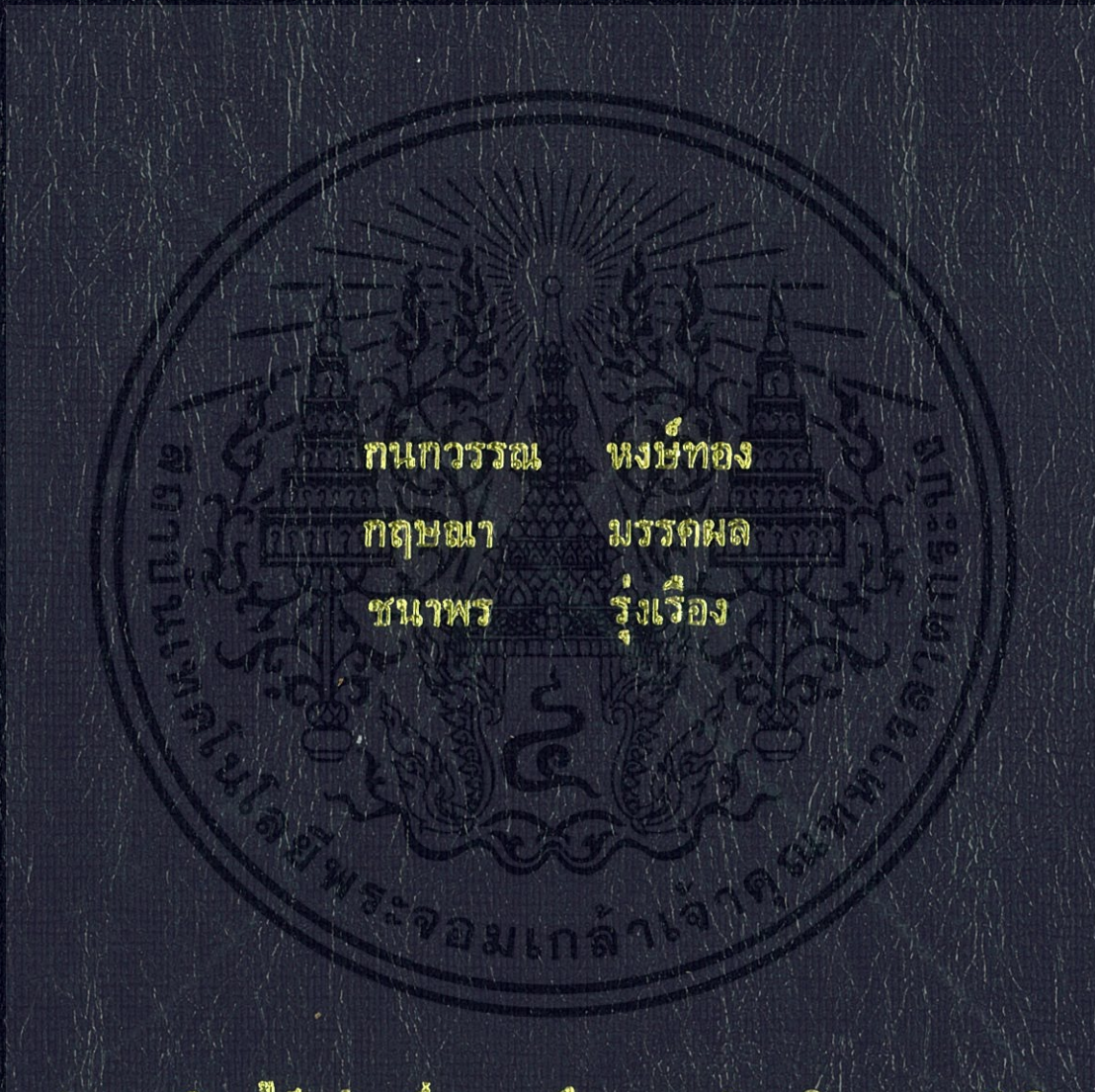


การศึกษาพอลิเมอร์ผสมของแอลแอลดีพี/เอสอีบีเอส/ซีโอไลต์ ZSM-5  
เพื่อเพิ่มการซึมผ่านแก๊สเอทิลีนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์

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



กนกวรรณ หงษ์ทอง  
กฤษณา มรรคผล  
ชนาพร รุ่งเรือง

โครงการพิเศษเป็นวิทยานิพนธ์ของภาควิชาเคมีหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา ๒๕๕๖

การศึกษาพอลิเมอร์ผสมของแอลแอลดีพีอี/เอสอีบีเอส/ซีโอไลต์ ZSM-5

เพื่อเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์

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



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY ON LLDPE/SEBS/ZEOLITE ZSM-5 BLENDS FOR  
IMPROVING ETHYLENE PERMEATION OF PACKAGING FILM**



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การศึกษาพอลิเมอร์ผสมของแอลแอลดีพีอี/เอสอีบีเอส/ซีโอไลต์ ZSM-5 เพื่อเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์

Study on LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5 blends for improving ethylene permeation of packaging film

**ชื่อนักศึกษา** นางสาวกนกวรรณ หงษ์ทอง  
 นางสาวกฤษณา มรรคผล  
 นางสาวชนาพร รุ่งเรือง

**ปริญญา** วิทยาศาสตร์บัณฑิต

**สาขาวิชา** เคมีอุตสาหกรรม

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์

**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย

ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

| คณะกรรมการสอบ             | ลายมือชื่อ   |
|---------------------------|--|
| รศ.ดร. อธิพิพล แจ่มชัด    |  |
| ผศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ |  |
| ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์     |  |
| รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย       |  |
| ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์  |  |

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพอลิเมอร์ผสมของแอลแอลดีพีอี/เอสอีบีเอส/ซีโอไลต์ ZSM-5 เพื่อเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์

ชื่อนักศึกษา นางสาวกนกวรรณ หงษ์ทอง  
นางสาวกฤษณา มรรคผล  
นางสาวชนาพร รุ่งเรือง

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2556

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย

ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ

### 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 มีแนวโน้มของขนาดตัวภาคใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังลดลง ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดครากไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมซีโอไลต์ (5-15 wt%) สามารถช่วยเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนได้ดีขึ้น ( $43,382-212,581 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$ ) เนื่องจากซีโอไลต์มีรูพรุนและมีความชอบต่อเอทิลีนสูง เมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดครากไม่เปลี่ยนแปลง

คำสำคัญ: พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE), พอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-  
สไตรีน (SEBS), ซีโอไลต์ ZSM-5, พอลิเมอร์ผสม, อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน



