ $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ซึ่งเป็นแผ่นพลาสติก 2 ชั้นประกบกัน และประกบแผ่นโลหะอีก 1 ชั้น ดังรูปที่ 3.2 โดยส่วนประกอบทั้งหมดถูกยึดไว้ด้วยสกรูที่มุมทั้ง 4 ซึ่งส่วนประกอบนี้เรียกว่า เซลล์เมมเบรน (Membrane cell) การทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนทำตามลำดับขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 3.2 เซลล์เมมเบรน

1. ปรับอัตราการไหลของก๊าซ

อัตราการไหล (Flow rate) ของสารป้อน (Feed, ก๊าซเอทิลีน) ถูกควบคุมด้วยโรตานิเตอร์ (Rotameter) และก๊าซพา (Carrier gas, ก๊าซฮีเลียม) ถูกควบคุมด้วยเครื่องวัดอัตราการไหล (Mass flow controller) ให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 30 mL/min

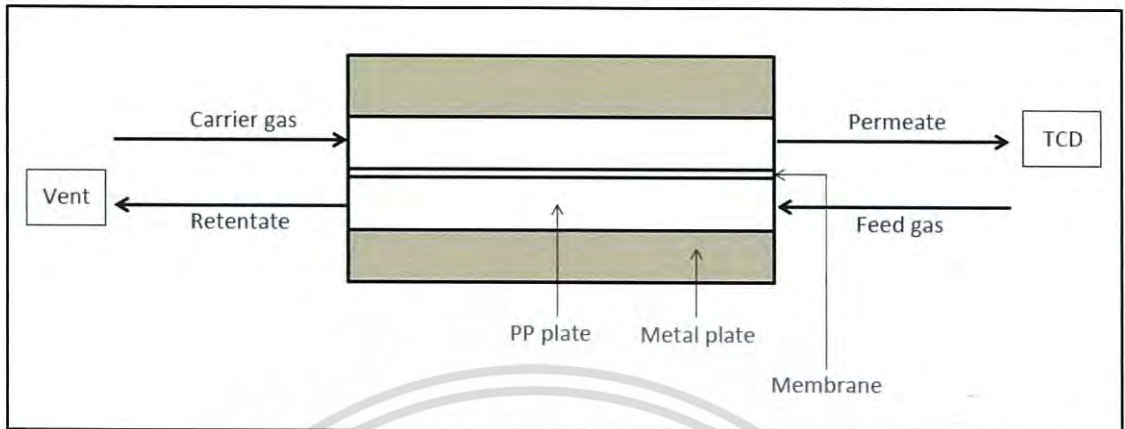
2. ปรับความดันของก๊าซ

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

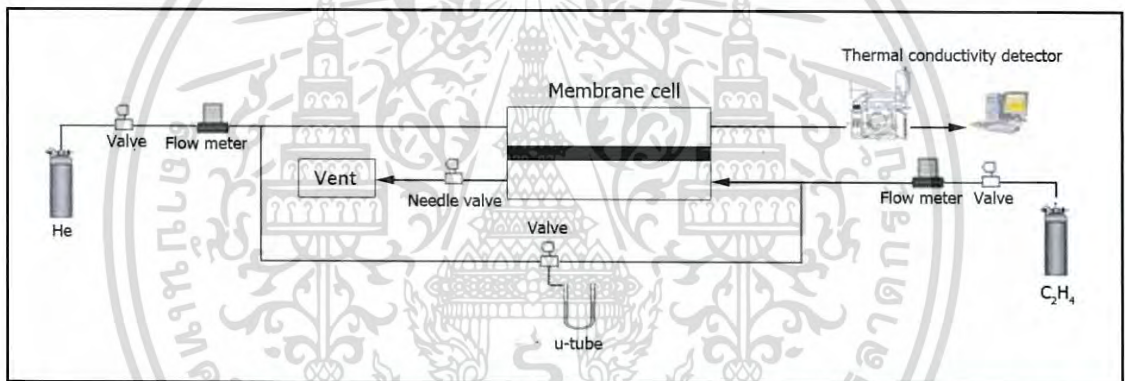
3. การทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มตัวอย่าง

นำเซลล์เมมเบรนมาทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน โดยก๊าซเอทิลีนไหลเข้าทางแผ่นพลาสติกด้านล่าง ในขณะที่ก๊าซฮีเลียมไหลเข้าทางแผ่นพลาสติกด้านบนของเซลล์เมมเบรน ซึ่งทิศทางการไหลของสารป้อนและก๊าซพาไหลในทิศทางตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เมื่อสารป้อนไหลผ่านฟิล์ม ก๊าซบางส่วนซึมผ่านฟิล์มในเซลล์เมมเบรนไปยังฝั่งเพอร์มิเอต โดยมีก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซพา

เข้าสู่เครื่อง TCD เพื่อตรวจวัดหาค่าการซึมผ่าน (Permeability) สำหรับก๊าซที่ไม่สามารถซึมผ่านไป
ได้ ไหลสู่ช่องระบายทิ้ง (Vent) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน



รูปที่ 3.4 แผนภาพแบบทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน

การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์มที่ทดสอบสามารถคำนวณได้จากพื้นที่
ใต้กราฟ TCD ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.3)

$$\text{อัตราเร็วการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน (ETR)} = J / (A_F \times \Delta p_i) \quad (3.3)$$

เมื่อ J = อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนต่อเวลา (ml/min)

A_F = พื้นที่ของฟิล์มตัวอย่าง (m^2)

Δp_i = Differential partial pressure (atm)

สารป้อนที่ไหลเข้าสู่ระบบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

$$J = 10^{-3} \times C_E \times F_X \quad (3.4)$$

เมื่อ C_E = ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่ซึมผ่าน (ppm)

F_X = อัตราการไหลของก๊าซ (ml/min)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่ซึมผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.5)

$$C_E = C_S \times (A_E / A_S) \quad (3.5)$$

เมื่อ C_S = ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนมาตรฐาน (ppm)

A_E = พื้นที่ใต้กราฟของก๊าซเอทิลีนที่ซึมผ่าน (V.s)

A_S = พื้นที่ของก๊าซเอทิลีนมาตรฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพื่อพัฒนาฟิล์มที่มีการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนได้ดี โดยทำการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน (PP) กับบล็อกโคพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (SEBS) โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลของอัตราส่วน PP/SEBS คือ 100/0, 95/5, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ตามลำดับ และปริมาณซีโอไลต์ ZSM-5 คือ 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ที่เติมใน PP/SEBS อัตราส่วน 50/50 ซึ่งซีโอไลต์มีความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีนรวมถึงมีโครงสร้างเป็นรูพรุน จึงสามารถช่วยเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนได้ดีขึ้น ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด จากนั้นขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด นำฟิล์มที่ได้มาศึกษาสมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน

4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วน PP/SEBS ต่อสมบัติของฟิล์ม

4.1.1 พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม PP/SEBS

การตรวจสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m), อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และค่าพื้นที่ใต้กราฟของอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (ΔH_f) (เทอร์โมแกรมใน ภาคผนวก ข) เพื่อนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP ในฟิล์ม PP/SEBS ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

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

สูตร	T_m (°C)	T_c (°C)	ความเป็นผลึก (%)
PP100S0	164.7	118.9	50
PP95S5	163.4	119.1	49
PP90S10	164.2	118.6	49
PP80S20	163.9	118.6	49
PP70S30	163.4	119.1	51
PP60S40	164.2	117.4	48
PP50S50	163.6	117.3	47

จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP ในแต่ละสูตรที่ใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 47-51% แสดงว่าเมื่อทำการเติม SEBS ซึ่งจัดเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) ไม่ขัดขวางการจัดเรียงตัวผลึก PP ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เนื่องจาก PP และ SEBS มีความเข้ากันได้ต่ำ จากลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ต่างกัน โดยโครงสร้างของ SEBS ประกอบด้วยวงอะโรมาติกจึงมีขั้วมากกว่า PP ทำให้ค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) ของพอลิเมอร์ทั้งสองไม่เท่ากัน โดยค่าดังกล่าวของ PP และ SEBS มีค่าเท่ากับ $8.1 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ [43] และ 8.5 รัคว่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

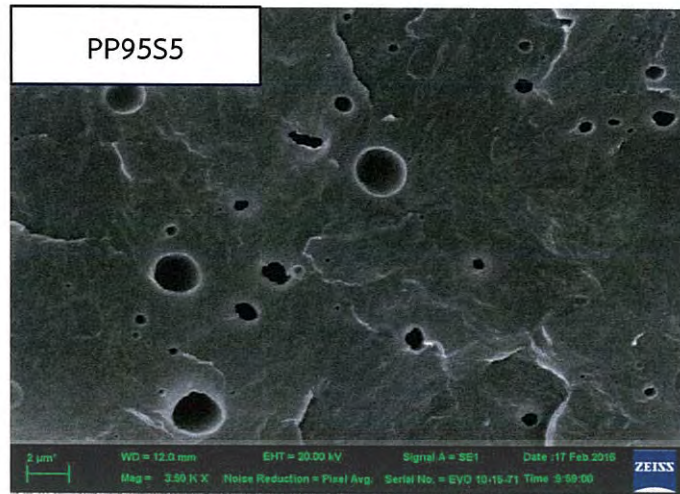
(cal/cm^3)^{1/2} [44] ตามลำดับ ทำให้พอลิเมอร์ผสม PP/SEBS จัดเป็นพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า T_m และ T_c ของ PP ในพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรพบว่ามีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดผลึกของ PP ทุกสูตรใกล้เคียงกัน

4.1.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม PP/SEBS

ฟิล์ม PP/SEBS เป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ที่มีส่วนของวัฏภาคต่อเนื่อง (Matrix, Continuous phase) คือ PP และวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) คือ SEBS ถูกศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยการสกัดวัฏภาคของ SEBS ด้วยตัวทำละลายไซลีน จากรูปที่ 4.1 แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ PP หลังสกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน พบว่าฟิล์ม PP หลังสกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน มีผิวเรียบไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น แสดงว่าไม่มีการละลายออกของ PP ในตัวทำละลายไซลีน และจากรูปที่ 4.2 แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ PP/SEBS ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าเมื่อทำการสกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ทำให้วัฏภาคของ SEBS ละลายออกลักษณะเป็นช่องว่างสีดำในวัฏภาคของ PP โดยแสดงสัณฐานวิทยาแบบทรงกลม (Spherical shape) ที่อัตราส่วน 95/5, 90/10 และ 80/20 นอกจากนี้เมื่อพอลิเมอร์ผสมมี SEBS มากขึ้น พบว่าวัฏภาคกระจายมีรูปร่างทรงกลมและทรงกระบอก (Cylindrical shape) อยู่รวมกัน ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 เนื่องจากวัฏภาคกระจายที่มีปริมาณมากขึ้นทำให้รูปร่างทรงกลมเกิดการรวมกัน มีลักษณะเป็นรูปร่างทรงกระบอก

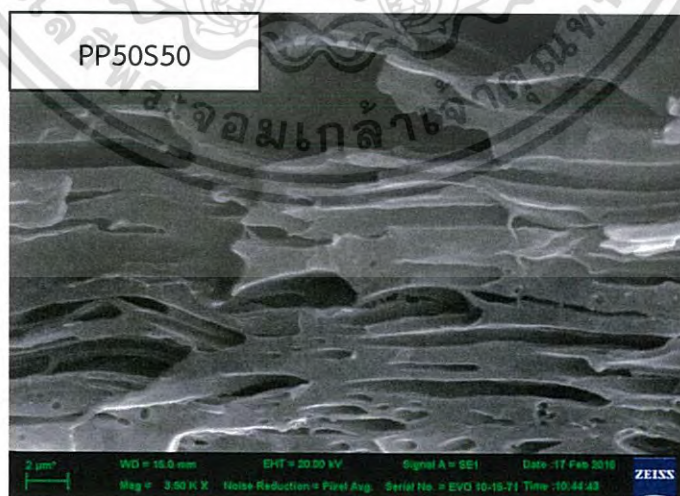
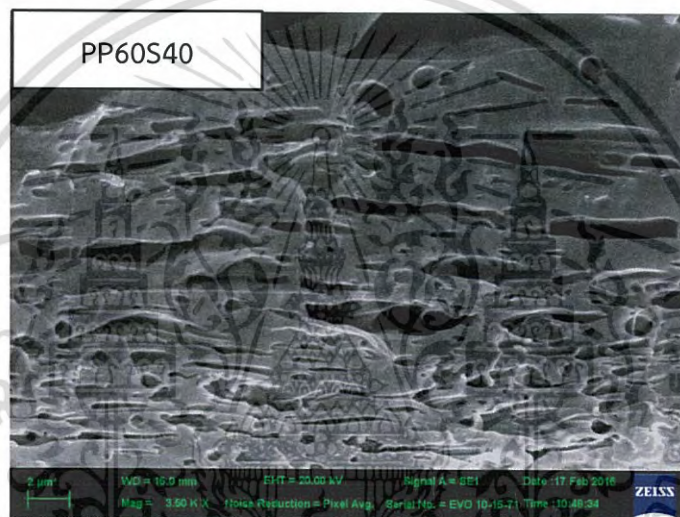


รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม PP100SO หลังสกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ที่กำลังขยาย 3500 เท่า



รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม PP/SEBS ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่สกัด SEBS ด้วยไซลีน ที่กำลังขยาย 3500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

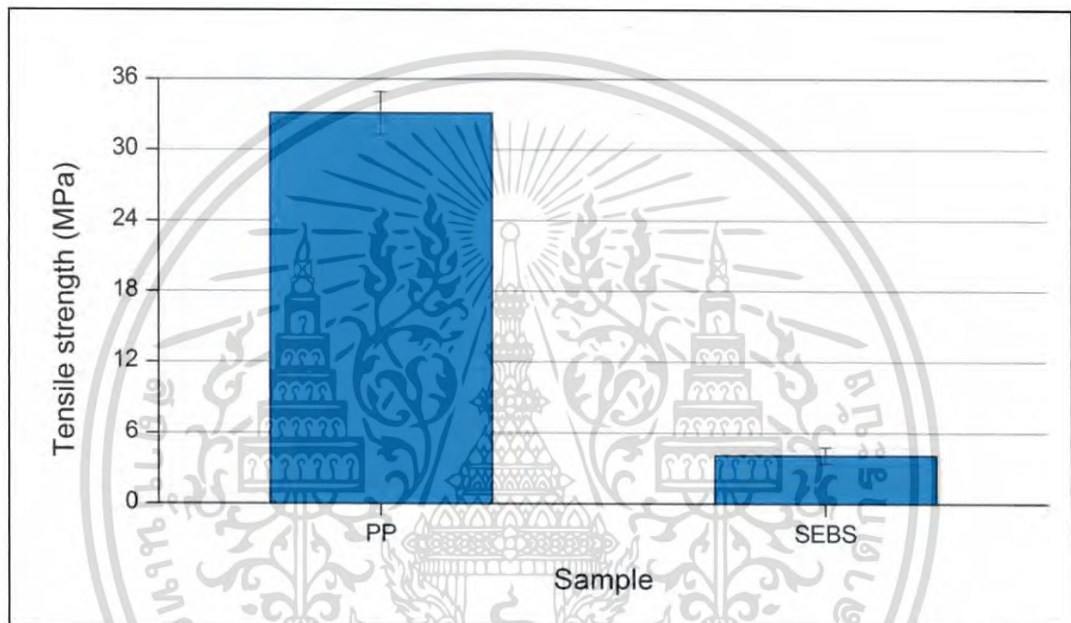


รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม PP/SEBS ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่สกัด SEBS ด้วยไซลีน ที่กำลังขยาย 3500 เท่า (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

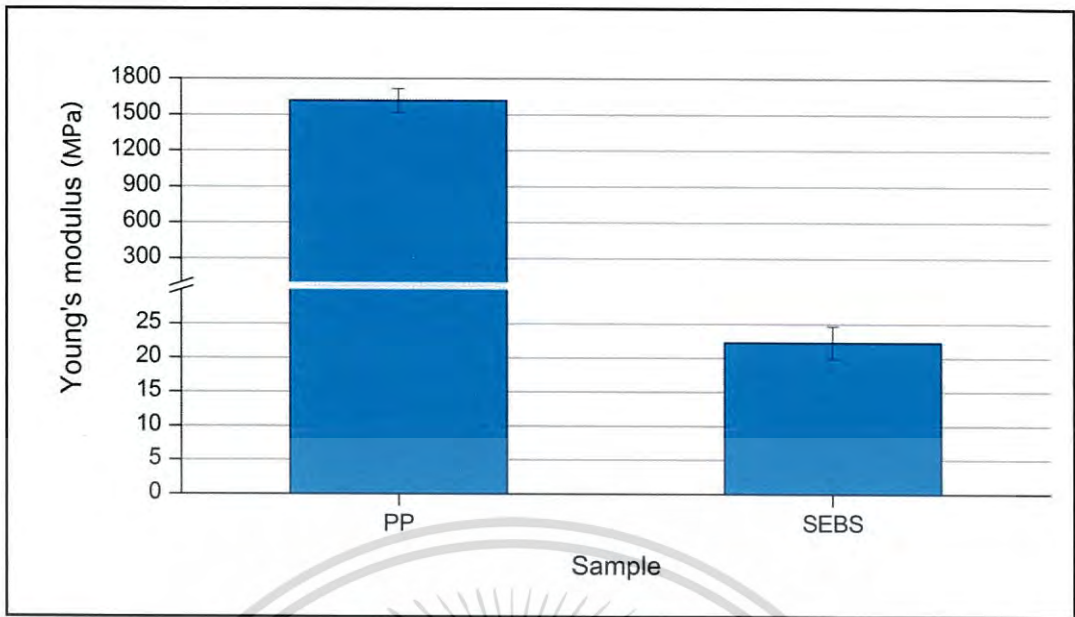
4.1.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/SEBS

