



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5  
Ethylene permeation of LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5 blend film

นางสาวชลลดา ฤตวิรุฬห์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5  
Ethylene permeation of LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5 blend film

นางสาวชลลดา ฤตวิรุฬห์

สาขา.....  
เลขทะเบียน **149121**  
วันเดือนปี.....-4 ค.ศ. 2561

.b. 00266434  
.i.

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5

ชื่อโครงการ (ภาษาอังกฤษ) Ethylene permeation of LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5 blend film

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2560 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ นางสาวชลลดา ฤตวิรุฬห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) บล็อกโคพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (SEBS) และซีโอไลต์ ZSM-5 เพื่อเพิ่มการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนในงานฟิล์มบรรจุภัณฑ์ โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วน 100/0, 80/20, 75/25 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ปริมาณของซีโอไลต์ (ZSM-5) 5, 10 และ 15 wt% ในพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30 ด้วยเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 190 °C ความเร็วรอบ 60 rpm จากนั้นขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด แล้วนำฟิล์มที่ได้มาศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณ SEBS ทำให้การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเพิ่มขึ้น เนื่องจาก SEBS ซึ่งกระจายตัวอยู่ใน LLDPE มีแนวโน้มของขนาดวฏภาคใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังลดลง ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดครากไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมซีโอไลต์ (5-15 wt%) สามารถช่วยเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนได้ดีขึ้น ( $43,382-212,581 \text{ cm}^3/\text{m}^2.\text{day.atm}$ ) เนื่องจากซีโอไลต์มีรูพรุนและมีความชอบต่อเอทิลีนสูง เมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดครากไม่เปลี่ยนแปลง

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

**Research Title:** Ethylene permeation of LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5 blend film

**Researcher:** Ms. Chonlada Ritvirulh

**Faculty:** Science **Department:** Chemistry

### ABSTRACT

In this research, linear low density polyethylene (LLDPE), polystyrene-ethylene-butylene-styrene copolymer (SEBS) and zeolite ZSM-5 blend films were prepared to improve ethylene gas permeation in packaging films. Polymer blends were compounded with blend ratios of LLDPE/SEBS at 100/0, 80/20, 75/25 and 70/30 with zeolite (ZSM-5) loading at 5, 10 and 15 wt% in a blend ratio of 70/30 using an internal mixer at temperature 190 °C with a rotor speed of 60 rpm. Thereafter the films were shaped by compression molding. Mechanical properties, thermal properties, morphology and ethylene transmission rate (ETR) were studied. It was found that the film with higher SEBS contents showed higher ETR due to the larger size of SEBS dispersed phase. Tensile strength and stress at yield were not affected by SEBS content. However, elongation at break was increased while Young's modulus was decreased with an increment of SEBS. ETR was enhanced (43,382-212,581 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.day.atm) when zeolite was added (5-15 wt%). This is because zeolite is higher porous solid with higher ethylene affinity. Tensile strength and stress at yield were not affected by the zeolite content. However, elongation at break was declined whereas Young's modulus was increased.

**Keywords:** LLDPE, SEBS, zeolite ZSM-5, polymer blends, ethylene transmission rate

### กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 ในการทำงานวิจัยนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงการวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ให้การช่วยเหลือ และแนะนำการใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์

นางสาวชลลดา ฤตวิรุฬห์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>4</b>
2.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของผลผลิต.....	4
2.1.1 การหายใจ.....	4
2.1.2 การสุก.....	5
2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้.....	6
2.3 การยืดอายุการเก็บรักษาผักผลไม้สดด้วยบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ.....	7
2.3.1 หลักการดัดแปลงบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์.....	7
2.3.2 การสร้างบรรยากาศดัดแปลงภายในบรรจุภัณฑ์.....	8
2.4 เทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane technology).....	9
2.4.1 กระบวนการเมมเบรน.....	9
2.4.2 การจำแนกกระบวนการเมมเบรน.....	9
2.4.3 กระบวนการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน.....	10
2.4.4 วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน.....	12
2.5 พอลิเมอร์ผสม.....	12
2.6 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น.....	13
2.6.1 สมบัติโดยทั่วไปของ LLDPE.....	14
2.6.2 การนำไปใช้งานในปัจจุบัน.....	14
2.7 พอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.8 ซีโอไลต์ ZSM-5.....	15
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
<b>บทที่ 3 การทดลอง</b> .....	<b>19</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.3 วิธีการดำเนินวิจัย.....	21
3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม.....	21
3.3.2 การเตรียมฟิล์ม.....	22
3.3.3 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม.....	22
3.3.3.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	22
3.3.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM.....	23
3.3.3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	23
3.3.3.4 การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน.....	23
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b> .....	<b>26</b>
4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วน LLDPE/SEBS ต่อสมบัติของฟิล์ม.....	26
4.1.1 พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/SEBS.....	26
4.1.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม LLDPE/SEBS.....	27
4.1.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE/SEBS.....	30
4.1.4 การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE/SEBS.....	33
4.2 การศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์ต่อสมบัติของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite.....	34
4.2.1 พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5).....	34
4.2.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5).....	36
4.2.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5).....	40
4.2.4 การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5).....	42
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>44</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	44
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก.....	48
ภาคผนวก ก การคำนวณ.....	49
ภาคผนวก ข เทอร์โมแกรม DSC.....	51
ภาคผนวก ค เทอร์โมแกรม TGA.....	55
ภาคผนวก ง โครมาโทแกรม.....	57
ภาคผนวก จ สมบัติเชิงกล.....	59
ภาคผนวก ฉ การซึมผ่านก๊าซเอทิลีน.....	60
ภาคผนวก ช สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	61
ประวัตินักวิจัย.....	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจัดกลุ่มของผลิตภัณฑ์ตามอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีน.....	7
3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE.....	19
3.2 สมบัติบางประการของ SEBS Kraton® G1657.....	19
3.3 สูตรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS.....	21
3.4 สูตรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS ที่อัตราส่วน 70:30 ที่มีการเติม Zeolite (ZSM-5).....	21
4.1 $T_m$ , $T_c$ และความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/SEBS.....	26
4.2 $T_m$ , $T_c$ และความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5).....	34
4.3 ปริมาณซีโอไลต์ในฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5).....	36
ก.1 ความเป็นผลึก (% Crystallinity).....	49
จ.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มตัวอย่างในอัตราส่วนต่างๆ.....	59
ฉ.1 อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มตัวอย่าง.....	60
จ.1 สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 บรรยากาศดัดแปลงบรรจุภัณฑ์.....	8
2.2 หลักการของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน.....	9
2.3 กลไกการถ่ายโอนในเมมเบรน กลไกของก๊าซดิวไทฟิวซีน; (a) รูพรุนของเมมเบรนใหญ่กว่าโมเลกุลของก๊าซมาก (b) รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กกว่าระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ได้โดยไม่ชนกัน (c) รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กมาก (d) กลไกก๊าซเพอร์มิเอชัน.....	11
2.4 สูตรโครงสร้างของ SEBS.....	15
2.5 โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5.....	16
3.1 เซลล์เมมเบรน.....	24
3.2 แผนภาพทิศทางการซึมผ่านก๊าซในเซลล์เพอร์มิเอชัน.....	25
3.3 แผนภาพแบบทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน.....	25
4.1 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE ก่อนและหลังสกัดด้วย THF ที่กำลังขยาย 3500 เท่า....	28
4.2 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ ที่สกัด SEBS ด้วย TH F กำลังขยาย 3500 เท่า.....	29
4.3 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE และ SEBS.....	30
4.4 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE และ SEBS.....	30
4.5 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE และ SEBS.....	31
4.6 มอดุลัสของยังของฟิล์ม LLDPE และ SEBS.....	31
4.7 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ.....	32
4.8 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ.....	32
4.9 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ.....	33
4.10 มอดุลัสของยังของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ.....	33
4.11 อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ.....	34
4.12 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30.....	35
4.13 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z5.....	35
4.14 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LL70S30 และ LL70S30Z15 ก่อนสกัดด้วย THF ที่กำลังขยาย 3500 เท่า.....	36
4.15 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LL70S30Z15 ก่อนและหลังสกัดด้วย THF ที่กำลังขยาย 3500 เท่า.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.16 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ซีโพลีโอดีปริมาณต่างๆ หลังสกัดด้วย THF ที่กำลังขยาย 8000 เท่า.....	39
4.17 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโพลีโอดีต่างๆ.....	40
4.18 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโพลีโอดีต่างๆ.....	40
4.19 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโพลีโอดีต่างๆ.....	41
4.20 มอดุลัสของยังของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโพลีโอดีต่างๆ.....	41
4.21 แบบจำลองการกระจายตัวของซีโพลีโอดีที่ปริมาณต่างๆ ในฟิล์ม LLDPE/SEBS.....	42
4.22 อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโพลีโอดีต่างๆ.....	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยมีรายได้หลักจากการส่งออกสินค้าอุตสาหกรรมมากกว่าเกษตรกรรมแต่โดยพื้นฐานแล้วประชากรส่วนใหญ่ในประเทศยังคงทำเกษตรกรรมเป็นหลัก ทำให้ไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกสินค้าเกษตรรายหนึ่งของโลก แต่อุปสรรคอย่างหนึ่งของการส่งออก สินค้าเกษตรคือ การถนอมความสดของพืชผักผลไม้รวมถึงดอกไม้เอาไว้ให้นานที่สุดจนกว่าจะถึงมือผู้บริโภค [1] หากวางพืชผัก ผลไม้ รวมถึงดอกไม้สดทิ้งไว้ภายนอกที่อากาศร้อน ไม่นานนักผักผลไม้และดอกไม้เหล่านั้นจะเหี่ยวเฉาอย่างรวดเร็ว เพราะพืชผักผลไม้รวมถึง ดอกไม้สดที่ถูกเด็ดหรือตัดจากลำต้นยังคงมีชีวิตและมีการหายใจ เสมือนกับว่าพืชผลเหล่านั้นยังอยู่กับลำต้นเหมือนเดิม ซึ่งกระบวนการ หายใจของพืชเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผักผลไม้สูญเสียความสด นอกจากนี้เอทิลีนเป็นก๊าซที่พืชบางชนิดปล่อยออกมาทำหน้าที่คล้าย ฮอรโมนกระตุ้นหรือเร่งให้ผลไม้เกิดกระบวนการสุกงอม ดังนั้นในการขนส่งผลไม้ที่ใช้เวลานาน เช่น การขนส่งทางเรือสินค้า นอกจากผู้ ประกอบการเก็บผลไม้ดิบไว้ที่อุณหภูมิต่ำแล้ว ยังต้องหาวิธีการกำจัดก๊าซเอทิลีนที่ผลไม้ปล่อยออกมาด้วย จึงอาจมีการใส่สารบางชนิด ที่สามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนอยู่ในบรรจุภัณฑ์ หรือใช้สารนั้นเป็นองค์ประกอบในวัสดุบรรจุภัณฑ์ เพื่อดูดซับเอทิลีนที่ผลไม้ปล่อยออกมา ระหว่างการบรรจุหรือขนส่ง นอกจากนี้การชะลอการสุกและเน่าเสียของผลิตผล อาจใช้เป็นการบรรจุผลิตผลลงในบรรจุภัณฑ์ที่ดัดแปลงบรรยากาศ [2] ซึ่งในบรรจุภัณฑ์นี้ควบคุมให้มีปริมาณก๊าซออกซิเจนน้อย พืชจึงหายใจน้อยลง นอกจากนี้ฟิล์มควรมีการซึมผ่านก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ด้วย เพื่อลดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน และสามารถช่วยลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่างๆ ซึ่งการควบคุม บรรยากาศแบบนี้จึงช่วยชะลอการสุกงอมและลดการสร้างก๊าซเอทิลีน

ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์นิยมผลิตฟิล์มจากพอลิโอเลฟิน (Polyolefin) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถนำมาทำเป็นฟิล์มได้หลากหลายตามสมบัติและประเภทของการนำไปใช้งาน ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือฟิล์มพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) โดยฟิล์ม PE ให้สมบัติยืดหยุ่นได้ดี ทนความร้อนได้ สามารถใช้กับกระบวนการปิดผนึกด้วยความร้อน (Heat sealing) และยังสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี และไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับตัวทาละลายที่อุณหภูมิห้องจึงปลอดภัยเหมาะสำหรับการบรรจุหรือสัมผัสกับอาหาร [3] แต่มีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนในระดับต่ำทำให้ไม่เหมาะที่ ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เป็นวัสดุหลัก เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้มี สมบัติเชิงกลดีกว่า LDPE เช่น ทนแรงฉีกขาด แรงทิ่มทะลุได้ดีกว่า และมีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากราคาที่ถูกลงกว่า [4] โดยทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนโดยการเตรียมพอลิเมอร์ผสม LLDPE กับบล็อกโคพอลิเมอร์ของพอลิ-สไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (SEBS) ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประกอบด้วยเอทิลีน/บิวทิลีนที่มีความยืดหยุ่น มีลักษณะเป็นอสัณฐาน และไม่มีขั้วเหมือนก๊าซเอทิลีน ก๊าซเอทิลีนจึงสามารถซึมผ่าน SEBS ได้ดี โดยทำการผสมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดด้วยเครื่องผสมแบบปิด โดยใช้ LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ นอกจากนี้ทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของโดยการเติมซีโอไลต์ (ชนิดไม่มีขั้ว) ZSM-5 ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน จึงช่วยการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนได้ดีขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ผสมกับบล็อกโคพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (SEBS) ที่มีการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนได้ดี โดยใช้อัตราส่วนผสม LLDPE/SEBS ต่างๆ และเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ซึ่งส่งผลให้ฟิล์ม มีการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนดีขึ้น

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง
3. ดำเนินงานวิจัย

3.1 เตรียมพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วน 100/0, 80/20, 75/25 และ 70/30 โดยน้ำหนัก โดยใช้ เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)

3.2 เตรียมพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วน 70/30 โดยเติมซีโอไลต์ในปริมาณ 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)

3.3 ขึ้นรูปฟิล์มทุกสูตรด้วยกระบวนการกดอัด (Compression molding)

3.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

3.5 ศึกษาสัณฐานวิทยาการกระจายตัวของวัสดุ SEBS ใน LLDPE ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

3.6 ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์มในสูตรต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึงของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเข้าใจผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS และการเติมซีโอโลต์ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ และการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม และสามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้และพัฒนาฟิล์มบรรจุผลิตผลสดในเชิงพาณิชย์ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดให้ยาวนานขึ้นและปลอดภัยต่อผู้บริโภค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของผลิตผล [5-9]

เมื่อผลิตผลถูกเก็บเกี่ยวผลิตผลจะเกิดความเครียดขึ้นภายในเนื่องจากผลิตผลยังคงมีชีวิตอยู่ แต่ถูกตัดขาดจากแหล่งอาหารและน้ำ จึงต้องมีการนำอาหารและน้ำที่สะสมอยู่มาใช้ควบคู่ไปกับการสร้างสารประกอบชนิดต่างๆ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยว ได้แก่

1. การหายใจ (Respiration) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่พืชสะสมไว้ (Catabolic) ให้เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน พร้อมกับมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา กระบวนการนี้มีการใช้ออกซิเจนและมีการสร้างคาร์บอนไดออกไซด์ การหายใจทำให้เกิดการสูญเสียของอาหารที่สะสมในเนื้อเยื่อสูญเสียน้ำหนักและอาจทำให้รสชาติเปลี่ยนไป เป็นผลให้สูญเสียคุณค่าทางอาหาร ตลอดจนพลังงานที่ผู้บริโภคควรจะได้รับ

2. การคายน้ำ (Transpiration) ทำให้น้ำหนักของผลิตผลลดลงและทำให้พื้นผิวของผลเหี่ยวแห้ง เป็นผลให้คุณภาพของผลิตผลลดลงทั้งในด้านน้ำหนักของผลดั้งเดิมที่ควรจะได้รับ และมูลค่าต่อหน่วยที่ลดลง

3. การเปลี่ยนแปลงในด้านสีของผล (Color change)

4. การสลายตัวขององค์ประกอบในผนังเซลล์ของผลิตผล ทำให้ผลนิ่มลง (Softening)

5. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเคมีที่สะสม เช่น แป้ง กรดอินทรีย์และไขมัน เป็นต้น

##### 2.1.1 การหายใจ

ผักและผลไม้สามารถเกิดการหายใจแบบใช้ออกซิเจนและการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งการหายใจแบบใช้ออกซิเจนเกิดการสลายตัวของอาหารอย่างสมบูรณ์ ทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน ส่วนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีการสลายตัวของอาหารไม่สมบูรณ์ ทำให้ได้เอทานอลและน้ำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการหายใจ [8]

*สภาพแวดล้อม* มีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการหายใจของผลิตผลหลังเก็บเกี่ยว ซึ่งอัตราการหายใจมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับอายุของผลิตผล ถ้าผลิตผลมีการหายใจที่เหมาะสมจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้

*อุณหภูมิ* มีอิทธิพลอย่างมากต่ออัตราเมตาบอลิซึมของผลิตผล เมื่ออุณหภูมิของผลิตผลสูงขึ้น อัตราของการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นตามไปด้วย แต่การเพิ่มของอุณหภูมิต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสม ถ้าอุณหภูมิสูงมากเกินไปจะลดการเกิดปฏิกิริยาทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียสภาพของเอนไซม์ (Enzyme denature) ซึ่งระดับของอุณหภูมิสูงสุดต่ำสุดและเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาจะแตกต่างกันไปตามชนิดของพืชและ

เนื้อเยื่อ ผลไม้บางอย่างอาจเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำมากได้ ในขณะที่ผลไม้บางอย่างจะได้รับความเสียหายจากความเย็น (Chilling injury)

*องค์ประกอบของสภาพบรรยากาศ* มีอิทธิพลต่อผลไม้หลังเก็บเกี่ยวทั้งอัตราการหายใจและอัตราการเกิดกิจกรรมทางเมตาบอลิซึม ออกซิเจน เอทิลีน และคาร์บอนไดออกไซด์มีอิทธิพลอย่างมากต่อการหายใจ ส่วนก๊าซบางชนิด เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โอโซน และพรอพิลีน ซึ่งเป็นมลภาวะ หากมีความเข้มข้นมากเพียงพอจะมีอิทธิพลต่อการหายใจด้วย

*ความชื้นของผล* ปริมาณความชื้นภายในผลมีอิทธิพลต่ออัตราการหายใจของผลเป็นอย่างมาก อัตราการหายใจและอัตราการเกิดกิจกรรมทางเมตาบอลิซึมลดลงเมื่อความชื้นภายในผลลดลง โดยทั่วไปแล้วผลไม้ที่มีปริมาณความชื้นต่ำมักมีอัตราการหายใจต่ำกว่าผลไม้ที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่า ปริมาณความชื้นภายในผลผลิตผลขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์พืช องค์ประกอบ และชนิดของเนื้อเยื่อของผลผลิตผลนั้น ตลอดจนสภาพแวดล้อมที่ได้รับทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว

*บาดแผล* เซลล์ที่ได้รับบาดเจ็บสามารถกระตุ้นให้เนื้อเยื่อมีอัตราการหายใจสูงขึ้นได้

*ระยะของการเจริญและพัฒนา* มีอิทธิพลอย่างมากต่ออัตราการหายใจและอัตราการเกิดกิจกรรมทางเมตาบอลิซึมภายหลังเก็บเกี่ยว โดยทั่วไปเซลล์ที่อายุอ่อนกว่าและกำลังเจริญเติบโตจะมีอัตราการหายใจสูงกว่าเซลล์ที่แก่กว่า

### 2.1.2 การสุก

ผลไม้รวมทั้งผลของพืชผัก เช่น มะเขือเทศ พริก และอื่นๆ เมื่อผ่านกระบวนการสุก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของการเจริญเติบโต ซึ่งจะนำไปสู่ความแก่และความตายของเนื้อเยื่อในที่สุด [9]

อัตราและธรรมชาติของกระบวนการสุกมีความแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของผลไม้ สายพันธุ์ของผลไม้ และชนิดของดินที่ใช้ปลูกด้วยเช่นกัน สภาพแวดล้อมหลังการเก็บเกี่ยวมีผลต่อความสุกของผลไม้ด้วย ได้มีการจำแนกผลไม้โดยยึดถือกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปสู่ความแก่และความสุก เป็น 2 แบบ คือ Climacteric และ Non-climacteric [8]

1. Climacteric fruit คือผลไม้ที่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากที่ถูกแก่จัดจะมีอัตราการหายใจต่ำลงมาก เมื่อเริ่มเข้าสู่กระบวนการสุกอัตราการหายใจจะสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งการเพิ่มอัตราการหายใจ ทำให้เกิดการสร้างก๊าซเอทิลีน (Ethylene) เพิ่มขึ้น ก๊าซเอทิลีนที่ถูกสร้างจะไปกระตุ้นให้ผลไม้สุกอย่างรวดเร็ว เมื่อสุกเต็มที่แล้วอัตราการหายใจจะค่อยๆ ลดต่ำลงจนเข้าสู่ระยะเสื่อมสลาย ดังนั้นผลไม้พวกนี้สามารถเก็บแล้วนำมาบ่มให้สุกได้ภายหลังการเก็บเกี่ยว เช่น มะเขือเทศ มังคุด ละคร กล้วย ทูเรียน เป็นต้น

2. Non-climacteric fruit คือผลไม้ที่ไม่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากที่ถูกแก่จัดจะมีอัตราการหายใจต่ำลงในระยะเก็บเกี่ยว หลังเก็บเกี่ยวแล้วผลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก คืออัตราการหายใจค่อนข้างคงที่ มีการสร้างก๊าซเอทิลีนในอัตราหรือปริมาณต่ำ ทำให้การสุกเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนถึงระยะเสื่อมสลาย รสชาติของผลไม้จึงคงที่ อายุเก็บรักษาค่อนข้างยาว ฉะนั้นถ้าเก็บเกี่ยวผลที่ยังไม่แก่

จัดเต็มที่ทำให้ผลไม้ที่ได้จะมีรสชาติเหมือนเดิม จึงจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลแก่จัด เช่น ส้ม สับปะรด มะนาว เงาะ ลิ้นจี่ ลำไย แดงกว่า เป็นต้น

## 2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้

คุณภาพและอายุการเก็บรักษาของผลิตผลสดหลังการเก็บเกี่ยว นอกจากขึ้นอยู่กับชนิด สายพันธุ์ คุณภาพขณะเก็บเกี่ยว ความสะอาด วิธีการขนส่ง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ อากาศที่ใช้ในการขนส่ง และเก็บรักษาแล้ว ยังขึ้นกับสภาพอากาศรอบๆ หรืออีกนัยหนึ่งคือ ความเข้มข้นของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ล้อมรอบผักและผลไม้ นั้น ปัจจัยหนึ่งซึ่งช่วยให้สภาวะที่ล้อมรอบผลิตภัณฑ์เป็นไปตามที่ต้องการ ตลอดเวลาที่เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ คือ ภาชนะบรรจุ สมบัติที่สำคัญของวัสดุบรรจุหรือภาชนะบรรจุที่จะต้องนำมาพิจารณามีดังนี้ คือ [1]

### 1. ก๊าซออกซิเจน

โดยปกติก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซที่มีความจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิดไม่ว่าแม้แต่พืช แต่สำหรับผลิตผลที่ถูกเก็บเกี่ยวหรือถูกตัดจากต้นแล้ว ระดับปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ปรากฏในบรรยากาศทั่วไป (~21%) ถือว่าเป็นระดับออกซิเจนที่มากเกินไปจนทำให้เกิดผลทางลบต่อผลิตผลได้ เนื่องจากก๊าซออกซิเจนเอื้อต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และเชื้อราต่างๆ ที่ทำลายผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยว และโดยธรรมชาติหลังการเก็บเกี่ยว ผลิตผลสดยังคงมีการหายใจซึ่งต้องใช้ก๊าซออกซิเจน สารอาหาร และน้ำที่อยู่ในเซลล์เป็นวัตถุดิบ ดังนั้นหากบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์มีระดับก๊าซออกซิเจนมาก ผลิตผลจึงมีการหายใจตามอัตราปกติเหมือนก่อนเก็บเกี่ยวซึ่งส่งผลให้พืชผลเหี่ยวง่าย

### 2. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

โดยทั่วไปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเพียงผลิตผลที่เกิดจากกระบวนการหายใจของสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ แต่สำหรับการถนอมรักษาความสดของผักผลไม้ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ที่มีระดับความเข้มข้นเหมาะสมจะมีบทบาทสามารถช่วยถนอมความสดของผลิตผล เนื่องจากก๊าซนี้ทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการแพร่พันธุ์และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่างๆ ได้