II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                      |  |              |
|----------------------|--|--------------|
| <b>Title</b>         | Study on LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5 blends for improving ethylene permeation of packaging film |              |
| <b>Students</b>      | Miss Kanokwan  | Hongthong    |
|                      | Miss Kritsana  | Makphon      |
|                      | Miss Chanaporn   | Rungroang    |
| <b>Degree</b>        | Bachelor of Science  |              |
| <b>Major Program</b> | Industrial Chemistry   |              |
| <b>Academic Year</b> | 2013   |              |
| <b>Advisor</b>       | Asst.Prof.Dr. Chonlada   | Ritviruth    |
| <b>Co-Advisor</b>    | Assoc.Prof.Dr. Tawan   | Sooknoi      |
|                      | Asst.Prof.Dr. Suparat  | Rukchonlatee |

### 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 ( $43,382-212,581 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$ ) 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

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ ช่วยตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุจิต สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคาร ฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมถึงให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่คอยไต่ถามและให้กำลังใจ ตลอดมา ตลอดจนเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกให้การนำวิจัยนี้ดำเนินไปด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมายที่ยังมิได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย   | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ  | III  |
| กิตติกรรมประกาศ   | IV   |
| สารบัญ  | V    |
| สารบัญตาราง   | IX   |
| สารบัญรูป   | X    |
| <b>บทที่ 1 บทนำ</b>   |      |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย                                  | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์  | 3    |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย  | 3    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                     | 4    |
| <b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>                      |      |
| 2.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของผลิตผล                      | 5    |
| 2.1.1 การหายใจ  | 5    |
| 2.1.2 การสุก  | 9    |
| 2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้                         | 10   |
| 2.3 การยืดอายุการเก็บรักษาผักผลไม้สดด้วยบรรจุภัณฑ์คัดแปลงบรรยากาศ | 12   |
| 2.3.1 หลักการคัดแปลงบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์                       | 12   |
| 2.3.2 การสร้างบรรยากาศคัดแปลงภายในบรรจุภัณฑ์                      | 13   |
| 2.4 เทคโนโลยีเมมเบรน  | 15   |
| 2.4.1 กระบวนการเมมเบรน  | 15   |
| 2.4.2 การจำแนกกระบวนการเมมเบรน                                    | 15   |
| 2.4.3 อุปกรณ์เมมเบรน (Membrane module types)                      | 18   |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 2.4.4 กระบวนการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน              | 20   |
| 2.4.4.1 กลไกการแพร่ของก๊าซ (Gas diffusion)     | 20   |
| 2.4.4.2 กลไกการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeation) | 21   |
| 2.4.5 วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน                   | 23   |
| 2.4.6 วิธีการผลิตเมมเบรนสังเคราะห์แบบเนื้อแน่น | 25   |
| 2.4.7 ข้อดีของเทคโนโลยีเมมเบรน                 | 25   |
| 2.5 พอลิเมอร์ผสม                               | 26   |
| 2.5.1 พอลิเมอร์ผสม                             | 26   |
| 2.5.2 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสม                | 27   |
| 2.5.3 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเมอร์ผสม           | 28   |
| 2.6 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น      | 29   |
| 2.6.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ LLDPE                 | 29   |
| 2.6.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LLDPE                 | 30   |
| 2.6.3 การนำไปใช้งานในปัจจุบัน                  | 30   |
| 2.7 ยางเทอร์โมพลาสติก                          | 31   |
| 2.8 พอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน         | 33   |
| 2.9 ซีโอไลต์                                   | 33   |
| 2.9.1 สมบัติทั่วไป                             | 33   |
| 2.9.2 ซีโอไลต์ ZSM-5                           | 35   |
| 2.9.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์ในชีวิตประจำวัน       | 36   |
| 2.10 เครื่องผสมแบบปิด                          | 37   |
| 2.11 เครื่องกดอัด                              | 38   |
| 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                     | 40   |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| <b>บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย</b>                                    |      |
| 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง   | 44   |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง                            | 45   |
| 3.3 วิธีการดำเนินวิจัย  | 46   |
| 3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม                                     | 46   |
| 3.3.2 การเตรียมฟิล์ม  | 47   |
| 3.3.3 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม                                      | 48   |
| 3.3.3.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อน                                   | 48   |
| 3.3.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM                                 | 49   |
| 3.3.3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล  | 49   |
| 3.3.3.4 การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน                            | 49   |
| <b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>   |      |
| 4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วน LLDPE/SEBS ต่อสมบัติของฟิล์ม             | 52   |
| 4.1.1 พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/SEBS                        | 52   |
| 4.1.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม LLDPE/SEBS                                | 53   |
| 4.1.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE/SEBS                               | 56   |
| 4.1.4 การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE/SEBS                      | 61   |
| 4.2 การศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์ต่อสมบัติของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite | 62   |
| 4.2.1 พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5)        | 62   |
| 4.2.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5)                | 65   |
| 4.2.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5)               | 69   |
| 4.2.4 การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5)      | 71   |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                     | หน้า |
|-------------------------------------|------|
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ |      |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย                  | 73   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ                      | 73   |
| เอกสารอ้างอิง                       | 75   |
| ภาคผนวก                             | 79   |



### VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า  |    |
|----------|---|----|
| 2.1      | การจำแนกผลิตผลบางชนิดตามการหายใจ  | 7  |
| 2.2      | การจัดกลุ่มของผลิตผลตามอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีน  | 11 |
| 2.3      | สัดส่วนบรรยากาศใน MAP และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับผักผลไม้สดตัดแต่ง                        | 14 |
| 2.4      | การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมของกระบวนการการแยกด้วยเมมเบรน                                   | 17 |
| 2.5      | ตัวอย่างการนำอุปกรณ์เมมเบรนแบบต่างๆ ไปใช้งาน  | 18 |
| 2.6      | Glass transition temperature ( $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ                              | 24 |
| 2.7      | Si/Al ratio ของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ  | 34 |
| 3.1      | สมบัติบางประการของ LLDPE  | 44 |
| 3.2      | สมบัติบางประการของ SEBS   | 44 |
| 3.3      | สูตรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS   | 46 |
| 3.4      | สูตรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS ที่อัตราส่วน 70:30 ที่มีการเติม Zeolite (ZSM-5) | 47 |
| 4.1      | $T_m$ , $T_c$ และความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/SEBS                                 | 53 |
| 4.2      | $T_m$ , $T_c$ และความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5)                 | 63 |
| 4.3      | ปริมาณซีโอไลต์ในฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5)  | 64 |
| ก.1      | ความเป็นผลึก (% Crystallinity)  | 80 |
| จ.1      | สมบัติเชิงกลของฟิล์มตัวอย่างในอัตราส่วนต่างๆ  | 90 |
| ฉ.1      | อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มตัวอย่าง  | 91 |