จากรูปที่ 4.3-4.5 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP กับ SEBS พบว่าฟิล์ม SEBS มีค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดุลัสของยังต่ำกว่าฟิล์ม PP แต่มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูงกว่าฟิล์ม PP เนื่องจาก SEBS เกรด Kraton® G1657 ที่ใช้คือบล็อกโคพอลิเมอร์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน ประกอบด้วยส่วนของพอลิสไตรีน 12.3-14.3 wt% ที่มีความแข็ง และเอทิลีน/บิวทิลีน 85.7-87.7 wt% ที่มีความนิ่มและยืดหยุ่นคล้ายยาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำ ขณะที่ PP เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่เป็นระเบียบ จึงสามารถรับแรงได้มากกว่าก่อนเกิดการเสียรูป

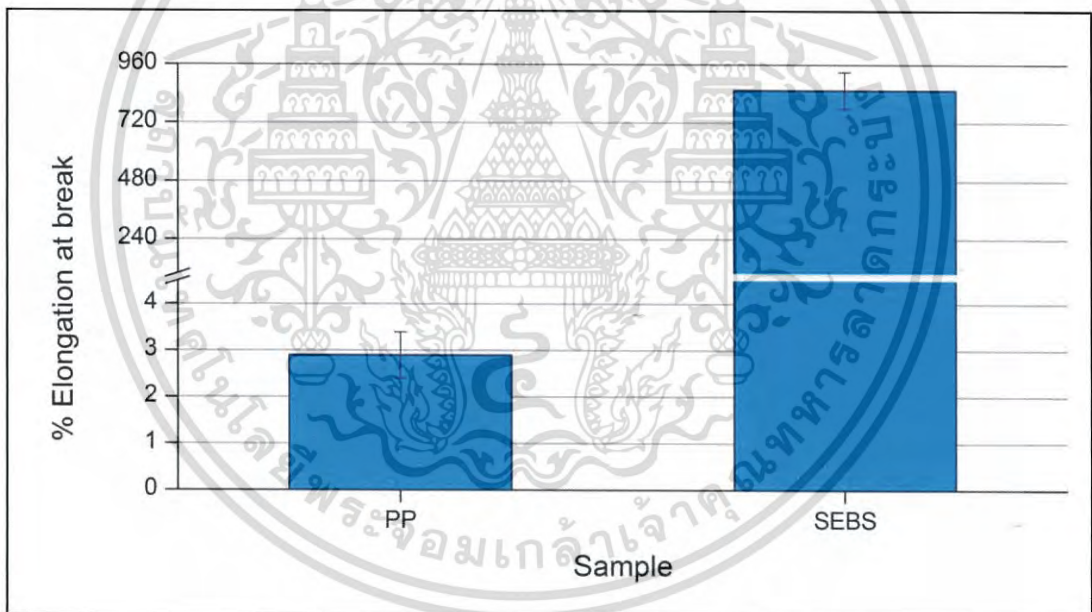


รูปที่ 4.3 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP และ SEBS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



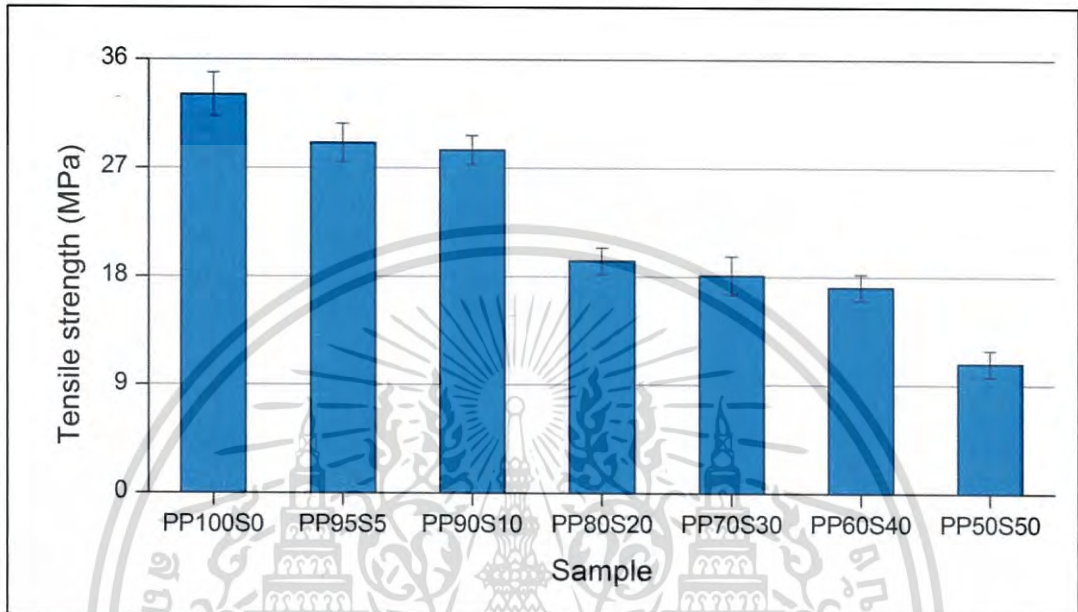
รูปที่ 4.4 มอดุลัสของยังของฟิล์ม PP และ SEBS



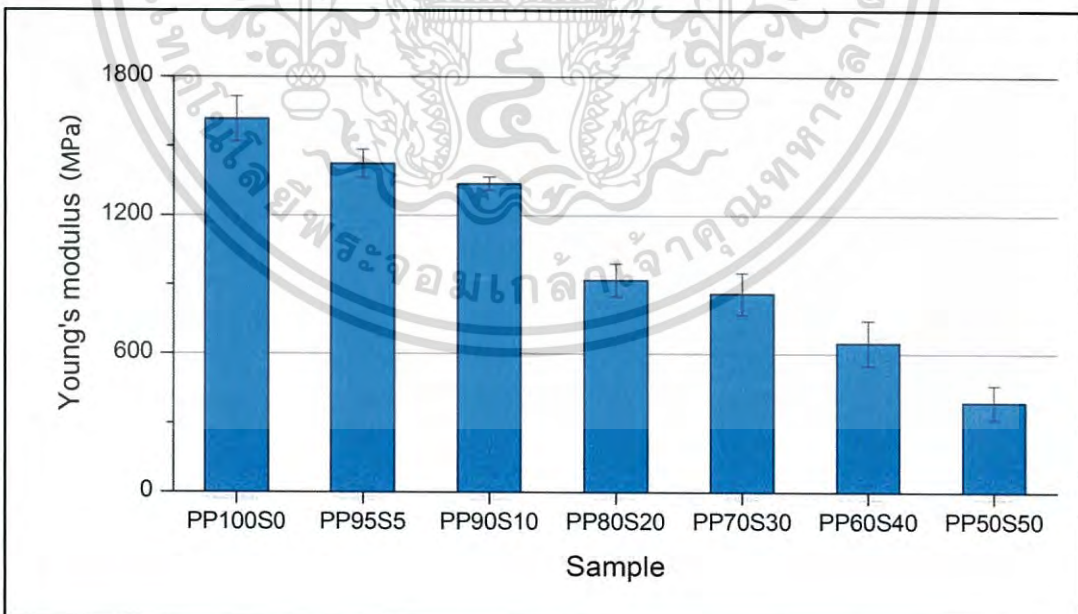
รูปที่ 4.5 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม PP และ SEBS

จากรูปที่ 4.6-4.8 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/SEBS จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลอยู่ระหว่างพอลิเมอร์หลักทั้งสองตัวคือ PP และ SEBS (ตารางที่ 3.1-3.2) เมื่อทำการเติม SEBS ทำให้ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากวัสดุภาค PP ทำหน้าที่เป็นวัสดุภาคต่อเนื่อง เมื่อเติม SEBS เป็นวัสดุภาคกระจายที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐานที่มีความนิ่มและยืดหยุ่นคล้ายยางจากการมีโครงสร้างของเอทิลีน/บิวทิลีน ทำให้ความต่อเนื่องของวัสดุภาค PP ลดลง แรงที่ใช้ในการทำให้ฟิล์มเกิดการเสียสภาพจึงมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดลงเช่นเดียวกับค่ามอดุลัสของยัง อย่างไรก็ตามการที่ SEBS มีโครงสร้างของเอทิลีน/บิวทิลีน ที่มีความนิ่ม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูาตให้นำไปไซประโยชน์ดานการคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยืดหยุ่นคล้ายยางทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มาก จึงได้ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ SEBS และให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงขึ้นอย่างชัดเจนที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 ซึ่งมีลักษณะฐานวิทยาแบบ Cylindrical shape และเห็นได้จากรูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับ %ความเครียดของฟิล์ม PP/SEBS ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของฟิล์มพอลิเมอร์เมื่อเติม SEBS ในปริมาณต่าง ๆ

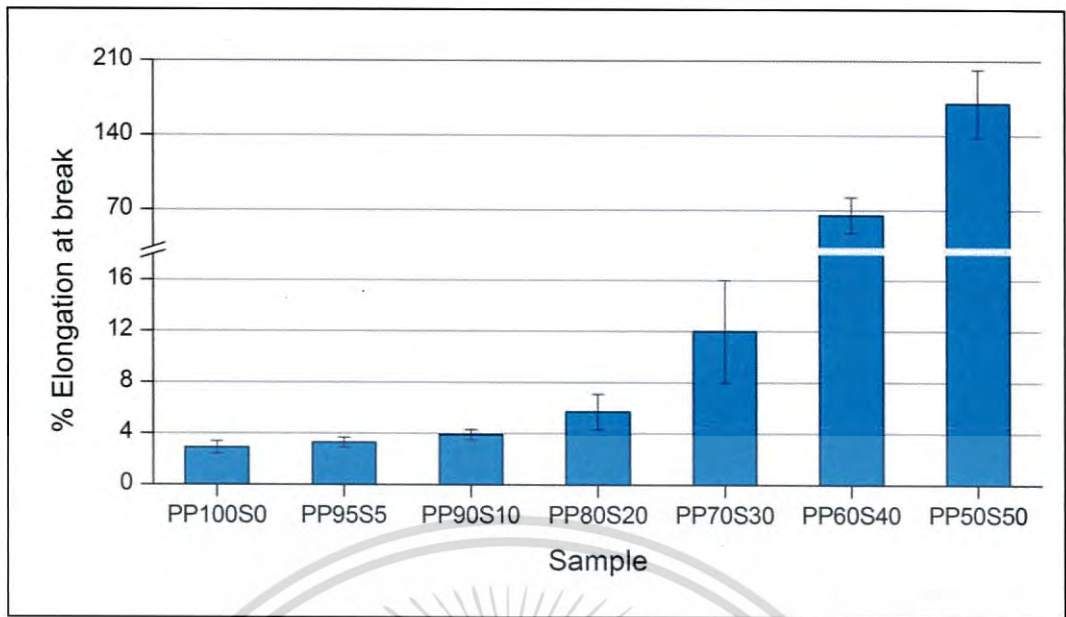


รูปที่ 4.6 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP/SEBS

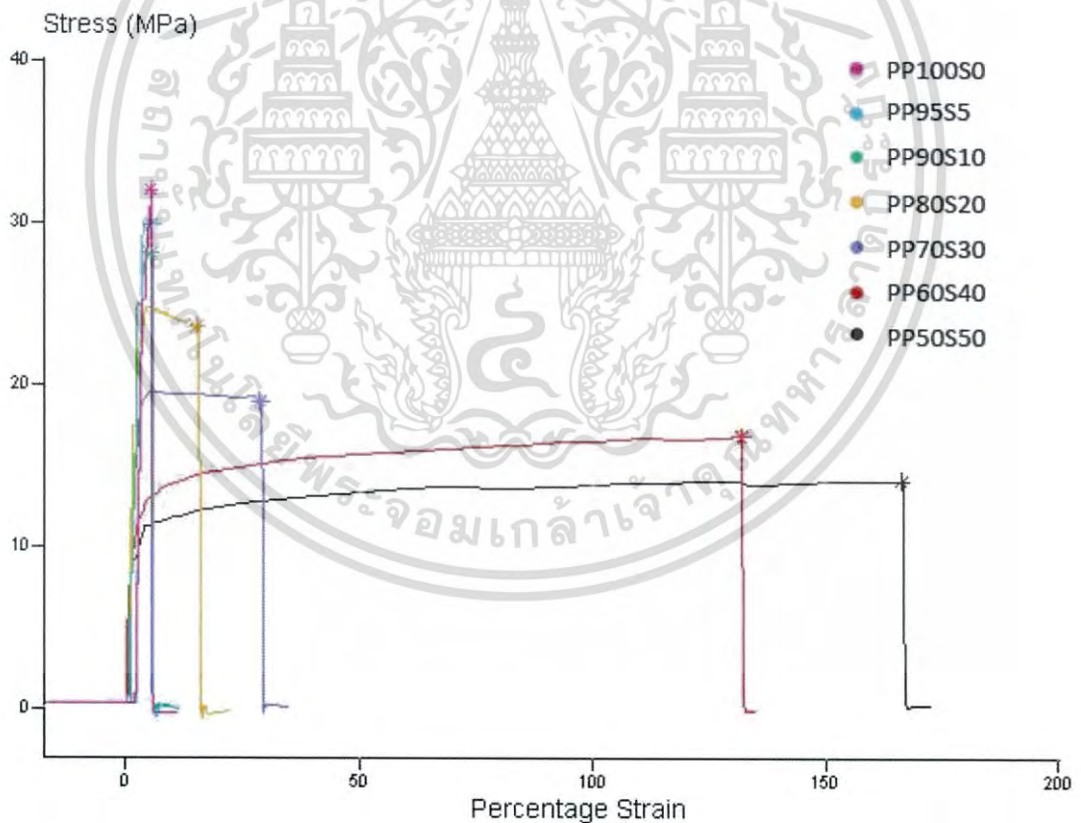


รูปที่ 4.7 มอดุลัสของยังของฟิล์ม PP/SEBS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม PP/SEBS

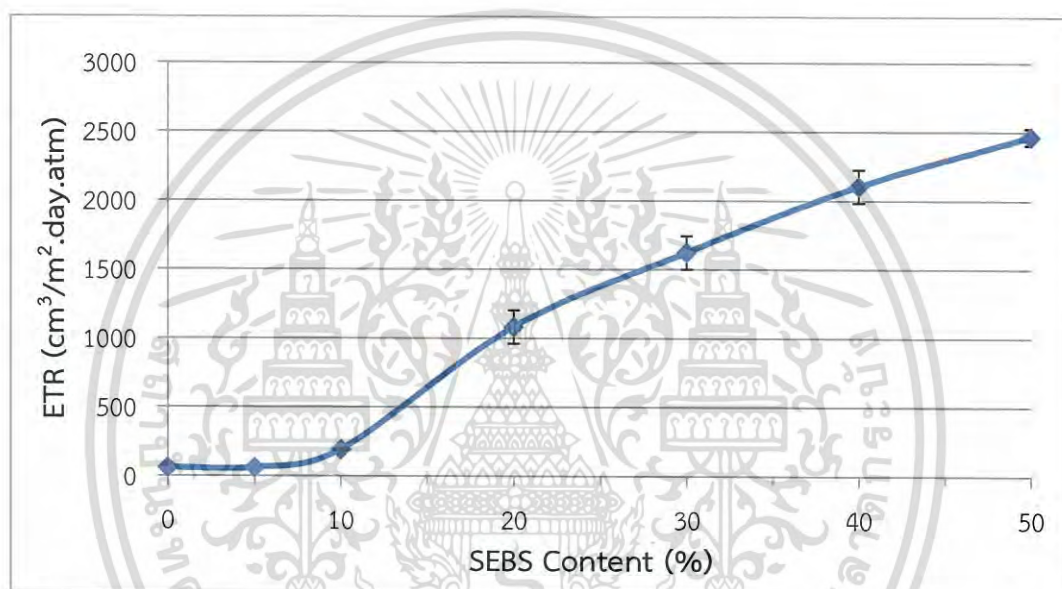


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับ %ความเครียดของฟิล์ม PP/SEBS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม PP/SEBS

จากรูปที่ 4.10 แสดงอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม PP และ PP/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่าง ๆ พบว่าฟิล์ม PP มีค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนต่ำ เนื่องจากความเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่อย่างเป็นระเบียบบางส่วน ทำให้ก๊าซเอทิลีนซึมผ่านได้น้อย ส่วน SEBS มีโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานรวมถึงมีส่วนของเอทิลีน/บิวทิลีนที่มีความนิ่มคล้ายยางสายโซ่โมเลกุลจึงเคลื่อนที่ได้ง่าย ก๊าซเอทิลีนจึงสามารถซึมผ่านได้ดี ดังนั้นเมื่อปริมาณ SEBS เพิ่มขึ้นจึงทำให้ส่วนที่เป็นอสัณฐานมีความนิ่มคล้ายยางของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.10 อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม PP/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่าง ๆ

4.2 การศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์ต่อสมบัติของฟิล์ม PP/SEBS/ZSM-5

การเลือกพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS ในอัตราส่วน 50/50 เพราะเป็นอัตราส่วนที่มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงที่สุดเนื่องจาก SEBS เป็นพอลิเมอร์อสัณฐานที่มีความยืดหยุ่นและนิ่มคล้ายยางทำให้ก๊าซเอทิลีนสามารถซึมผ่านได้ดีกว่า PP โดยนำฟิล์ม PP50S50 มาผสมกับซีโอไลต์ ZSM-5 ในปริมาณ 5-15% โดยน้ำหนัก ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดแล้วขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด จากนั้นนำฟิล์มมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ

4.2.1 พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม PP/SEBS/ZSM-5

ทำการตรวจสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m), อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และค่าพื้นที่ใต้กราฟของอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (ΔH_f) (เทอร์โมแกรมใน ภาคผนวก ข) เพื่อนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP ในฟิล์ม PP/SEBS/ZSM-5 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่า T_m , T_c และความเป็นผลึกของ PP ในฟิล์ม PP/SEBS/ZSM-5