### 3. ก๊าซเอทิลีน

เอทิลีน (Ethylene) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี มีกลิ่นหอมเล็กน้อย ติดไฟง่าย จัดเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีผลต่อกระบวนการทางสรีระวิทยาของพืช เป็นสารที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของพืชชั้นสูง และจากจุลินทรีย์บางชนิด เอทิลีนถือว่าเป็นฮอร์โมนธรรมชาติที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีระวิทยาหลายอย่างในผลิตผล เช่น ทำให้เกิดการแก่ (Aging) การสุก (Ripening) และ/หรือการแยกตัว (Abscission) ของอวัยวะของพืช และมีการสร้างสารให้กลิ่นและรส แม้ว่าจะมีปริมาณน้อยเพียง 1 ส่วนในล้านส่วน (0.1 ppm) ซึ่งสามารถจัดกลุ่มของผลิตผลตามอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีนได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจัดกลุ่มของผลิตผลตามอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีน [8]

กลุ่ม	ช่วงการผลิตที่ 20 °C ( $\mu$ C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> kg-hr <sup>-1</sup> )	ชนิดของผลิตผล
ต่ำมาก	ต่ำกว่า 0.1	ส้ม องุ่น พุทรา ทับทิม เซอร์รี่ สตรอเบอร์รี่
ต่ำ	0.1-1.0	แตงกวา มะเขือ กระเจี๊ยบ พริก สับปะรด ฟักทอง แตงโม โอลีฟ ราสเบอร์รี่ บลูเบอร์รี่
ปานกลาง	1.0-10.0	กล้วย มะเดื่อ ฝรั่ง มะม่วง มะเขือเทศ
สูง	10.0-100.0	มะละกอ สาลี่ ท้อ แอปเปิ้ล อะโวคาโด แคนตาลูป พลัม กีวี (ผลสุก) เนคทารีน
สูงมาก	มากกว่า 100.0	น้อยหน่า ละมุด พาสชันฟรุต

บทบาทของเอทิลีนมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อความเสียหายทางกายภาพของผักและผลไม้ เอทิลีนถูกสร้างขึ้นในเนื้อเยื่อพืชทุกชนิดโดยธรรมชาติ ดังนั้นการทำความเข้าใจทางกายภาพต่อผลไม้จึงเป็นการเร่งกระบวนการสุกไปด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้นการลดการสะสมของก๊าซเอทิลีนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการชะลอการสุกของผลไม้

### 2.3 การยืดอายุการเก็บรักษาผักผลไม้สดด้วยบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ [2]

การยืดอายุการเก็บรักษาผักผลไม้สดด้วยภาชนะบรรจุดัดแปลงบรรยากาศ (Modified Atmosphere Packaging, MAP) หมายถึง การเก็บรักษาผลิตผลไว้ในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่ภายในมีสัดส่วนขององค์ประกอบของก๊าซที่แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติ (ไนโตรเจน 78% ออกซิเจน 21% คาร์บอนไดออกไซด์ 0.03% และก๊าซเฉื่อยเล็กน้อย) การใช้ MAP ในการยืดอายุการเก็บรักษาผักผลไม้ให้ได้ผลดีและสามารถคงคุณภาพของผักผลไม้ให้ได้นั้น ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของก๊าซภายในภาชนะบรรจุเป็นหลัก

#### 2.3.1 หลักการดัดแปลงบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์

หลักการสำคัญของการดัดแปลงบรรยากาศที่ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผักผลไม้คือ การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของก๊าซในบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุผักผลไม้จนสามารถยับยั้งหรือชะลอกระบวนการหายใจตามธรรมชาติของผักผลไม้ (ภาพที่ 2.2) ซึ่งยังคงสามารถดำเนินต่อไปแม้จะถูกเก็บเกี่ยวแล้ว และหากผักผลไม้ผ่านขั้นตอนการปกปิด ตัดแต่ง หรือหั่นชิ้นด้วยแล้ว กระบวนการหายใจจะยังมีอัตราสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่าการยับยั้งการหายใจของผักผลไม้สดตัดแต่งพร้อมบริโภคให้ได้ผลดี จำเป็นที่ต้องลดปริมาณออกซิเจนซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องใช้ในกระบวนการหายใจและเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุ รวมทั้งเก็บผักผลไม้ในอุณหภูมิที่ต่ำตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา นอกจากนี้จะสามารถช่วยชะลออัตราการหายใจแล้วยังช่วยป้องกันความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเนื้อเยื่อ กลิ่นเหม็นจากกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนของผักผลไม้ และการเจริญของแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลกติกด้วย



ภาพที่ 2.1 บรรยากาศดัดแปลงบรรจุภัณฑ์ [2]

ที่มา: K. Venkatachalam and M. Meenune, 2012

### 2.3.2 การสร้างบรรยากาศดัดแปลงภายในบรรจุภัณฑ์

วิธีการสร้างบรรยากาศดัดแปลงภายในภาชนะบรรจุให้มีสัดส่วนตามที่ต้องการนั้นมี 2 วิธี คือ

1. การแทนที่อากาศภายในภาชนะบรรจุด้วยก๊าซผสม ที่มีสัดส่วนขององค์ประกอบของก๊าซแต่ละชนิดตามต้องการเรียกว่า Active modification
2. การอาศัยสมบัติของฟิล์มพลาสติกที่ใช้เป็นภาชนะบรรจุเป็นตัวกำหนดสัดส่วนของก๊าซชนิดต่างๆ ที่อยู่ภายในภาชนะบรรจุ ตามปกติแล้วฟิล์มพลาสติกที่ใช้จะมีความสามารถในการยอมให้ก๊าซชนิดต่างๆ แพร่ผ่านได้ในอัตราที่แตกต่างกัน ดังนั้นควรเลือกฟิล์มพลาสติกที่สามารถทำให้ระดับออกซิเจนภายในภาชนะบรรจุต่ำลงและเพิ่มระดับคาร์บอนไดออกไซด์ให้สูงขึ้น วิธีการดังกล่าวนี้เรียกว่า Passive modification

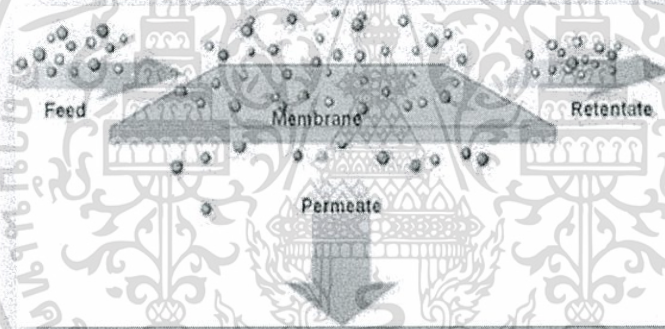
จากการศึกษาพบว่า การลดออกซิเจนหรือเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์อย่างใดอย่างหนึ่งให้ผลที่ไม่ดีเท่ากับการใช้ทั้งสองปัจจัยร่วมกัน การลดออกซิเจนสามารถช่วยลดอัตราการหายใจได้โดยตรง ในขณะที่การเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์จะให้ผลในการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้พบว่าบรรยากาศดัดแปลงที่มีปริมาณออกซิเจนในภาชนะบรรจุอยู่ในระดับต่ำจะสามารถช่วยลดอัตราการหายใจของผักผลไม้ และลดอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีน ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดได้นานขึ้น แต่การลดระดับออกซิเจนในบรรยากาศมากจนเกินไป (<1%) ทำให้ผักผลไม้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนแทน (Anaerobic respiration) ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อและทำให้เกิดกลิ่นเหม็น ดังนั้นระดับออกซิเจนที่ใช้ในการดัดแปลงบรรยากาศสำหรับเก็บรักษาผักผลไม้ควรอยู่ในช่วง 1-5% สำหรับสัดส่วนของบรรยากาศใน MAP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 เทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane technology)

### 2.4.1 กระบวนการเมมเบรน

กระบวนการเมมเบรนเป็นกระบวนการที่อาศัยเยื่อเมมเบรนในการแยกสารหรือเพิ่มความเข้มข้นหรือทำสารให้บริสุทธิ์ขึ้นสำหรับสารละลายหรือก๊าซผสม ซึ่งมีความแตกต่างจากกระบวนการแยกทั่วไป เช่น กระบวนการดูดซับ (Absorption) กระบวนการไล่ออก (Stripping) กระบวนการการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid-liquid extraction) และการกลั่น (Distillation) หลักการสำคัญของกระบวนการเมมเบรน คือ อาศัยแรงขับเคลื่อนทำให้สารละลายไหลผ่านเมมเบรนแล้วเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้นหรือผลต่างของความดัน ลักษณะสำคัญของเมมเบรน คือ มีคุณสมบัติในการเลือกสารหนึ่งมากกว่าสารอื่น การเลือกผ่านสารเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีหรือทางกายภาพ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากกรณี Affinity ของเมมเบรนต่อสารนั้นๆ หรือจากขนาดรูพรุน ซึ่งสารละลายที่ผ่านเมมเบรนได้เรียกว่า เพอร์มิเอต (Permeate) ส่วนสารที่ไม่ผ่านเมมเบรน เรียกว่า รีเทนเตตหรือคอนเซนเทรต (Retentate หรือ Concentrate) หลักการกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนแสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 หลักการของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน [10]

ที่มา: มหาลัยสงขลานครินทร์, 2556

### 2.4.2 การจำแนกกระบวนการเมมเบรน

การจำแนกกระบวนการแยกตามขนาดโมเลกุลและแยกเมมเบรนตามหลักการของแรงดันสามารถแยกได้ดังนี้

1. กระบวนการไดอะไลซิส (Dialysis process, D) ให้ผลต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลายระหว่างสองด้านของเมมเบรน เป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการถ่ายเทผ่านเมมเบรน ตัวถูกละลายขนาดเล็กจะถ่ายเทโดยการแพร่ผ่านเมมเบรนจากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นต่ำ
2. กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis, ED) เป็นกระบวนการแยกองค์ประกอบที่มีประจุออกจากสารอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนมาต่ออนุกรมกันและอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) มีความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเป็นแรงขับเคลื่อน ร่วมกับการเลือกผ่านไอออนของเมมเบรน โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไอออนบวก ส่วน ไอออนลบจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไอออนลบ เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสูงและ สารละลายเจือจาง

3. กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis, RO) หรืออาจเรียกว่า Hyperfiltration เช่น กระบวนการแยกสลายโดยใช้ผลต่างระหว่างแผ่นความดันของเมมเบรน เช่น แรงขับ ดับซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1-10 มิลลิปาสคาล หรือ 10-100 บรรยากาศ มีความสามารถในการกักเก็บโมเลกุล ขนาดเล็ก (น้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 1000 หรือมีขนาด 0.1-1 นาโนเมตร) การผ่านเมมเบรนของสารเกิด จากความสามารถในการละลายและการแพร่ (Solution diffusion) ในเมมเบรน

4. กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) เป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรนที่มีรู พุนขนาดเล็ก (Microporous) สำหรับแยกสารโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เรียกว่า คอลลอยด์ (Colloid) ออกจาก น้ำและสารโมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่งเมมเบรนมีรูพุนประมาณ 2-20 นาโนเมตร แรงขับเคลื่อนที่ใช้ในการแยกต่ำ กว่าออสโมซิสผันกลับ คือ 100-800 กิโลปาสคาล

5. กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) เป็นกระบวนการที่ใช้ เมมเบรนที่มีรูพุนค่อนข้างใหญ่ คือ 0.1-10 นาโนเมตร สำหรับแยกโมเลกุลขนาดใหญ่ สารแขวนลอย หรือ อนุภาคเล็กๆ ออกจากของเหลว โดยใช้ความดันอยู่ในช่วง 100-500 กิโลปาสคาล

6. กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) เป็นเมมเบรนที่ใช้ขนาดรูพุนค่อนข้าง ใหญ่ คือ 2-5 นาโนเมตร โดยกักเก็บไอออนไว้บางส่วน ไอออนที่มีขนาดเล็กและสารอินทรีย์น้ำหนักโมเลกุล ต่ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้

7. กระบวนการการแยกก๊าซ (Gas separation) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกก๊าซผสม แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ กลไกก๊าซเพอร์มิเอชัน (Gas permeation, GP) ซึ่งโมเลกุลของก๊าซหรือไอผ่านเมม-เบรนแบบแน่นไม่มีรูพุนด้วยกลไกการละลายและการแพร่ (คล้ายออสโมซิสผันกลับ) ใช้แรงดันในการแยก 100 กิโลปาสคาล-10 เมกกะปาสคาล และกลไกก๊าซดิฟฟิวชัน (Gas diffusion, GD) เป็นการแยกก๊าซผ่าน เมมเบรนรูพุนขนาดเล็ก แรงขับเคลื่อนเป็นผลต่างของความเข้มข้นหรือความดันย่อย

8. กระบวนการเพอร์เวปอเรชัน (Pervaporation, PV) เป็นการแยกองค์ประกอบหนึ่งออก จากสารผ่านเมมเบรนแบบแน่นด้วยกลไกการละลายและการแพร่ องค์ประกอบที่ผ่านเมมเบรนอยู่ในรูป ของไอ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการควบคุมความดันด้านเพอร์มิเอตให้ต่ำกว่าความดันย่อยของสารที่ผ่านเมมเบรนและการเก็บตัวอย่างที่เป็นไอ สามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิให้สารนั้นกลั่นตัวกลับมาเป็นของเหลว

#### 2.4.3 กระบวนการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน

กระบวนการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ก๊าซดิฟฟิวชัน (Gas diffusion) และก๊าซเพอร์มิเอชัน (Gas permeation)

- กลไกก๊าซดิฟฟิวชัน (Gas diffusion)

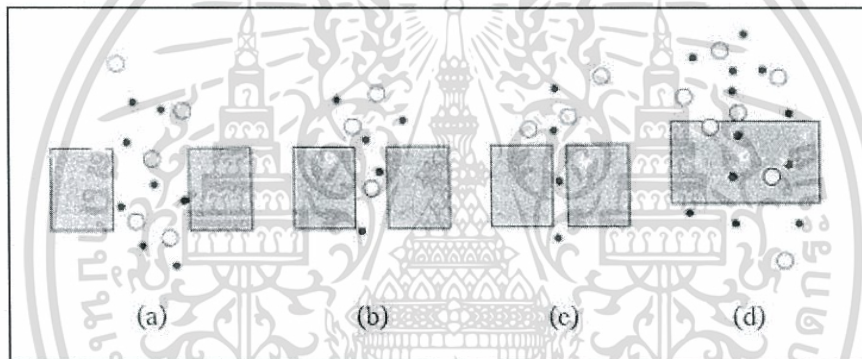
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการแยกก๊าซโดยใช้เยื่อแผ่นรูพรุน แรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทอาจเป็นผลต่างของความเข้มข้นหรือความดันย่อย และยังแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

1) ถ้ารูพรุนของเมมเบรนใหญ่กว่าโมเลกุลของก๊าซมาก โมเลกุลของก๊าซภายใต้ความดันสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนโดยการพามวล ทำให้โมเลกุลของก๊าซทุกชนิดผ่านเมมเบรนได้เท่าๆกัน และจะไม่เกิดการแยก

2) ถ้ารูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กกว่าระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ได้โดยไม่ชนกัน (Mean free path) โมเลกุลจะเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนด้วยกลไก Knudsen diffusion โดยจะชนกับผนังมากกว่าที่จะชนกันเอง จากกลไกดังกล่าว ทำให้ก๊าซที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะแพร่ผ่านเมมเบรนได้รวดเร็วกว่าก๊าซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้เกิดการแยกขึ้น (สัมประสิทธิ์การแพร่แปรผกผันกับรากที่สองของน้ำหนักโมเลกุล)

3) รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กมาก ทำให้ก๊าซที่มีโมเลกุลใหญ่กว่าไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้จึงเกิดการแยกขึ้น และเรียกกลไกนี้ว่าการคัดขนาด หรือ Molecular sieving ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 กลไกการถ่ายโอนในเมมเบรน กลไกของก๊าซดีฟิวชัน; (a) รูพรุนของเมมเบรนใหญ่กว่าโมเลกุลของก๊าซมาก (b) รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กกว่าระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ได้โดยไม่ชนกัน (c) รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กมาก (d) กลไกก๊าซเพอร์มิเอชัน [10]

ที่มา: มหาลัยสงขลานครินทร์, 2556

ในทางปฏิบัติการผลิตเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กพอที่จะกักกันโมเลกุลของก๊าซทำได้ยาก เนื่องจากโมเลกุลของก๊าซมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของตัวถูกละลายอื่นๆมาก นอกจากนี้การแยกก๊าซโดยใช้เมมเบรนรูพรุนยังมีข้อจำกัดตรงที่ค่าการแยกต่ำ

- กลไกก๊าซเพอร์มิเอชัน (Gas permeation)

ถ้าเมมเบรนที่ใช้ในการแยกก๊าซเป็นเมมเบรนแบบเนื้อแน่น แรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทเป็นผลจากความต่างของความดันหรือความเข้มข้นของก๊าซ การเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนสามารถอธิบายด้วยกลไกการละลายการแพร่ (Solution-diffusion mechanism) สมมติฐานพื้นฐานของการซึมผ่านเมมเบรน คือ

- 1) โฟสมที่ป้อนเข้าสู่เมมเบรนถูกละลายหรือดูดซับเข้าสู่ผิวเมมเบรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) โอมผสมเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนโดยกลไกการแพร่
- 3) องค์ประกอบที่สามารถซึมผ่านเมมเบรนจะเคลื่อนที่มาด้านเพอร์มิเอต

#### 2.4.4 วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน [11]

1. พอลิเมอร์ เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เรียกว่า มอนอเมอร์ (Monomer) มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาว ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลจึงขึ้นอยู่กับจำนวนในสายโซ่และน้ำหนักโมเลกุลของหน่วยย่อย โดยที่พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยชนิดเดียวกันในสายโซ่ เรียกว่า โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) มีพอลิเมอร์หลายชนิดที่ผลิตจากมอนอเมอร์มากกว่า 1 ชนิด เรียกว่า โคพอลิเมอร์ (Copolymer) สถานะของพอลิเมอร์มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติทางกลทางความร้อนและสภาพการซึมผ่านเมมเบรน เมื่อพอลิเมอร์ได้รับความร้อนจนอุณหภูมิสูงถึงค่าหนึ่งก็จะเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วไปเป็นสถานะยืดหยุ่น อุณหภูมินั้น คือ Glass transition temperature ( $T_g$ ) ในสถานะแก้วสายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้จำกัด คือไม่สามารถหมุนรอบแกนของสายโซ่หลักได้อย่างอิสระ มีผลทำให้สภาพการซึมผ่านสารของเมมเบรนที่ผลิตได้จากพอลิเมอร์นั้นๆ ต่ำกว่าที่อุณหภูมิเท่ากับหรือสูงกว่า  $T_g$  พอลิเมอร์มีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะความแข็งของพันธะได้จึงเคลื่อนไหวได้มากขึ้น

2. สารอนินทรีย์สำหรับผลิตเมมเบรน เมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุอนินทรีย์มีเสถียรภาพต่อความร้อนตัวทำละลายที่เหนือกว่าเมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ สารอนินทรีย์ที่นิยมนำมาผลิตเมมเบรนสังเคราะห์ ได้แก่ เซรามิกส์ โลหะ แก้ว และซีโอไลต์ (Zeolite) ในปัจจุบันได้มีการนำเมมเบรนอนินทรีย์มาใช้ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชัน และการแยกก๊าซ

#### 2.5 พอลิเมอร์ผสม [12-14]

จากความต้องการผลิตวัสดุพอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่หลากหลายของตลาด ทำให้ผู้ผลิตพอลิเมอร์ได้มีการพัฒนาพอลิเมอร์ผสมขึ้นมาเป็นทางเลือกหนึ่งในการเตรียมพอลิเมอร์ชนิดใหม่ให้ตรงตามความต้องการของตลาด เนื่องพอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend) คือสารผสมที่เกิดจากผสมพอลิเมอร์อย่างน้อย 2 ชนิดขึ้นไป หรือพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) ดังนั้นการเตรียมพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติเฉพาะจึงเกิดจากการนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติที่ไม่สามารถได้จากพอลิเมอร์ ชนิดเดียว การเตรียมพอลิเมอร์ส่วนใหญ่มักใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงวิศวกรรมที่มีความทนทานต่อแรงเชิงกลและอุณหภูมิสูงซึ่งได้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ดังนั้นจึงทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นโดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่า การผสมถือว่าการผสมที่ง่าย สะดวก และราคาไม่สูงมาก เมื่อเทียบกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ชนิดใหม่จากมอนอเมอร์ นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณขยะจากเศษพอลิเมอร์จากผลิตภัณฑ์โดยการนำเศษขยะพอลิเมอร์มาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นกลายเป็นพอลิเมอร์ผสมได้

พอลิเมอร์ผสมแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend)

Miscibility คือ ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ในระดับโมเลกุล ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ ทำให้พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันมีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์สองชนิด โดยมีปัจจัยเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ ได้แก่ ความมีขั้วคล้ายกัน น้ำหนักโมเลกุลและความเป็นผลึกต่ำ รวมทั้งการสร้างพันธะไฮโดรเจนร่วมกัน เป็นต้น

2. พอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend)

ระบบที่ไม่ละลายในระดับโมเลกุลในพอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันคือ พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีการแยกเป็นวัฏภาคกระจายตัว (Dispersed phase) และวัฏภาคหลัก (Matrix) โดยที่วัฏภาคกระจายตัวมีขนาดเล็ก เมื่อพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้ดี (Good compatibility) ดังนั้นในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมปรับปรุงระบบผสม เพื่อให้แต่ละวัฏภาคเกิดการยึดเกาะกันดีขึ้น ซึ่งเป็นการรวมสมบัติที่ดีของแต่ละวัฏภาค และเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถได้จากสมบัติของพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว

วัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสม

1. เพื่อให้สมบัติดีขึ้นและมีราคาถูกลง
2. เพื่อพัฒนาสมบัติให้ได้ตามต้องการ
3. เพื่อให้สมบัติเด่นของพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น
4. เพื่อปรับปรุงส่วนประกอบของการผสมตามที่ถูกค่าต้องการ
5. เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น การนำเศษพลาสติกหลายชนิดกลับมาขึ้นรูปใหม่

ในการเลือกพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมต้องคำนึงถึงข้อดีข้อเสียของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งต้องชดเชยข้อเสียของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

## 2.6 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น [15]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) เป็นเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดใหม่ที่เกิดโดยใช้กระบวนการความดันต่ำ สามารถควบคุมโครงสร้างของโมเลกุลพอลิเอทิลีนได้ดีกว่ากระบวนการผลิตแบบเก่าที่ใช้ความดันสูง ทำให้เม็ดพลาสติกที่ผลิตได้เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นเส้นตรง มีกิ่งก้านสาขาเล็กๆ กระจายตลอดความยาวของเส้นตรงและมีการกระจายของน้ำหนักของโมเลกุลแคบ ทำให้ LLDPE เป็นพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงโมเลกุลเป็นระเบียบกว่า LDPE (ซึ่งมีกิ่งที่มีความยาวและมีตำแหน่งแบบสุ่ม) ความเป็น

ระเบียบของโครงสร้างของกิ่งใน LLDPE ได้มาจากการทำปฏิกิริยาของเอทิลีนร่วมกับโคมอนอเมอร์ เช่น บิวเทน (Butane), พรอพิลีน (Propylene), เฮกเซน (Hexane), ออกเทน (Octane) เป็นต้น โดยโคมอนอเมอร์เหล่านี้จะมีจำนวนคาร์บอนอะตอมเพิ่มขึ้นตามลำดับ ความยาวของกิ่งใน LLDPE ที่ผลิตจะขึ้นอยู่กับจำนวนคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลโคมอนอเมอร์ที่ใช้ตัวเร่งที่ใช้ในการเตรียม LLDPE เช่น ไททาเนียมเฮไลด์ครึ่งวินัสต์ต่างๆ เช่น อะลูมินา เป็นต้น

#### 2.6.1 สมบัติโดยทั่วไปของ LLDPE

1. มีความทนแรงกระแทกของอุณหภูมิต่ำกว่า LDPE
2. ความต้านแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ  $-40^{\circ}\text{C}$  พลาสติก LLDPE ที่เตรียมการไหลเดียวกันกับ LDPE จะมีความต้านทานแรงกระแทกดีกว่า
3. มีความต้านทานแรงเจาะทะลุดีกว่า LDPE ถึง 60%
4. LDPE มีการต้านแรงดึงขาดต่ำกว่า LLDPE ประมาณ 50% ซึ่งถ้าเราผสม LLDPE ใน LDPE ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของพลาสติกสูงขึ้น
5. มีความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Seal Strength) สูงกว่า LDPE มาก ซึ่งประโยชน์ในด้านนี้คือ การทำฟิล์มหลายชั้น
6. การพิมพ์ฟิล์มบางๆ LLDPE 100% สามารถผลิตฟิล์มความหนาประมาณ 38 ไมครอน แต่ถ้าผสม LLDPE 10-20% สามารถดึงฟิล์มได้มากขึ้น หนาเพียง 4-5 ไมครอน
7. โดยทั่วไป LLDPE ไม่ค่อยใส ต้องใส่ LDPE เข้าไปปรับคุณภาพตกผลึกของโมเลกุลของ LLDPE ทำให้ได้ฟิล์มใสขึ้น
8. สมบัติเชิงกลดีกว่า LDPE เช่น ทนแรงฉีกขาด ทนต่อแรงทิ่มทะลุได้ดีกว่า
9. ชุ่มกว่า LDPE
10. สามารถใช้ที่อุณหภูมิต่ำได้