# สารบัญรูป

| รูปที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 2.1    | แผนผังแสดงการหายใจของพืชทั้งแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน   | 6    |
| 2.2    | บรรยากาศตัดแปลงบรรจุภัณฑ์   | 13   |
| 2.3    | หลักการของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน  | 15   |
| 2.4    | อุปกรณ์แบบแผ่นและแบบกรอบ  | 19   |
| 2.5    | อุปกรณ์แบบท่อ   | 19   |
| 2.6    | อุปกรณ์แบบท่อม้วน   | 20   |
| 2.7    | อุปกรณ์แบบเส้นใยกลาง  | 20   |
| 2.8    | กลไกการถ่ายโอนในเมมเบรน กลไกของก๊าศคิฟิวชัน   | 21   |
| 2.9    | มอดูลัสสะสม (E) ของพอลิเมอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะคล้ายแก้วไปเป็นสถานะยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์  | 24   |
| 2.10   | สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน   | 29   |
| 2.11   | สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน  | 29   |
| 2.12   | แบบจำลองโครงสร้างเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์   | 32   |
| 2.13   | สูตรโครงสร้างของ SEBS   | 33   |
| 2.14   | โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5  | 36   |
| 2.15   | เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)   | 37   |
| 2.16   | เครื่องกดอัด (Compression molding machine)  | 38   |
| 3.1    | เซลล์เมมเบรน  | 50   |
| 3.2    | แผนภาพทิศทางการซึมผ่านก๊าศในเซลล์เพอร์มิเอชัน   | 51   |
| 3.3    | แผนภาพแบบทดสอบการซึมผ่านก๊าศเอทิลีน   | 51   |
| 4.1    | สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE ก่อนและหลังสกัดด้วย THF ที่กำลังขยาย 3500 เท่า                  | 54   |
| 4.2    | สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ ที่สกัด SEBS ด้วย THF กำลังขยาย 3500 เท่า | 56   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.3 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE และ SEBS  | 57   |
| 4.4 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE และ SEBS  | 57   |
| 4.5 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE และ SEBS   | 58   |
| 4.6 มอดุลัสของยังของฟิล์ม LLDPE และ SEBS   | 58   |
| 4.7 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ   | 59   |
| 4.8 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ   | 60   |
| 4.9 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS<br>ต่างๆ                                   | 60   |
| 4.10 มอดุลัสของยังของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ   | 61   |
| 4.11 อัตราการซึมผ่านก๊าซเททรีนของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS<br>ต่างๆ                              | 62   |
| 4.12 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30   | 63   |
| 4.13 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z5   | 64   |
| 4.14 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LL70S30 และ LL70S30Z15 ก่อนสกัดด้วย THF<br>ที่กำลังขยาย 3500 เท่า             | 65   |
| 4.15 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LL70S30Z15 ก่อนและหลังสกัดด้วย THF ที่<br>กำลังขยาย 3500 เท่า                 | 66   |
| 4.16 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ซีโอไลต์ปริมาณต่างๆ หลังสกัด<br>ด้วย THF ที่กำลังขยาย 8000 เท่า | 68   |
| 4.17 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ  | 69   |
| 4.18 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ  | 69   |
| 4.19 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ   | 70   |
| 4.20 มอดุลัสของยังของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ   | 70   |
| 4.21 แบบจำลองการกระจายตัวของซีโอไลต์ที่ปริมาณต่างๆ ในฟิล์ม LLDPE/SEBS  | 71   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.22   | อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ | 72   |
| ข.1    | DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LLDPE  | 82   |
| ข.2    | DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL80S20  | 82   |
| ข.3    | DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL75S25  | 83   |
| ข.4    | DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30  | 83   |
| ข.5    | DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z5  | 84   |
| ข.6    | DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z10   | 84   |
| ข.7    | DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z15   | 85   |
| ค.1    | TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z5  | 86   |
| ค.2    | TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z10   | 86   |
| ค.3    | TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z15   | 87   |
| ง.1    | โครมาโทแกรมของฟิล์ม LLDPE  | 88   |
| ง.2    | โครมาโทแกรมของฟิล์ม LL70S30  | 88   |
| ง.3    | โครมาโทแกรมของฟิล์ม LL70S30Z15   | 89   |
| ง.4    | โครมาโทแกรมของก๊าซเอทิลีนมาตรฐาน   | 89   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยมีรายได้หลักจากการส่งออกสินค้าอุตสาหกรรมมากกว่าเกษตรกรรมแต่โดยพื้นฐานแล้วประชากรส่วนใหญ่ในประเทศยังคงทำเกษตรกรรมเป็นหลัก ทำให้ไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกสินค้าเกษตรรายหนึ่งของโลก แต่อุปสรรคอย่างหนึ่งของการส่งออกสินค้าเกษตรคือ การถนอมความสดของพืชผักผลไม้รวมถึงดอกไม้เอาไว้ให้นานที่สุดจนกว่าจะถึงมือผู้บริโภค [1] หากวางพืชผักผลไม้รวมถึงดอกไม้สดทิ้งไว้ภายนอกที่อากาศร้อน ไม่นานนักผักผลไม้และดอกไม้เหล่านั้นจะเหี่ยวเฉาอย่างรวดเร็ว เพราะพืชผักผลไม้รวมถึงดอกไม้สดที่ถูกเค็ดหรือตัดจากลำต้นยังคงมีชีวิตและมีการหายใจ เสมือนกับว่าพืชผลเหล่านั้นยังอยู่กับลำต้นเหมือนเดิม ซึ่งกระบวนการหายใจของพืชเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผักผลไม้สูญเสียความสด นอกจากนี้เอทิลีนเป็นก๊าซที่พืชบางชนิดปล่อยออกมา ทำหน้าที่คล้ายฮอร์โมนกระตุ้น หรือเร่งให้ผลไม้เกิดกระบวนการสุกงอม ซึ่งผลไม้จะไม่เกิดการสุกงอมเร็วขึ้นเมื่อได้รับก๊าซนี้ ดังนั้นในการขนส่งผลไม้ที่ใช้เวลานาน เช่น การขนส่งทางเรือสินค้า นอกจากผู้ประกอบการเก็บผลไม้ดิบไว้ที่อุณหภูมิต่ำแล้ว ยังต้องหาวิธีการกำจัดก๊าซเอทิลีนที่ผลไม้ปล่อยออกมาด้วย เหตุผลสำคัญที่ต้องชะลอเวลาสุกงอม เนื่องจากการสุกงอมเป็นสภาวะสุดท้ายที่ผักผลไม้อยู่ในสภาวะสมบูรณ์ เมื่อผ่านสภาพสุกงอมแล้วผลไม้จะเริ่มเหี่ยวเพราะเกิดการเน่าเสีย ดังนั้นบรรจุก๊าซสำหรับบรรจุผลไม้ชนิดที่สามารถปล่อยก๊าซเอทิลีนออกมาได้ จึงอาจมีการใส่สารบางชนิดที่สามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนอยู่ในบรรจุก๊าซ หรือใช้สารนั้นเป็นองค์ประกอบในวัสดุบรรจุก๊าซ เพื่อดูดซับเอทิลีนที่ผลไม้ปล่อยออกมาระหว่างการบรรจุหรือขนส่ง การชะลอการสุกและเน่าเสียของผลิตผล อาจใช้เป็นการบรรจุผลิตผลลงในบรรจุก๊าซคัดแปลงบรรยากาศ [2] ซึ่งในบรรจุก๊าซนี้ควบคุมให้มีปริมาณก๊าซออกซิเจนน้อย พืชจึงหายใจน้อยลง นอกจากนี้ฟิล์มควมมีการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย เพื่อลดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน และสามารถช่วยลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่างๆ ซึ่งการควบคุมบรรยากาศแบบนี้จึงช่วยชะลอการสุกงอม ลดการสร้างก๊าซเอทิลีน ตลอดจนการเปลี่ยนสี กลิ่น และคุณค่าทางอาหารของผลไม้