สูตร	T_m (°C)	T_c (°C)	ความเป็นผลึก (%)
PP50S50	163.6	117.3	47
PP50S50Z5	163.6	117.9	53
PP50S50Z10	164.0	117.8	49
PP50S50Z15	164.2	117.6	53

จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS/ZSM-5 ทุกสูตรมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP ที่ใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 47-53% แสดงให้เห็นว่าการเติมซีโอไลต์ไม่ได้รับกวนการจัดเรียงตัวของผลึก PP ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากซีโอไลต์ส่วนใหญ่กระจายตัวได้ดีในวัฏภาค SEBS ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจายและมีลักษณะพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับ PP นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า T_m และ T_c ของ PP พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันทุกสูตร แสดงให้เห็นว่า การเติมซีโอไลต์ไม่ทำให้ขนาดผลึกของ PP ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลง

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร เพื่อหาปริมาณซีโอไลต์ที่มีอยู่จริงในพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS/ZSM-5 ด้วยเครื่อง TGA (เทอร์โมแกรมในภาคผนวก ค) ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณซีโอไลต์ในฟิล์ม PP/SEBS/ZSM-5

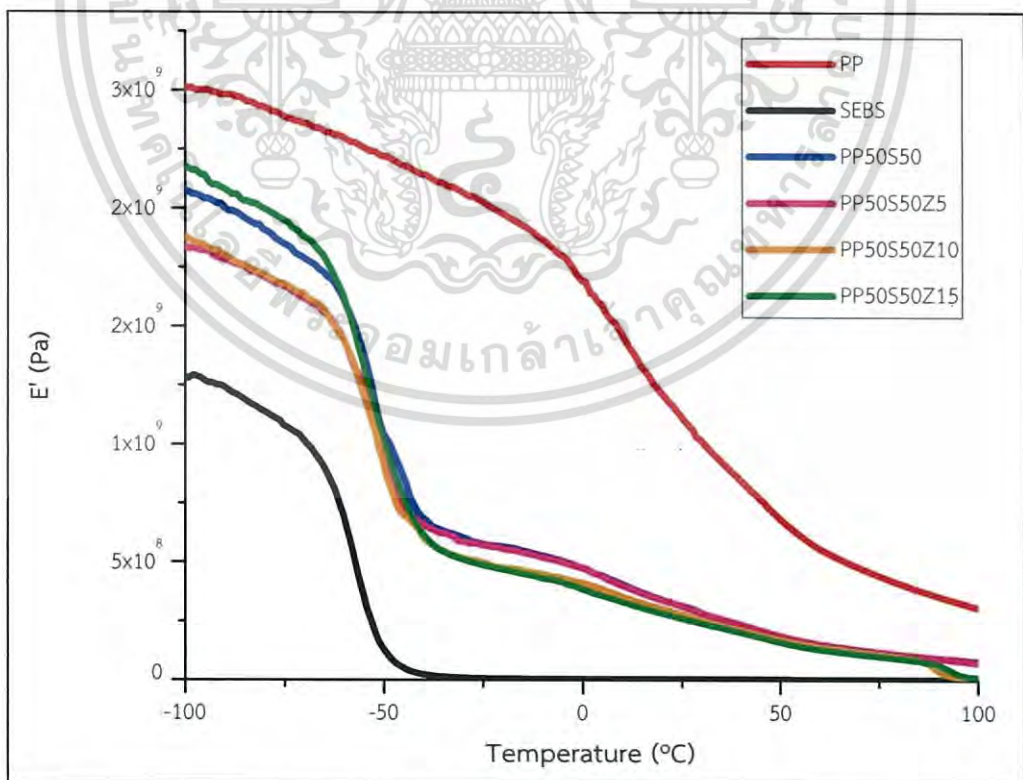
สูตร	Zeolite ที่เติม (%)	Zeolite ที่ได้จากการวิเคราะห์ (%)
PP50S50Z5	5	2.1
PP50S50Z10	10	8.0
PP50S50Z15	15	13.8

จากผลการทดลองพบว่าซีโอไลต์ที่มีอยู่จริงในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณน้อยกว่าซีโอไลต์ที่เติม ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าในขั้นตอนการผสมซีโอไลต์ซึ่งมีลักษณะเป็นผงอนุภาคขนาดเล็ก (1-2 μm) อาจเกิดการฟุ้งกระจายหายไปบางส่วน รวมถึงการผสมนี้อาจมีการกระจายตัวของซีโอไลต์ที่ไม่ดีนักจึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ซีโอไลต์เกิดการคลาดเคลื่อนได้ นอกจากนี้ในการทดสอบใช้สารในปริมาณน้อย จึงอาจทำให้ปริมาณซีโอไลต์ที่วิเคราะห์มีค่าคลาดเคลื่อนจากซีโอไลต์ที่มีอยู่จริง

การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนแบบพลวัต (DMA) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเป็นการศึกษาความร้อนเชิงกลของวัสดุเมื่อได้รับแรงสั่นอย่างต่อเนื่อง สามารถใช้หาค่ามอดุลัสสะสม (E') ค่ามอดุลัสสูญเสีย (E'') ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่กับอุณหภูมิ และจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วน E''/E' ได้เป็นค่า $\tan \delta$ จากค่าดังกล่าวสามารถหาอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของวัสดุได้

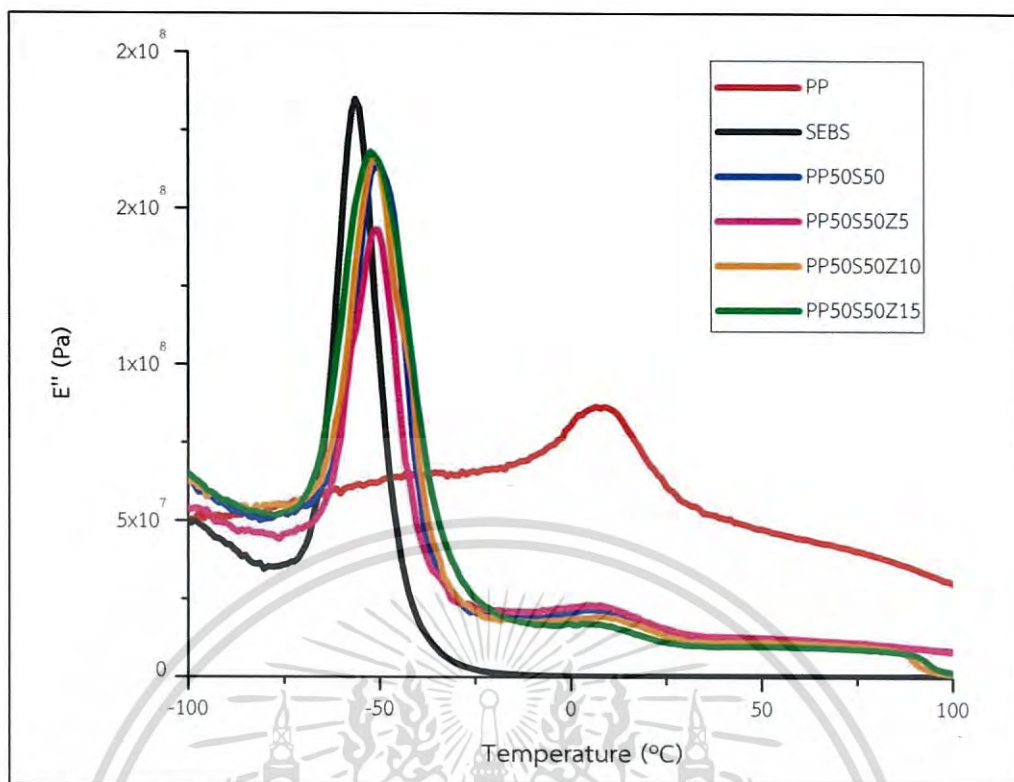
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11-4.13 แสดงเทอร์โมแกรมของ PP, SEBS, PP50S50, PP50S50Z5, PP50S50Z10 และ PP50S50Z15 พบว่าในรูปที่ 4.11 แสดงค่า E' ในช่วง Rubbery plateau ของพอลิเมอร์ พบว่า PP มีค่ามากที่สุดเนื่องมาจากเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกมีความแข็งแรง SEBS มีค่าต่ำสุดเนื่องมาจากสูตรโครงสร้างประกอบด้วยเอทิลีน/บิวทิลีนซึ่งมีความยืดหยุ่น ในขณะที่พอลิเมอร์ผสม PP50S50 มีค่าอยู่ในช่วงระหว่างพอลิเมอร์หลักทั้งสองตัว โดยการเติมซีไอโพลีเมอร์ในฟิล์ม PP50S50Z5, PP50S50Z10 และ PP50S50Z15 ไม่ส่งผลให้ค่า E' แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากรูปที่ 4.12 แสดงค่า E'' ของพอลิเมอร์ ซึ่งการคำนวณค่า $\tan \delta$ หาได้จาก E''/E' แสดงดังรูปที่ 4.13 โดยตำแหน่งพีคของกราฟ $\tan \delta$ แสดงค่า T_g ของพอลิเมอร์ T_g ของ PP พบที่อุณหภูมิ 12.8 °C แสดงถึงตำแหน่งที่มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่หลัก (α -transition) ของ PP T_g ของ PP ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีซีไอโพลีเมอร์พบที่ 10.8-12.8 °C มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์ม PP สำหรับ SEBS ตามทฤษฎีควรแสดงค่า T_g 2 ตำแหน่งเพราะในโครงสร้างประกอบด้วยส่วนของเอทิลีน/บิวทิลีน และส่วนของพอลิสไตรีน แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้ SEBS เกรด G1657 ซึ่งมีปริมาณพอลิสไตรีนเพียง 12-14 wt% ทำให้สังเกต T_g ในส่วนของพอลิสไตรีนได้ยาก ส่วนค่า T_g ของเอทิลีน/บิวทิลีนพบที่อุณหภูมิ -46.3 °C และเมื่อพิจารณา T_g ของ PP50S50, PP50S50Z5, PP50S50Z10 และ PP50S50Z15 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง -49.3 ถึง -46.3 °C (ตารางที่ 4.4) แสดงให้เห็นว่าซีไอโพลีเมอร์ที่เติมลงไปพอลิเมอร์ผสมไม่ได้เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า $\tan \delta$ ในรูปที่ 4.13 พบว่า SEBS มีค่าแอมพลิจูดสูงกว่า PP เนื่องจาก SEBS จัดเป็นอีลาสโตเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นและเป็นอสัณฐาน สายโซ่จึงสามารถเคลื่อนที่และเกิดการคลายตัว (Relaxation) ง่ายกว่า PP ซึ่งเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่อย่างเป็นระเบียบ

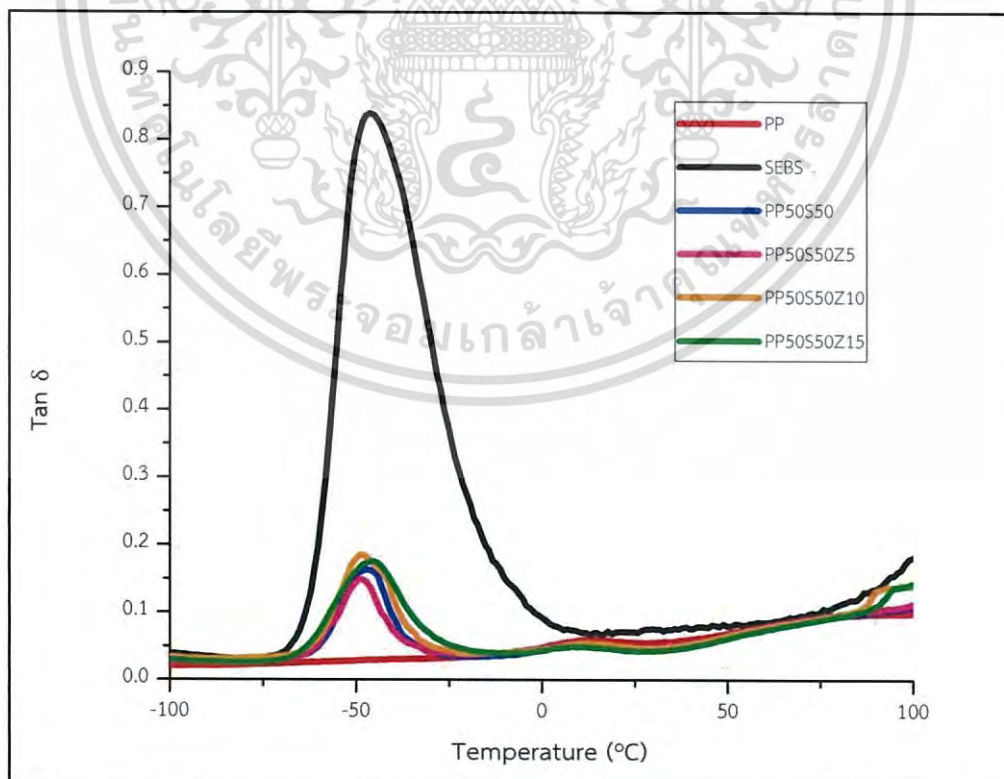


รูปที่ 4.11 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม (E') กับอุณหภูมิของ PP, SEBS, PP50S50, PP50S50Z5, PP50S50Z10 และ PP50S50Z15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสูญเสีย (E'') กับอุณหภูมิของ PP, SEBS, PP50S50, PP50S50Z5, PP50S50Z10 และ PP50S50Z15



รูปที่ 4.13 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของ PP, SEBS, PP50S50, PP50S50Z5, PP50S50Z10 และ PP50S50Z15

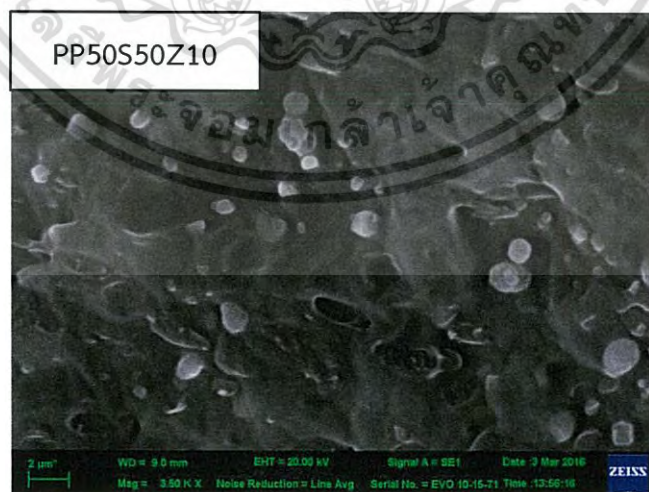
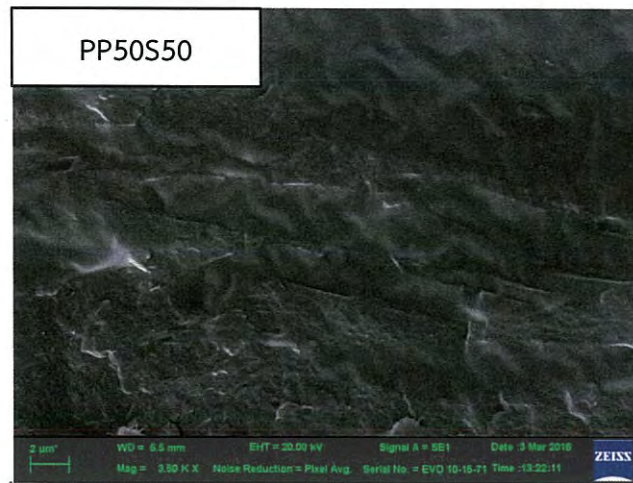
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่า T_g ของ PP, SEBS และพอลิเมอร์ผสมสูตร PP50S50 ที่เติมและไม่เติมซีโอไลต์ ZSM-5

สูตร	T_g (°C)	
	SEBS	PP
PP	-	12.8
SEBS	- 46.3	-
PP50S50	- 47.3	12.8
PP50S50Z5	- 49.3	10.8
PP50S50Z10	- 48.3	11.9
PP50S50Z15	- 46.3	10.8

4.2.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม PP/SEBS/ZSM-5

จากรูปที่ 4.14 แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม PP50S50 ที่เติมและไม่เติมซีโอไลต์ในปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์ม PP50S50 มีผิวเรียบ ส่วนฟิล์มที่เติมซีโอไลต์มีอนุภาคทรงกลมสีขาวของซีโอไลต์ ZSM-5 กระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน เมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้นมีซีโอไลต์บางส่วนรวมกลุ่มกัน (Agglomerate) เนื่องจากซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) ซึ่งมีความเป็นขี้วมมากกว่า PP และ SEBS และจากรูปที่ 4.15 แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ PP/SEBS ที่เติมซีโอไลต์ปริมาณ 15 wt% หลังสกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน โดย PP ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง มี SEBS และซีโอไลต์ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคกระจาย ก่อนการสกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน พบอนุภาคทรงกลมสีขาวกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน หลังการสกัดพบว่ามีช่องว่างสีดำซึ่งเป็นวัฏภาค SEBS ที่ถูกสกัดด้วยไซลีนและอนุภาคทรงกลมสีขาว ซึ่งอนุภาคทรงกลมสีขาวน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PP50S50Z15 ก่อนสกัด เนื่องจากซีโอไลต์บางส่วนถูกสกัดออกไปพร้อมกับวัฏภาค SEBS แสดงว่าซีโอไลต์กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของ SEBS มากกว่าวัฏภาคของ PP ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นขี้วมที่สูงกว่าของ SEBS ($\delta = 8.5$ (cal/cm³)^{1/2}) เมื่อเทียบกับ PP ($\delta = 8.1$ (cal/cm³)^{1/2})