#### 2.6.2 การนำไปใช้งานในปัจจุบัน

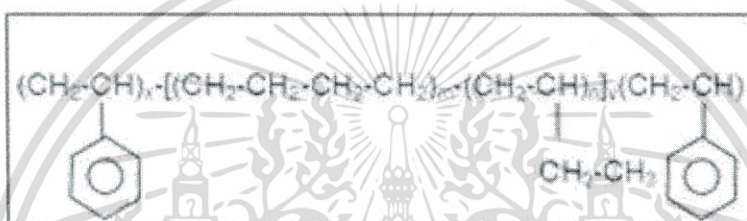
LLDPE นิยมนำมาใช้ประโยชน์สำหรับงานฟิล์ม เนื่องจากมีสมบัติเด่นในเรื่องของความใส ความสามารถในการขึ้นรูป ยืดเกาะได้ดีกับซับสเตรตต่างๆ และสมบัติเชิงกลที่ดี จากสมบัตินี้ทำให้ผลิตภัณฑ์ InnoPlus LLDPE ในกลุ่มฟิล์มสามารถผลิตฟิล์มที่มีความหลากหลาย เช่น บรรจุภัณฑ์อาหาร ฟิล์มแช่แข็ง ฟิล์มที่ต้องการความแข็งแรงสูง ฟิล์มเกษตรอุตสาหกรรม ฟิล์มยืด ฟิล์มลามิเนตหรือฟิล์มที่มีหลายชั้นใช้กับบรรจุภัณฑ์ปลอดเชื้อ (Aseptic packaging) โดยใช้เป็นชั้นหรือตัวกลางปิดผนึกสำหรับ Sealing layer เป็นต้น

### 2.7 พอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน [16]

พอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (Poly(styrene-ethylenebutylene-styrene), SEBS) จัดเป็นยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomers, TPEs) ที่มีทั้งสมบัติของยางและพลาสติก จึงมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติคล้ายยางเทอร์โมเซต (Thermoset rubber) คือ มีสมบัติเป็นอิลาสติก โดย TPEs จะสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก และสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อแรงกระทำนั้นหมดไป ในขณะที่เดียวกัน TPEs มีสมบัติของเทอร์โมพลาสติกด้วย โดยจะหลอมเมื่อได้รับความร้อน และกลับมาแข็งตัวได้เมื่อเย็นตัวลง SEBS มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่  $-55^{\circ}\text{C}$  ที่มาจากส่วนของ Ethylene-butylene (Soft segment) และที่  $95^{\circ}\text{C}$  มาจากส่วนของ Polystyrene (Hard segment) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 จากสององค์ประกอบนี้ ส่งผลให้ SEBS มีความแข็งแรงสูง มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนและโอโซนสูง มีความเหนียว และยังสามารถในการรักษาสมบัติความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงได้ดี โดยทั่วไป SEBS สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เนื่องจากมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจึงเหมาะที่จะใช้ผลิตผลิตภัณฑ์กลางแจ้ง SEBS สามารถขึ้นรูปได้โดยใช้กระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการอัดรีด (Extrusion) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของ SEBS [16]

ที่มา: นเรนทร์ อาศัยพานิชย์, 2550

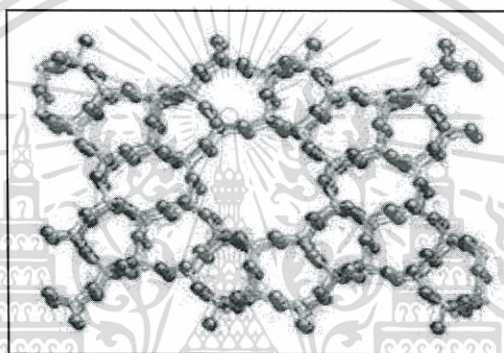
## 2.8 ซีโอไลต์ ZSM-5

Zeolite คือ สารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) 1 อะตอม และออกซิเจน 4 อะตอม ( $\text{SiO}_4$  หรือ  $\text{AlO}_4$ ) สร้างพันธะกันเป็นรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) [17] โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างทรงเหลี่ยมสี่หน้านี้เชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอม เท่ากับ  $1 \times 10^{-10}$  เมตร) นอกจากซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงสร้างผลึก

ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดกลาง มี Si/Al ratio สูงคือ 15-Infinity ซึ่ง Si/Al ratio สูง [17] มักจะเกิดโครงสร้าง Channel structure แสดงดังภาพที่ 2.5 แต่จะตกผลึกช้ากว่าซีโอไลต์ที่มี Si/Al ratio ต่ำ ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) ได้ดี ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 มีขนาดความกว้างของหน้าต่าง 5.5 อังสตรอม [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ปฏิบัติการที่ได้รับความนิยม คือปฏิบัติการเติมไฮโดรเจนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากการเพิ่มมูลค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จัดเป็นก๊าซเรือนกระจกซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถสังเคราะห์ได้จากหลายปฏิกิริยา เช่น การสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ได้จากกากของเสียของโรงงานอุตสาหกรรมหล่อหลอมเหล็ก และโรงงานซูปเปอร์ลูมิเนียม การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากเพอร์ไลต์และเถ้าแกลบ [19] ซึ่งเพอร์ไลต์เป็นหินภูเขาไฟเนื้อแก้วเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของแมกมา จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่าเพอร์ไลต์ประกอบด้วย ซิลิกา (Silica,  $\text{SiO}_2$ ) 70-75 wt%, อะลูมินา (Alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 12-14 wt% และน้ำ 2-6 wt% ส่วนแกลบเป็นผลผลิตพลอยได้จากการสีข้าวเพื่อแยกเปลือกข้าวออกจากเมล็ด ในแกลบมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ ซิลิกาในปริมาณสูง เมื่อเผาแกลบภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะได้เถ้าของแกลบที่มีซิลิกาประมาณ 95 wt% ซึ่งสามารถนำไปผลิตเป็นซีโอไลต์ได้



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 [18]

ที่มา: ดลพร ชูเกียรติสกุล และคณะ, 2553

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก๊าซเอทิลีนเป็นฮอร์โมนที่พืชสร้างขึ้น ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมการเจริญเติบโตและพัฒนาของผลผลิตภายหลังการ เก็บเกี่ยว เช่น การออกดอก การสุกของผลไม้ และการหลุดร่วงของใบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลไม้ประเภท Climacteric มีการผลิตก๊าซ เอทิลีนเมื่อเริ่มสุกสูงกว่าผลไม้ประเภท Non-climacteric ทำให้การหายใจสูงขึ้นและผลผลิตเกิดการเน่าเสียเร็วขึ้น [20] ด้วยเหตุนี้จึงมี การนำเอาสารยับยั้งหรือกำจัดเอทิลีนมาใช้เพื่อชะลอการเสื่อมเสียของผลผลิตสด โดยสารดูดซับเอทิลีนที่นิยมใช้ได้แก่ ผงถ่านกัมมันต์ ต่างทับทิม (Potassium permanganate,  $\text{KMnO}_4$ ) โดยพบว่าเมื่อเก็บรักษาผลผลิต เช่น กล้วย มะม่วง กิ่ว ร่วมกับการใช้ต่างทับทิม ผลผลิตมีอายุการเก็บรักษานานขึ้นและช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสีของผลผลิต เนื่องจากต่างทับทิมทำปฏิกิริยากับเอทิลีนที่เกิดขึ้น เป็นสารประกอบของแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีสีน้ำตาล ทำให้ช่วยลดระดับความเข้มข้นของเอทิลีนที่มีอยู่ในบรรยากาศได้ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วรรณิ ฉินศิริกุล และอศิรา เฟืองฟูชาติ [21] ได้พัฒนาฟิล์มพลาสติกสำหรับบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงสภาวะบรรยากาศ ทำให้ฟิล์ม พลาสติกที่พัฒนาขึ้นใหม่มีอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen transmission rate, OTR) เพิ่มขึ้น แผ่นฟิล์มมีลักษณะใส เกิดฝ้าน้อย และมีความหนาน้อยกว่าฟิล์มพลาสติกทั่วไปประมาณร้อยละ 25 แต่ความแข็งแรงเท่าฟิล์มพลาสติกที่จำหน่ายตาม ท้องตลาด สมบัติพิเศษอีกอย่างของฟิล์มพลาสติกที่พัฒนาขึ้น คือยอมให้ก๊าซแต่ละชนิดผ่านฟิล์มในอัตราที่แตกต่างกัน ซึ่งสมบัติพิเศษ นี้เป็นผลมาจากการควบคุมโครงสร้างระดับโมเลกุลของพอลิเมอร์และการควบคุมโครงสร้างรูพรุน โดยขึ้นรูปฟิล์มแบบสองชั้น ฟิล์ม บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ทดสอบมี 10 ชนิด โดยอยู่ในรูปของฟิล์มทั่วไป ถูบรรจุ ถูเจาะรู และฟิล์มที่มีสารเติมแต่ง พบว่าผลิตผลยังคงรักษา ความสดไว้ได้นานกว่า 5 สัปดาห์ มีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดประมาณ 2.1% โดยเทียบกับการใช้บรรจุภัณฑ์จากฟิล์ม HDPE ทั่วไป และถูบรรจุภัณฑ์ผลิตผลไม้สดชนิดหนึ่งจากต่างประเทศ

พอลิเมอร์ผสมเป็นทางเลือกในการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ใหม่ๆ โดยเฉพาะการผสมสารตัวเติมกับพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก สารตัวเติมที่นิยมใช้ คือซีโอไลต์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นผลึก มีรูพรุน และเหมาะสำหรับใช้เป็นสารดูดซับก๊าซเอทิลีนในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ ซีโอไลต์ที่ใช้มีค่า Si/Al สูง ซึ่งเป็นซีโอไลต์ชนิดไม่มีขั้ว จากงานวิจัยศึกษาผลซีโอไลต์เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกผสมกับ LDPE, LLDPE และ HDPE [8] โดยการนำสารละลายกรดสเตียริกเคลือบบนผิวของซีโอไลต์ โดยเตรียมอัตราส่วนของน้ำหนักต่อปริมาตร (ซีโอไลต์/กรดสเตียริก) เป็น 1:0.6 แล้วอบให้แห้ง จากนั้นนำซีโอไลต์ที่ผ่านการเคลือบผิวมาผสมกับพอลิเมอร์ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ โดยใช้ซีโอไลต์ปริมาณ 5-50 wt% จากนั้นเตรียมฟิล์มโดยใช้เครื่องอัดรีดผ่านหัวดายแบบ Slit die ความหนาประมาณ 40  $\mu\text{m}$  และนำ ฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ผลการศึกษาพบว่าซีโอไลต์ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกมี การกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีกว่าซีโอไลต์ที่ไม่เคลือบผิว และซีโอไลต์กระจายตัวได้ดีที่สุดใน HDPE และค่า Tensile modulus ของพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์ที่เคลือบผิวมีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์ที่ไม่เคลือบผิว และค่านี้เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของซีโอไลต์ เพิ่มขึ้น ส่วนการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เคลือบผิวมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) เพียงเล็กน้อย คือ ลดลง 2-3°C

พรพรรณ มั่นประสิทธิ์ [22] ได้ทำการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตสองชั้นเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อเก็บรักษาผักและผลไม้หลังการ เก็บเกี่ยว โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ LDPE กับพอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (SEBS) ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ ประกอบด้วย Ehtylene/butylene ที่มีความยืดหยุ่น มีลักษณะเป็นอสัณฐานและไม่มีขั้วเหมือนก๊าซเอทิลีน ทำให้ ก๊าซเอทิลีนจึงสามารถซึมผ่าน SEBS ได้ดี นอกจากนี้มีการเติมซีโอไลต์ (ชนิดไม่มีขั้ว) ZSM-5 และนำฟิล์มที่ไปวิเคราะห์ เช่น สัณฐานวิทยา (SEM), พฤติกรรมทางความร้อน (DSC), การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ (เอทิลีน, ออกซิเจน, คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ), ค่าความแข็งแรงดึง พบว่าการเติมซีโอไลต์ในปริมาณ 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนักลงในฟิล์ม SEBS โดยเตรียมให้ซีโอไลต์ ZSM-5 มีการกระจายตัวในชั้น SEBS 2 แบบ (แบบ Surface-rich) ทำให้ซีโอไลต์กองรวมกันอยู่ด้านหนึ่งของผิวฟิล์ม และแบบ Well dispersed ทำให้ซีโอไลต์กระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อฟิล์ม และพบว่าการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ในปริมาณ 5-10% สามารถเพิ่มการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึมผ่าน ของก๊าซเอทิลีน แต่ถ้าปริมาณที่เติมมากกว่า 10% การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มคอมโพลีเมอร์เพิ่มไม่มากนัก และการกระจายตัวที่ ต่างกันของซีโอโลต์ไม่ส่งผลต่อการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน เนื่องจากมีชั้น LDPE ที่มีความเป็นผลึกขัดขวางการซึมผ่านของก๊าซ (Barrier) ทำให้ก๊าซซึมผ่านได้ช้า

รุจิเรข วิวัฒน์านุกุล [23] ได้มีการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS จากผลการทางานวิจัยพบว่า เกรดของ SEBS ชนิดและปริมาณการเติม SEBS และปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติต่างๆ และการ ซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของพอลิเมอร์ผสม เมื่อปรับเปลี่ยนความเร็วโรเตอร์ในการผสมสูตร LLDPE/SEBS (55/45) เป็น 40, 60 และ 80 rpm พบว่าการผสมที่ความเร็วโรเตอร์ 40 rpm ภูมิภาคกระจาย SEBS ที่ได้มีขนาดใหญ่และมีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ เอทิลีนสูงกว่าการผสมด้วยความเร็วโรเตอร์ 60 และ 80 rpm การเลือกใช้ SEBS เกรดที่มีปริมาณสไตรีนและเอทิลีน/บิวทิลีนต่างกัน ส่งผลโดยตรงต่อสัณฐานวิทยาและการซึมผ่านเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE/SEBS (72/28) ซึ่งการเลือกใช้ SEBS Kraton® G1657 ที่ประกอบด้วยปริมาณเอทิลีน/บิวทิลีนสูง (87 wt%) ทำให้ได้ภูมิภาค SEBS ขนาดใหญ่และมีอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสูงกว่า การใช้ SEBS Kraton® G1652 ที่ประกอบด้วยเอทิลีน/บิวทิลีนสูงในปริมาณน้อยกว่า (70 wt%) ผลการศึกษาของปริมาณการเติม SEBS Kraton® G1652 ลงในฟิล์ม LLDPE/SEBS พบว่าการเพิ่มปริมาณ SEBS ทำให้ฟิล์มมีค่าความเค้น ณ จุดคราก, ค่ามอดูลัสของยัง และร้อยละการยืด ณ จุดขาดลดลง แต่มีความแข็งแรงดึงสูงขึ้น ลักษณะของสัณฐานวิทยาพบว่าขนาดของภูมิภาคกระจายมีแนวโน้ม ใหญ่ขึ้นและมีความต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความต่อเนื่องของภูมิภาคอสัณฐาน SEBS ก๊าซเอทิลีนจึงสามารถซึมผ่านฟิล์มได้ มากขึ้น การเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LL72S28 (G1652) โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ DOP, Cereclor, DBP, TCP และ DOP ในปริมาณ 10% พบว่าการเติม DOA สามารถเพิ่มการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนได้สูงสุด เพราะ DOA มีค่าความสามารถในการละลาย (Solubility parameter) ใกล้เคียงกับ SEBS มากที่สุด ทำให้ DOA และ SEBS มีความเข้ากันได้ดี แต่การเติมพลาสติกไซเซอร์ที่ปริมาณ 10 wt% ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงดึงต่ำ จึงลดปริมาณลงเป็น 5 wt% พบว่าการเติม DOP ที่ปริมาณ 5 wt% ให้ความแข็งแรงดึงของฟิล์มเท่ากับ 11.9 MPa ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่ามาตรฐานของฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร มาตรฐานเลขที่ มอก. 1027-2553 (7 MPa)

## บทที่ 3 การทดลอง

### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) เกรดเป่าฟิล์ม PE 1220G1 จากบริษัท ดาวเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด

#### ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE

สมบัติ	PE 1220G1	หน่วย
ดรรรชนีการไหล (Melt flow rate) (2.16 kg/190 °C)	2	g/10 min
ความหนาแน่น (Density)	0.919	g/cm <sup>3</sup>

2. พอลิสไตรีน-เอทิลีนบิวทิลีน-สไตรีน (Poly(styrene-ethylenebutylene-styrene), 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%
ดรรรชนีการไหล (Melt flow rate) (5 kg/230 °C)	22	g/10 min
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 มีขนาดความกว้างของหน้าตา 5.5 Å บริษัท Star Petroleum จำกัด

4. ก๊าซ Air Zero ความบริสุทธิ์อย่างน้อย 99.9% จากบริษัท ไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด

5. น้ำกลั่น (Distilled water)

6. ก๊าซเอทิลีน (Ethylene gas) ความบริสุทธิ์อย่างน้อย 99.9% จากบริษัท ไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ก๊าซเอทิลีนมาตรฐาน (Standard ethylene gas) ความเข้มข้น 589 ppm จากบริษัท ไทย-อินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด

8. ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas) ความบริสุทธิ์อย่างน้อย 99.9% จากบริษัท ไทยอินดัส-เตรียลแก๊ส จำกัด

9. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N<sub>2</sub>)

10. เทตระไฮโดรฟูราน (THF)

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression molding machine) บริษัท แมช กรุ๊ป (1992) จำกัด รุ่น MGLP 20 AT

2. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) บริษัท C. Melchers (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น PL 2000/PL 2001

3. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) บริษัท Bosco Engineering จำกัด รุ่น Bosco A600

4. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) บริษัท LLOYD Instrument จำกัด รุ่น LR 5K

5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท JEOL จำกัด รุ่น JSM-5410LV

6. เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter) บริษัท Perkin Elmer จำกัด รุ่น DSC 7

7. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนอลไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer) บริษัท Hetsch จำกัดรุ่น TG 209 F3 Taraus

8. เครื่องทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน (เครื่องประกอบ Home-made)

9. เซลล์เพอร์มิเอชัน (Permeation cell)

10. เครื่องชั่งแบบดิจิตอลความละเอียด 4 ตำแหน่ง (g)

11. ไมโครมิเตอร์

12. กระบอกลไนโตรเจนเหลว

13. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว

14. เครื่องปั๊มลม บริษัท ฮิตาชิ จำกัด รุ่น BEBICON 400

15. เครื่อง Gas Chromatograph (GC) บริษัท Varian จำกัด รุ่น CP-3800

16. อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า

17. เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic bath)

18. ตู้อบความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการดำเนินวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม

1) การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS ด้วยเครื่องผสมแบบปิด ดังตารางที่ 3.3 โดยทำการผสมใช้สัดส่วนปริมาตรของวัสดุต่อความจุของห้องผสม (Fill factor) เท่ากับ 0.8

ตารางที่ 3.3 สูตรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS

สูตรพอลิเมอร์ผสม	อัตราส่วน LLDPE:SEBS	LLDPE (g)	SEBS (g)
LL100	100:0	40	0
LL80S20	80:20	32	8
LL75S25	75:25	30	10
LL70S30	70:30	28	12

การผสมในเครื่องผสมแบบปิด ตั้งสภาวะของเครื่อง ดังนี้

- Front plate 190 °C
- Mixer chamber 190 °C
- Reae panel 190 °C
- Rotor speed 60 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 20 นาที

นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาบดให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องบดพลาสติก

2) การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE, SEBS และ Zeolite ZSM-5 ด้วยเครื่องผสมแบบปิด ดังตารางที่ 3.4 โดยทำการผสมใช้สัดส่วนปริมาตรของวัสดุต่อความจุของห้องผสม (Fill factor) เท่ากับ 0.8

ตารางที่ 3.4 สูตรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS ที่อัตราส่วน 70:30 ที่มีการเติม Zeolite (ZSM-5)

สูตรพอลิเมอร์ผสม	ปริมาณสารก่อนเติม SEBS		ปริมาณสารหลังเติม SEBS		
	LLDPE (g)	Zeolite (ZSM-5) (g)	LLDPE (g)	SEBS (g)	Zeolite (ZSM-5) (g)
LL70S30Z5	37.2	2.8	26.6	11.4	2
LL70S30Z10	34.6	5.4	25.2	10.8	4
LL70S30Z15	32	8	23.8	10.2	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะที่ใช้ในการผสม ดังนี้

1. สูตรพอลิเมอร์ผสม LL70S30Z5 โดยผสม LLDPE และ Zeolite (ZSM-5) (5 wt%) 2.8 กรัม ที่อุณหภูมิ 170 °C ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นตัดคอมปาวด์ (Compound) ออกเท่ากับปริมาณของ SEBS (11.4 กรัม) ที่ต้องการ

2. เติม SEBS 11.4 กรัม ลงในเครื่องผสม และทำการผสมโดยใช้อุณหภูมิ 190 °C ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาบดด้วยเครื่องบดพลาสติก

3. ผสมสูตร LL70S30Z10 และ LL70S30Z15 ดังวิธีที่กล่าวในข้อ 1 และ 2 โดยเพิ่มปริมาณ Zeolite (ZSM-5) เป็น 10 wt% และ 15 wt% ตามลำดับ

### 3.3.2 การเตรียมฟิล์ม

การเตรียมฟิล์มบาง แบ่งกลุ่มฟิล์มตามการทดสอบ ดังนี้

1. ฟิล์มเพื่อทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน เตรียมให้มีความหนาในช่วง 40-55  $\mu\text{m}$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 cm โดยชั่งพอลิเมอร์ผสมประมาณ 0.2 กรัม

2. ฟิล์มเพื่อการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติเชิงกล เตรียมให้มีความหนาในช่วง 70-90  $\mu\text{m}$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 cm โดยชั่งพอลิเมอร์ผสมประมาณ 0.6 กรัม

จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด โดยใช้สภาวะของเครื่องกดอัด ดังนี้

- ขนาดแม่พิมพ์แผ่นเรียบ 20×20×1  $\text{cm}^3$
- ความดันในการกดอัด 1800 psi
- อุณหภูมิในการกดอัด 190 °C
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์ 3 นาที
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์ผสม 3 นาที
- เวลาในการกดอัดร้อน 3 นาที
- อุณหภูมิในการกดอัดเย็น 12 °C
- เวลาในการกดอัดเย็น 3 นาที

### 3.3.3 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม

#### 3.3.3.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การตรวจสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) อุณหภูมิการตกผลึก ( $T_c$ ) และปริมาณผลึกของ LLDPE โดยนำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC โดยชั่งน้ำหนักประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนในช่วง 25-160 °C ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 10 °C ต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) นำข้อมูลที่ได้มาหาค่า  $T_m$ ,  $T_c$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ตามมาตรฐาน ASTM E794

### 3.3.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM

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

- กรณีที่ 1 ทำการสกัดวัฏภาค SEBS ออกจากชิ้นงาน LLDPE/SEBS โดยนำแผ่นฟิล์มใส่ในขวดรูปชมพู่และแช่ด้วยตัวทำละลายเทตระไฮโดฟูราน เขย่าเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- กรณีที่ 2 ทำการสกัดวัฏภาค SEBS ออกจากชิ้นงาน LLDPE/SEBS/Zelite (ZSM-5) โดยนำแผ่นฟิล์มใส่ในหลอดทดลองและแช่ด้วยตัวทำละลายเทตระไฮโดฟูรานใส่ในเครื่องอัลตราโซ-นิค (Ultrasonic) เป็นเวลา 2 ชั่วโมงครึ่ง

จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการสกัดตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 12 ชั่วโมง และนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำไปศึกษาการกระจายตัวของ SEBS ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- กรณีที่ 3 ศึกษาการกระจายตัวของซีโอไลต์ไม่ต้องทำการสกัด โดยนำชิ้นงานที่หักเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำไปศึกษาการกระจายตัวของซีโอไลต์ด้วย SEM