จากงานวิจัยของพรพรรณ มั่นประสิทธิ์ [3] ได้มีการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตสองชั้นของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิโอสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (SEBS) ซึ่ง SEBS เป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ประกอบด้วย Ethylene-butylene ที่มีความยืดหยุ่น มีลักษณะเป็นอสัณฐานและไม่มีขั้วเหมือนก๊าซเอทิลีน ก๊าซเอทิลีนจึงสามารถซึมผ่าน SEBS ได้ดี นอกจากนี้มีการเติมซีโอไลต์ (ชนิดไม่มีขั้ว) ZSM-5 ในปริมาณ 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนักลงในฟิล์ม SEBS โดยเตรียมให้ซีโอไลต์ ZSM-5 มีการกระจายตัวในชั้น SEBS 2 แบบ (แบบ Surface-rich ทำให้ซีโอไลต์กองรวมกันอยู่ด้านหนึ่งของผิวฟิล์ม และแบบ Well-dispersed ทำให้ซีโอไลต์กระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อฟิล์ม) พบว่าการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ในปริมาณ 5-10% สามารถเพิ่มการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน แต่ถ้าปริมาณที่เติมมากกว่า 10% การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มคอมโพสิตเพิ่มไม่มากนักและการกระจายตัวที่ต่างกันของซีโอไลต์ไม่ส่งผลต่อการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนเนื่องจากมีขั้ว LDPE ที่มีความเป็นผลึก (Crystallinity) ขัดขวางการซึมผ่านของก๊าซ (Barrier) ทำให้ก๊าซซึมผ่านได้ช้า จากปัญหาดังกล่าว ในงานวิจัยของรุจิเรข วิวัฒนานุกูล [4] ได้มีการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) พบว่าการเลือกใช้ SEBS Kraton® G1657 ที่ประกอบด้วยปริมาณเอทิลีน/บิวทิลีนสูง (87 wt%) ทำให้ได้วัสดุภาค SEBS ขนาดใหญ่และมีอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสูงกว่าการใช้งาน SEBS Kraton® G1652 ที่ประกอบด้วยเอทิลีน/บิวทิลีนในปริมาณน้อยกว่า (70 wt%) นอกจากนี้ทำการศึกษาผลของความเร็วยกในฟิล์ม LL55S45 (G1652) พบว่าการผสมที่ความเร็วยกของสกรู 40 rpm วัสดุกระจาย SEBS ที่ได้มีขนาดใหญ่และมีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงกว่าการผสมด้วยความเร็วยกของสกรู 60 และ 80 rpm และการเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LL72S28 (G1652) โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ DOP, Cereclor, DBP, TCP และ DOP ในปริมาณ 10 wt% พบว่าการเติม DOA สามารถเพิ่มการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนได้สูงสุด เพราะ DOA มีค่าความสามารถในการละลาย (Solubility parameter) ใกล้เคียงกับ SEBS มากที่สุด แต่การเติมพลาสติกไซเซอร์ที่ปริมาณ 10 wt% ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงดึงต่ำ จึงลดปริมาณลงเป็น 5 wt% พบว่าการเติม DOP ที่ปริมาณ 5 wt% ให้ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม เท่ากับ 11.9 MPa ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่ามาตรฐานของฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร มาตรฐานเลขที่ มอก. 1027-2553 (7 MPa)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาและพัฒนาฟิล์มให้มีการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนได้ดีขึ้นจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS Kraton® G1657 ที่มีปริมาณเอทิลีนต่อบิวทิลีน 87 wt% ซึ่งทำให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนดีขึ้น โดยเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว (Melt

blending) เนื่องจากกระบวนการเตรียมมีความซับซ้อนยุ่งยากน้อยกว่าการทำฟิล์มสองชั้นและฟิล์มพอลิเมอร์ผสมช่วยให้ก๊าซเอทิลีนสามารถซึมผ่านฟิล์มได้รวดเร็วกว่า เนื่องจากมีการกระจายตัวของวัฏภาคกระจาย (SEBS) อยู่ในวัฏภาคต่อเนื่อง (LLDPE) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เช่น ความทนแรงกระแทก ความต้านทานแรงเฉาะทะลุ ทนแรงฉีกขาดได้ดีกว่า และยังมีราคาถูกกว่า LDPE นอกจากนี้ทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของ LLDPE/SEBS โดยทำการเติมซีโอไลต์ (ชนิดไม่มีขี้) ZSM-5 ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน จึงช่วยการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนได้ดีขึ้น เพื่อศึกษาอัตราส่วนของ LLDPE/SEBS และการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ผสมกับพอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (SEBS)
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ และการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม เช่น อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS และการเติมซีโอไลต์ ZSM-5