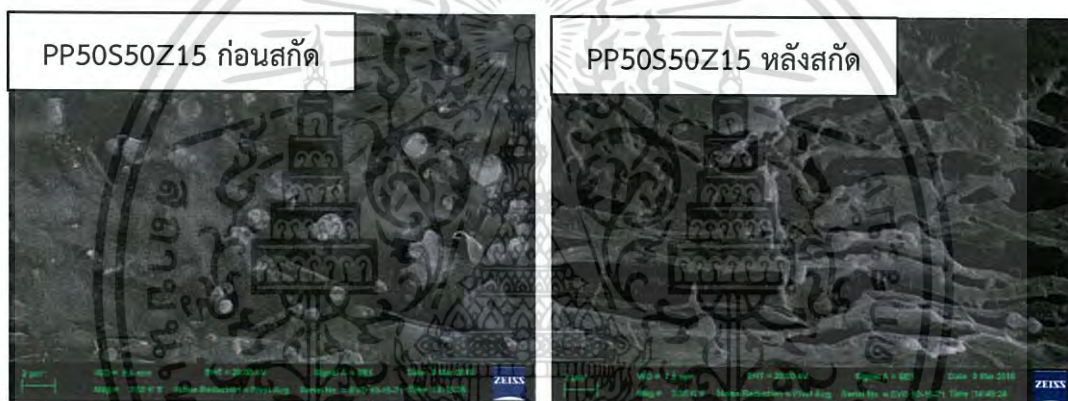


รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม PP50S50 ที่เติมและไม่เติมซีโอไลต์ในปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 3500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม PP50S50 ที่เติมและไม่เติมซีโอไลต์ในปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 3500 เท่า (ต่อ)



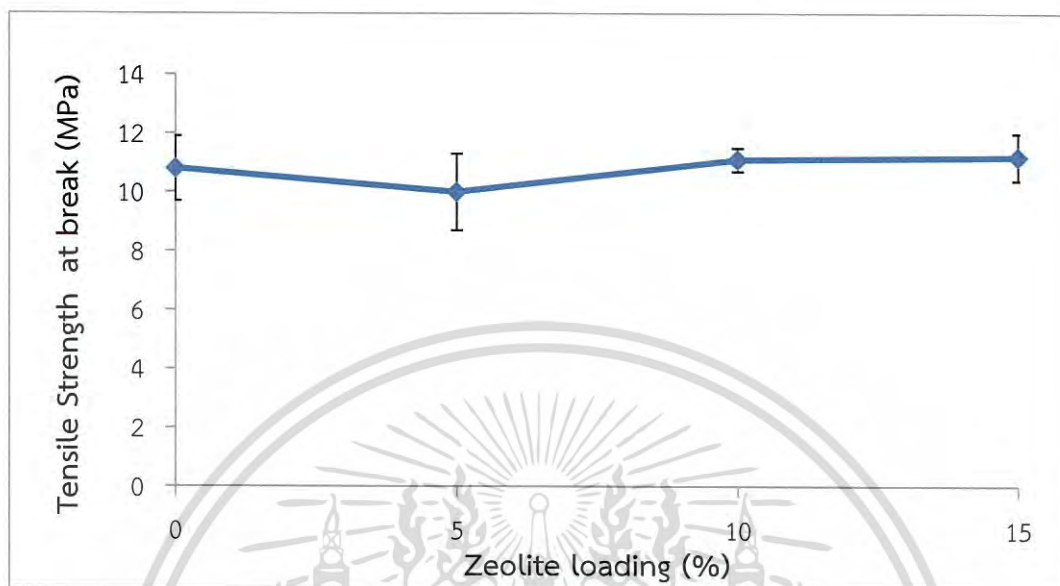
รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม PP50S50Z15 ก่อนและหลังสกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ที่กำลังขยาย 3500 เท่า

4.2.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/SEBS/Zeolite ZSM-5

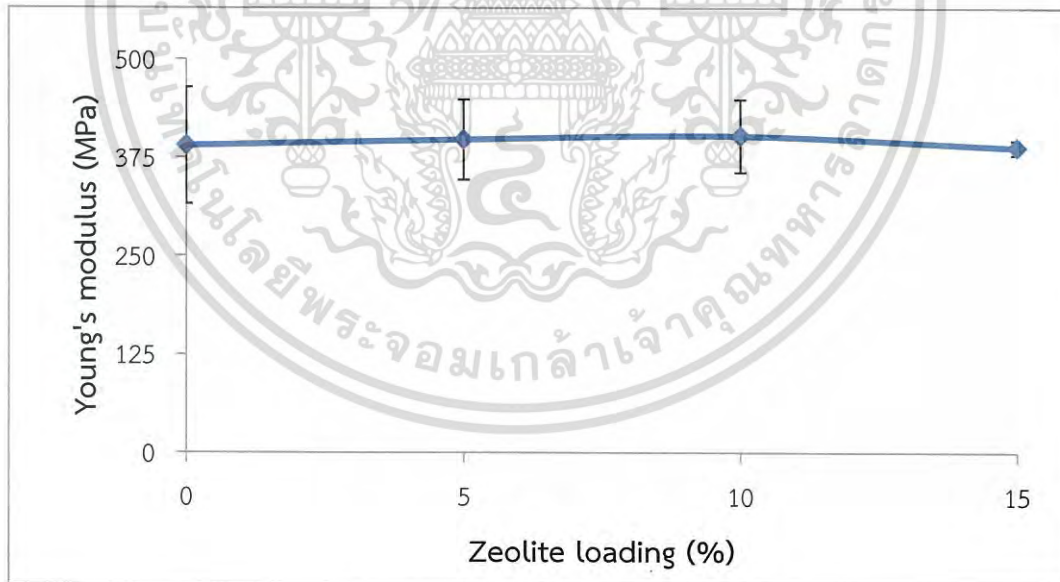
จากรูปที่ 4.16-4.18 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/SEBS ที่มีปริมาณซีโอไลต์ต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่าฟิล์ม PP50S50 ไม่เติมและเติมซีโอไลต์มีค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 11-12 MPa เนื่องจากซีโอไลต์กระจายตัวในวัฏภาค SEBS มากกว่าวัฏภาค PP จากความเป็นขั้วที่ต่างกันของพอลิเมอร์ จากผลของสัณฐานวิทยา (ในหัวข้อ 4.2.2) ทำให้ความต่อเนื่องของวัฏภาค PP ไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก ผลการทดลองเช่นเดียวกันกับค่ามอดูลัสของยัง ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดต่ำลง เนื่องจากซีโอไลต์กระจายตัวในวัฏภาค SEBS มากกว่าวัฏภาค PP และซีโอไลต์เป็นอนุภาคของแข็งที่ไม่มีอันตรกิริยากับ PP และ SEBS เมื่อได้รับแรงดึง ทำให้พอลิเมอร์ไม่สามารถกระจายแรงจากวัฏภาคพอลิเมอร์ไปยังซีโอไลต์ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งได้ จึงเสมือนเป็นการเพิ่มจุดบกพร่องในชิ้นงาน ทำให้ฟิล์มยืดตัวได้น้อยลงหรือขาดได้ง่ายมากขึ้น รวมถึงการเพิ่มปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลต์เป็นการเพิ่มรอยต่อระหว่างวัฏภาค SEBS จึงส่งผลให้ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มมีค่าลดลง

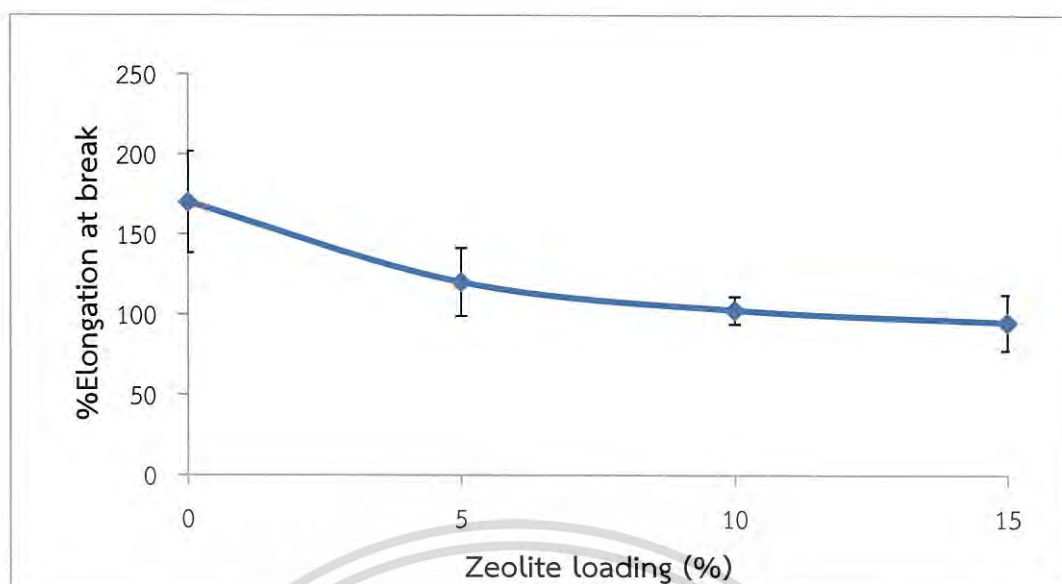


รูปที่ 4.16 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP50S50 ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่าง ๆ



รูปที่ 4.17 โมดูลัสของยังของฟิล์ม PP50S50 ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่าง ๆ

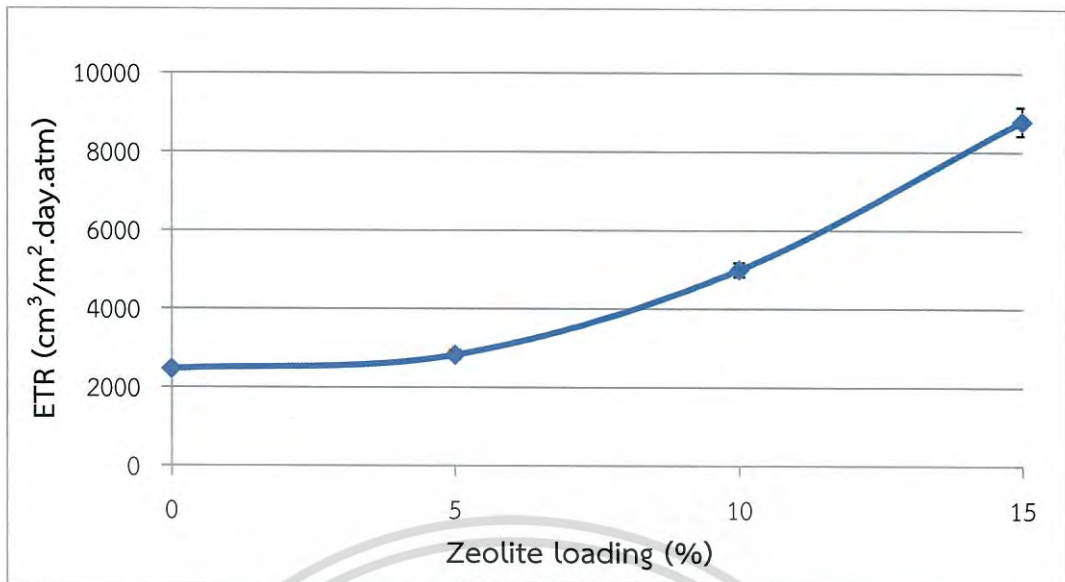
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม PP50S50 ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่าง ๆ

4.2.4 การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม PP/SEBS/ZSM-5

พอลิเมอร์ผสม PP/SEBS อัตราส่วน 50/50 เป็นอัตราส่วนที่เป็นอัตราส่วนสูงที่สุด และอัตราส่วนที่มีการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนดีที่สุด ถูกเลือกเพื่อนำมาทำการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ในปริมาณ 5-15% โดยน้ำหนัก เนื่องจากซีโอไลต์ ZSM-5 มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีขนาดความกว้างของหน้าต่าง 5.4-5.6 อังสตรอม ซึ่งก๊าซเอทิลีนมีขนาดเชิงจลนศาสตร์ (Kinetic diameter) 3.9 อังสตรอม [45] รูพรุนของซีโอไลต์จึงยอมให้ก๊าซเอทิลีนซึมผ่านได้ รวมถึงซีโอไลต์ ZSM-5 มีความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีน เมื่อก๊าซเอทิลีนถูกดูดซับทำให้เกิดความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนสูงที่ชั้นของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมและเกิดการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนไปยังบรรยากาศซึ่งมีความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนต่ำกว่า จากรูปที่ 4.19 แสดงอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม PP50S50 ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่าง ๆ พบว่าฟิล์ม PP50S50 มีค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนต่ำกว่าฟิล์ม PP50S50 ที่เติมซีโอไลต์ และเมื่อปริมาณซีโอไลต์มากขึ้น ทำให้มีความสามารถในการดูดซับเอทิลีนที่ชั้นของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น รวมถึงซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็น Channel structure ซึ่งมีความต่อเนื่องของรูพรุน ก๊าซเอทิลีนสามารถซึมผ่านในส่วนของรูพรุนได้ดี ทำให้ช่วยเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน ส่งผลให้ค่าอัตราการซึมผ่านเอทิลีนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ เห็นได้ว่าการเติมซีโอไลต์ 5 wt% ให้ค่า ETR เพิ่มขึ้นจาก $2,828 \pm 120 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$ เป็น 2 และ 3 เท่า เมื่อเติมซีโอไลต์ 10 wt% ($4,993 \pm 180 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$) และ 15 wt% ($8,783 \pm 361 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$) ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม PP50S50 ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน (PP) กับพอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (SEBS) เพื่อเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ พบว่าการเพิ่มปริมาณ SEBS มากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสของยังมีค่าลดลง เนื่องจาก SEBS มีโครงสร้างของเอทิลีน/บิวทิลีน ที่มีความนิ่มและยืดหยุ่นคล้ายยาง ทำให้รับแรงกระทำได้น้อยแต่สามารถมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มาก จึงทำให้ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน พบว่าการเติม SEBS ไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม แสดงให้เห็นว่าการเติม SEBS ไม่ขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึก PP ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม จากหลักฐานวิทยาเมื่อเพิ่มปริมาณ SEBS ขนาดวรัภาคของ SEBS มีแนวโน้มขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีหลักฐานวิทยาแบบ Spherical shape บางส่วนรวมตัวกันเป็นแบบ Cylindrical shape และพบว่าเมื่อปริมาณ SEBS เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีความต่อเนื่องของวรัภาคหลักฐานมากขึ้น ก๊าซเอทิลีนจึงสามารถซึมผ่านได้ดีขึ้น

การเพิ่มอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม PP50S50 โดยการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ในปริมาณ 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก พบว่าการเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของ PP ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม จากหลักฐานวิทยาพบว่าซีโอไลต์กระจายตัวอยู่ในวรัภาคของ SEBS มากกว่าวรัภาคของ PP โดยพบว่าเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้นมีซีโอไลต์บางส่วนรวมกลุ่มกัน ฟิล์มมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสของยังไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าต่ำลง และเมื่อทดสอบการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนพบว่าฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 15 wt% สามารถเพิ่มอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนได้ดีที่สุด ($8,783 \pm 361 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. อาจทำการปรับปรุงซีโอไลต์ ZSM-5 ให้มีความมีขั้วลดลงเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวในวรัภาค PP
2. ศึกษาการซึมผ่านของก๊าซชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ เป็นต้น
3. นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไปทดสอบห่อผลิตผลสดทางการเกษตรที่มีความว่องไวต่อก๊าซเอทิลีน เช่น มะม่วง กล้วย เป็นต้น
4. เลือกสูตรพอลิเมอร์ผสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในเชิงพาณิชย์

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. ภาพรวมการผลิตผลไม้ของประเทศไทย. [Online]. Available : www.thaifita.com/thaifita/portals/0/file/ascn_fruit2.doc.
- [2] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2559. ยืดอายุผักผลไม้สดด้วยบรรจุภัณฑ์ที่ดัดแปลงบรรยากาศ. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-05-29-09-39-49/1389->.
- [3] วรณ สันธิภูญญา และคณะ. 2545. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ. เล่มที่ 26. กรุงเทพฯ : สำนักงานกลางหอรัษฎากรพิพัฒน์ ในพระบรมมหาราชวัง.
- [4] สรวิต แจ่มจำรูญ และคณะ. 2545. การยืดอายุผักและผลไม้. [Online]. Available : <http://www.tistr.or.th/tistrblog/?tag=เอทิลีน>.
- [5] ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. 2555. บรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับอาหาร. [Online]. Available : http://www.foodnetworksolution.com/news_and_articles/article/0101/บรรจุภัณฑ์อาหารตอนที่5-บรรจุภัณฑ์พลาสติก.
- [6] Monprasit, P. 2010. "Study on Ethylene Gas Permeability of SEBS/LLDPE Double-Layered Zeolite Composite." M.Sc. Thesis (Polymer technology), Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [7] กนกวรรณ หงส์ทอง, กฤษณา มรรคผล และชญาพร รุ่งเรือง. 2556. "การพัฒนาฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS/ZSM-5 ที่มีอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน." โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2555. การเปลี่ยนแปลงของผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3369>.
- [9] พีรเดช ทองอำไพ. 2554. การสุกของผลไม้ (Fruit ripening). [Online]. Available : <http://www.thaikasetsart.com/การสุกของผลไม้/>.
- [10] Wutthipong. 2557. TYPEOFFRUIT. [Online]. Available : <https://wutthipong12.wordpress.com/2013/02/11/type-of-fruit-ประเภทของผลไม้/>.
- [11] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2549. เอทิลีน (Ethylene). [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3624/เอทิลีน-ethylene>.
- [12] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2554. กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process). [Online]. Available : 202.28.32.231/personal/engmsu_ma/.../กระบวนการเมมเบรน.doc.
- [13] Nadine, S. Roman, K. Daniel, S. Patrick, R. and Claudia, S. 2010. "Functionalized Copolyimide Membranes for the Separation of Gaseous and Liquid Mixtures." *Journal of Organic Chemistry*. 6 : 789-800.
- [14] Kiyoumars, Z. and Ahmadreza, R. 2016. "Mixed Matrix Membrane of Nano-zeolite NaX/poly(ether-block-amide) for Gas Separation Applications." *Journal of Membrane Science*. 510 : 270-283.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] Oran, A. 2559. A dense layer in the RO membrane's polymer matrix acts as a barrier and assists in separation. [Online]. Available : <http://www.water-technology.net/projects/magtaa-desalination/magtaa-desalination4.html>.
- [16] ชันทอง สุทธราภา. 2547. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2559. พลาสติกย่อยสลายได้. [Online]. Available : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_and_usage_plas.html.
- [18] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2558. พอลิเมอร์เบลนด์. [Online]. Available : archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2554/chem20954sg_ch1.pdf.2558.
- [19] ชลลดา ฤตวิรุฬห์. 2543. “พอลิเมอร์.” *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 10(1) : 14-19.
- [20] Edward, P. and Moore, Jr. 1996. *Polypropylene Handbook*. New York : Hanser.
- [21] Harutun, G. 2009. *Polypropylene and Polypropylene Composite*. New York : Marcel Dekker.
- [22] นเรนทร์ อาศัยพานิชย์. 2550. “การพัฒนาเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [23] Francisco, J. and Zbigniew, R. 2000. *Block Copolymers*. New York : Marcel Dekker.
- [24] CJP. 2015. *Styrene-EthyleneButadiene-Styrene (SEBS)*. [Online]. Available : <http://www.cjpsales.co.uk/products/downloads/26/19.pdf>.
- [25] Hristijan, S. Matthias, K. Denis, M. and Guggi, K. 2010. “Molecular Composites with Enhanced Energy Density for Electroactive Polymers.” *Journal of Materials Chemistry*. 20 : 7558-7564.
- [26] จุฬารัตน์ อุปชาภัย และนัตยา วัฒนพจน์. 2559. การสังเคราะห์ซีโอไลต์. [Online]. Available : <http://chem.flas.kps.ku.ac.th/01403443/01403443-REPORT-SYNTHESIS-ZEOLITE.pdf>.
- [27] Wikipedia. 2015. Zeolite. [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Zeolite#Properties_and_occurrence.
- [28] Vcharkarn. 2559. ซีโอไลต์. [Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com/vblog/38694>.
- [29] Wikipedia. 2015. ZSM-5. [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/ZSM-5#cite_note-7.
- [30] Frederik, G. 1987. “ZSM-5 type zeolites.” Thesis of Delft University of Technology.
- [31] Miki, N. Masaaki, K. Tadashi, H. and Yuichi, M. 1986. “Fine Control of the Pore-Opening Size of Zeolite ZSM-5 by Chemical Vapor Deposition.” *The journal of physical chemistry*. 90(23) : 6233-6237.