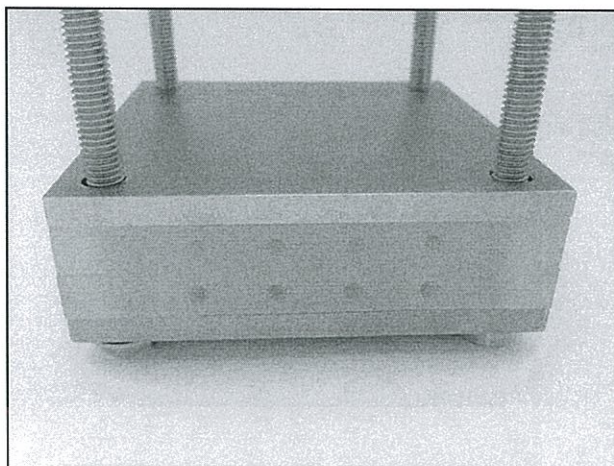
### 3.3.3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม เพื่อหาค่าความเค้น ณ จุดคราก (Stress at yield) ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของชิ้นงานโดยเตรียมฟิล์มตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D 882 และใช้เครื่องทดสอบเนกประสงค์ ตัดตัวอย่างให้มีขนาด  $10 \times 80 \text{ mm}^2$  โดยใช้สภาวะในการทดสอบ ดังนี้

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

### 3.3.3.4 การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน

นำฟิล์มขนาด  $5.5 \times 5.5 \text{ cm}^2$  ใส่ในเซลล์เมมเบรนที่มีพื้นที่การซึมผ่านของก๊าซขนาด  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  ซึ่งเป็นแผ่นพลาสติกสองชั้นประกบกัน และประกบแผ่นโลหะอีกหนึ่งชั้น ดังภาพที่ 3.1 ส่วนประกอบนี้เรียกว่า เซลล์เมมเบรน (Membrane cell) การทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนทำตามลำดับขั้นตอน ดังนี้



ภาพที่ 3.1 เซลล์เมมเบรน

1) ปรับอัตราการไหลของก๊าซ

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

2) ปรับความดันของก๊าซ

วัดความดันของก๊าซที่ไหลเข้าสู่เครื่อง Gas chromatograph (GC) ด้วย U-tube โดยวัดความแตกต่างของระดับน้ำเมื่อก๊าซไหลผ่าน จากนั้นวัดความดันของก๊าซที่ไหลสู่ช่องระบายทิ้ง (Vent) และปรับ Needle valve ให้มีความแตกต่างของระดับน้ำใน U-tube มีค่าเท่ากับครั้งแรก เพื่อเป็นการปรับความดันขาเข้า-ออก ให้เท่ากัน

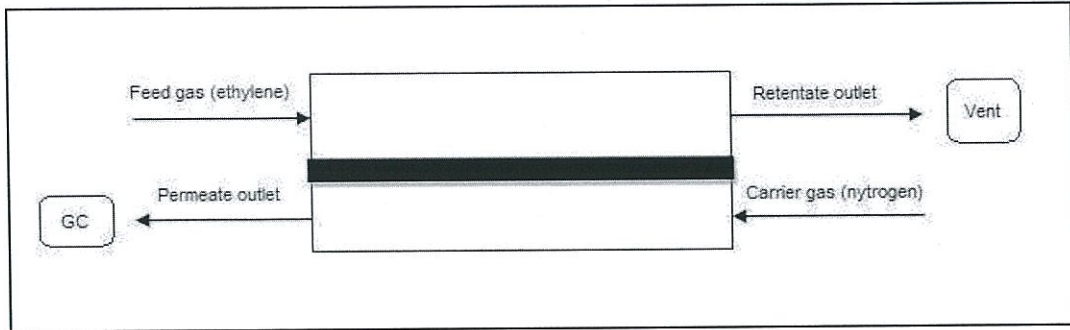
3) การทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มตัวอย่าง

นำเซลล์เมมเบรนมาทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน โดยก๊าซเอทิลีนไหลเข้าทางแผ่นพลาสติกด้านบน และก๊าซไนโตรเจนไหลเข้าทางแผ่นพลาสติกด้านล่าง ซึ่งทิศทางการไหลและการซึมผ่านของก๊าซแสดงดังในภาพที่ 3.2 เมื่อสารป้อนไหลผ่านฟิล์ม ก๊าซบางส่วนจะซึมผ่านฟิล์มในเซลล์เมมเบรนไปยังฝั่งเพอร์มิเอตที่ต่อท่อเข้ากับวาล์วของเครื่อง GC (ภาพที่ 3.3) ที่บรรจุคอลัมน์ชนิดแพ็ค (Porapak Q column) โดยมีก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพา สำหรับก๊าซที่ไม่สามารถซึมผ่านไปได้ จะไหลไปสู่ช่องระบายทิ้ง (Vent) สภาวะเครื่อง GC ที่ใช้ มีดังนี้

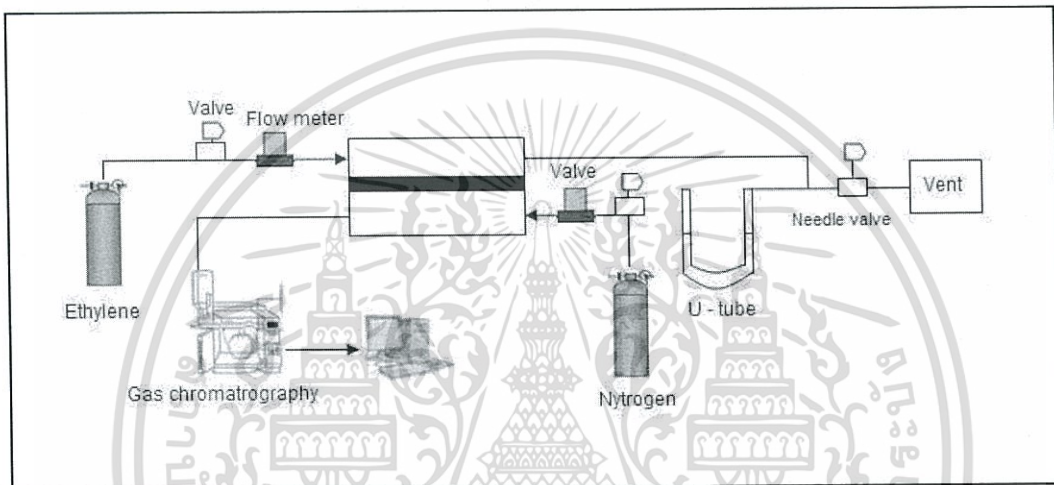
- Injection port	200 °C
- Column oven	150 °C
- Flame ionization detector (FID)	200 °C

เพอร์มิเอตถูกตรวจวัดด้วย FID ทุกๆ 10 นาที เพื่อหาค่าการซึมผ่าน (Permeability) จนเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) สังเกตได้จากพื้นที่ใต้กราฟไม่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 แผนภาพทิศทางการซึมผ่านก๊าซในเซลล์เพอร์มิเอชัน



ภาพที่ 3.3 แผนภาพแบบทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพื่อพัฒนาฟิล์มที่มีการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนได้ดี โดยทำการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) กับบล็อกโคพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (SEBS) ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลของอัตราส่วน LLDPE/SEBS คือ 80/20, 75/25 และ 70/30 และปริมาณซีโอไลต์ ZSM-5 คือ 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ซึ่งซีโอไลต์มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุน สามารถช่วยการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนได้ดีขึ้น นำมาเตรียมเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนและปริมาณซีโอไลต์ต่อสมบัติต่างๆของฟิล์ม เช่น สัมฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน

#### 4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วน LLDPE/SEBS ต่อสมบัติของฟิล์ม

การศึกษาผลของอัตราส่วน LLDPE/SEBS โดยใช้ SEBS เกรด Kraton® G1657 ที่ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด นำฟิล์มมาทดสอบสมบัติต่างๆ

##### 4.1.1 พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/SEBS

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/SEBS ด้วย DSC แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1 พบว่าค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) และอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ของ LLDPE ในพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS มีค่าใกล้เคียงกันในทุกสูตรฟิล์ม แสดงว่าการเติม SEBS ไม่รบกวนการเติบโตของผลึก LLDPE อาจเนื่องมาจาก LLDPE และ SEBS เป็นพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) มีความเข้ากันได้ต่ำ ขนาดของผลึก LLDPE ทุกสูตรใกล้เคียงกัน เห็นได้จาก  $T_m$  และ  $T_c$  มีค่าใกล้เคียงกัน แต่สายโซ่โมเลกุลของ SEBS ประกอบด้วยพอลิสไตรีนทำให้ระบบมีความหนืดสูงขึ้น ส่งผลให้การจัดเรียงผลึกของสายโซ่ LLDPE ยากขึ้น เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกจึงมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อเติม SEBS ในปริมาณมากขึ้นพบว่าไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึก (ซึ่งมีค่าในช่วง 34-36%)

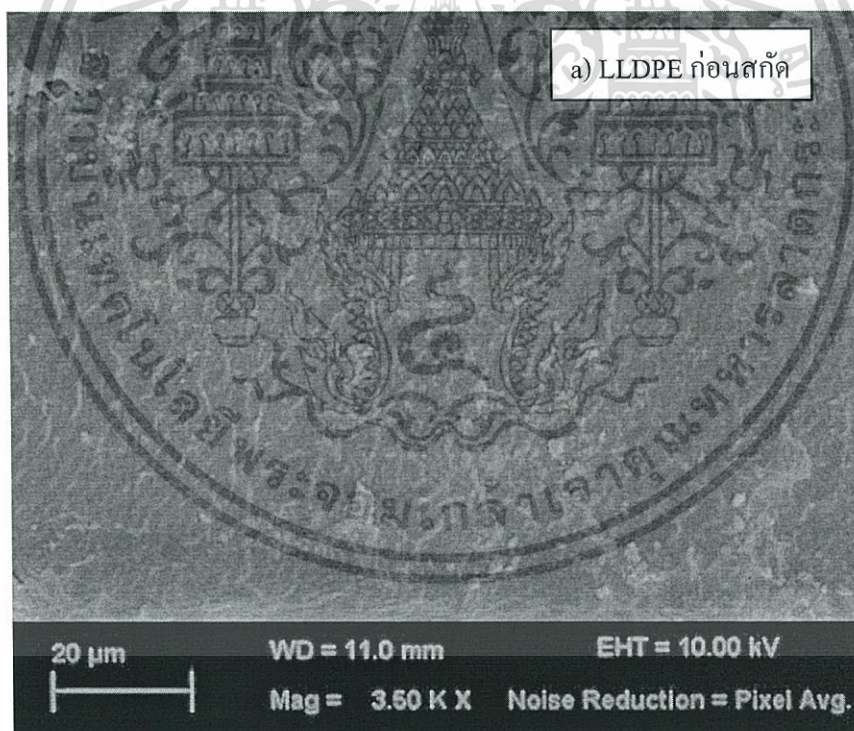
ตารางที่ 4.1  $T_m$ ,  $T_c$  และความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/SEBS

สูตร	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	ความเป็นผลึก (%)
LLDPE	119	102	40
LL80S20	116	103	36
LL75S25	119	101	34
LL70S30	118	101	34

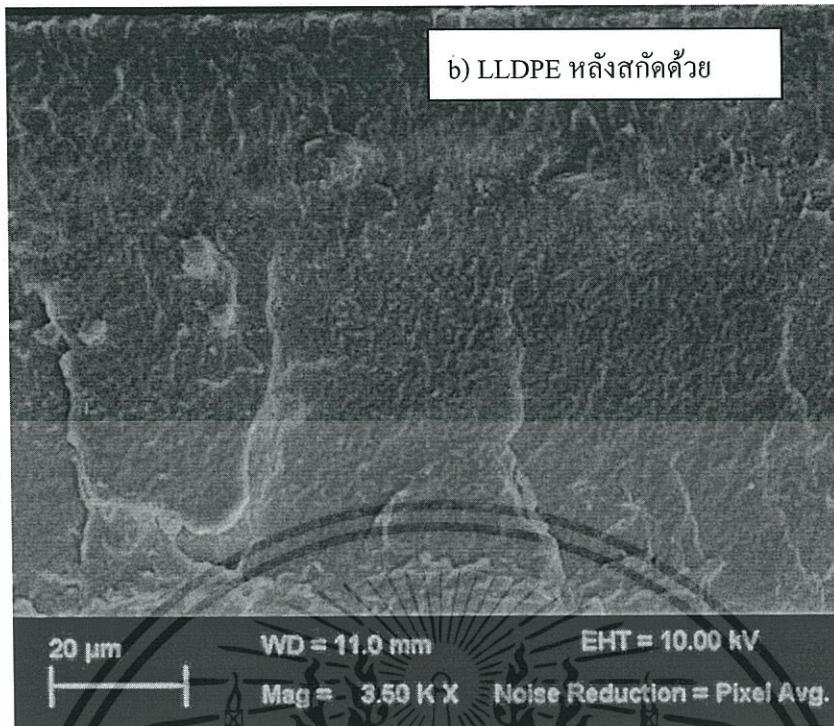
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม LLDPE/SEBS

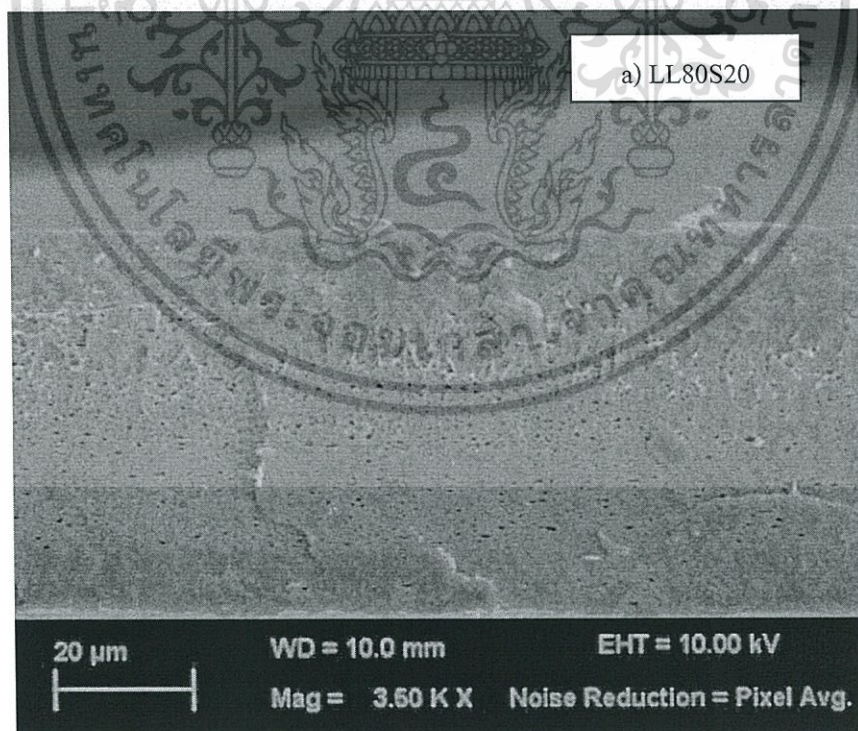
จากภาพที่ 4.1 แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ LLDPE ก่อนและหลังสกัดด้วยตัวทำละลาย เทตระไฮโดรฟูราน จากภาพทั้งก่อนและหลังสกัด LLDPE ด้วยเทตระไฮโดรฟู-ราน พบว่าฟิล์ม LLDPE มีผิวเรียบ ไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น แสดงว่าไม่มีการละลายออกของ LLDPE ในตัวทำละลายเทตระไฮโดรฟูราน และจากภาพที่ 4.2 แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า LLDPE ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และมี SEBS ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคกระจาย เห็นได้ว่าเมื่อทำการสกัดด้วยเทตระไฮโดรฟูราน ทำให้วัฏภาคของ SEBS ละลายออกกลายเป็นช่องว่างสีดำในวัฏภาคของ LLDPE โดยแสดงสัณฐานวิทยาแบบทรงกลม (Spherical) มีการกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม แต่เนื่องจากกระบวนการอัดเย็น ส่งผลให้บริเวณผิวด้านนอกของแผ่นฟิล์มที่สัมผัสกับแม่พิมพ์มีการจัดเรียงตัวและเกิดผลึกก่อน จึงเห็นช่องว่างของ SEBS บริเวณตรงกลางของแผ่นฟิล์ม เมื่อปริมาณของ SEBS เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีวัฏภาคของ SEBS กระจายตัวในวัฏภาคของ LLDPE มากขึ้น และมีโอกาสที่ SEBS รวมตัวกัน (Coalescence) ขณะผสมสูงกว่าการมีปริมาณ SEBS น้อย จึงทำให้ขนาดวัฏภาค SEBS มีแนวโน้มใหญ่ขึ้น และมีความต่อเนื่องมากขึ้น โดยที่อัตราส่วน LLDPE/SEBS ที่ 70/30 มีลักษณะของวัฏภาค SEBS เป็นทรงกลมและทรงรี (Cylindrical) ตามแนวการกดอัด



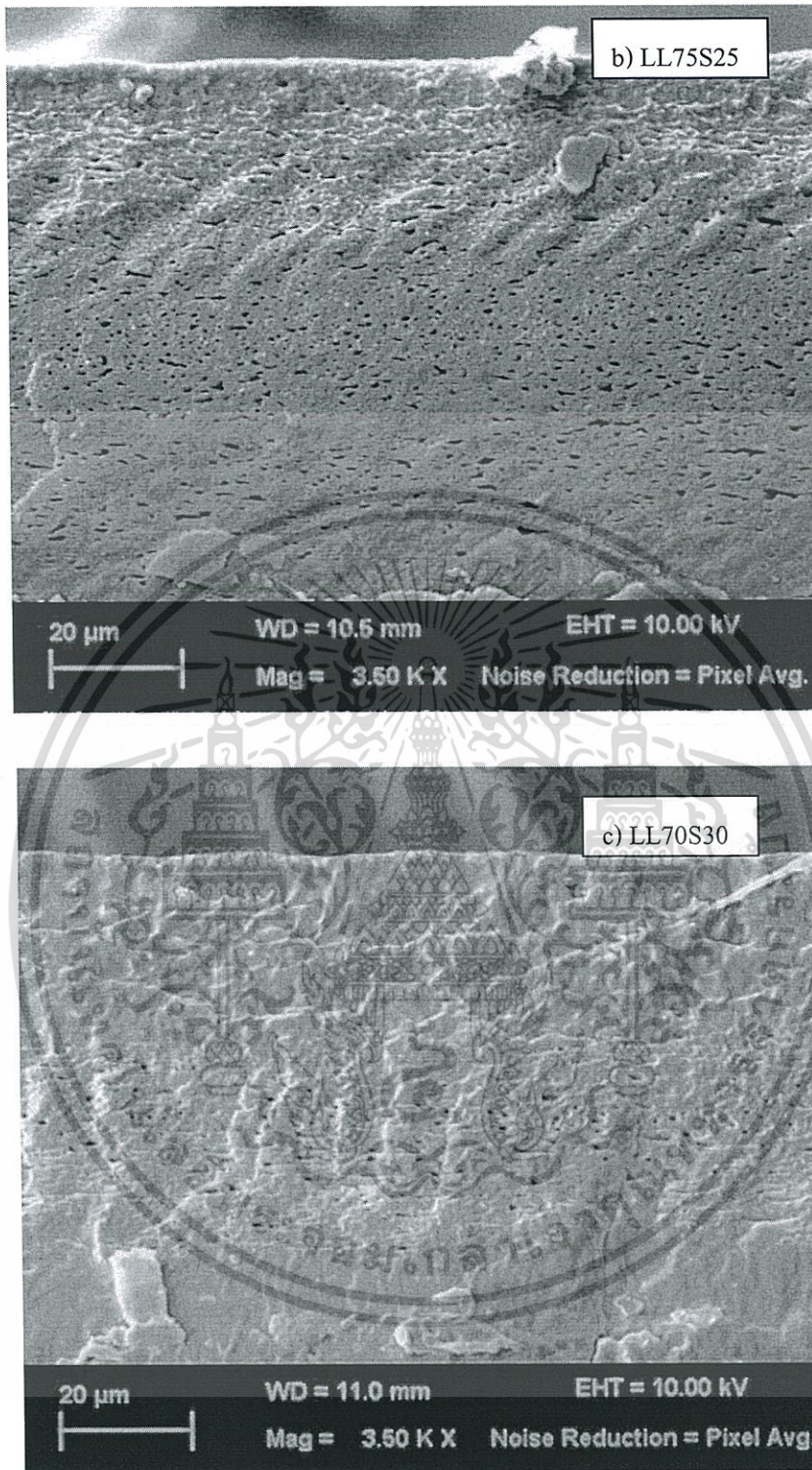
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.1 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE ก่อนและหลังสกัดด้วย THF ที่กำลังขยาย 3500 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

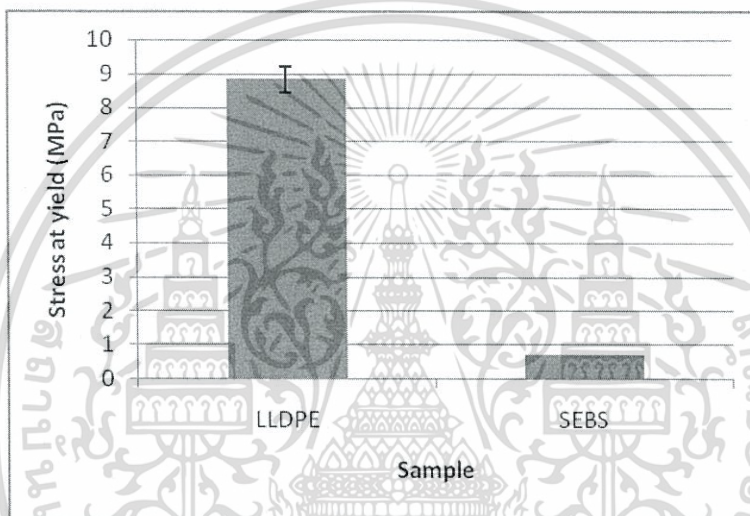


ภาพที่ 4.2 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ ที่สกัด SEBS ด้วย TH F  
กำลังขยาย 3500 เท่า

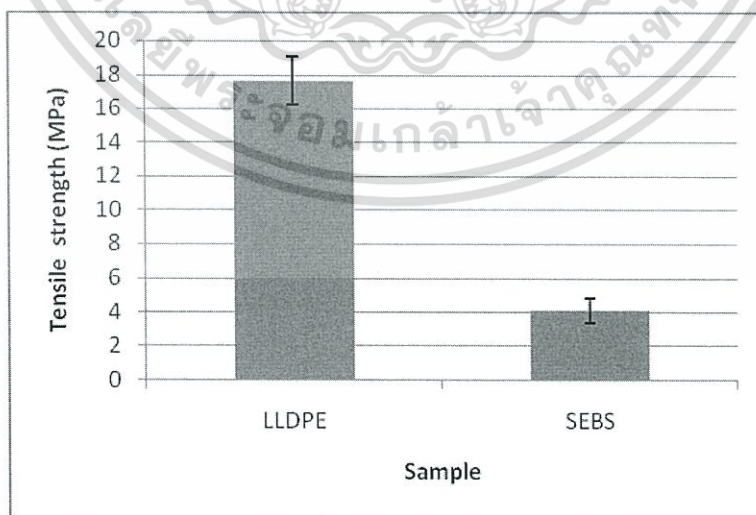
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE/SEBS

จากภาพที่ 4.3-4.6 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE กับ SEBS พบว่าฟิล์ม SEBS มีค่าความแข็งแรงดึง ความเค้น ณ จุดคราก และค่ามอดุลัสของยังต่ำกว่าฟิล์ม LLDPE เนื่องจาก SEBS เกรด Kraton® G1657 ที่ใช้เป็นพอลิเมอร์ออสัณฐาน ประกอบด้วยส่วนของพอลิ-สไตรีน 12.3-14.3 wt% ที่มีความแข็ง และเอทิลีน/บิวทิลีน 85.7-87.7 wt% ที่มีความนิ่มคล้ายยาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำ ขณะที่ LLDPE เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่เป็นระเบียบ จึงสามารถรับแรงได้มากก่อนเกิดการเสียรูป สำหรับร้อยละการยืด ณ จุดขาด พบว่าฟิล์ม SEBS มีค่าต่ำกว่าฟิล์ม LLDPE เนื่องจากมีโครงสร้างของสไตรีนใน SEBS ทำหน้าที่เหมือนจุดเชื่อมโยงทางกายภาพ คล้ายโครงสร้างร่างแห ทำให้ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดต่ำ