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วน 100/0, 80/20, 75/25 และ 70/30 โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) และขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding machine)
2. ศึกษาปริมาณของซีโอไลต์ (Zeolite) 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ที่เติมในพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วน 70/30
3. ขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด
4. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)
5. ศึกษาการกระจายตัวของ SEBS และซีโอไลต์ ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5) ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
6. ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์มในสูตรต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มในสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเข้าใจผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS และการเติมซีโอโลต์ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ และการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม และสามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้และพัฒนาฟิล์มบรรจุผลิตผลสดในเชิงพาณิชย์ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดให้ยาวนานขึ้น และปลอดภัยต่อผู้บริโภค



## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของผลิตผล [5-9]

เนื่องจากผักผลไม้เป็นสิ่งที่ยังมีชีวิตจึงมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ทำให้องค์ประกอบรสชาติ และคุณค่าทางอาหารเปลี่ยนแปลงไปด้วย และส่วนมากเปลี่ยนไปในทางที่ทำให้คุณภาพลดลง และทำให้มีผลเกี่ยวข้องกับคุณภาพของผลิตผลดังนี้ [5]

#### 1. การสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากสาเหตุสำคัญ คือ การหายใจและการคายน้ำ

*การหายใจ* เป็นกลไกที่ทำให้เกิดพลังงานที่พืชสามารถนำไปใช้ทำกิจกรรมต่างๆ โดยเฉพาะการเจริญเติบโตทุกๆ ระยะหรือแม้เมื่อมีการเก็บเกี่ยวผลผลิตออกมาจากต้นแล้ว กระบวนการหายใจยังคงดำเนินต่อไปจนถึงอายุไขของเซลล์ โดยมีการรับก๊าซออกซิเจนเข้าไปสลายโมเลกุลของสารอาหารแล้วปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานความร้อนออกมา

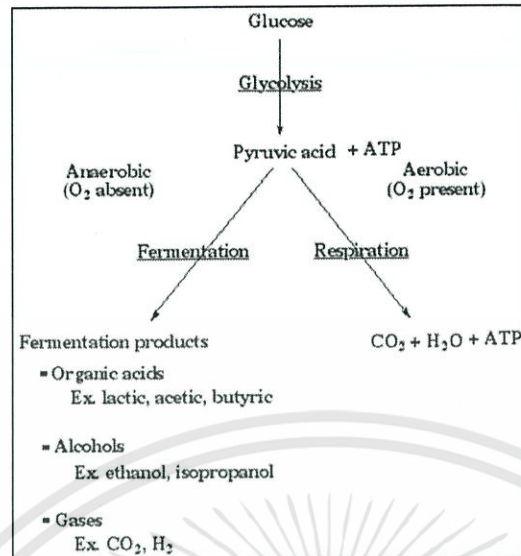
*การคายน้ำ* ผลไม้สดและผักสดประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ (80 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่า) เมื่อเก็บเกี่ยวมาแล้วผลิตผลมีชีวิตอยู่ได้ด้วยน้ำที่สะสมไว้เอง เมื่อผลิตผลยังหายใจอยู่การคายน้ำยังคงเกิดอยู่ต่อไป การสูญเสียน้ำจึงทำให้น้ำหนักลดลง ยิ่งสูญเสียน้ำมากขึ้น รูปร่างและความยืดหยุ่นของผลิตผลยิ่งลดลงจนอ่อนนุ่มและเหี่ยวแห้งไป

#### 2. การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น เนื้อสัมผัส สี กลิ่น รส

#### 3. การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบเคมี เช่น แป้ง ไขมัน โปรตีน กรดอินทรีย์ วิตามิน

#### 2.1.1 การหายใจ [6]

การหายใจแบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ การหายใจแบบใช้ออกซิเจนและการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน แสดงแผนผังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชทั้งแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน [6]

### การหายใจแบบใช้ออกซิเจน

ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวจากต้นแล้วเซลล์ยังมีชีวิตและมีการหายใจอยู่ การหายใจแบบใช้ออกซิเจนของพืชจะรับออกซิเจนจากสิ่งแวดล้อมเข้าไปเพื่อเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตที่สะสมไว้ในเซลล์พืชในรูปของแป้งและน้ำตาล ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานในรูปของความร้อน การหายใจแบบใช้ออกซิเจน แสดงสมการดังนี้



พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการหายใจของพืช เรียกว่า Vital heat หรือ Respiration heat ทำให้เกิดการเน่าเสียได้ง่าย ผักผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูงจะผลิตความร้อนออกมามากกว่าผักผลไม้ที่มีอัตราการหายใจต่ำ เพราะจะมีอัตราการสลายโมเลกุลของสารอาหารมากกว่า และเสื่อมคุณภาพเร็วกว่า ดังนั้นสามารถจำแนกผลผลิตตามการหายใจได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกผลิตภัณฑ์บางชนิดตามการหายใจ [6]

| อัตรา<br>การหายใจ | ปริมาณการหายใจ<br>ที่อุณหภูมิ 5 °C<br>(mgCO <sub>2</sub> /kg-hr) | พลังงานความร้อนที่<br>เกิดขึ้นจากการหายใจ<br>(Vital heat)<br>(Btu/ton/24 hrs) | ตัวอย่างผลิตภัณฑ์   |
|-------------------|--|---|---|
| ต่ำมาก            | น้อยกว่า 5   | น้อยกว่า 1100   | ผลแห้ง เช่น ถั่วเมล็ดแห้ง อินท-<br>ผาลัม  |
| ต่ำ               | 5-10   | 1100-2200   | แอปเปิ้ล ส้ม องุ่น กีวี กระเทียม<br>หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง มันเทศ                    |
| ปานกลาง           | 10-20  | 2200-4400   | กล้วย เซอร์รี่ ท้อ แนนทาริน แพร<br>พลัม มะเดื่อ กะหล่ำปลี แครอท<br>มะเขือเทศ พริก |
| สูง               | 20-40  | 4400-8800   | สตอเบอรี่ แบลคเบอรี่ ราสเบอ-<br>รี่ กะหล่ำดอก อะโวคาโด                            |
| สูงมาก            | 40-60  | 8800-13200  | ต้นหอม ไม้ตัดดอก  |
| สูงมากที่สุด      | มากกว่า 60   | มากกว่า 13200   | หน่อไม้ฝรั่ง บรอกโคลี<br>ข้าวโพดหวาน  |

$$\text{Vital heat (Btu/ton/24 hrs)} = \text{mgCO}_2/\text{kg-hr} \times 220$$

#### การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน

การสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนหรือเรียกว่า กระบวนการหมัก (Fermentation) มีกลไกการเกิดได้ 2 แบบ คือ