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [32] มกรา ทัพพุน, ผึ้งพาย พรธณวดี และเมตตา เจริญพานิช. 2556. “แอกติวิตีของเหล็กบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่เตรียมจากเถ้าลอยลิกไนต์ในการเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.” โครงการพิเศษ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [33] พงนิย ชุมมงคล, สุวิมล อัสวพิศิษฐ และเรวดี อนุวัฒนา. 2550. “การสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ได้จากกากของเสียของโรงงานอุตสาหกรรมหล่อหลอมเหล็ก และโรงงานซูปอะลูมิเนียม.” โครงการพิเศษ ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [34] ศุภลักษณ์ วรมังครรัตน์. 2550. “การสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [35] IZA-SC. 2559. Framework Type MFI. [Online]. Available : http://izasc.fos.su.se/fmi/xsl/IZA-SC/ftc_tm.xsl?-db=Atlas_main&lay=tm&STC=MFI&find.
- [36] Siam success. 2559. โดดเด่นด้วยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ. [Online]. Available : <http://www.siamsuccess.co.th/data/Active-Packaging.html>.
- [37] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2559. เทคโนโลยีฟิล์มบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเพื่อยืดอายุและรักษาคุณภาพของผักและผลไม้สด. [Online]. Available : <http://www.most.go.th/portalweb/index.php/intro/structural-units/agency-rector/nstda/1710.html>.
- [38] ชัยสัมพันธ์ ณ ลำพูน, ปาณิดา ผาลทอง และรัตนาวดี ทุมชะ. 2555. “การศึกษาการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS.” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [39] รุจิเรข วิวัฒน์นุกุล. 2556. “การศึกษาพอลิเมอร์ผสมของแอลแอลดีพีอี/เอสอีบีเอสเพื่อเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [40] Sahassanon, T. 2015. “Study on LLDPE/SEBS/Zeolite Y blends for selective ethylene permeation of packaging film.” M.Sc. Thesis (Polymer technology), Faculty of Science, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang.
- [41] Balkan, O. Demirer, H. and Sabri Kayali, E. 2011. “Effects of Deformation Rates on Mechanical Properties of PP/SEBS Blends.” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 47(1) : 26-33.
- [42] Moeller, H. W. 2008. *Progress in Polymer Degradation and Stability Research*. New York : Nova Science.
- [43] Michaels, A. S. Vieth, W. R. and Alcalay, H. H. 1968. “The Solubility Parameter of Polypropylene.” *Journal of Applied Polymer Science*. 12(7) : 1621-1624.
- [44] Peng, W. Shuhua, Q. Nailiang, L. Kangqing, D. and Haiying, N. 2011. “Investigation of Thermodynamic Properties of SIS, SEBS, and Naphthenic Oil by Inverse Gas Chromatography.” *Journal of Elastomers and Plastics*. 43(4) : 369-386.

[45] Richard, B. 2012. *Membrane Technology and Applications*. California : John Wiley & Sons.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

ก.1 ความเป็นผลึกของ PP

ตารางที่ ก.1 ความเป็นผลึก (% Crystallinity)

ตัวอย่าง	%PP ที่มีในฟิล์มตัวอย่าง	ΔH_f (J/g)
PP100S0	100	103.37
PP95S5	95	96.45
PP90S10	90	91.87
PP80S20	80	80.43
PP70S30	70	73.23
PP60S40	60	59.85
PP50S50	50	48.41
PP50S50Z5	47.5	52.38
PP50S50Z10	45	45.44
PP50S50Z15	42.5	46.99

$$\Delta H_f \text{ (J/g)} = 207.1 \text{ J/g (ความเป็นผลึกของ PP 100\%)}$$

$$\% \text{ความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{\% \text{โดยน้ำหนักของ PP ที่มีอยู่จริง}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณความเป็นผลึกของ PP ในฟิล์มตัวอย่าง

$$= \frac{103.37}{207.1} \times \frac{100}{100} \times 100$$

$$= 49.9 \%$$

ก.2 การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน

การคำนวณ Pressure drop

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

m = มวลของน้ำที่เปลี่ยนแปลงในท่อรูปตัวยู

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

A = พื้นที่หน้าตัด loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หามวลของน้ำที่เปลี่ยนแปลงในท่อรูปตัวยู (m)

$$\text{จากความสัมพันธ์ } D = \frac{m}{V}$$

$$m = DV ; V = \pi r^2 h$$

$$= (1000 \text{ kg/m}^3) (\pi \times (3 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2 \times 2.9 \times 10^{-2} \text{ m})$$

$$= 8.1996 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } P_{\text{drop}} = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{(8.1996 \times 10^{-4} \text{ kg})(9.807 \text{ m/s}^2)}{\pi \left(\frac{0.7875 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 \text{ m}^2}$$

$$P = 16,509.6488 \text{ kg/m.s}^2 \text{ or Pa}$$

$$= 0.1629 \text{ atm}$$

คำนวณความเข้มข้นก๊าซเอทิลีนมาตรฐาน

$$\text{จากความสัมพันธ์ของก๊าซ } PV = nRT ; n = \frac{PV}{RT}$$

โดยที่ $P = 1.1931 \text{ atm}$ (Atmospheric pressure + Pressure drop)

$$V = 97.9404 \times 10^{-6} \text{ L (ปริมาตรของท่อ)}$$

$$R = 0.0820 \text{ L.atm/mol.K}$$

$$T = 300 \text{ K (อุณหภูมิ ณ ห้องปฏิบัติการ)}$$

หาปริมาณโมลของก๊าซเอทิลีน

$$\text{จะได้ } n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1.1931 \text{ atm})(97.9404 \times 10^{-6} \text{ L})}{(0.08206 \text{ L.atm/mol.K})(300 \text{ K})}$$

$$n = 4.8564 \times 10^{-6} \text{ mol}$$

เปลี่ยนเป็นหน่วยความเข้มข้น (mol/L)

$$\text{จะได้ ปริมาตรท่อขนาด } 97.9404 \times 10^{-6} \text{ L มีก๊าซเอทิลีน } 4.8564 \times 10^{-6} \text{ mol}$$

$$\begin{aligned} \text{ถ้าปริมาตรท่อขนาด } 1.0000 \text{ L} \quad \text{จะมีก๊าซเอทิลีน} & \frac{(1.0000 \text{ L})(4.8564 \times 10^{-6} \text{ mol})}{(97.9404 \times 10^{-6} \text{ L})} \\ & = 0.0496 \text{ mol/L} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนเป็นหน่วย ppm (mg/L)

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad (0.0496 \text{ mol/L})(28.05 \text{ g/mol}) &= 1.3913 \text{ g/L} \\ &= 1.3913 \times 10^3 \text{ mg/L หรือ ppm} \\ &= 1,391.30 \text{ ppm} \end{aligned}$$

คำนวณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน (ฟิล์ม PP)

พื้นที่ใต้กราฟของก๊าซเอทิลีนมาตรฐานที่ความเข้มข้น 1,391.30 ppm (A_s) 3.27 V.s

พื้นที่ใต้กราฟของก๊าซเอทิลีนที่ซึมผ่าน (Permeate) (A_F) 0.01 V.s

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่ซึมผ่าน} &= \frac{1,391.30}{3.27} \times 0.01 \\ &= 4.2547 \text{ ppm or } \mu\text{L/L} \\ &= 4.2547 \times 10^{-3} \text{ mL/L} \end{aligned}$$

อัตราการไหลของก๊าซ (F_x) = 30.00 mL/min

$$\begin{aligned} \text{อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนต่อเวลา (J)} &= 4.2547 \times 10^{-3} \text{ mL/L} \times 30.00 \text{ mL/min} \\ &= 0.1276 \text{ mL} \times \text{mL}/(\text{L} \times \text{min}) \\ &= 1.2764 \times 10^{-4} \text{ mL/min} \end{aligned}$$

พื้นที่ของฟิล์มตัวอย่าง (A_F) = 0.003025 m²

ความหนาของฟิล์ม (Δx) = 0.0456 mm

$$\begin{aligned} \text{ฟลักซ์ของก๊าซเอทิลีน (Flux)} &= \frac{J}{A_F} \\ &= \frac{1.2764 \times 10^{-4} \text{ mL/min}}{0.003025 \text{ m}^2} \\ &= 0.0422 \text{ mL/min.m}^2 \\ &= 60.7680 \text{ cm}^3/\text{m}^2.\text{day} \end{aligned}$$

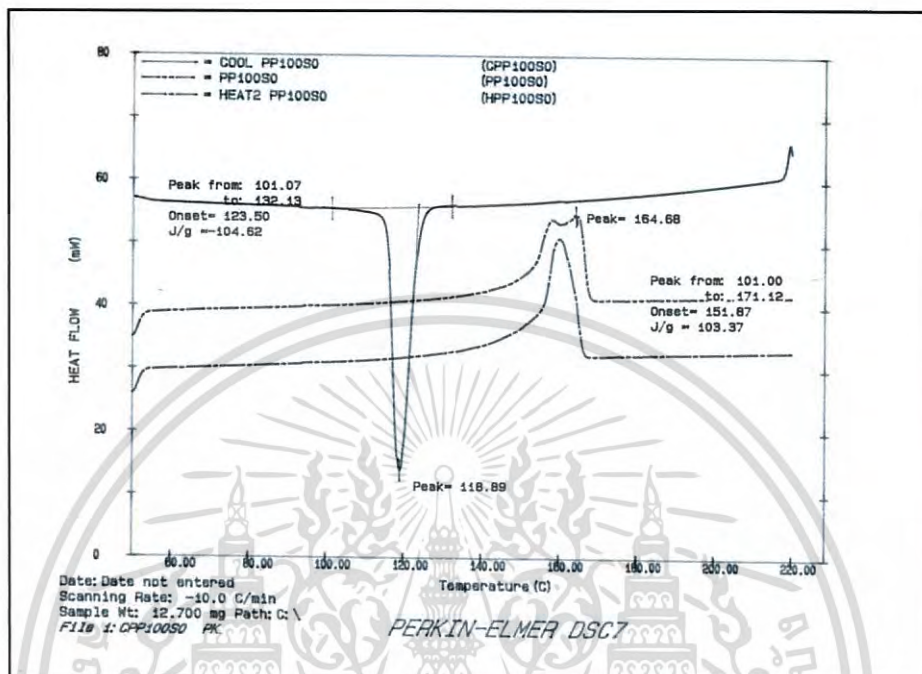
$$\begin{aligned} \text{อัตราเร็วการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน (ETR)} &= \frac{J}{A_F \times \Delta p_i} \\ &= \frac{60.7680}{1.01} \\ &= 60.1663 \text{ cm}^3/\text{m}^2.\text{day.atm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน (EP)} &= \frac{J \times \Delta x}{A_F \times \Delta p_i} \\ &= \text{ETR} \times \text{ความหนาของฟิล์ม} \\ &= 60.1663 \times 0.0456 \\ &= 2.7436 \text{ cm}^3.\text{mm}/\text{m}^2.\text{day.atm} \end{aligned}$$

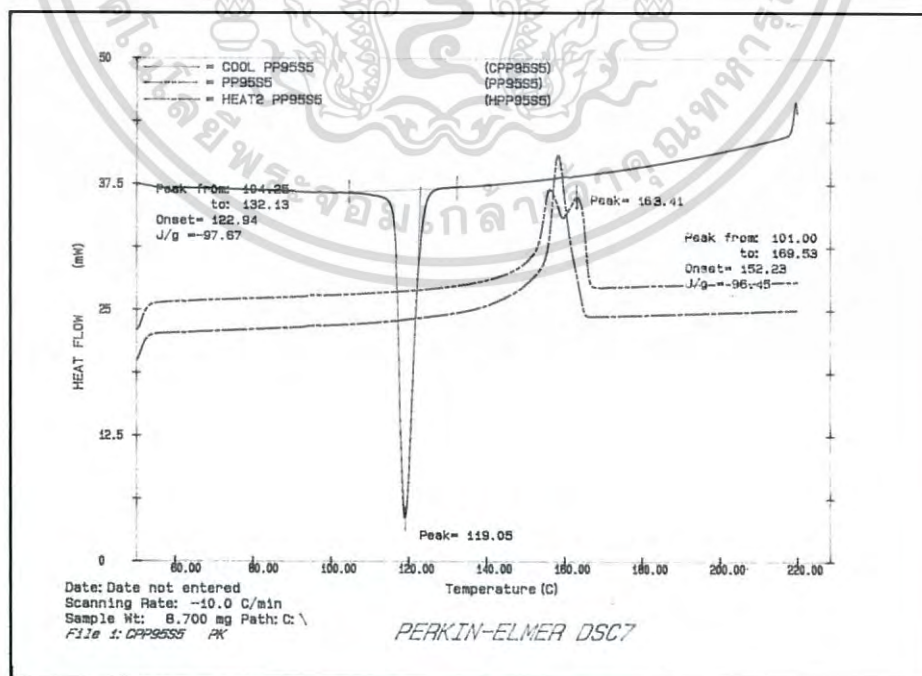
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

DSC เทอร์โมแกรม

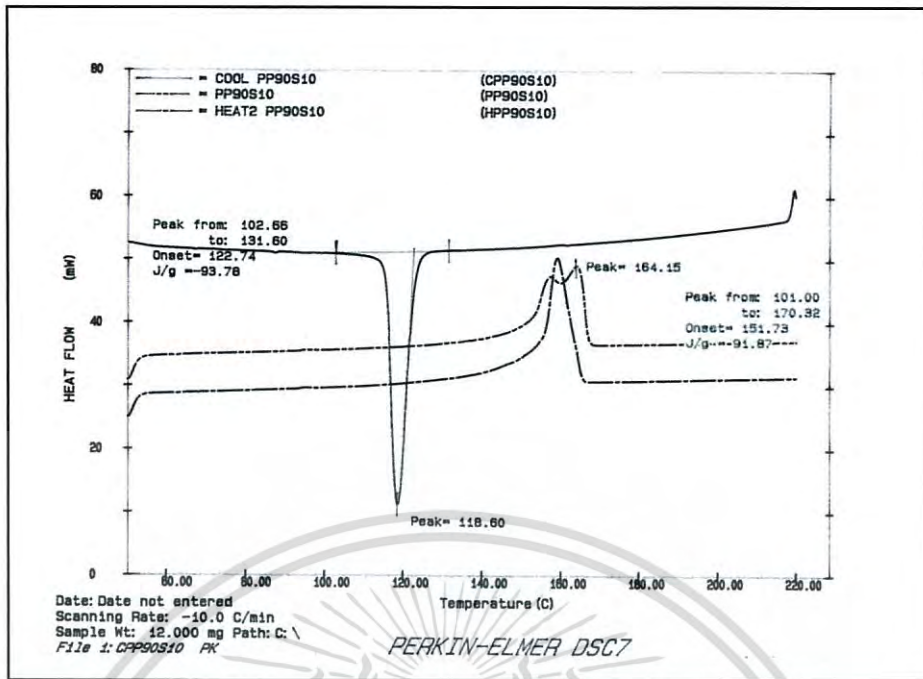


รูปที่ ข.1 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP100S0

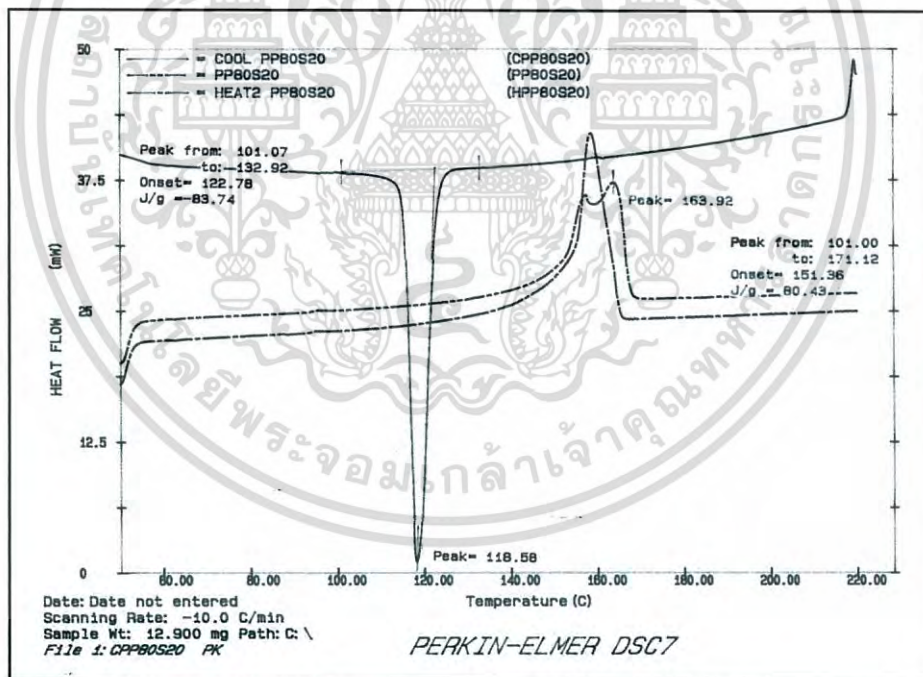


รูปที่ ข.2 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP95S5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