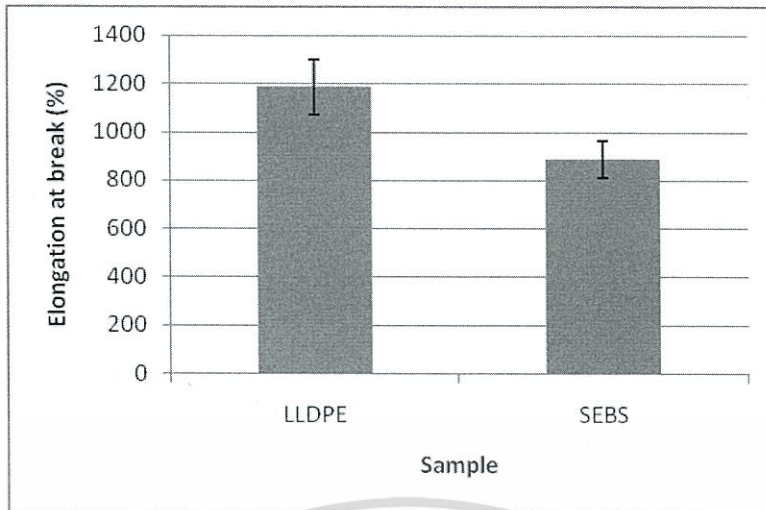


ภาพที่ 4.3 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE และ SEBS

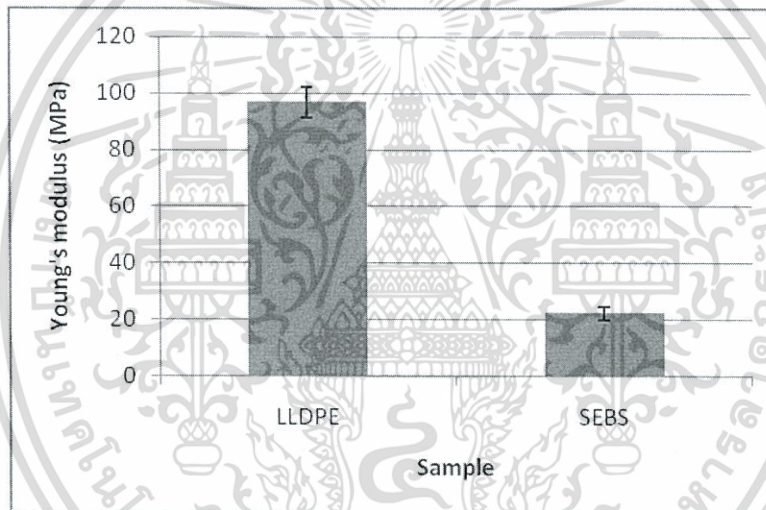


ภาพที่ 4.4 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE และ SEBS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE และ SEBS

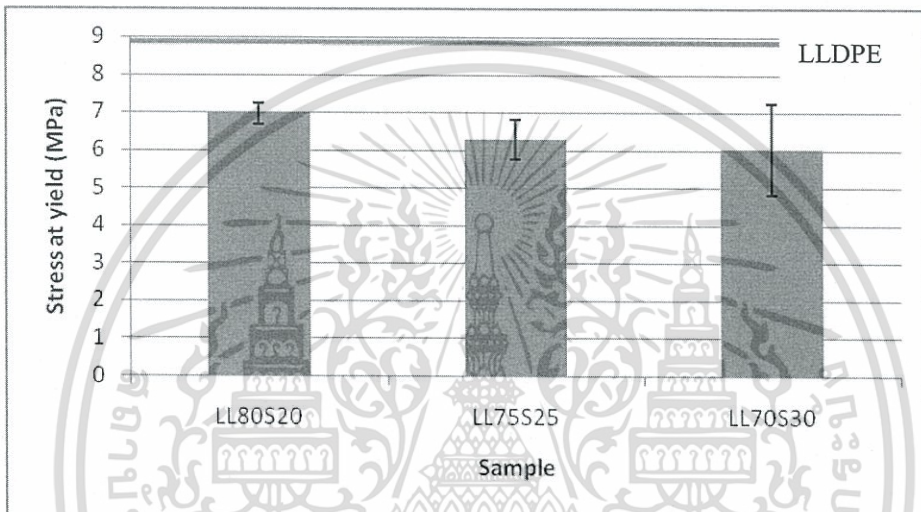


ภาพที่ 4.6 มอดุลัสของยังของฟิล์ม LLDPE และ SEBS

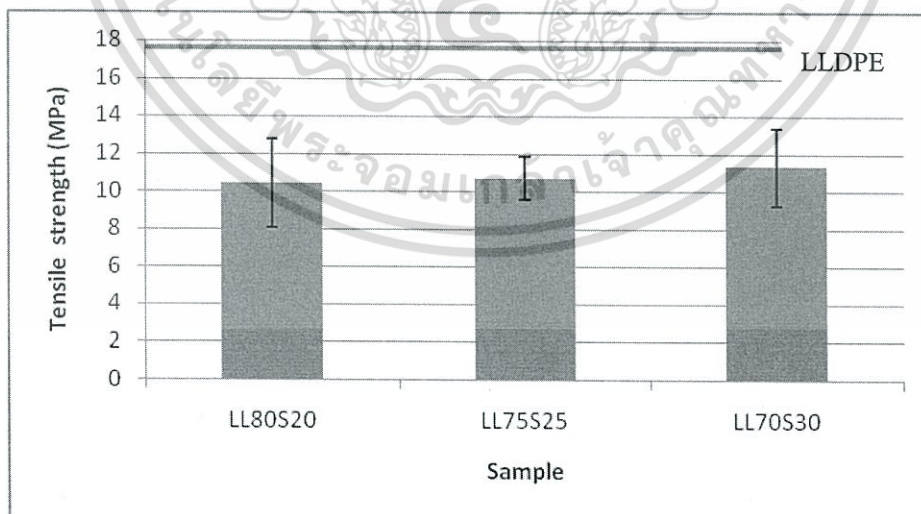
ภาพที่ 4.7-4.10 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่มีปริมาณ SEBS ต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า สมบัติเชิงกลมีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์หลักทั้งสองตัวคือ LLDPE และ SEBS เมื่อทำการเติม SEBS ทำให้ค่าสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก SEBS มีโครงสร้างเป็นอสัณฐานเข้าไปแทรกอยู่ใน LLDPE และ LLDPE มีสมบัติเชิงกลที่สูงกว่า ดังนั้นเมื่อทำการเติม SEBS ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำกว่า LLDPE ถ้าพิจารณาถึงการเพิ่มปริมาณ SEBS ในทางทฤษฎี การเพิ่มปริมาณ SEBS ทำให้ค่าความเค้น ณ จุดครากลดลง เนื่องจาก SEBS เป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่แทรกตัวอยู่ในวัฏภาค LLDPE จึงทำให้ความต่อเนื่องของวัฏภาค LLDPE ลดลง ดังนั้นแรงที่ใช้ในการเสียสภาพ ณ จุดครากจึงมีค่าลดลง ส่วนค่าความแข็งแรงดึงในทางทฤษฎีมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก SEBS เป็นวัฏภาคกระจายเมื่อได้รับแรงกระทำสโต-รินใน SEBS ซึ่งทำหน้าที่เหมือนจุดเชื่อมโยง ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถรับแรงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นก่อนขาด และจากผลการทดลอง เมื่อเพิ่มปริมาณ SEBS เป็น 20%, 25% และ 30% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดคราก (6-7 MPa) ไม่เปลี่ยนแปลง อาจเนื่องจากการผสมที่ไม่ดี มีความเข้ากันได้ต่ำระหว่างพอลิเมอร์ผสม LLDPE และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ SEBS ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดคราก ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (น้อยกว่า 1 MPa) เนื่องจาก SEBS เป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ซึ่งมีความนิ่มยืดหยุ่นคล้ายยาง ใน SEBS มีส่วนของเอทิลีน/บิวทิลีน 87 wt% จึงทำให้ค่ามอดุลัสของยังลดลง ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ SEBS เพราะขณะทำการดึงยืด SEBS ส่วนของเอทิลีน/บิวทิลีนสามารถเสียรูปเกิดเป็นทรงรีซึ่งช่วยในการกระจายแรง เปรอ์เซ็นการยืดตัวสูง

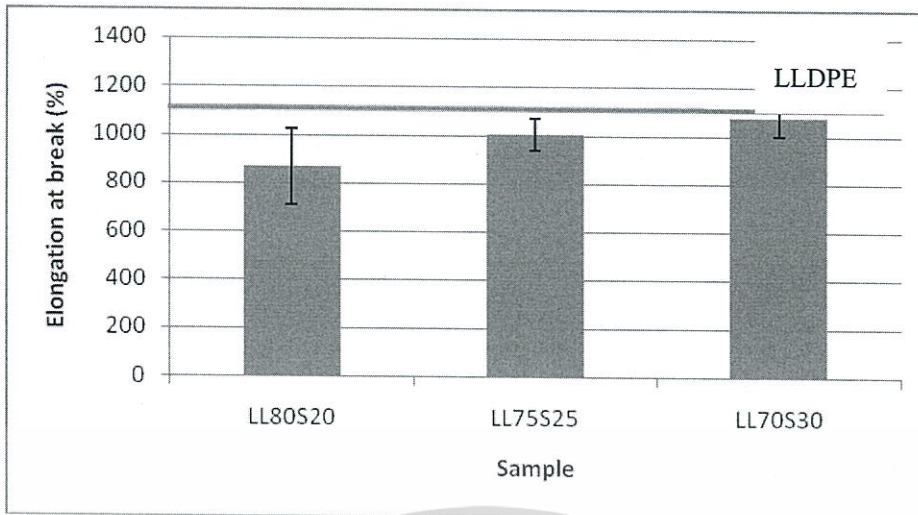


ภาพที่ 4.7 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ

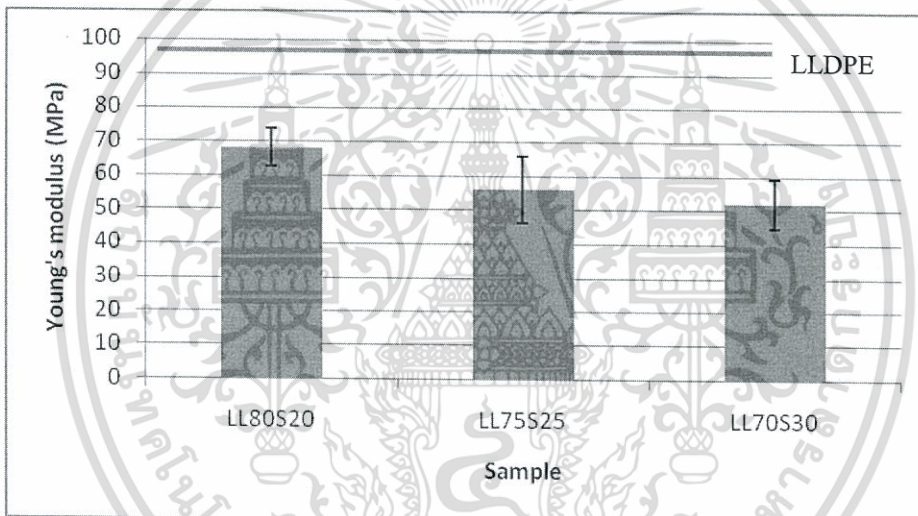


ภาพที่ 4.8 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



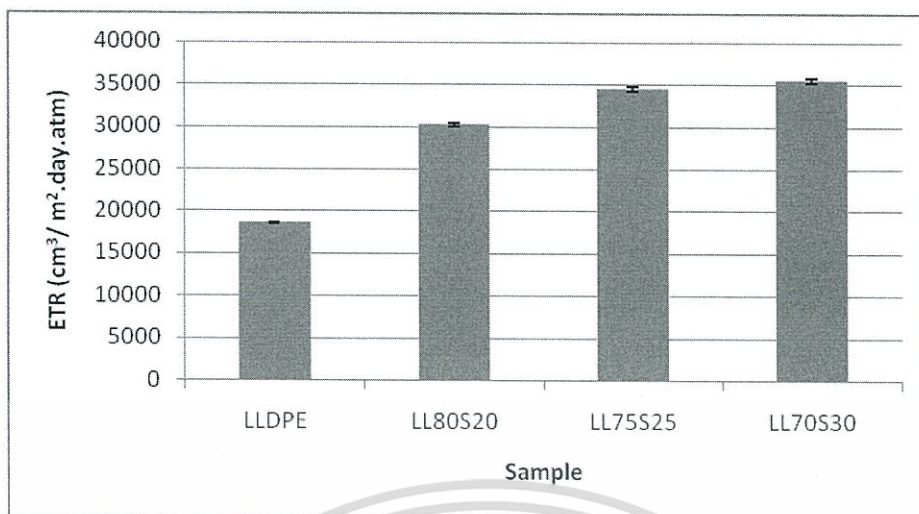
ภาพที่ 4.9 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ



ภาพที่ 4.10 โมดูลัสของยังของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ

#### 4.1.4 การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE/SEBS

จากภาพที่ 4.11 แสดงอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ พบว่าฟิล์ม LLDPE มีค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนต่ำ เพราะความเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกของ LLDPE จึงมีโครงสร้างที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ สายโซ่อยู่ชิดติดกัน ก๊าซเอทิลีนผ่านได้ในส่วนที่เป็นอสัณฐานของ LLDPE ส่วน SEBS มีโครงสร้างเป็น อสัณฐาน จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ มีปริมาตรอิสระสูง (Free volume) มีส่วนของเอทิลีน/บิวทิลีนที่มีความนิ่มทำให้ก๊าซเอทิลีนซึมผ่านได้ดี และเมื่อปริมาณของ SEBS เพิ่มขึ้น จึงมีส่วนที่เป็นอสัณฐานมากขึ้น และยังพบว่า การเติม SEBS ทำให้ความเป็นผลึกลดลง ส่วนที่เป็นอสัณฐานของ LLDPE เพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงขึ้น



ภาพที่ 4.11 อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ

#### 4.2 การศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์ต่อสมบัติของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite

นำพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วน 70/30 โดยใช้ SEBS Kraton® G1657 และนำมาผสมกับซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดแล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด จากนั้นนำฟิล์มมาทดสอบสมบัติต่างๆ

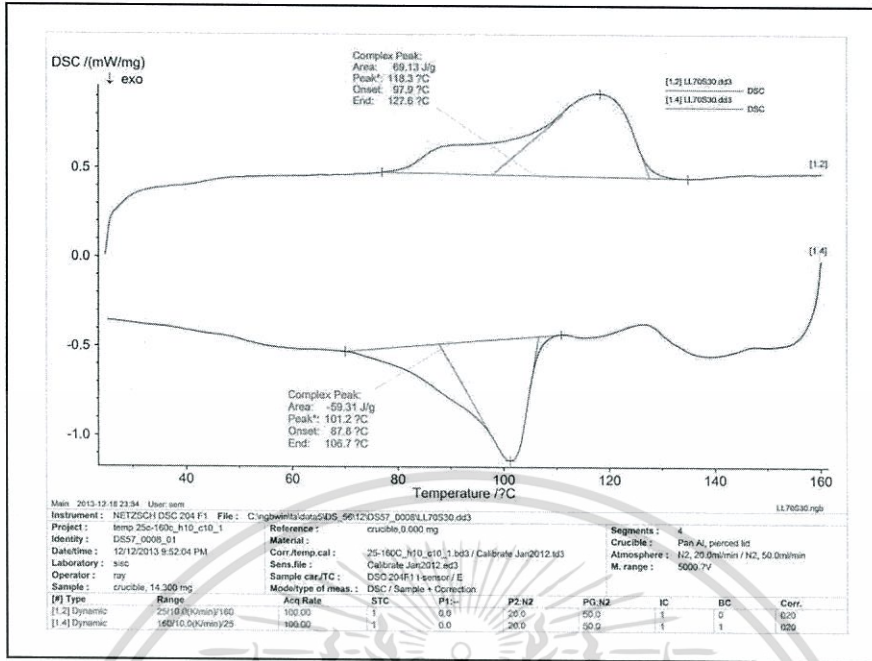
##### 4.2.1 พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5)

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5) ด้วย DSC แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2 พบว่าค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) และอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ของ LLDPE มีค่าใกล้เคียงกันในทุกสูตรฟิล์ม จากภาพที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าการเติมซีโอไลต์ (LL70S30Z5) ทำให้ LLDPE เกิดผลึกขนาดเท่าเดิม ( $T_m$  มีค่า 118-120 °C) และมีผลึกขนาดเล็ก เห็นได้จากการพบไหล่ฟีกที่กว้างขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรพอลิเมอร์ผสม LL70S30 จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมซีโอไลต์ ส่วนการเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์ไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของ LLDPE

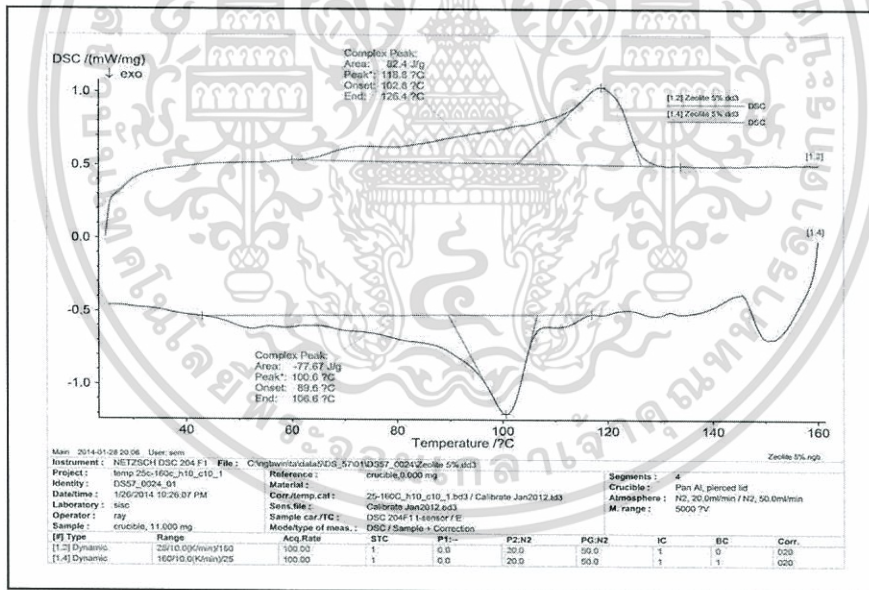
ตารางที่ 4.2  $T_m$ ,  $T_c$  และความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5)

สูตร	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	ความเป็นผลึก (%)
LL70S30	118	101	34
LL70S30Z5	118	101	40
LL70S30Z10	119	100	38
LL70S30Z15	120	101	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.12 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30



ภาพที่ 4.13 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z5

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร เพื่อหาปริมาณซีโอไลต์ที่มีอยู่จริงในสูตรพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5) ด้วยเครื่อง TGA แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 4.3 จากผลการทดลองพบว่า ซีโอไลต์ที่มีอยู่จริงในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณน้อยกว่าซีโอไลต์ที่เติม อาจเนื่องจากการผสมซึ่งมีสองขั้นตอนคือ ผสม LLDPE และซีโอไลต์ก่อน และมีการตักสารออกเพื่อเติม SEBS จึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ซีโอไลต์คลาดเคลื่อน และการผสมนี้อาจมีการกระจายตัวของซีโอไลต์ที่ไม่ดี อีกทั้งเมื่อทำการทดสอบโดยใช้เอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารในปริมาณน้อย (5-10 mg) จึงอาจทำให้ปริมาณซีโอไลต์ที่วิเคราะห์มีค่าคลาดเคลื่อนจากซีโอไลต์ที่มีอยู่จริง

ตารางที่ 4.3 ปริมาณซีโอไลต์ในฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5)

สูตร	Zeolite ที่เติม (%)	Zeolite ที่ได้จากการวิเคราะห์ (%)
LL70S30Z5	5	2.99
LL70S30Z10	10	7.38
LL70S30Z15	15	13.05

#### 4.2.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5)

สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ LLDPE/SEBS (ภาพที่ 4.14) ที่ไม่เติมและเติมซีโอไลต์ก่อนสกัดด้วยตัวทำละลายเทระไฮโดรฟوران โดยฟิล์ม LLDPE/SEBS มีผิวเรียบ ส่วนฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5) พบว่ามีอนุภาคทรงกลมสีขาวกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน ซึ่งคือ ซีโอไลต์ ZSM-5

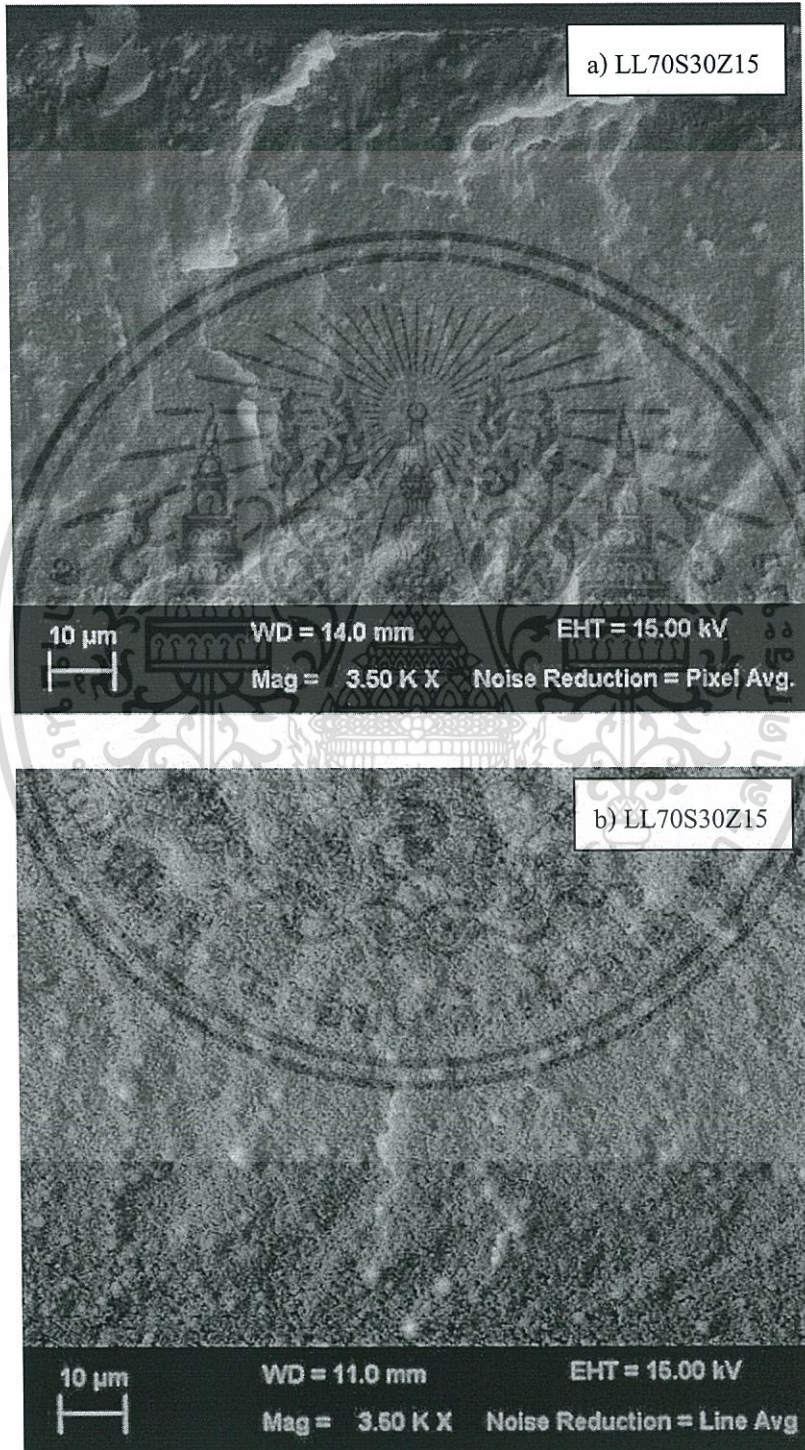


ภาพที่ 4.14 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LL70S30 และ LL70S30Z15 ก่อนสกัดด้วย THF ที่กำลังขยาย 3500 เท่า

จากภาพที่ 4.15 แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ LLDPE/SEBS ที่เติมซีโอไลต์ปริมาณ 15 wt% ก่อนและหลังสกัดด้วยตัวทำละลายเทระไฮโดรฟوران โดย LLDPE ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง โดยมี SEBS และซีโอไลต์ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคกระจาย หลังการสกัดพบว่ามีช่องว่างสีดำและอนุภาคทรงกลมสีขาว ซึ่งอนุภาคทรงกลมสีขาวน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับ LL70S30Z15 ก่อนสกัด เนื่องจากการสกัดส่งผลให้ซีโอไลต์บางส่วนถูกสกัดออกพร้อมกันกับวัฏภาค SEBS แสดงว่าซีโอไลต์กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของ LLDPE และ SEBS และจากภาพที่ 4.16 เมื่อปริมาณของซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ซีโอไลต์มีการกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าค่า  $T_g$  ของ SEBS เพิ่มขึ้น ซึ่งซีโอไลต์ ZSM-5 เกิดอันตรกิริยากับ SEBS ได้ดี [22] ทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น จึงเห็นวัฏภาคของ SEBS มีการกระจายตัวดี