##### 1. การหมักแอลกอฮอล์ (Alcoholic fermentation)

การหมักแอลกอฮอล์พบในแบคทีเรียและยีสต์ ในกระบวนการนี้ กรดไพรูวิกที่ได้จากกระบวนการไกลโคลิซิสจะถูกเปลี่ยนเป็นอะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จากนั้น Acetaldehyde ถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนเป็นเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol)

การหมักแอลกอฮอล์ แสดงสมการดังนี้ [7]



## 2. การหมักกรดแลคติก (Lactic acid fermentation)

การหมักกรดแลคติกพบในแบคทีเรียบางชนิด ในคนพบในเซลล์กล้ามเนื้อในสภาพที่ขาดออกซิเจนหรือมีปริมาณออกซิเจนน้อย เช่น ทำงานหนักหรือออกกำลังกาย กรดไพรูวิกจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เกิดเป็นกรดแลคติก (Lactic acid) การหมักกรดแลคติกแสดงสมการดังนี้



แต่ถ้าอากาศเข้าสู่ภาชนะที่ใช้หมักจะทำให้ยีสต์หายใจแบบใช้ออกซิเจน เกิดสมการดังนี้



ผักและผลไม้สามารถเกิดการหายใจแบบใช้ออกซิเจนและการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งการหายใจแบบใช้ออกซิเจนเกิดการสลายตัวของอาหารอย่างสมบูรณ์ ทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน ส่วนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีการสลายตัวของอาหารไม่สมบูรณ์ ทำให้ได้เอทานอลและน้ำ

## ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการหายใจ [8]

**สภาพแวดล้อม** มีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการหายใจของผลิตผลหลังเก็บเกี่ยว ซึ่งอัตราการหายใจมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับอายุของผลิตผล ถ้าผลิตผลมีการหายใจที่เหมาะสมจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้

**อุณหภูมิ** มีอิทธิพลอย่างมากต่ออัตราเมตาบอลิซึมของผลิตผล เมื่ออุณหภูมิของผลิตผลสูงขึ้นอัตราของการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นตามไปด้วย แต่การเพิ่มของอุณหภูมิต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสม ถ้าอุณหภูมิสูงมากเกินไปจะลดการเกิดปฏิกิริยาทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียสภาพของเอนไซม์ (Enzyme denature) ซึ่งระดับของอุณหภูมิสูงสุดต่ำสุดและเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาจะแตกต่างกันไปตามชนิดของพืชและเนื้อเยื่อ ผลไม้บางอย่างอาจเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำมากได้ในขณะที่ผลไม้บางอย่างจะได้รับความเสียหายจากความเย็น (Chilling injury)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นของผล ปริมาณความชื้นภายในผลมีอิทธิพลต่ออัตราการหายใจของผลเป็นอย่างมาก อัตราการหายใจและอัตราการกิจกรรมทางเมตาบอลิซึมลดลงเมื่อความชื้นภายในผลลดลง โดยทั่วไปแล้วผลไม้ที่มีปริมาณความชื้นต่ำมักมีอัตราการหายใจต่ำกว่าผลไม้ที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่า ปริมาณความชื้นภายในผลติดขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์พืช องค์ประกอบ และชนิดของเนื้อเยื่อของผลติดนั้น ตลอดจนสภาพแวดล้อมที่ได้รับทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว

ขนาดผล เชลล์ที่ได้รับบาดเจ็บสามารถกระตุ้นให้เนื้อเยื่อมีอัตราการหายใจสูงขึ้นได้

ระยะของการเจริญและพัฒนา มีอิทธิพลอย่างมากต่ออัตราการหายใจและอัตราการเกิดกิจกรรมทางเมตาบอลิซึมภายหลังเก็บเกี่ยว โดยทั่วไปเชลล์ที่อายุอ่อนกว่าและกำลังเจริญเติบโตจะมีอัตราการหายใจสูงกว่าเชลล์ที่แก่กว่า

### 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. ผลไม้กลุ่ม Climacteric เป็นผลไม้ที่มีการเก็บสะสมอาหารในรูปของแป้งหรือไขมัน และผลไม้เหล่านี้สามารถเก็บเกี่ยวมาแล้วนำมาทิ้งไว้ให้สุกได้ เนื่องจากในระหว่างการสุกผลของการหายใจเกิดการสร้างก๊าซเอทิลีนขึ้นภายในเนื้อเยื่อซึ่งก๊าซเอทิลีนในเนื้อเยื่อที่ถูกสร้างขึ้นสามารถกระตุ้นให้ผลไม้มีการสุก ผลไม้เหล่านี้สามารถบ่มให้สุกได้โดยการใช้ก๊าซเอทิลีนจากภายนอก เมื่อผลไม้พวก Climacteric ได้รับการกระตุ้นโดยการใช้ก๊าซเอทิลีนในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมจะสามารถเพิ่มอัตราหรือปริมาณการสร้างเอทิลีนภายในเนื้อเยื่อให้สูงขึ้นไปอีกและการสร้างก๊าซเอทิลีนภายในจะดำเนินต่อไปได้เอง ผลไม้จำพวกนี้ ได้แก่ กัลฉ่าย มะละกอ ละครูด พุริชยนต์ น้อยหน่า ฝรั่ง สาเล่ มะเขือเทศ แอปเปิ้ล มะม่วง อะโวคาโด เป็นต้น

2. ผลไม้กลุ่ม Non-climacteric เป็นผลไม้ที่เมื่อถูกเก็บเกี่ยวมาแล้วจะมีอัตราการหายใจค่อนข้างต่ำและคงที่ตั้งแต่เริ่มเข้าสู่ระยะการสุกไปจนกระทั่งผลไม้ที่แก่และตายไป ผลไม้