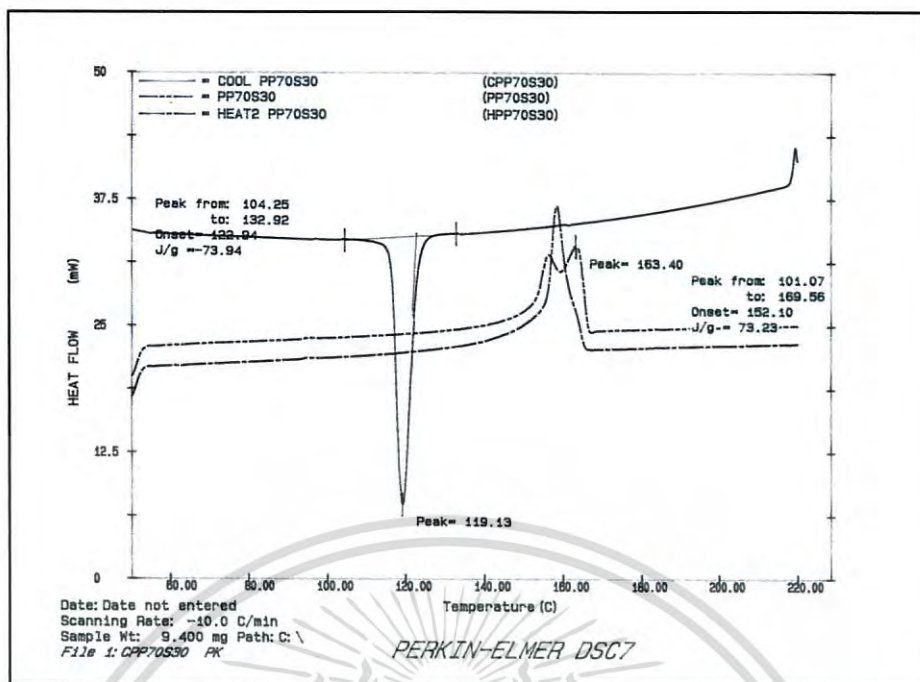


รูปที่ ข.3 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP90S10

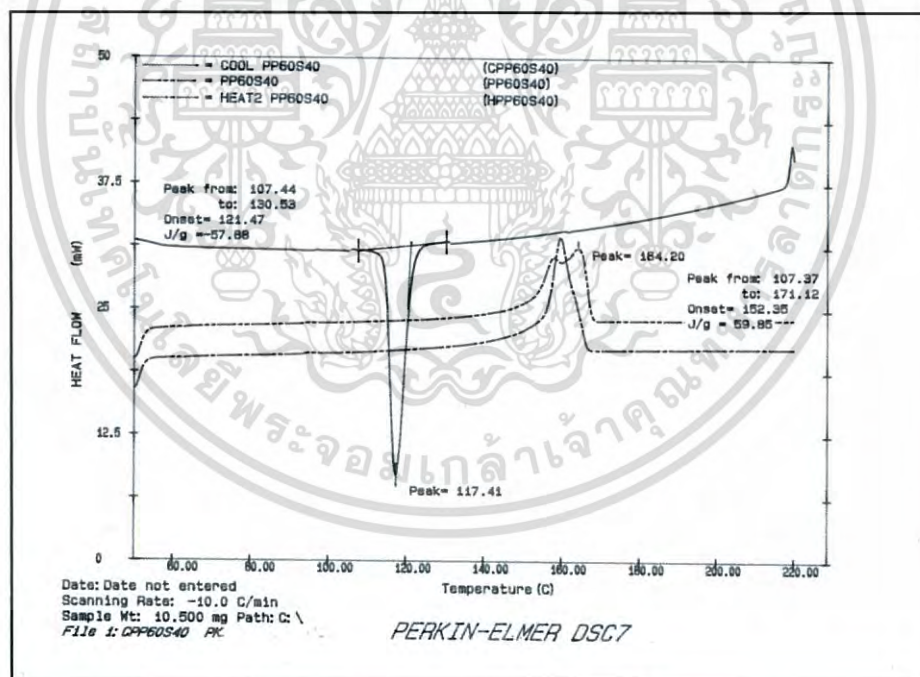


รูปที่ ข.4 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP80S20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

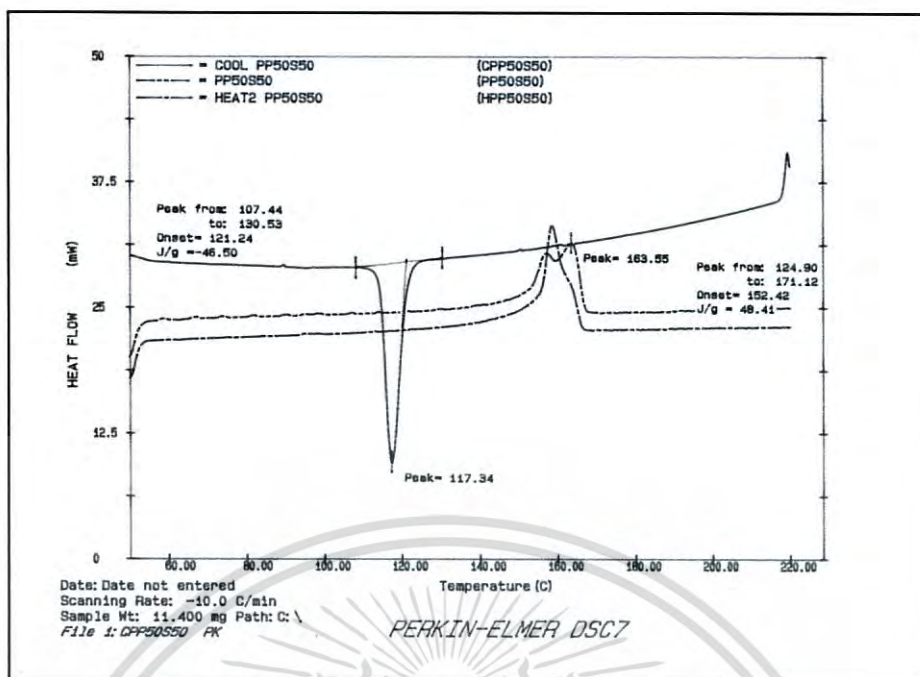


รูปที่ ข.5 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP70S30

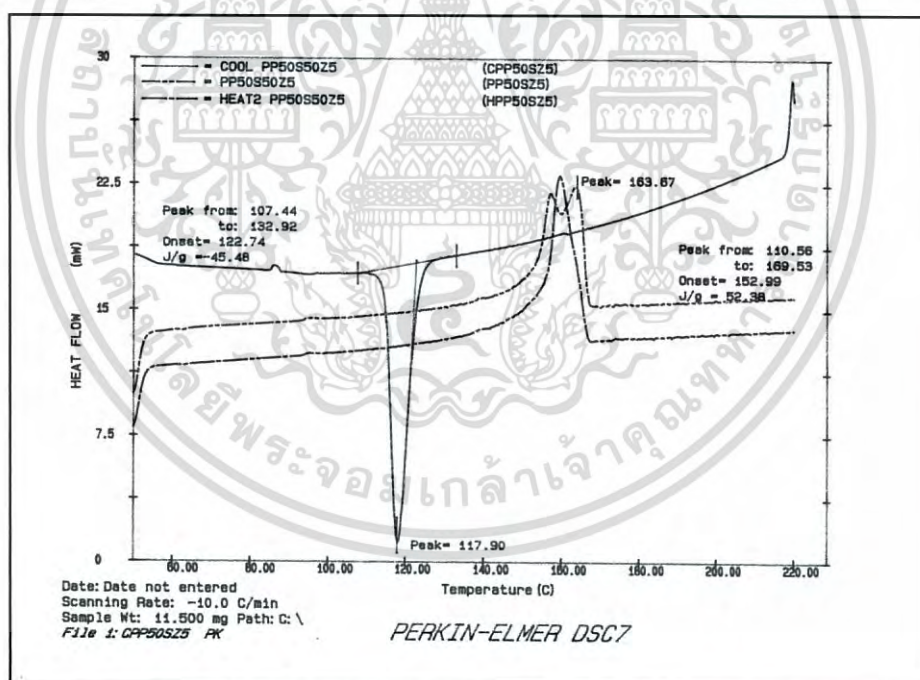


รูปที่ ข.6 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP60S40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

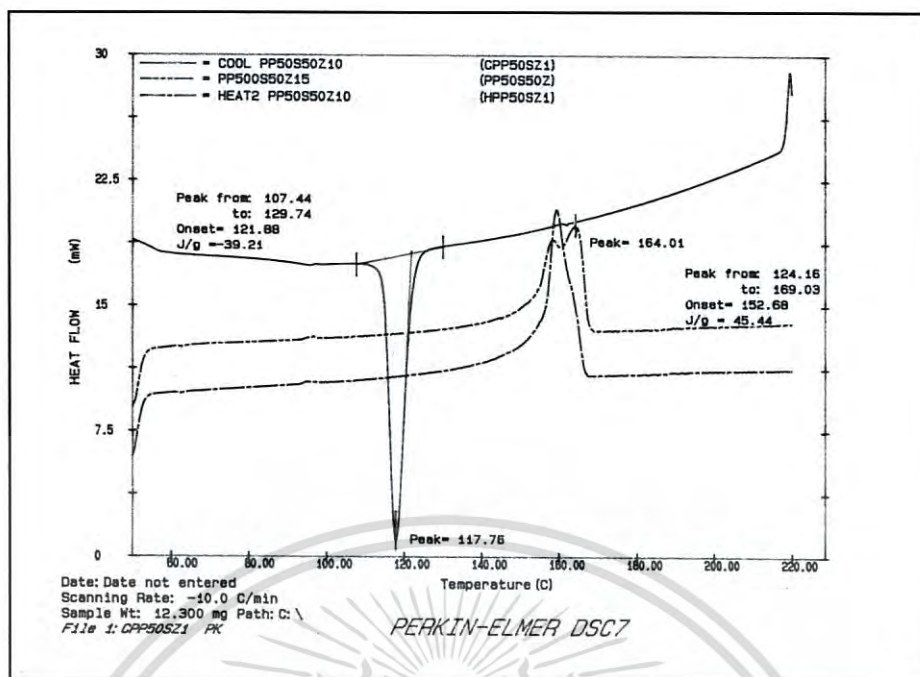


รูปที่ ข.7 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP50S50

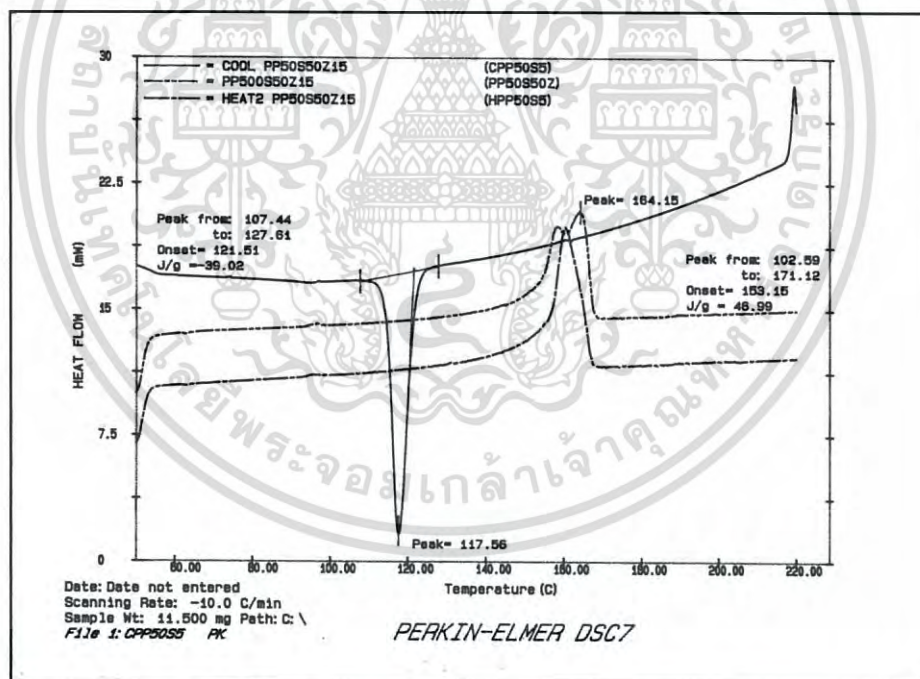


รูปที่ ข.8 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP50S50Z5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.9 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP50S50Z10

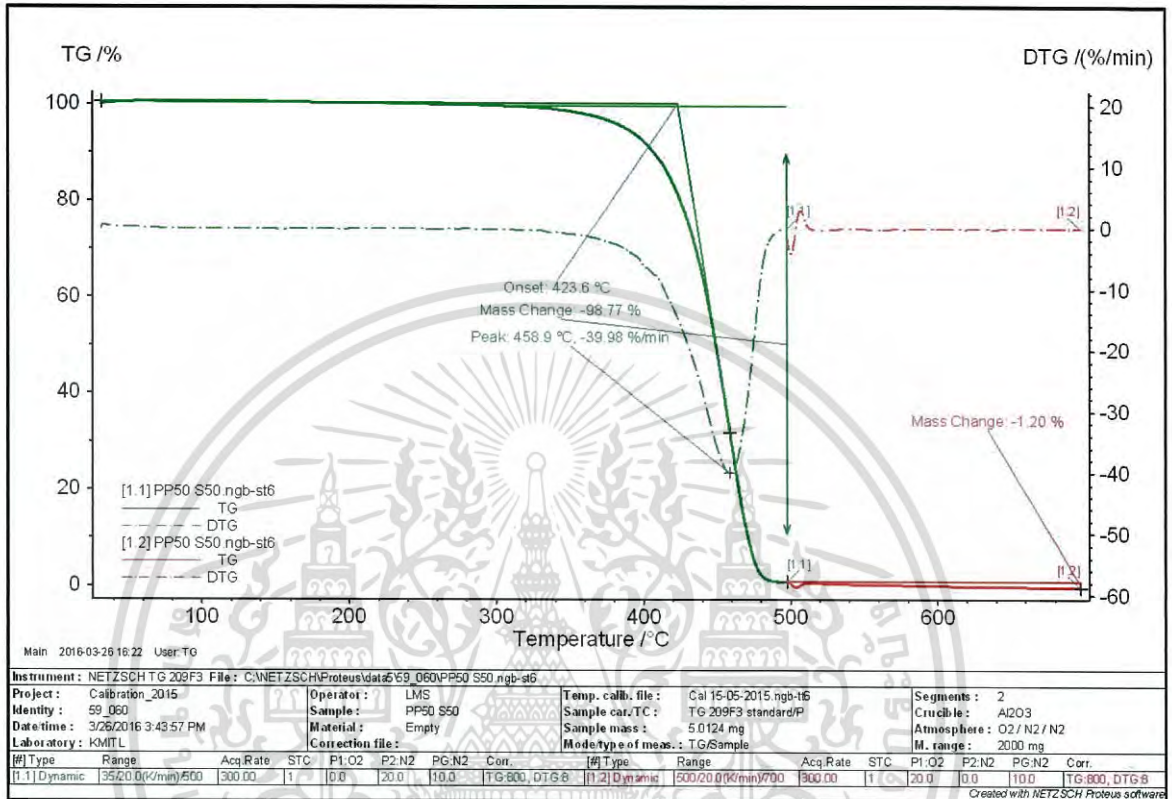


รูปที่ ข.10 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP50S50Z15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