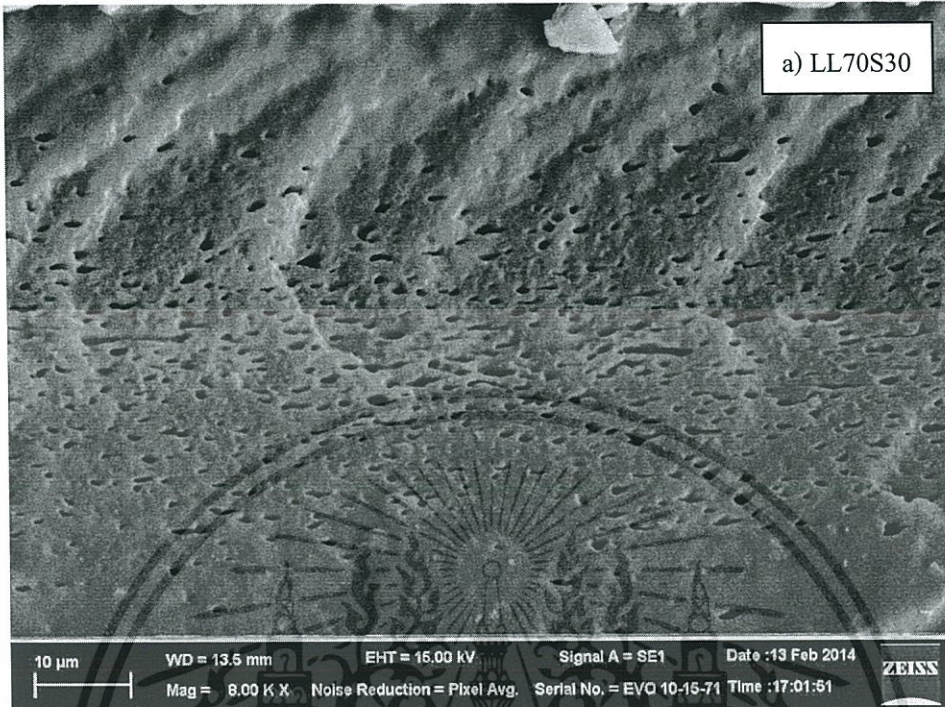
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้น และยังช่วยเพิ่มการยึดติดของวัสดุภาค SEBS กับซีโอไลต์ได้มากขึ้น เนื่องจากมีอนุภาคของแข็งอยู่ในระบบ เมื่อปริมาณซี-โอไลต์เพิ่มขึ้นพบว่ามีซีโอไลต์บางส่วนรวมกลุ่มกัน (Agglomerate) เนื่องจากซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) ซึ่งมีความเป็นขี้มากกว่า LLDPE และ SEBS

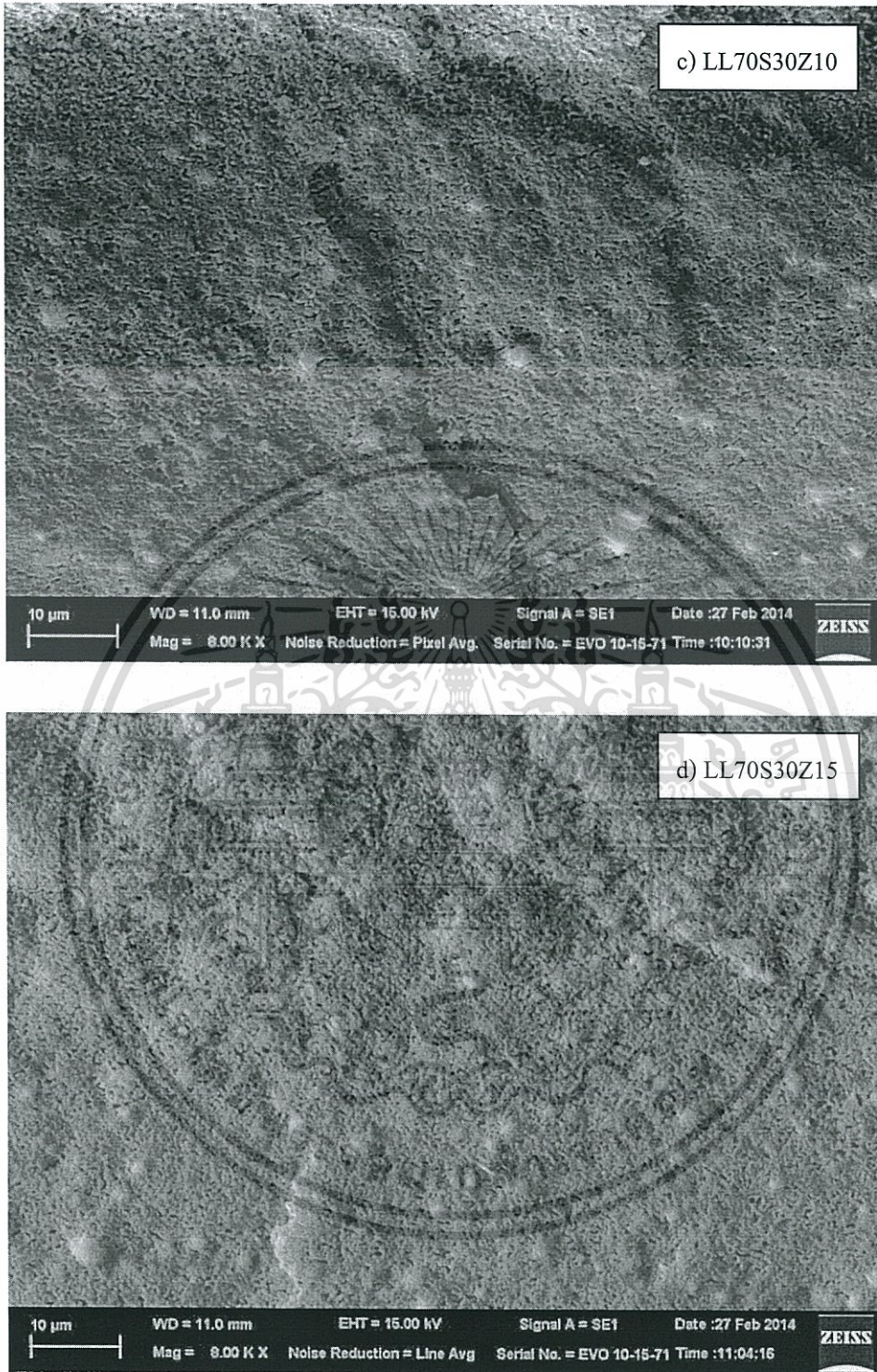


ภาพที่ 4.15 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LL70S30Z15 ก่อนและหลังสกัดด้วย THF ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังขยาย 3500 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

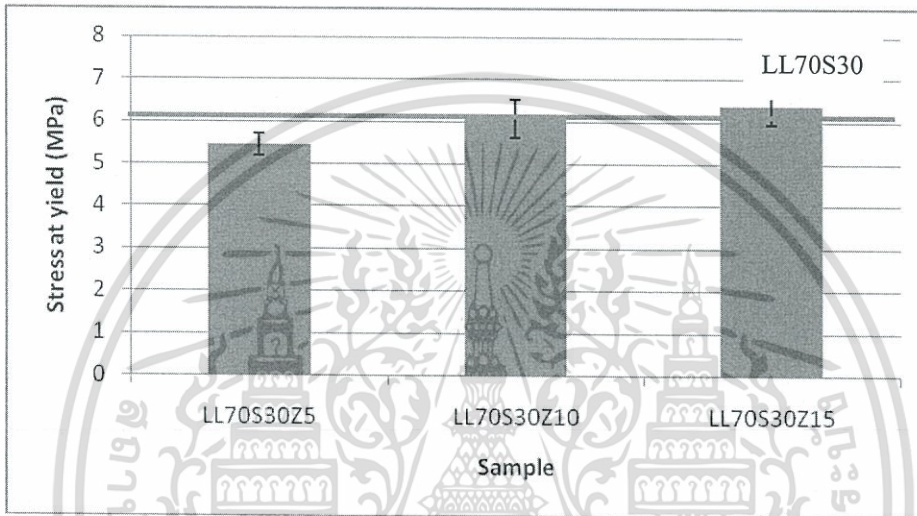


ภาพที่ 4.16 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ซีโอไลต์ปริมาณต่างๆ หลังสกัดด้วย THF ที่กำลังขยาย 8000 เท่า

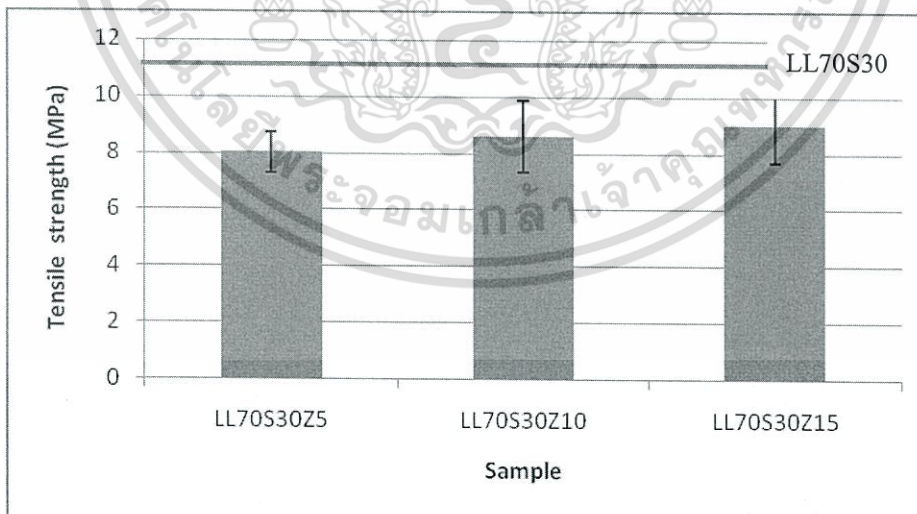
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5)

จากภาพที่ 4.17-4.20 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่มีปริมาณซี-โอไลต์ต่างๆ พบว่าฟิล์มที่มีซีโอไลต์ มีค่าความเค้น ณ จุดคราก ค่าความแข็งแรงดึง ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดต่ำ เนื่องจากซีโอไลต์เป็นอนุภาคของแข็งที่เกิดอันตรกิริยาได้ดีในระดับหนึ่งกับ LLDPE และ SEBS อย่างไรก็ตามอาจไม่แข็งแรงมากนัก เมื่อให้แรงดึงกับชิ้นงานสามารถเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งกับวัฏภาคของพอลิเมอร์ ส่วนค่ามอดุลัสของยัง โดยปกติการใส่อนุภาคของแข็งลงไปในพอลิเมอร์ผสม ทำให้มอดุลัสของยังเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่า มอดุลัสของยังลดลงเมื่อมีซีโอไลต์

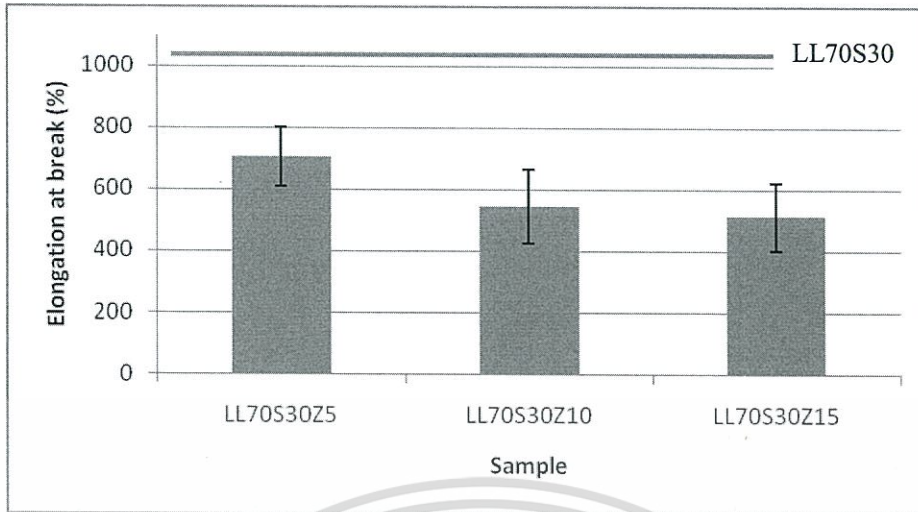


ภาพที่ 4.17 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ

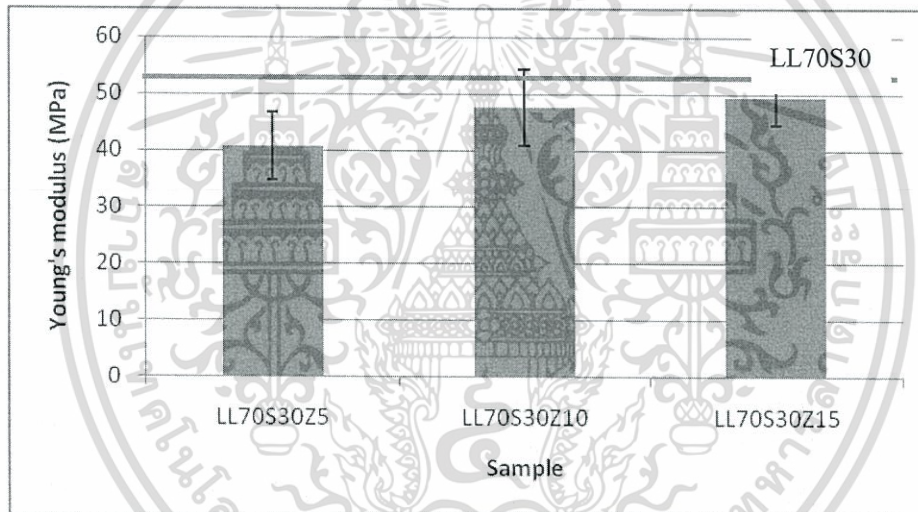


ภาพที่ 4.18 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.19 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโอไซด์ต่างๆ



ภาพที่ 4.20 มอดุลัสของยังของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโอไซด์ต่างๆ

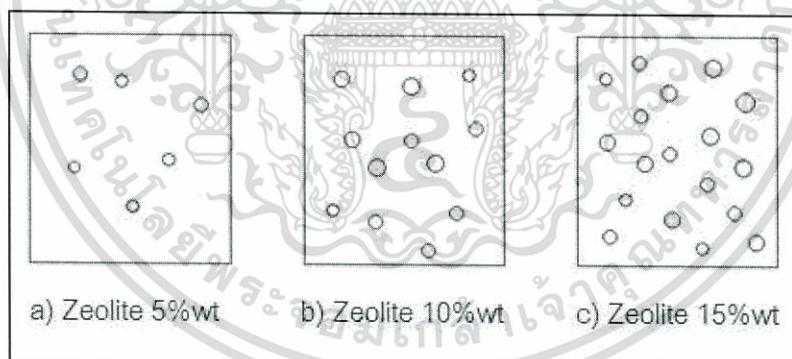
การเพิ่มปริมาณซีโอไซด์ 5-15 wt% ทำให้มอดุลัสของยังเพิ่มขึ้น เพราะมีอนุภาคของแข็งเพิ่มขึ้น และมีผลให้ร้อยละการยืด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากการเพิ่มจุดบกพร่องในชิ้นงานขณะรับแรงดึง อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดคราก มีค่าใกล้เคียงกัน ในทางทฤษฎี การเพิ่มปริมาณซีโอไซด์ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็ง เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไซด์เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) ทำให้ฟิล์มมีความแข็งมากขึ้น โดยซีโอไซด์สามารถก่อให้เกิดผลึกขนาดเล็กของ LLDPE ได้ ทำให้ค่าความเค้น ณ จุดครากและค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จากผลการทดลองพบว่า ค่าความเค้น ณ จุดครากและค่าความแข็งแรงดึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง อาจเนื่องจากการผสมยังไม่ดีพอ สืบเนื่องจากการมีอนุภาคของแข็งของซีโอไซด์ที่รวมเป็นกลุ่มก้อน (ภาพที่ 4.16) อย่างไรก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

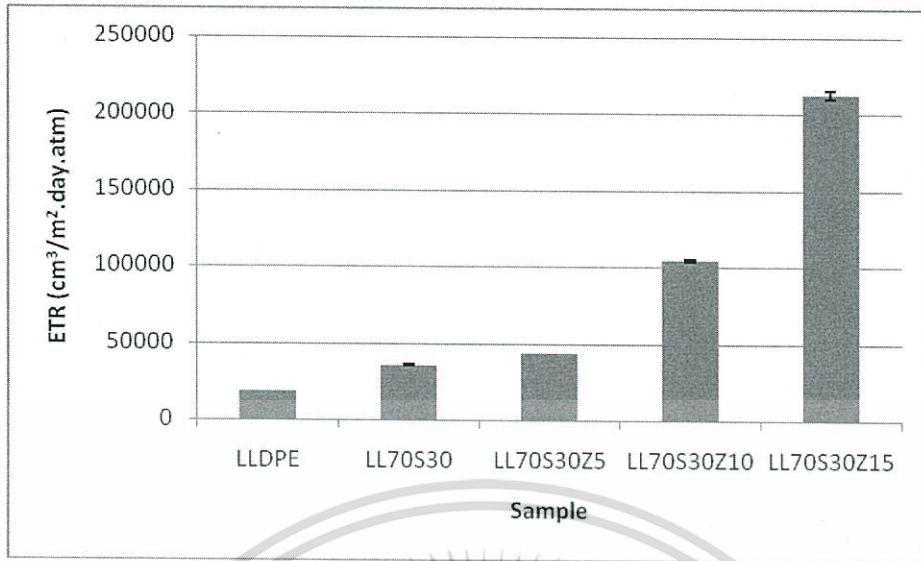
ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5) (8-9 MPa) ยังมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานอุตสาหกรรม (ไม่น้อยกว่า 7 MPa)

#### 4.2.4 การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5)

การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสามารถซึมผ่านในส่วนที่เป็นอสัณฐานได้ดี เนื่องจากการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ มีปริมาตรอิสระ และเมื่อเติมซีโอไลต์ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น จึงขัดขวางการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน แต่เนื่องจากซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ขนาดความกว้างของหน้าต่าง 5.5 Å (0.55 nm) ซึ่งก๊าซเอทิลีนมีขนาดเชิงจลนศาสตร์ (Kinetic diameter) 0.39 nm [24] รูพรุนของซีโอไลต์จึงยอมให้ก๊าซเอทิลีนซึมผ่านได้ จากภาพที่ 4.22 แสดงอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ พบว่าฟิล์ม LLDPE/SEBS มีค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนต่ำกว่าฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่เติมซีโอไลต์ และเมื่อมีปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ทำให้มีโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากขึ้น (ภาพที่ 4.21) นอกจากนี้ซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็น Channel structure ซึ่งมีความต่อเนื่องของรูพรุน โดยก๊าซเอทิลีนสามารถซึมผ่านในส่วนของรูพรุนได้ดี และก๊าซเอทิลีนยังสามารถซึมผ่านในส่วนที่เป็นรอยต่อระหว่างภูมิภาคของซีโอไลต์กับพอลิเมอร์ ส่งผลให้ค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มปริมาณซีโอไลต์เป็น 10-15 wt% ยังช่วยเพิ่มรอยต่อระหว่างภูมิภาคและมีรูพรุนเพิ่มขึ้น เห็นได้จากค่า ETR เพิ่มขึ้น จาก 5 wt% ( $43,382 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$ ) เป็น 2 และ 5 เท่า ตามลำดับ คือ เมื่อเติมซีโอไลต์ 10 wt% ค่า ETR เท่ากับ  $104,021 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$  และเมื่อเติมซีโอไลต์ 15 wt% ค่า ETR เท่ากับ  $212,581 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$



ภาพที่ 4.21 แบบจำลองการกระจายตัวของซีโอไลต์ที่ปริมาณต่างๆ ในฟิล์ม LLDPE/SEBS



ภาพที่ 4.22 อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของการเติม SEBS Kraton® G1657 ลงในฟิล์ม พบว่าการเพิ่มปริมาณ SEBS ทำให้ได้ฟิล์มมีค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดคราก (6-7 MPa) มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่ามอดูลัสของยังลดลง และความเป็นผลึกลดลงเนื่องจากมีวัฏภาคอสัณฐาน (SEBS) เข้ามาแทรกตัวกับวัฏภาคกึ่งผลึก (LLDPE) จากสัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ SEBS ขนาดวัฏภาคของ SEBS มีแนวโน้มที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จากทรงกลมกลายเป็นทรงรีซึ่งมีความต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความต่อเนื่องของวัฏภาค อสัณฐานสูง ก๊าซเอทิลีนจึงสามารถซึมผ่านฟิล์มได้มากขึ้น

การเพิ่มการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LL70S30 โดยการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ในปริมาณ 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก พบว่าการเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ ส่งผลให้ LLDPE เกิดผลึกขนาดเท่าเดิม และมีผลึกขนาดเล็ก ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของ LLDPE และจากสัณฐานวิทยาพบว่าซีโอไลต์มีการกระจายตัวอยู่ทั้งในวัฏภาคของ LLDPE และ SEBS โดยพบว่าซีโอไลต์บางส่วนรวมกลุ่มกันเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ และฟิล์มมีค่าความเค้น ณ จุดครากและค่าความแข็งแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าค่าสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้มีค่าต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LL70S30 (11 MPa) แต่มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานอุตสาหกรรมเลขที่ มอก. 1027-2553 (7 MPa) และเมื่อทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนพบว่าฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 15 wt% สามารถเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนได้  $212,581 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$  เพราะซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่มีขนาดของหน้าตัดใหญ่กว่าขนาดของก๊าซเอทิลีน และมีโครงสร้างรูพรุนที่เชื่อมต่อกัน (Channel structure)

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

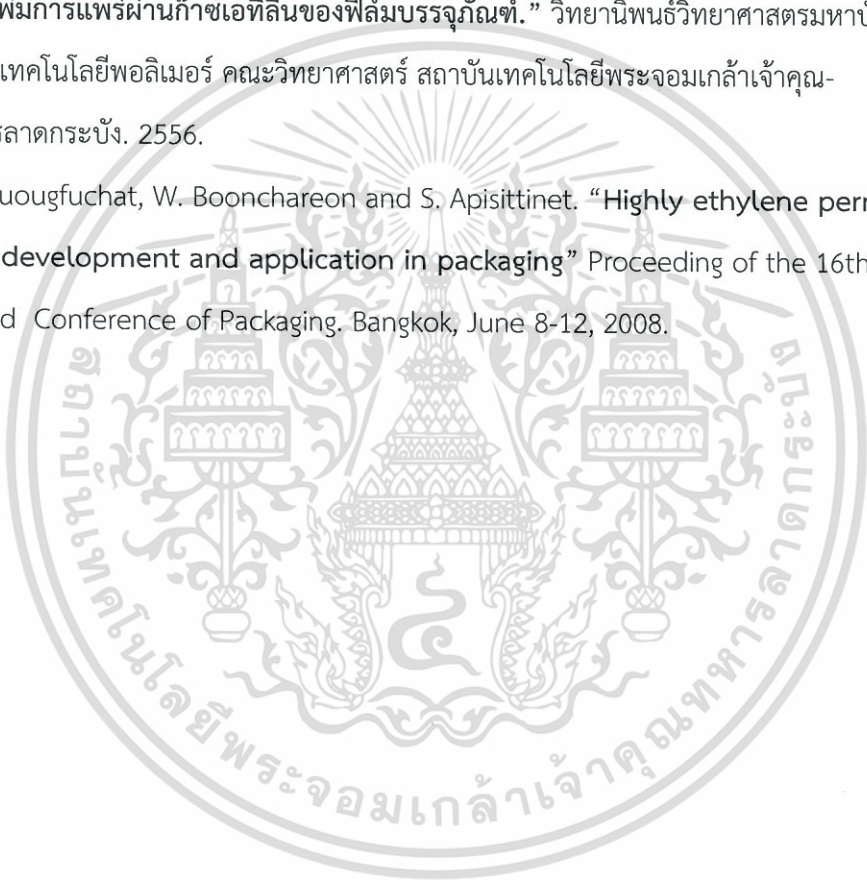
1. เลือกสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย SEBS ในปริมาณมากและสามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในเชิงพาณิชย์ โดยฟิล์มบรรจุภัณฑ์นี้ใช้ในการบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อก๊าซเอทิลีนและมีอายุการเก็บรักษาสั้น เช่น กล้วย มะม่วง มะเขือเทศ เป็นต้น
2. เลือกพอลิเมอร์ที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่องให้มีความเป็นผลึกต่ำ เพื่อให้ก๊าซเอทิลีนสามารถซึมผ่านได้ดีขึ้น
3. ศึกษาการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไอน้ำ เพื่อดูความเป็นไปได้ในการพัฒนาเป็นฟิล์มในเชิงพาณิชย์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชัย. “บรรจุภัณฑ์ฉลาด นวัตกรรมยืดอายุผักผลไม้.” [Online]. Available:[http://www.mtec.or.th/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1389&Itemid=176](http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=1389&Itemid=176). 2556.
- [2] K. Venkatachalam and M. Meenune. “Physical and chemical quality changes of longkong (*Aglaia dookoo*Griff.) during passive modified atmospheric storage.” *International Food Research Journal* 19(3): 795-800 (2012).
- [3] ปุ่น คงเจริญเกียรติ และสมพร คงเจริญเกียรติ. “บรรจุภัณฑ์อาหาร.” [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/knowledge/content/101>. 2541.
- [4] James, D.E. “Linear Low Density Polyethylene.” *Wiley-Interscience. Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*. 6 (1986) 429-454.
- [5] สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดลำปาง. “การเปลี่ยนแปลงในพืชผักผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว.” [Online]. Available: <http://www.korsorlampang.com/?name=knowledge&file=readknowledge&id=164>. 2556.
- [6] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนাপนนท์. “การเปลี่ยนแปลงของผักผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว.” [Online]. Available:<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3369>. 2556.
- [7] วาสนา แก้วหุ้ง. “สมการการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน.” [Online]. Available: <http://www.wasana.net16.net/p6.html>. 2556.
- [8] สังคม เตชะวงศ์เสถียร. “สรีรวิทยาการสุกของผล (Physiology of Fruit Ripening).” *ภาควิชาภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น*. หน้า 25-32. 2535.
- [9] พีรเดช ทองอำไพ. “เอทิลีนกับการสุกของผลไม้.” [Online]. Available: <http://www.komchadluek.net/detail/20120625/133598>. 2556.
- [10] มหาลัยสงขลานครินทร์. “กระบวนการเมมเบรน.” [Online]. Available: [http://kb.psu.ac.thpsukbbitstream255329418270056\\_ch1.pdf](http://kb.psu.ac.thpsukbbitstream255329418270056_ch1.pdf). 2556.
- [11] มกรา ทัพพุน, ผึ้งผาย พรรณวดี และเมตตา เจริญพานิช. “แอกติวิตีของเหล็กบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่เตรียมจากเถ้าลอยลิกไนต์ในการเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของก๊าซ