เหล่านี้อาจมีการเก็บสะสมอาหารในรูปของน้ำตาลหรือกรดอินทรีย์ ผลไม้พวกนี้ไม่สามารถนำมาทิ้งไว้ให้สุกได้เหมือนกับผลไม้พวก Climacteric ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวเมื่อสุกแล้วเท่านั้น ผลไม้พวก Non-climacteric อาจมีการสร้างก๊าซเอทิลีนภายในเนื้อเยื่อในอัตราหรือปริมาณที่ต่ำ ทำให้กระบวนการสุกเกิดขึ้นอย่างช้าๆ นอกจากนี้การใช้ก๊าซเอทิลีนจากภายนอกกระตุ้นให้มีการสุก ผลไม้เหล่านี้จะตอบสนองโดยมีอัตราการหายใจสูงขึ้นได้ตลอดระยะเวลาที่มีการรับก๊าซเอทิลีน เมื่อหยุดการรับก๊าซเอทิลีนอัตราการหายใจของพวก Non-climacteric กลับเข้าสู่ระดับเดิมอีกโดยไม่มีการเพิ่มอัตราการหายใจให้สูงขึ้นเหมือนกับพวก Climacteric ผลไม้จำพวกนี้ ได้แก่ ส้ม ส้มโอ เชมรี่ มะนาว สับปะรด สตอเบอรี่ องุ่น มะไฟ ลำไย ลิ้นจี่ เป็นต้น

## 2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้

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

### 1. ก๊าซออกซิเจน

โดยปกติก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซที่มีความจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิดไม่เว้นแม้แต่พืช แต่สำหรับผลิตผลที่ถูกเก็บเกี่ยวหรือถูกตัดจากต้นแล้ว ระดับปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ปรากฏในบรรยากาศทั่วไป (~21%) ถือว่าเป็นระดับออกซิเจนที่มากเกินไปจนทำให้เกิดผลทางลบต่อผลิตผลได้ เนื่องจากก๊าซออกซิเจนเมื่อต่อกรเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และเชื้อราต่างๆ ที่ทำลายผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยว และโดยธรรมชาติหลังการเก็บเกี่ยว ผลิตผลสดยังคงมีการหายใจซึ่งต้องใช้ก๊าซออกซิเจน สารอาหาร และน้ำที่อยู่ในเซลล์เป็นวัตถุดิบ ดังนั้นหากบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์มีระดับก๊าซออกซิเจนมาก ผลิตผลจึงมีการหายใจตามอัตราปกติเหมือนก่อนเก็บเกี่ยวซึ่งส่งผลให้พืชผลเหี่ยวง่าย

### 2. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

โดยทั่วไปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเพียงผลิตผลที่เกิดจากกระบวนการหายใจของสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ แต่สำหรับการถนอมรักษาความสดของผักผลไม้ ปริมาณก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่มีระดับความเข้มข้นเหมาะสมจะมีบทบาทสามารถช่วยถนอมความสดของผลิตผล เนื่องจากก๊าซนี้ทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการแพร่พันธุ์และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่างๆ ได้

### 3. ก๊าซเอทิลีน

เอทิลีน (Ethylene) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี มีกลิ่นหอมเล็กน้อย ดัดไปง่าย จัดเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีผลต่อกระบวนการทางสรีระวิทยาของพืช เป็นสารที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของพืชชั้นสูง และจากจุลินทรีย์บางชนิด เอทิลีนถือว่าเป็นฮอร์โมนธรรมชาติที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีระวิทยาหลายอย่างในผลิตผล เช่น ทำให้เกิดการแก่ (Aging) การสุก (Ripening) และ/หรือการแยกตัว (Abscission) ของอวัยวะของพืช และมีการสร้างสารให้กลิ่นและรส แม้ว่าจะมีปริมาณน้อยเพียง 1 ส่วนในล้านส่วน (0.1 ppm) ซึ่งสามารถจัดกลุ่มของผลิตผลตามอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีนได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจัดกลุ่มของผลิตผลตามอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีน [8]

| กลุ่ม   | ช่วงการผลิตที่ 20 °C<br>( $\mu \text{C}_2\text{H}_4 \text{ kg-hr}^{-1}$ ) | ชนิดของผลิตผล  |
|---------|---|--|
| ต่ำมาก  | ต่ำกว่า 0.1   | ส้ม องุ่น พุทรา ทับทิม เชอร์รี่ สตรอเบอร์รี่                                       |
| ต่ำ     | 0.1-1.0   | แตงกวา มะเขือ กระเจี๊ยบ พริก สับปะรด พักทอง<br>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<br>กีวี (ผลสุก) เนคทารีน          |
| สูงมาก  | มากกว่า 100.0   | น้อยหน่า ละมุด พาสชันฟรุต  |

บทบาทของเอทิลีนมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อความเสียหายทางกายภาพของผักและผลไม้ เอทิลีนถูกสร้างขึ้นในเนื้อเยื่อพืชทุกชนิดโดยธรรมชาติ ดังนั้นการทำความเข้าใจทางกายภาพต่อผลไม้มักเป็นการเร่งกระบวนการสุกไปด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้นการลดการสะสมของก๊าซเอทิลีนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการชะลอการสุกของผลไม้

## 2.3 การยืดอายุการเก็บรักษาผักผลไม้สดด้วยบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ [2]

การยืดอายุการเก็บรักษาผักผลไม้สดด้วยบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ (Modified Atmosphere Packaging, MAP) หมายถึง การเก็บรักษาผลิตผลไว้ในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่ภายในมีสัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซที่แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติ (ไนโตรเจน 78%, ออกซิเจน 21%, คาร์บอนไดออกไซด์ 0.03% และก๊าซเฉื่อยเล็กน้อย) การใช้ MAP ในการยืดอายุการเก็บรักษาผักผลไม้ให้ได้ผลดีและสามารถคงคุณภาพของผักผลไม้ให้ได้นั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนของก๊าซภายในภาชนะบรรจุเป็นหลัก สัดส่วนที่เหมาะสมจะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของผักผลไม้ให้ยาวนาน แต่หากเลือกใช้ภาชนะบรรจุที่ไม่ถูกต้องสิ่งที่ตามมาคือความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผักผลไม้และอายุการเก็บรักษาที่ยังสั้นลงกว่าเดิม ก๊าซที่นิยมใช้ในการดัดแปลงบรรยากาศในปัจจุบันยังคงเป็น ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน ในขณะที่ก๊าซชนิดอื่น เช่น ไนตรัส ไนตริกออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เอทิลีน คลอรีน โอโซน และพรอพิลีนออกไซด์ ซึ่งเคยมีการทดลองนำมาใช้แล้วและพบว่าได้ผลดีแต่ยังไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากข้อจำกัดในด้านความปลอดภัยต่อการบริโภค กฏระเบียบ และต้นทุนการผลิต