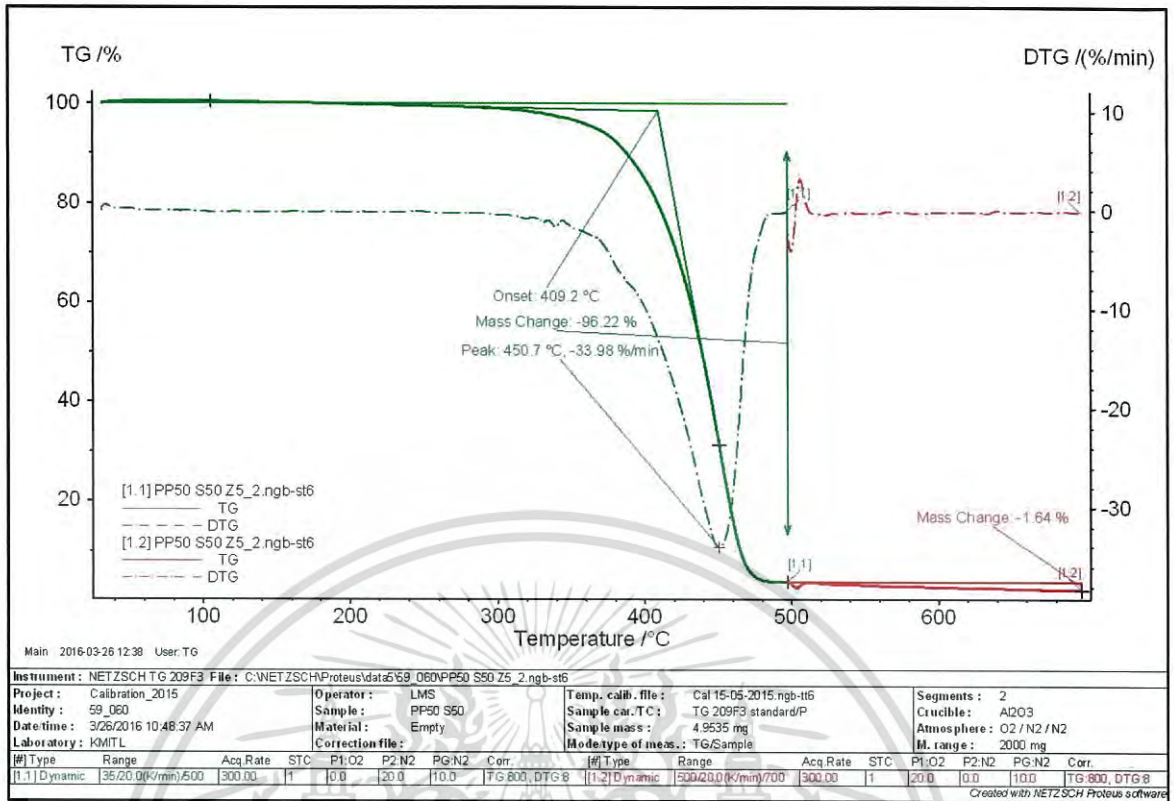
ภาคผนวก ค

TGA เทอร์โมแกรม

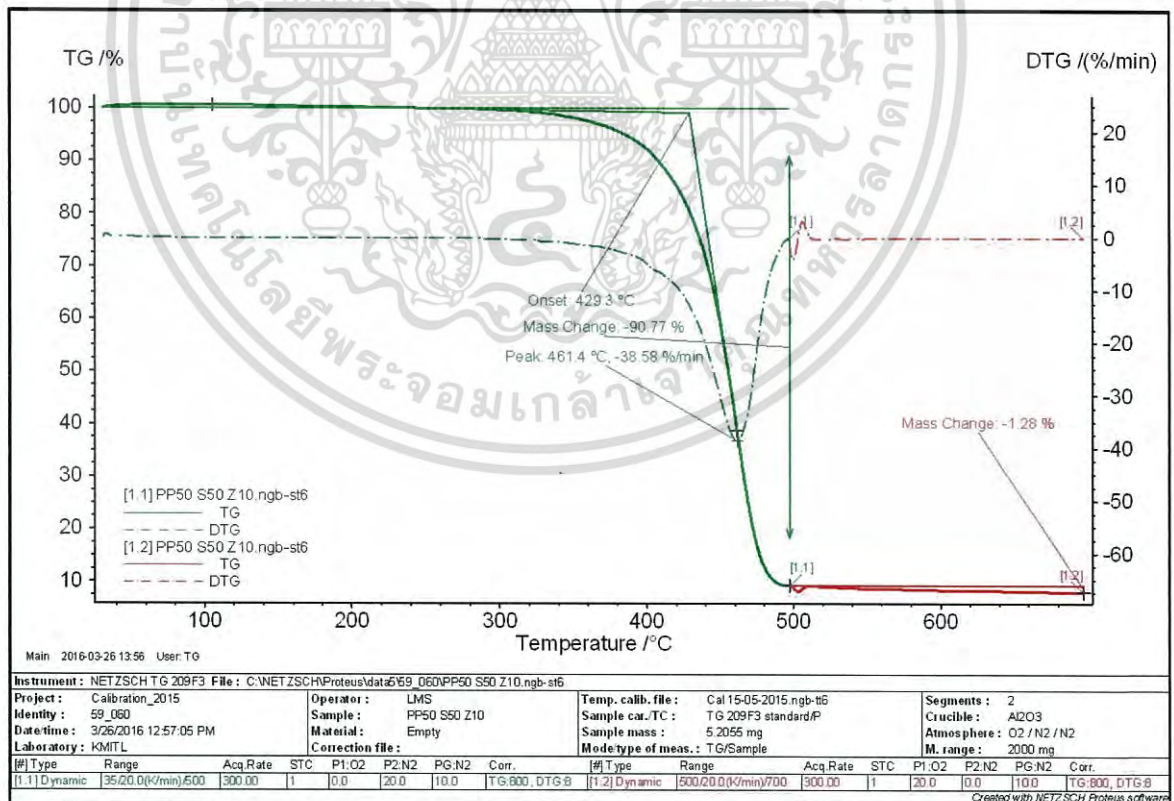


รูปที่ ค.1 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP50S50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

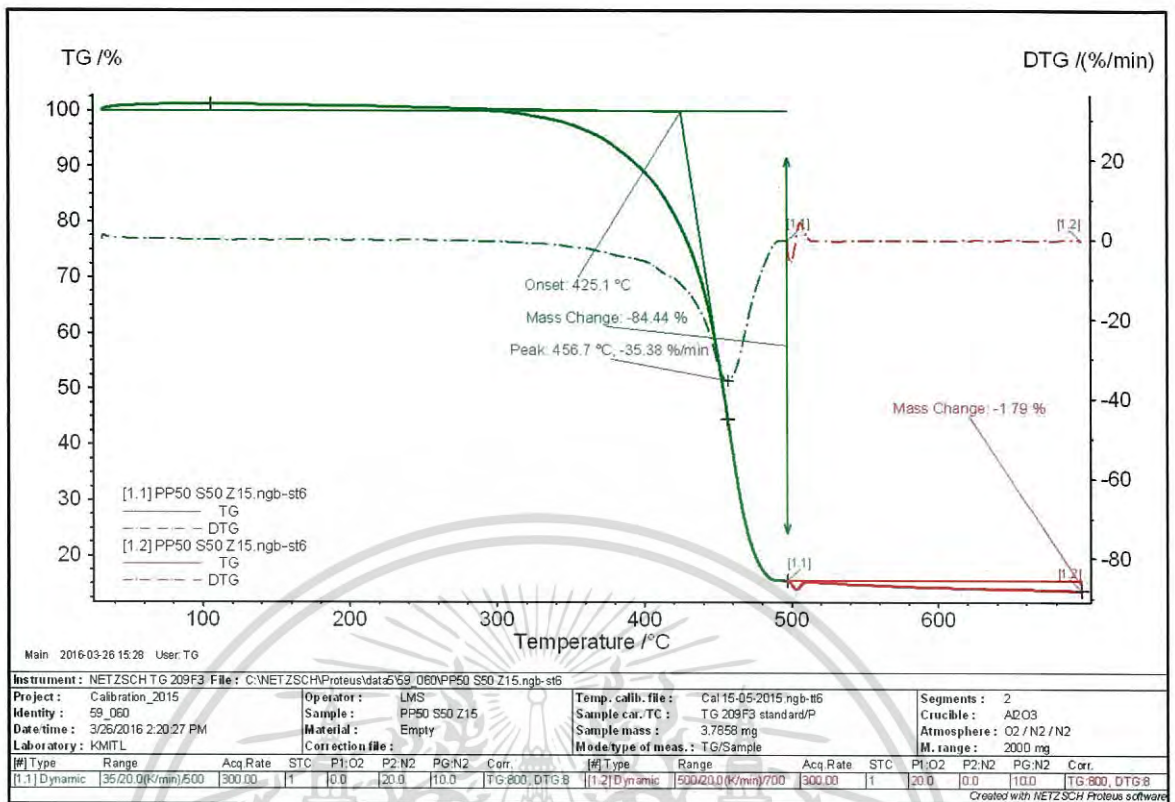


รูปที่ ค.2 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP50S50Z5



รูปที่ ค.3 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP50S50Z10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

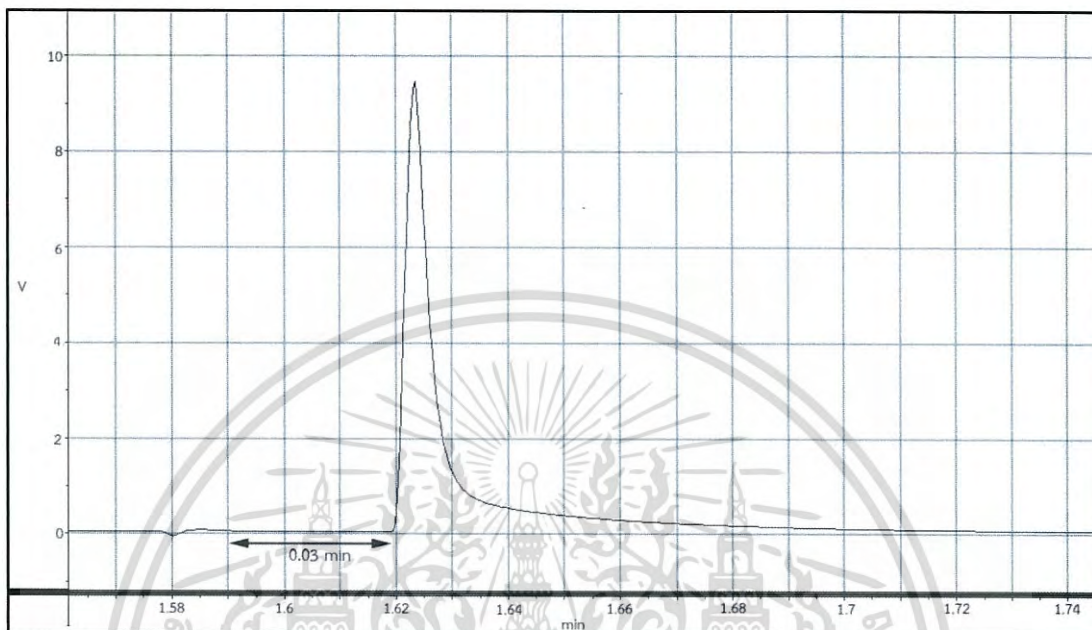


รูปที่ ค.4 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PP50S50Z15

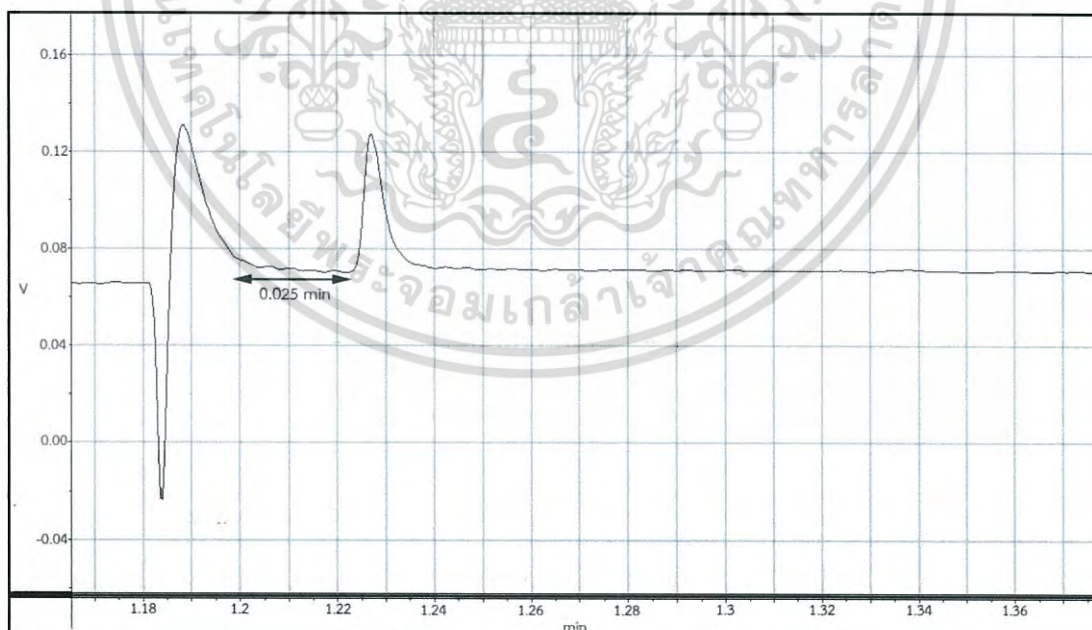
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

โครมาโทแกรม

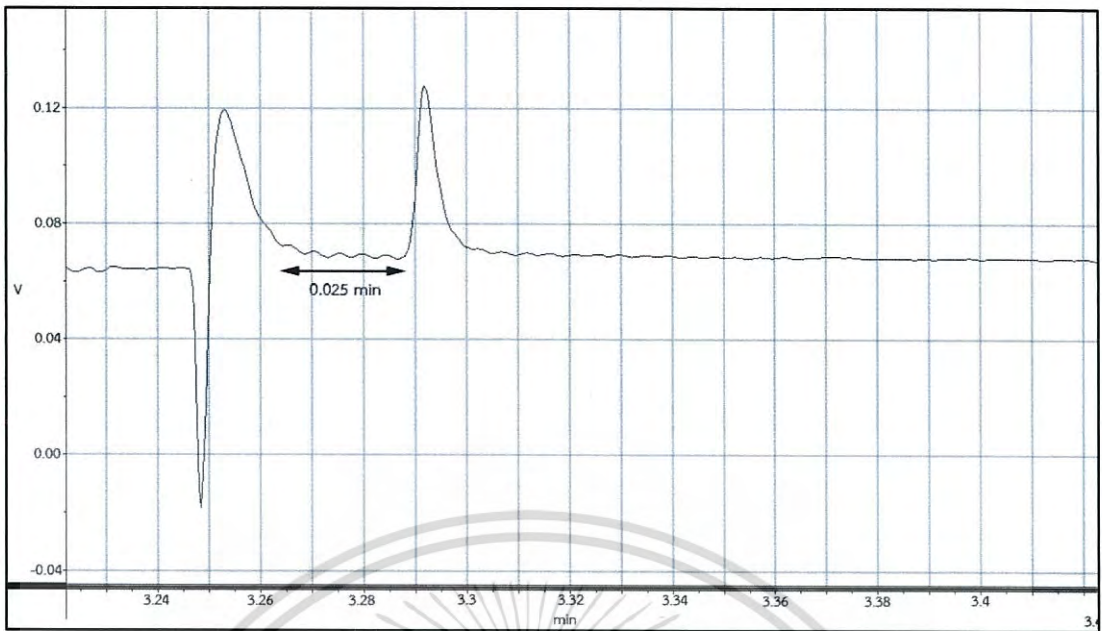


รูปที่ ง.1 โครมาโทแกรมของก๊าซเอทิลีนมาตรฐาน

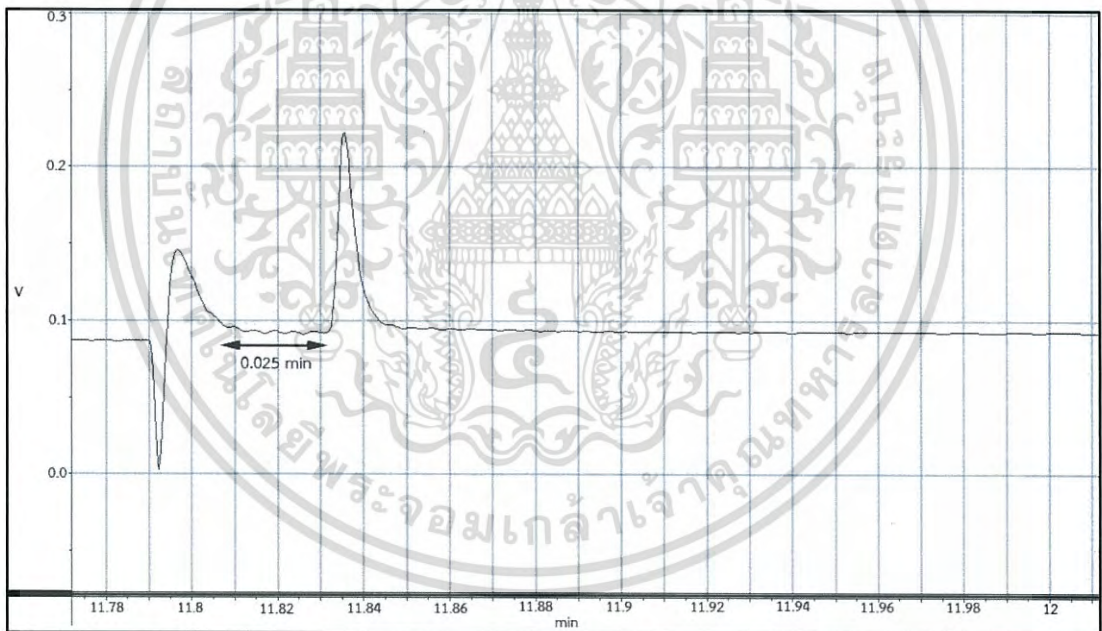


รูปที่ ง.2 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP100S0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