- คาร์บอนไดออกไซด์.” ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2556.
- [12] เฉลิมชัย วงศ์วัฒนชะ .“ฮอร์โมนที่เกี่ยวข้องกับพืช.” [Online]. Available: <http://mylesson.swu.ac.th/bi456/Plant%20hormone/Index/Index%20first.html>. 2556.
- [13] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ฝ่ายเทคโนโลยีอาหาร. “การสุกของผลไม้.” [Online]. Available : [http://www.tistr-foodprocess.net/Fruit/fruit\\_home/fruit\\_home2.html#top](http://www.tistr-foodprocess.net/Fruit/fruit_home/fruit_home2.html#top). 2556.
- [14] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. “บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ.” [Online]. Available: [http://www.mtec.or.th/index.php?option=com\\_content&task=view&id=84&Itemid=36](http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=84&Itemid=36). 2556.
- [15] มหาวิทยาลัยศิลปากร. “การศึกษาสมบัติการกระจายตัวของวัสดุคอมโพสิต.” [Online]. Available:[http://www.universalpolymer.com/images/introc\\_1247455897/Local%20Resin%20Comparison.pdf](http://www.universalpolymer.com/images/introc_1247455897/Local%20Resin%20Comparison.pdf). 2556.
- [16] นเรนทร์ อาศัยพานิชย์. “การพัฒนาเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2550.
- [17] รัตน์ อุปชาภัย และนาดยา วัฒนพงษ์ “การสังเคราะห์ซีโอไลต์.” [Online]. Available: <http://chem.flas.kps.ku.ac.th/01403443/01403443-REPORT-SYNTHESIS-ZEOLITE.pdf>. 2556.
- [18] ดลพร ชูเกียรติสกุล, นันทพร เสรีประชารัตน์ และสุนีย์ นาทะคำ. “การแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.” วิทยานิพนธ์ (วศ.บ.(วิศวกรรมเคมี)) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [19] มกรา ทัพพุน, ผึ้งผาย พรรณวุฒิ และเมตตา เจริญพานิช. “แอกติวิตีของเหล็กบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่เตรียมจากเถ้าลอยลิกไนต์ในการเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.” ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2556.
- [20] กฤษณา ชูติมา. “เอทิลีน ฮอร์โมนพืช” วารสารราชบัณฑิตยสถาน. 3 (2537) 69-78.

- [21] วรรมณี ฉินศิริกุล และอศิรา เพ็องฟูชาติ. “Science and technology of modified atmosphere packaging.” [Online]. Available:<http://www.foodscience.afisc.csiro.au/actpac-text.htm>. 2556.
- [22] P. Monprasit. “Study of Ethylene Gas Permeability of SEBS/LDPE Double-layered Zeolite Composite.” M.Sc. in Polymer Technology. Thesis of King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang. 2009.
- [23] รุจิเรข วิวัฒนานุกูล. “การศึกษาพอลิเมอร์ผสมของแอลแอลดีพีอี/เอสอีบีเอส เพื่อเพิ่มการแพร่ผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [24] A. Fuougfuchat, W. Boonchareon and S. Apisittinet. “Highly ethylene permeable film:development and application in packaging” Proceeding of the 16th IAPRI World Conference of Packaging. Bangkok, June 8-12, 2008.





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## การคำนวณ

## ก.1 ความเป็นผลึก (% Crystallinity)

ตัวอย่าง	% LLDPE ที่มีในฟิล์มตัวอย่าง	$\Delta H_f$ (J/g)
LLDPE	100	117.9
LL80S20	80	84.89
LL75S25	75	74.9
LL70S30	70	69.13
LL70S30Z5	66.5	82.4
LL70S30Z10	66.5	79.18
LL70S30Z15	66.5	75.95

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

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{\% \text{LLDPE in film}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์มตัวอย่าง

$$= \frac{117.9}{293} \times \frac{100}{100} \times 100$$

$$= 40.2 \%$$

## ก.2 การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน (ฟิล์ม LLDPE)

พื้นที่ของก๊าซเอทิลีนมาตรฐานที่ความเข้มข้น 589 ppm ( $A_s$ ) 14765 count

พื้นที่ของก๊าซเอทิลีนที่ซึมผ่าน (Permeate) ( $A_p$ ) 27185.67 count

$$\text{ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่ซึมผ่าน} = \frac{589}{14765} \times 27185.67$$

$$= 1084.517 \text{ ppm or } \mu\text{L/L}$$

$$= 1.0845 \text{ mL/L}$$

อัตราการไหลของก๊าซ ( $F_x$ ) = 30.0 mL/min

$$\text{อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนต่อเวลา (J)} = 1.0845 \text{ mL/L} \times 30.00 \text{ mL/min}$$

$$= 32.5355 \text{ mL} \times \text{mL/L} \times \text{min}$$

$$= 0.003253 \text{ mL/min}$$

พื้นที่ของฟิล์มตัวอย่าง ( $A_f$ ) = 0.0025 m<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

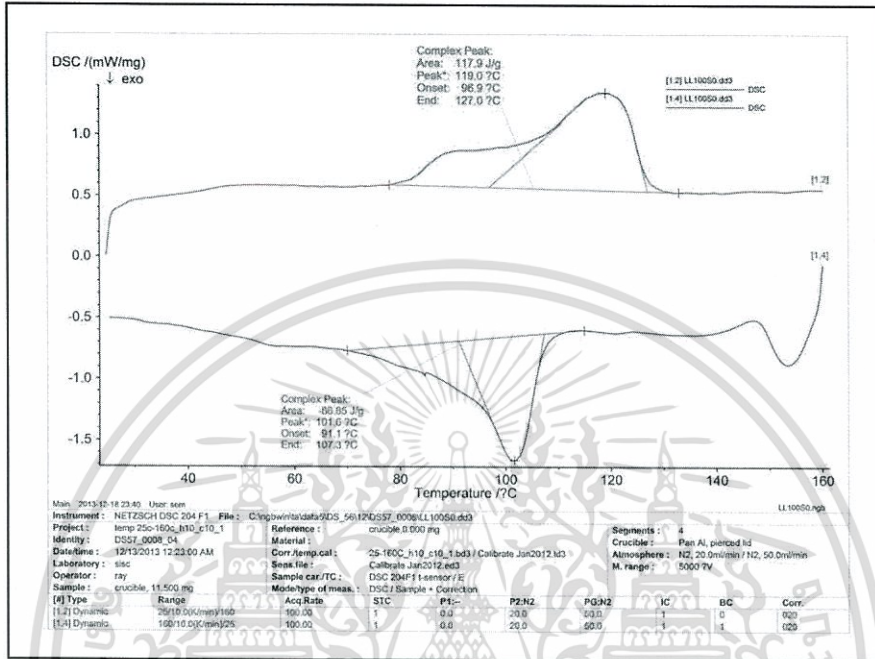
$$\begin{aligned}
 \text{ความหนาของฟิล์ม } (\Delta x) &= 0.055 \text{ mm} \\
 \text{ฟลักซ์ของก๊าซเอทิลีน (Flux)} &= J / A_F \\
 &= 0.003253 / 0.0025 \\
 &= 13.0142 \text{ ml/min. m}^2 \\
 &= 18740.4614 \text{ cm}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{day} \\
 \text{อัตราเร็วการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน (ETR)} &= J / (A_F \times \Delta p) \\
 &= \frac{18740.4614}{1.01} \\
 &= 18554.9 \text{ cm}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm} \\
 \text{การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน (EP)} &= (J \times \Delta x) / (A_F \times \Delta p) \\
 &= \text{ETR} \times \text{ความหนาของฟิล์ม} \\
 &= 18554.9 \times 0.055 \\
 &= 1020.52 \text{ cm}^3 \cdot \text{mm} / \text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}
 \end{aligned}$$



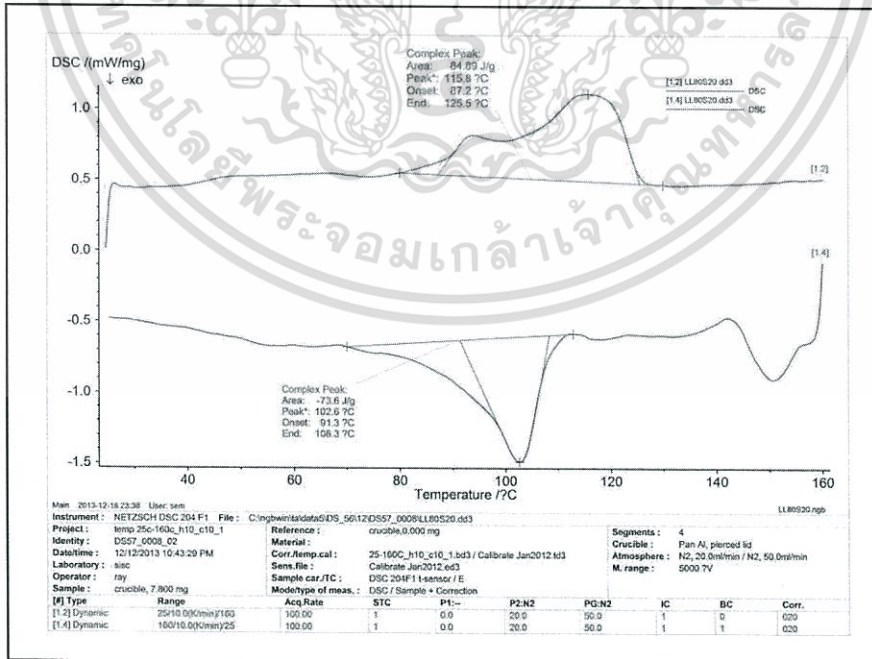
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เทอร์โมแกรม DSC

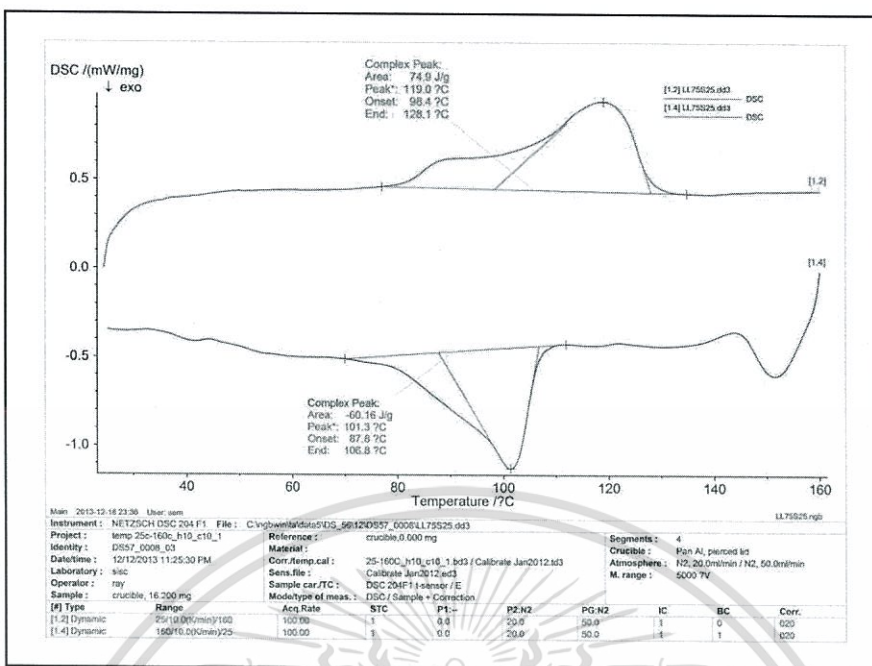


ภาพที่ ข.1 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LLDPE

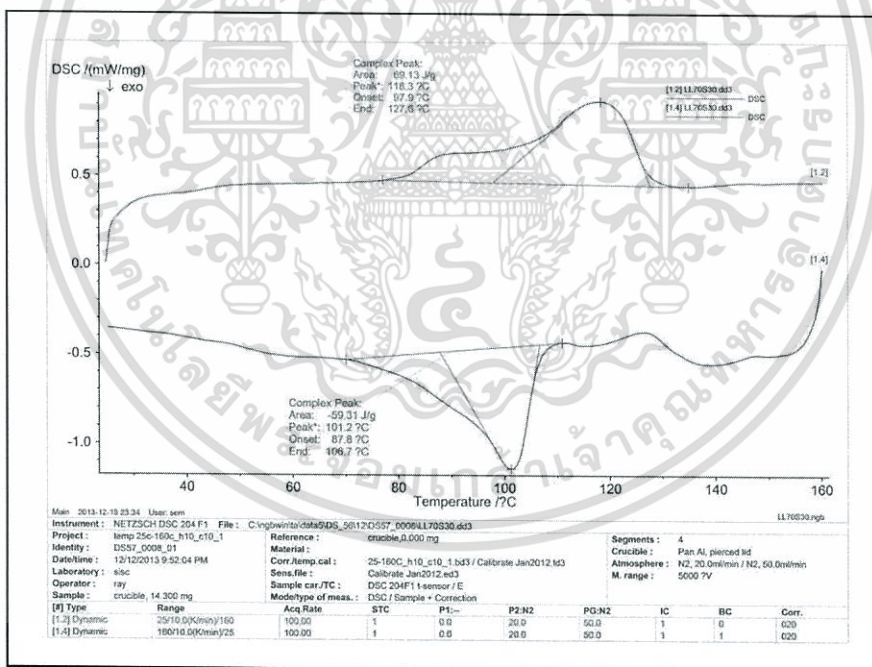


ภาพที่ ข.2 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL80S20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

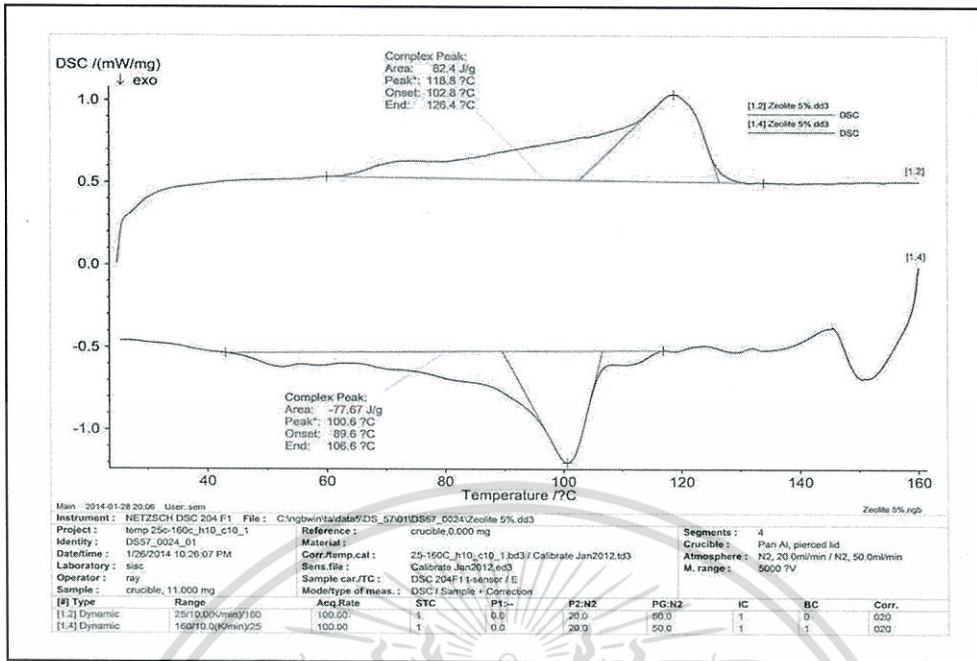


ภาพที่ ข.3 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL75S25

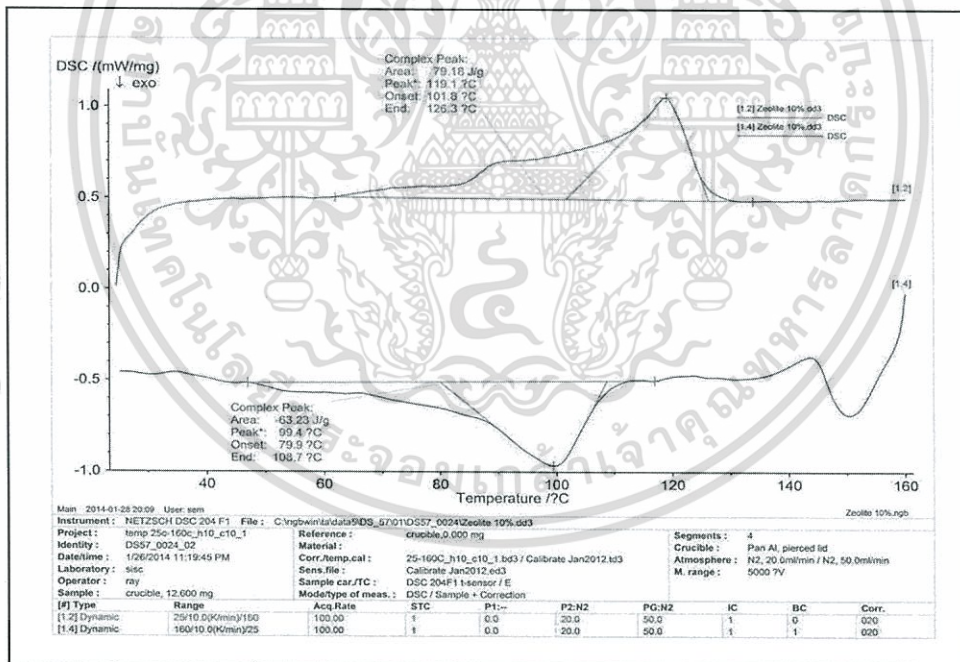


ภาพที่ ข.4 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

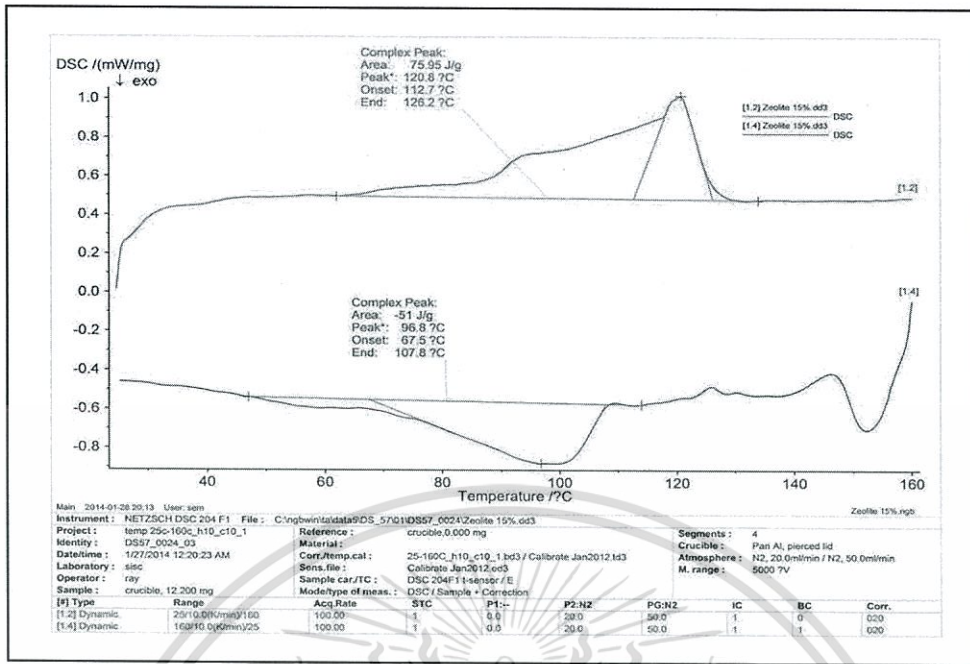


ภาพที่ ข.5 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z5



ภาพที่ ข.6 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



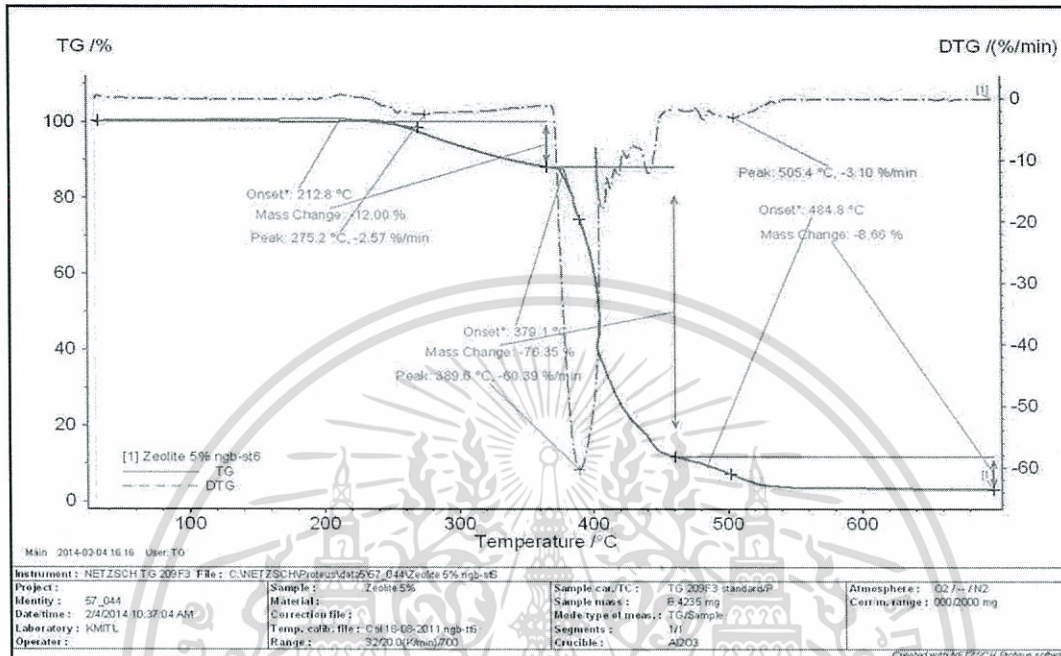
ภาพที่ ข.7 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z15



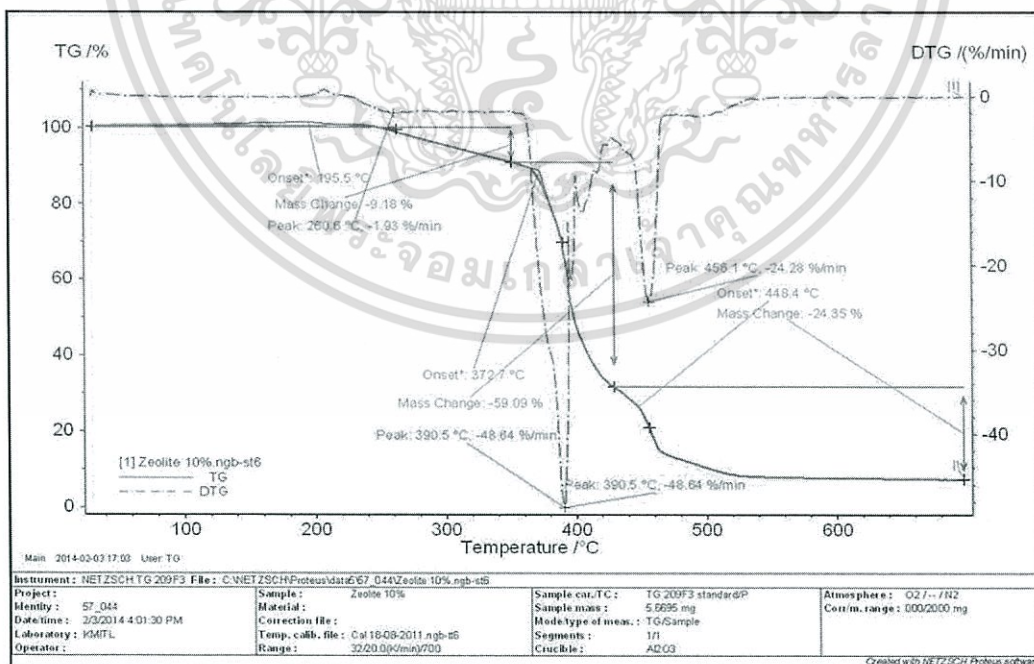
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เทอร์โมแกรม TGA

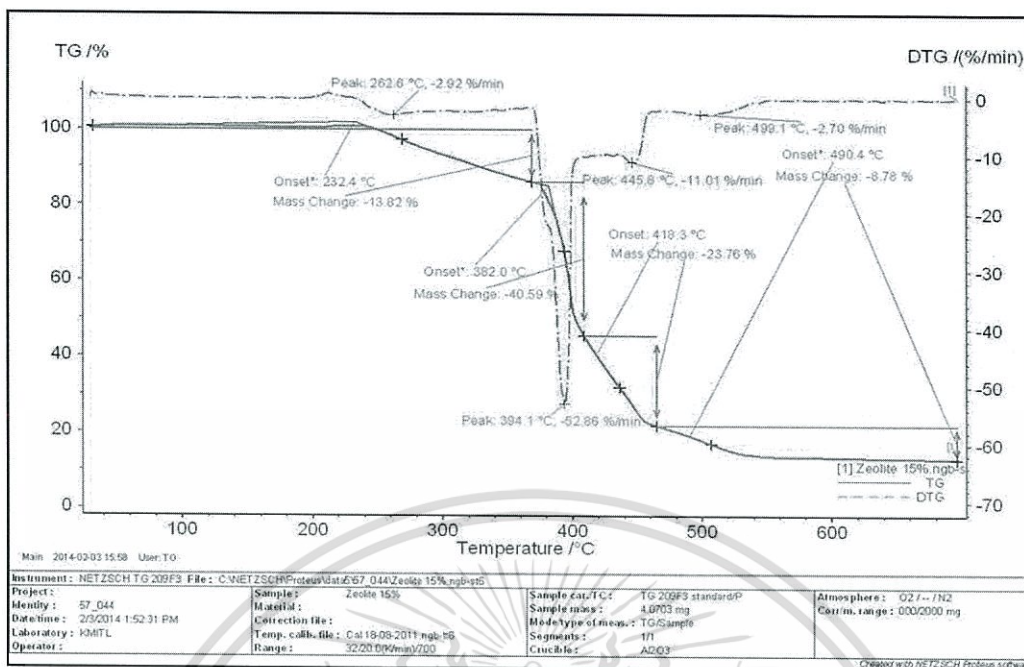


ภาพที่ ค.1 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z5



ภาพที่ ค.2 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

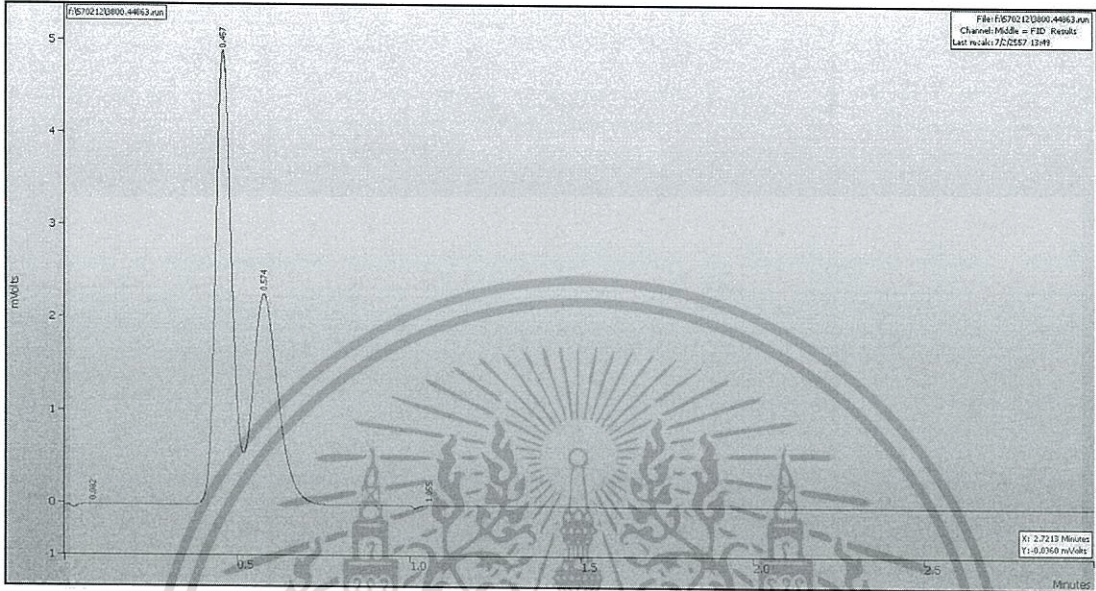


ภาพที่ ค.3 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

## โครมาโทแกรม

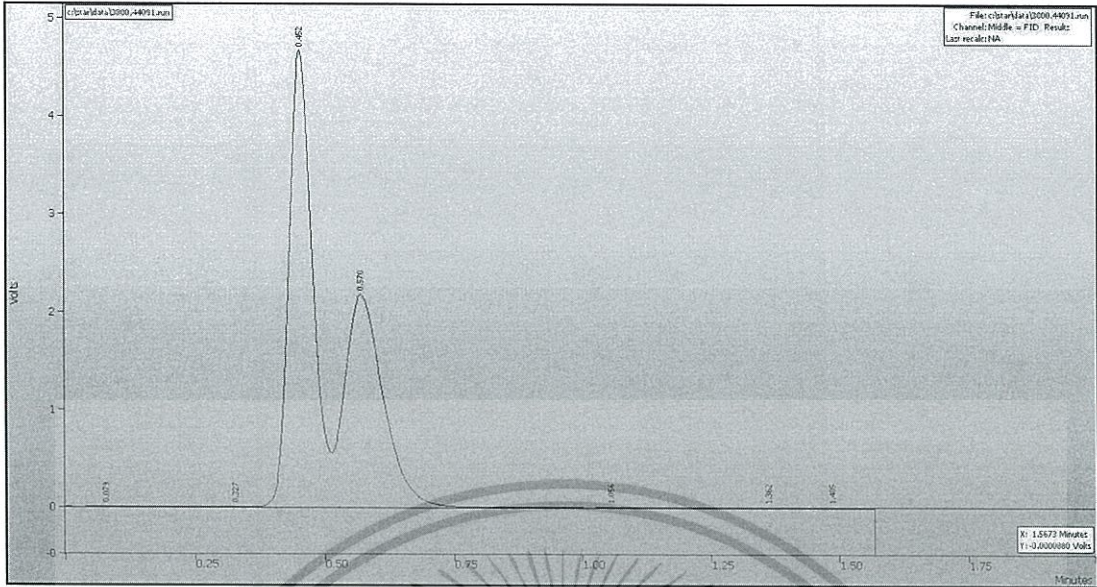


ภาพที่ ง.1 โครมาโทแกรมของฟิล์ม LLDPE



ภาพที่ ง.2 โครมาโทแกรมของฟิล์ม LL70S30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ง.3 โครมาโทแกรมของฟิล์ม LL70S30Z15



ภาพที่ ง.4 โครมาโทแกรมของก๊าซเอทิลีนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

## สมบัติเชิงกล

จ.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มตัวอย่างในอัตราส่วนต่างๆ

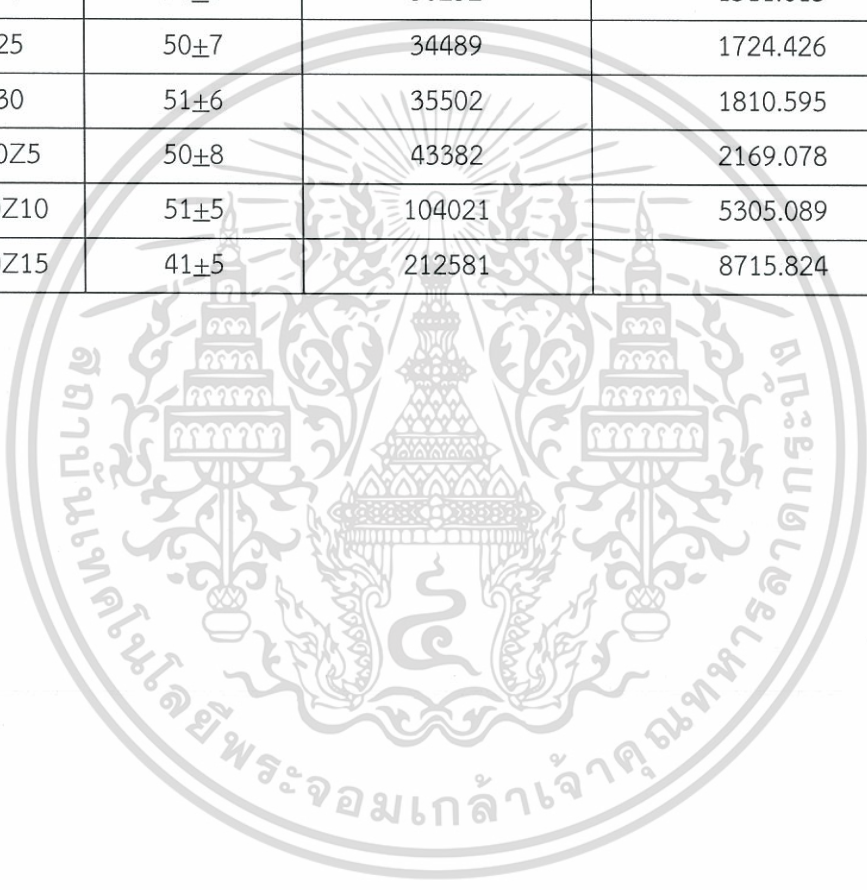
ตัวอย่าง	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ความเค้น ณ จุดคราก (MPa)	ความ แข็งแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
LLDPE	80 $\pm$ 5	8.8 $\pm$ 0.4	17.6 $\pm$ 1.4	1186 $\pm$ 114	96.7 $\pm$ 5.3
SEBS G1657	78 $\pm$ 4	0.7 $\pm$ 0.0	4.1 $\pm$ 0.7	855 $\pm$ 76	22.3 $\pm$ 2.4
LL80S20	81 $\pm$ 4	7.0 $\pm$ 0.3	10.4 $\pm$ 2.3	868 $\pm$ 156	68.2 $\pm$ 5.6
LL75S25	82 $\pm$ 4	6.3 $\pm$ 0.5	10.7 $\pm$ 1.2	1003 $\pm$ 67	56.1 $\pm$ 9.7
LL70S30	79 $\pm$ 5	6.0 $\pm$ 1.2	11.3 $\pm$ 2.1	1076 $\pm$ 76	52.0 $\pm$ 7.2
LL70S30Z5	84 $\pm$ 4	5.4 $\pm$ 0.3	8.0 $\pm$ 0.7	705 $\pm$ 97	40.7 $\pm$ 6.0
LL70S30Z10	83 $\pm$ 5	6.1 $\pm$ 0.5	8.6 $\pm$ 1.3	546 $\pm$ 120	47.7 $\pm$ 6.7
LL70S30Z15	83 $\pm$ 5	6.4 $\pm$ 0.4	9.0 $\pm$ 1.3	512 $\pm$ 109	49.4 $\pm$ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การซึมผ่านก๊าซเอทิลีน

ฉ.1 อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ETR ( $\text{cm}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$ )	EP ( $\text{cm}^3 \cdot \text{mm} / \text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$ )
LLDPE	55 $\pm$ 9	18555	1020.52
LL80S20	50 $\pm$ 5	30232	1511.615
LL75S25	50 $\pm$ 7	34489	1724.426
LL70S30	51 $\pm$ 6	35502	1810.595
LL70S30Z5	50 $\pm$ 8	43382	2169.078
LL70S30Z10	51 $\pm$ 5	104021	5305.089
LL70S30Z15	41 $\pm$ 5	212581	8715.824



## ภาคผนวก ข

## สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย

ตารางที่ จ.1 สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร: ค่าจ้างชั่วคราว			
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	-	-	-
ค่าใช้สอย	31,000.00	24,320.00	6,680
ค่าวัสดุ	19,000.00	25,718.12	(-6,718.12)
ค่าสาธารณูปโภค			
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์			
รวม	50,000.00	50,038.12	-38.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นางสาวชลลดา ฤทธิวิรุฬห์

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ. เคมี	เคมี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2535
M.Sc.	Polymer science and Technology	UMIST, U.K	2538
Ph.D.	Polymer science and Technology	UMIST, U.K	2542

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) .....Packaging films and photo degradable films.....

### ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2549	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	บริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด
2551	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	ศูนย์โลหะและวัสดุแห่งชาติ
2551	ทุนฝึกอบรม	รัฐบาลญี่ปุ่น หลักสูตร Technical Support for SME Promotion (Plastics Technology)
2553	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	บริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด
2554	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	บริษัทไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน)
2555	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2557	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2558	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2558	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2559	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2560	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2560	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Patents

1. Tawan Sooknoi, Chonlada Ritvirulh and Asira Fuongfuchat. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. Japanese Patent no. 5914477. April 2016.
2. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. Austratian Patent no. 2011293914. December 2014.
3. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. New Zealand Patent no. 606351. September 2014.
4. Tawan Sooknoi, Chonlada Ritvirulh, Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul and Phatchareeya Raksa. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. United States Patent no. 8697777B2. April 2014.
5. Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. European Patent no. 11760880.2-1302. March 2013.
6. Tawan Sooknoi, Chonlada Ritvirulh, Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul and Phatchareeya Raksa. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. PCT Patent no. WO 2012/026893 A1. March 2012.
6. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for plastic film with high ethylene transmission rate and permeation and plastic film prepared from this master batch. Thai patent no. 1001001199. August 2010.
7. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Plastic film with high ethylene transmission rate for prolonging shelf life of fresh produces. Thai patent no. 0801001835. April 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Asira Fuongfuchat, Dounporn Sirikittikul, Warintorn Booncharoen, Phatchareeya Raksa, Chonlada Ritvirulh and Tawan Sooknoi, Hydrophobic Zeolite-Filled Polymeric Films with High Ethylene Permselectivity for Fresh Produce Packaging Applications, *Packag. Technol. Sci.*, Volume 27, Issue 10 (2014) 763-773. (Impact factor 2014: 1.584)
2. P. Monprasit, C. Ritvirulh, T. Sooknoi, S. Rukchonlatee, A. Fuongfuchart and D. Sirikittikul, Selective ethylene permeable zeolite composite double-layered film for novel modified atmosphere packaging, *Polym. Eng. Sci.*, Volume 51, Issue 7 (2011) 1264-1272. (Impact factor 2009: 1.248)
3. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ณีรัฐภูมิ กวีวิรัชชัย ณรงค์เดช สุวรรณดาลัย และตะวัน สุขน้อย. 2548. การสลายตัวของพอลิเอโซพรีนโดยใช้ของแข็งเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 12(1): 69-80.
4. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ วิไลรัตน์ เมืองแก้ว สุมาลี ขอมอินทร์ และตะวันสุขน้อย .2547. การศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของยางไอโซพรีนด้วยพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮดราไซด์. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 32(3) : 158-167.
5. ชลลดา ฤตวิรุฬห์. 2543. พอลิเมออร์ผสม. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 10(1) : 14-19.

### การเสนอผลงานวิชาการ

1. Kritsana Makphon, Chaisan Na Lampoon, Panida Phanthong, Rattanawadee Tumsa, Chonlada Ritvirulh, Tawan Sooknoi, and Suparat Rukchonlatee, "Effect of Poly (Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene) Type on Ethylene Gas Permeation Property of Linear Low Density Polyethylene Film" *The proceeding of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-7)*, 1-2 June, Bangkok, Thailand, pp. 175-179, 2017.
2. Tawan Sooknoi, Preeyaporn Mahawanjam, Surapong Piamsuwansiri, Oranut Pongtanapaisan, Suparat Rukchonlatee and Chonlada Ritvirulh "Enhanced photodegradability of LDPE filled with OTS-modified TiO<sub>2</sub>" The 11<sup>th</sup> SPSJ International Polymer Conference (IPC 2016), 13-16 December, Fukuoka, Japan, 2016.
3. Chonlada Ritvirulh, Kanokwan Hongthong, Kritsana Makphon, Chanaporn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Rungroang, Suparat Rukchonlatee and Tawan Sooknoi, "Selective Ethylene Permeability of LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5 Films" *The 11<sup>th</sup> SPSJ International Polymer Conference (IPC 2016)*, 13-16 December, Fukuoka, Japan, 2016.
4. Chonlada Ritvirulh, Pathavuth Monvisade, Chanvit Limpai boon, Piyathida Hasitapong, Pusit Chantawut, "Silver loaded alginate-guar gum hydrogel with antibacterial property" *14<sup>th</sup> International symposium on Biocontrol and Biotechnology*, 6-9 November, St. Petersburg-Pushkin, Russia, 2016.
  5. Praty Kunjit, Tawan Sooknoi Tosapol Maluangnont, Suparat Rukchonlatee and Chonlada Ritvirulh, "Photodegradable film prepared from LDPE/TiO<sub>2</sub> nanotube", *The proceeding of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)*, June 30-July 1, Bangkok, Thailand, pp. 454-458, 2016.
  6. Kritsana Makphon, Suparat Rukchonlatee, Tawan Sooknoi, Masayuki Yamaguchi and Chonlada Ritvirulh, "Mechanical and rheological properties of LLDPE/SEBS/modified zeolite ZSM-5 blends", *The proceeding of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)*, June 30-July 1, Bangkok, Thailand, pp. 355-360, 2016.
  7. Chonlada Ritvirulh, Hydrophobic zeolite composite film with selective ethylene permeation for packaging application, *The 3<sup>rd</sup> International Symposium for Green-Innovation Polymers (GRIP2016)*, March 4-7, Nomi, Japan, 2016.
  8. Thanaporn Sahassanon, Suparat Rukchonlatee, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh, Improvement of ethylene permeation in LLDPE/SEBS film with zeolite Y, *The proceedings Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON 2015)*, January 21-23, Bangkok, Thailand, 432-435, 2015.
  9. C. Ritvirulh, S. Rattanapaibongij, T. Sooknoi and S. Ruckchonlatee, Initial delay in photodegradation of Zn doped TiO<sub>2</sub>/LDPE films, *ACS 247<sup>th</sup> National meeting*, March 16-20, Dallas, USA, 2014.
  10. R. Wiwattananukul, T. Sooknoi, S. Ruckchonlatee and C. Ritvirulh, Improved the ethylene transmission rate of LLDPE/SEBS blend film, *The proceedings Pure and Applied Chemistry International Conference 2013 (PACCON 2013)*, January 23-25, Bangsaen, Thailand, 1033, 2013
  11. สมยศ รัตน์ไพบูลย์กิจ, ตะวัน สุขน้อย, ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธี "ฟิล์มพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง" การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 4, 12-15 มีนาคม พิชณโลก, 2555 หน้า 153-158.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ขวัญใจ พูลสวัสดิ์, อธิพล แจ่มชัด, ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และปราณี ภิญโญชีพ, อิทธิพลของความหนืดที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากยางธรรมชาติ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ, เรื่องเติมการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 49 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 1-4 กุมภาพันธ์, กรุงเทพมหานคร, 2554 หน้า 265-272.
13. S. Laowakul, C. Ritvirulh, T. Sooknoi, S. Rukchonlatee, A. Fuongfuchart and D. Sirikittikul, Ethylene transmission rate through zeolite modified double-layered films for Packaging of fresh produce, *The 7<sup>th</sup> International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, September 30- October 1, Kanazawa, Japan, 45, 2010.
14. P. Monprasit, C. Ritvirulh, S. Rukchonlatee, T. Sooknoi and A. Fuongfuchart, Tensile Properties of the Zeolite Composite Double-Layered Film, *The 6<sup>th</sup> International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 156, 2009.
15. S. Laowakul, T. Sooknoi, C. Ritvirulh, S. Rukchonlatee, and A. Fuongfuchart, Study on Tensile Properties of SEBS/LDPE and SEBS/OPP double-layer films for Packaging Application, *The 6<sup>th</sup> International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 163, 2009.
16. P. Monprasit, C. Ritvirulh, S. Rukchonlatee, Sooknoi, T. and A. Fuongfuchart, Study on Ethylene Gas Permeability of Double-layer Composite Film, *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON)*, January 14-16, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, 82, 2009.
17. A. Fuongfuchart, W. Boonchareon, S. Apisittinet, D. Sirikittikul, C. Ritvirulh, and T. Sooknoi, Highly ethylene permeable film : development and application in packaging, *Proceeding of the 16<sup>th</sup> IAPRI World Conference of Packaging*, Bangkok, June 8 - 12, 2008.
18. W. Boonchareon, S. Apisittinet, D. Sirikittikul, S. Loykulnant, A. Fuongfuchart, C. Ritvirulh, and T. Sooknoi, "Structure and Gas Selectivity of PE/Zeolite Composite Film", *Proceeding of The 2<sup>nd</sup> International Conference on Advanced in Petrochemicals and Polymers*, Bangkok, 25 - 28 June, 2007.
19. S. Apisittinet, T. Sooknoi, C. Ritvirulh, D. Sirikittikul, S. Loykulnant, A. Fuongfuchart and W. Boonchareon, Ethylene permeation of silicalite I composite film, *NSTDA Annul Conference 2007*, Pathumthanee, 28-30 March 2007.

20. A. Fuongfuchat, C. Ritvirulh, S. Loykulnant, T. Sooknoi, An Investigation of the Effect of Zeolite Structure on Adsorption of Gases in Postharvest Environment, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Thailand Materials Science and Technology Conference, 444-446, 10-11 August 2004, Bangkok, Thailand.
21. C. Ritvirulh, P. Liawsomboon and S. Woramongkolchai, Compatibilisation effect of SBS on Recycling PS/NR Blends, PPC 8, 2003, Thailand.
22. C. Ritvirulh, A.J. Ryan and A.N. Wilkinson, Copolymers as compatibilisers in LDPE/PS Blends, PPS Symposium, 1999, Thailand.
23. ระพี เจริญสูงเนิน ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธี, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิ(สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน) กับมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICHe 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
24. อภิขญา เจียนประเสริฐ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน สุภารัตน์ รักชลธี และชลลดา ฤตวิรุฬห์, ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติของวัสดุประกอบนาโน LDPE/MMT, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมี และเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICHe 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
25. อมรรัตน์ สวัสดิมงคล ภัทธารุช มนต์วิเศษ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน และชลลดา ฤตวิรุฬห์, การเตรียมวัสดุ ประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์ร่วมพอลิเมทิลเมทาคริเลตพอลิอะคริลิกแอซิดกับไคโตซานมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีพอลิเมอไรซ์ขณะขึ้นรูป, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICHe 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.

#### ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

1. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. Japanese Patent no. 5914477. April 2016.
2. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. Austratian Patent no. 2011293914. December 2014.
3. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. New Zealand Patent no. 606351. September 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Tawan Sooknoi, Chonlada Ritvirulh, Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul and Phatchareeya Raksa. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. United States Patent no. 8697777B2. April 2014.
5. Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. European Patent no. 11760880.2-1302. March 2013.
6. Tawan Sooknoi, Chonlada Ritvirulh, Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul and Phatchareeya Raksa. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. PCT Patent no. WO 2012/026893 A1. March 2012.
7. เลขที่คำขอ 1001001199 มาสเตอร์แบทช์สำหรับเตรียมฟิล์มพลาสติกที่มีค่าอัตราการซึมผ่านและค่าการเลือกผ่านก๊าซเอทิลีนสูงและฟิล์มพลาสติกที่ทำมาจากมาสเตอร์แบทช์ดังกล่าว, 4 สิงหาคม 2553
8. เลขที่คำขอ 0801001835 ฟิล์มพลาสติกที่มีค่าการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสูงเพื่อชะลอการสุก และการเสื่อมสภาพของผลิตผลสด, 11 เมษายน 2551



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้