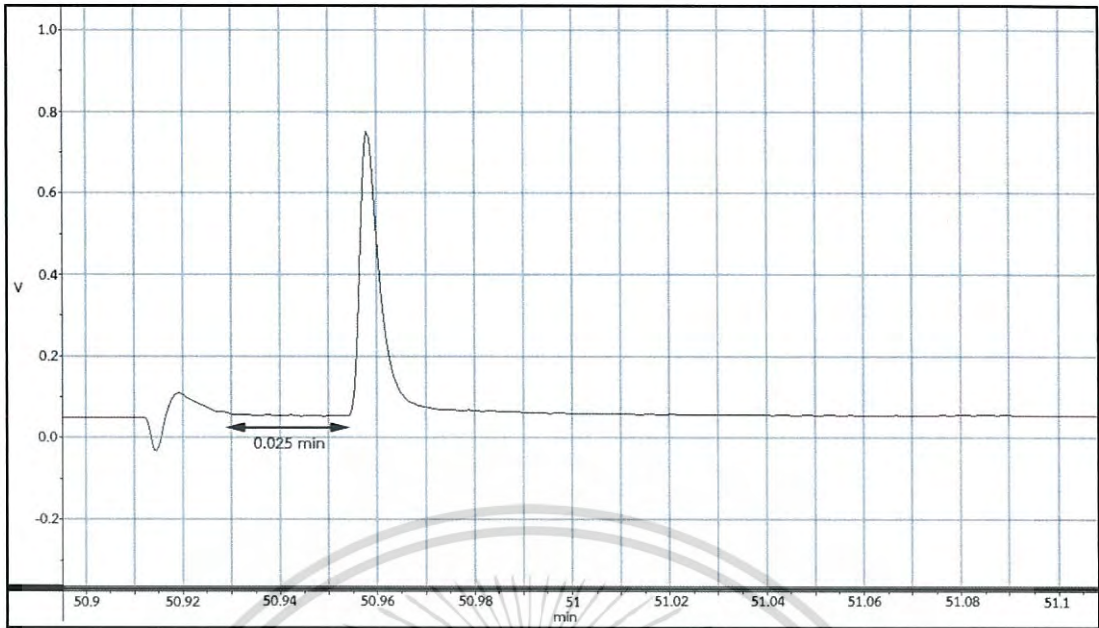


รูปที่ ง.3 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP95S5

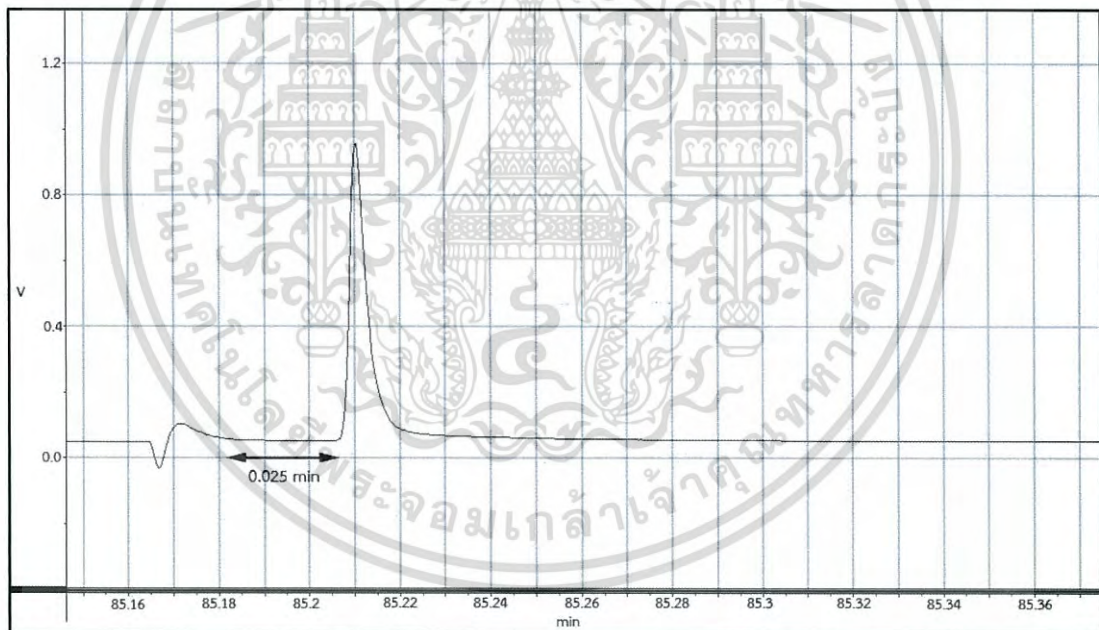


รูปที่ ง.4 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP90S10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

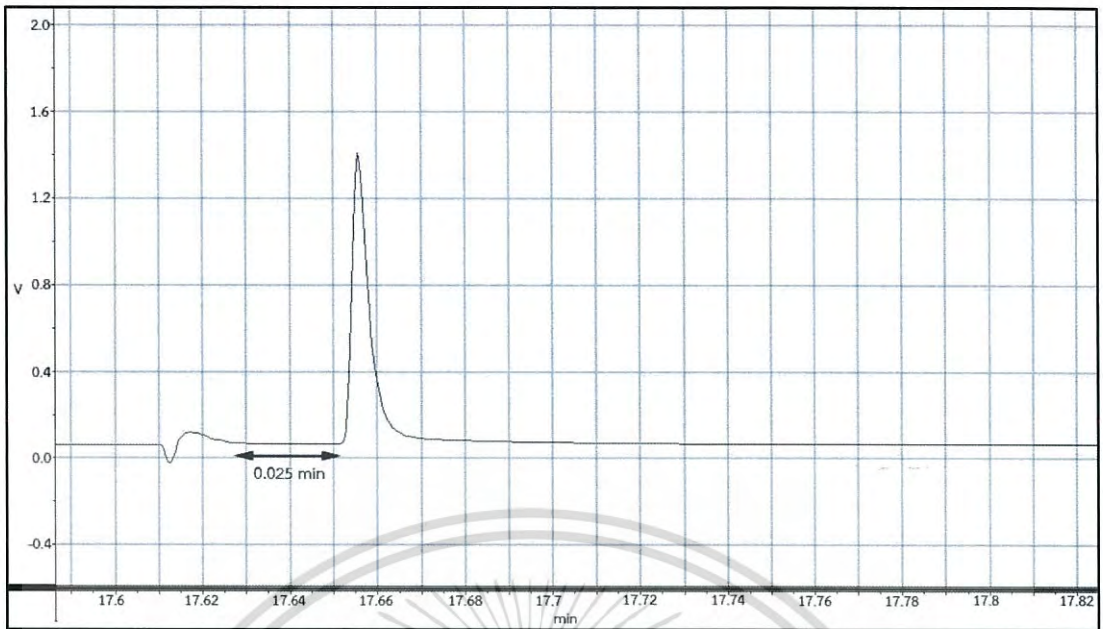


รูปที่ ง.5 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP80S20

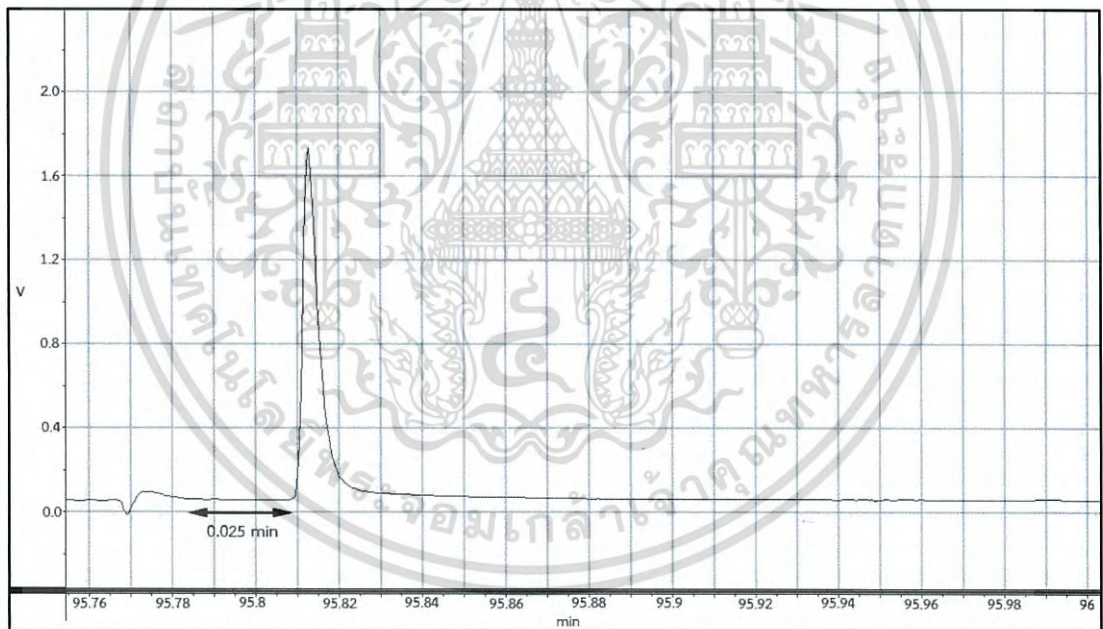


รูปที่ ง.6 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP70S30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

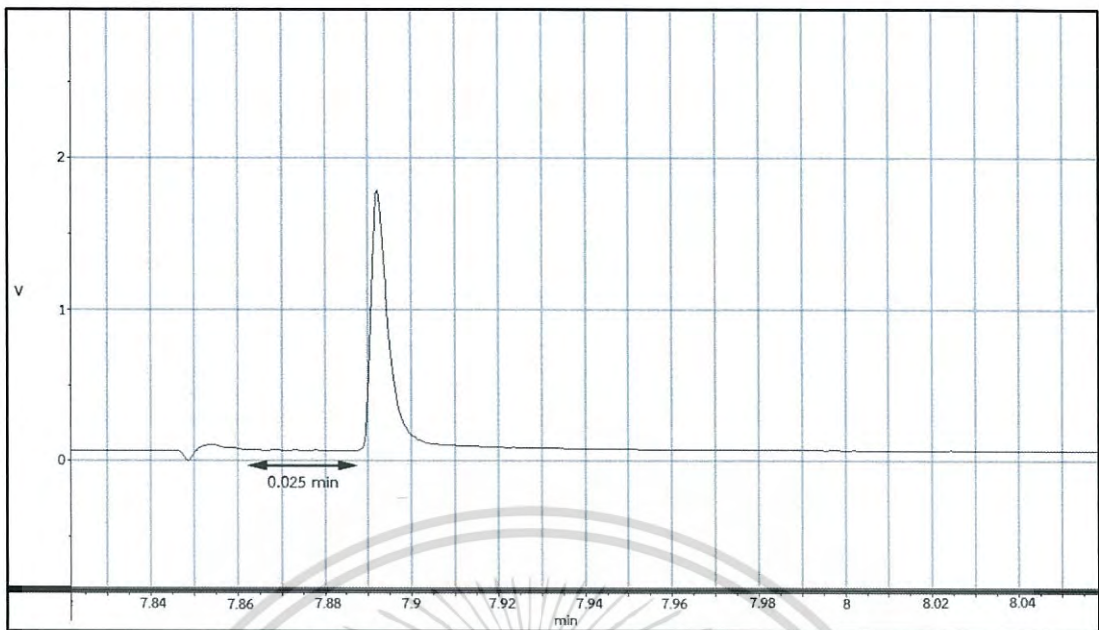


รูปที่ ง.7 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP60S40

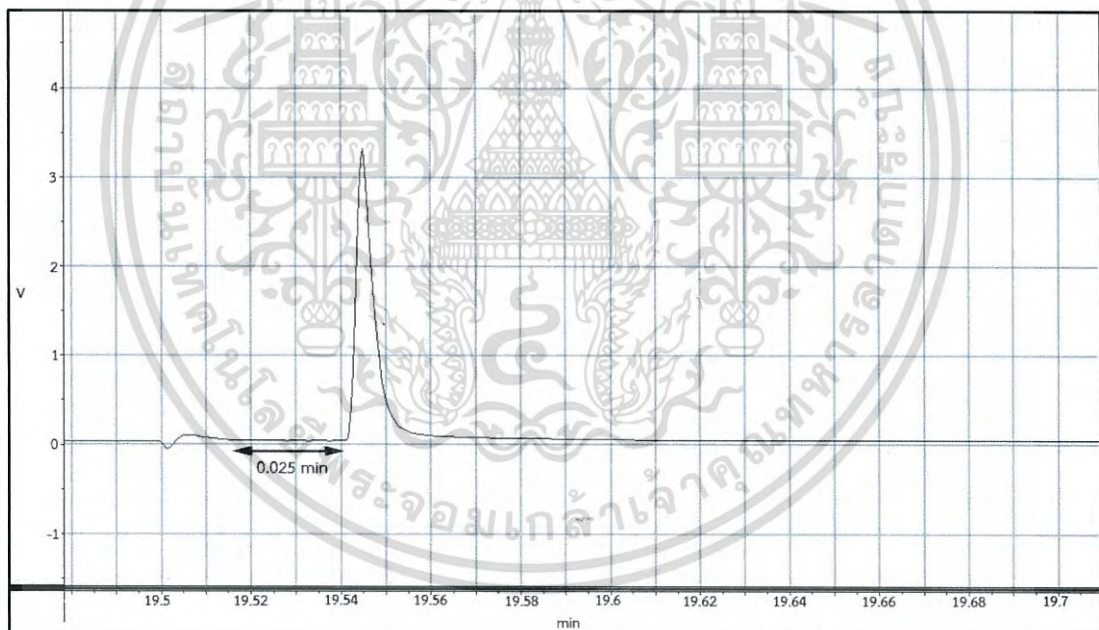


รูปที่ ง.8 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP50S50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

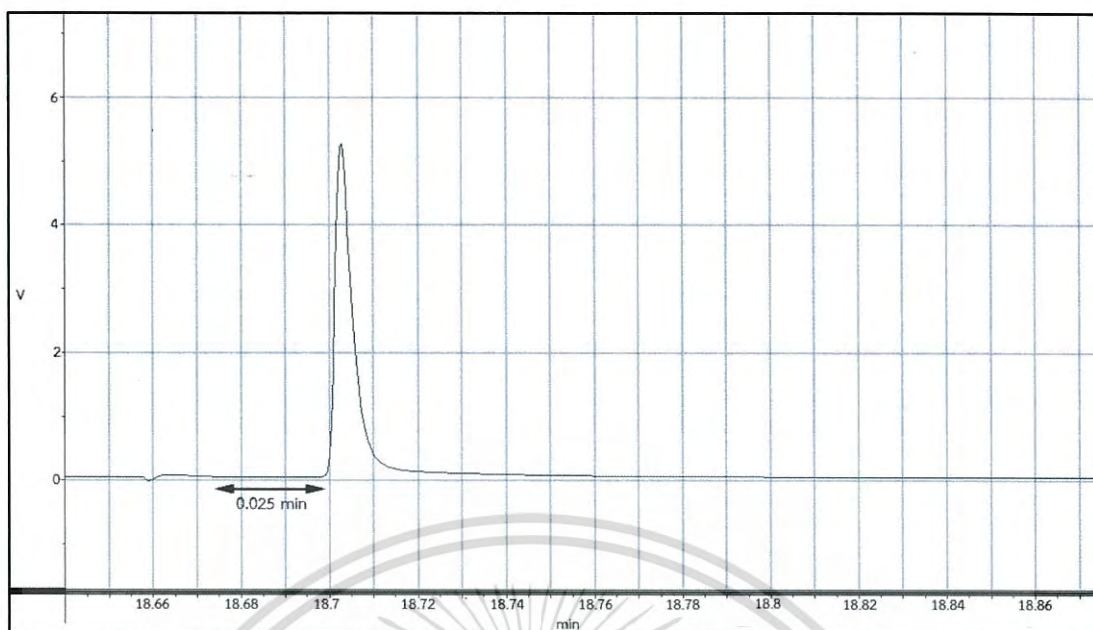


รูปที่ ง.9 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP50S50Z5



รูปที่ ง.10 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP50S50Z10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.11 โครมาโทแกรมของฟิล์ม PP50S50Z15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ จ.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มตัวอย่างในอัตราส่วนต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ความหนา (μm)	ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (MPa)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
PP100S0	52.3 \pm 3.8	33.1 \pm 1.8	2.9 \pm 0.5	1,618 \pm 98
PP95S5	52.5 \pm 2.5	29.1 \pm 1.6	3.3 \pm 0.4	1,425 \pm 62
PP90S10	53.3 \pm 4.9	28.8 \pm 1.2	3.9 \pm 0.4	1,337 \pm 30
PP80S20	54.5 \pm 4.3	19.3 \pm 1.1	5.7 \pm 1.4	920 \pm 71
PP70S30	53.7 \pm 3.0	18.1 \pm 1.6	12.0 \pm 4.0	861 \pm 91
PP60S40	53.3 \pm 2.4	16.6 \pm 1.5	65.3 \pm 16.9	648 \pm 98
PP50S50	52.8 \pm 4.2	10.8 \pm 1.1	170.1 \pm 31.7	390 \pm 74
PP50S50Z5	59.3 \pm 5.3	10.0 \pm 1.3	120.2 \pm 21.2	398 \pm 51
PP50S50Z10	63.9 \pm 2.7	11.1 \pm 0.4	102.7 \pm 8.6	402 \pm 46
PP50S50Z15	63.9 \pm 4.2	11.2 \pm 0.8	95.1 \pm 17.4	388 \pm 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

การซึมผ่านก๊าซเอทิลีน

ตารางที่ ฉ.1 อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ความหนา (μm)	ETR ($\text{cm}^3/\text{m}^2.\text{day}.\text{atm}$)	EP ($\text{cm}^3.\text{mm}/\text{m}^2.\text{day}.\text{atm}$)
PP100S0	45.6 \pm 1.6	60 \pm 0	3 \pm 0
PP95S5	46.1 \pm 0.8	60 \pm 0	3 \pm 0
PP90S10	45.8 \pm 1.2	192 \pm 0	9 \pm 0
PP80S20	47.5 \pm 1.2	1,083 \pm 120	51 \pm 6
PP70S30	45.8 \pm 0.4	1,624 \pm 120	74 \pm 6
PP60S40	46.1 \pm 0.8	2,106 \pm 120	97 \pm 6
PP50S50	47.2 \pm 1.6	2,467 \pm 60	116 \pm 3
PP50S50Z5	48.4 \pm 1.5	2,828 \pm 120	137 \pm 6
PP50S50Z10	47.2 \pm 0.8	4,993 \pm 180	236 \pm 9
PP50S50Z15	48.1 \pm 1.2	8,783 \pm 361	422 \pm 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้