### 2.3.1 หลักการดัดแปลงบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์

หลักการสำคัญของการดัดแปลงบรรยากาศที่ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผักผลไม้คือ การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของก๊าซในบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุผักผลไม้จนสามารถยับยั้งหรือชะลอกระบวนการหายใจตามธรรมชาติของผักผลไม้ (รูปที่ 2.2) ซึ่งยังคงสามารถดำเนินต่อไปแม้จะถูกเก็บเกี่ยวแล้ว และหากผักผลไม้ผ่านขั้นตอนการปกปิด ตัดแต่ง หรือหั่นชิ้นด้วยแล้ว กระบวนการหายใจจะยังมีอัตราสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่าการยับยั้งการหายใจของผักผลไม้สดตัดแต่งพร้อมบริโภคให้ได้ผลดีจำเป็นต้องลดปริมาณออกซิเจนซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องใช้ในกระบวนการหายใจและเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุ รวมทั้งเก็บผักผลไม้ในอุณหภูมิต่ำตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา นอกจากจะสามารถช่วยชะลออัตราการหายใจแล้วยังช่วยป้องกันความเสียหายของเนื้อเยื่อ กลิ่นเหม็นจากกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนของผักผลไม้ และการเจริญของแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลกติกด้วย



รูปที่ 2.2 บรรยากาศดัดแปลงบรรจุภัณฑ์ [2]

### 2.3.2 การสร้างบรรยากาศดัดแปลงภายในบรรจุภัณฑ์

วิธีการสร้างบรรยากาศดัดแปลงภายในภาชนะบรรจุให้มีสัดส่วนตามที่ต้องการนั้นมี 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่

1. การแทนที่อากาศภายในภาชนะบรรจุด้วยก๊าซผสมที่มีสัดส่วนขององค์ประกอบของก๊าซแต่ละชนิดตามต้องการ ซึ่งเรียกว่า Active modification
2. การอาศัยคุณสมบัติของฟิล์มพลาสติกที่ใช้เป็นภาชนะบรรจุเป็นตัวกำหนดสัดส่วนของก๊าซชนิดต่างๆ ที่อยู่ภายในภาชนะบรรจุ ซึ่งตามปกติแล้วฟิล์มพลาสติกที่ใช้มีความสามารถในการยอมให้ก๊าซชนิดต่างๆ ซึมผ่านได้ในอัตราที่แตกต่างกัน การเลือกฟิล์มพลาสติกที่เหมาะสมสามารถทำให้ระดับออกซิเจนภายในภาชนะบรรจุน้อยลงและเพิ่มระดับคาร์บอนไดออกไซด์ให้สูงขึ้น ซึ่งส่วนหนึ่งเกิดจากการที่ออกซิเจนถูกใช้ในกระบวนการหายใจตามธรรมชาติของผักผลไม้และปลดปล่อยเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ วิธีการดังกล่าวนี้เรียกว่า Passive modification

จากการศึกษาพบว่า การลดออกซิเจนหรือเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์อย่างใดอย่างหนึ่งให้ผลที่ไม่ดีเท่ากับการใช้ทั้งสองปัจจัยร่วมกัน การลดออกซิเจนสามารถช่วยลดอัตราการหายใจได้โดยตรง ในขณะที่การเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์ให้ผลในการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ โดยคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ช่วงเวลาในการพักตัวและเริ่มต้นในการแบ่งตัวของเชื้อจุลินทรีย์ยืดออกไป ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิในการเก็บรักษา

บรรยากาศดัดแปลงที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำและคาร์บอนไดออกไซด์สูงจะสามารถช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาเอนไซม์ในผักกาดหอมหั่นได้ดีและช่วยยับยั้งการเปลี่ยนแปลงทางสีระของผักผลไม้สดตัดแต่งที่เกิดจากฮอร์โมนเอทิลีนที่ผักผลไม้สร้างขึ้นเมื่อเนื้อเยื่อถูกทำลาย

จากการตัดแต่ง หั่นชิ้น หรือรอยชำ ผู้ประกอบการหลายรายนิยมใส่สารดูดซับเอทิลีนเข้าไปในบรรจุภัณฑ์ตัดแปลงบรรยากาศเพื่อหวังยืดอายุในการเก็บรักษาผักผลไม้สดตัดแต่งพร้อมบริโภค แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวอาจไม่มีประโยชน์เท่าที่ควร เนื่องจากการตัดแปลงบรรยากาศเองได้มีส่วนช่วยในการลดการผลิตเอทิลีนและผลที่เกิดขึ้นกับผักผลไม้จากเอทิลีนแล้วในระดับสูงแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สัดส่วนบรรยากาศใน MAP และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับผักผลไม้สดตัดแต่ง [2]

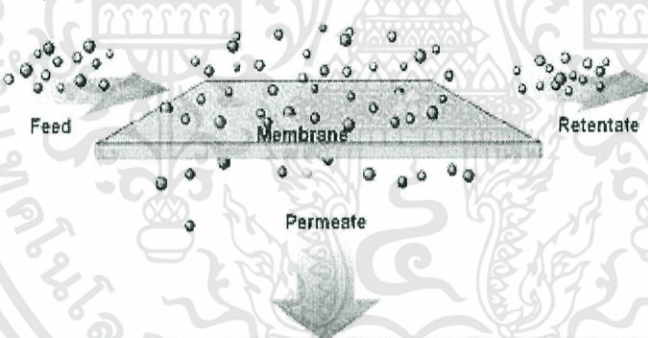
| ชนิดผักผลไม้                         | อุณหภูมิ<br>(°C) | สัดส่วนของบรรยากาศ (%) |                  | ประสิทธิผล |
|--------------------------------------|------------------|------------------------|------------------|------------|
|                                      |                  | ออกซิเจน               | คาร์บอนไดออกไซด์ |            |
| หัวบีท(แดง) ชูด, หั่นเต๋า, ปอกเปลือก | 0-5              | 5                      | 5                | ปานกลาง    |
| บรอกโคลี่                            | 0-5              | 2-3                    | 6-7              | ดี         |
| กะหล่ำปลี (หั่นฝอย)                  | 0-5              | 5-7.5                  | 15               | ดี         |
| แครอทหั่น                            | 0-5              | 2-5                    | 15-20            | ดี         |
| ต้นหอมหั่น                           | 0-5              | 5                      | 5                | ปานกลาง    |
| ผักกาดหอมหั่น                        | 0-5              | 0.5-3                  | 5-10             | ดี         |
| เห็ดสไลด์                            | 0-5              | 3                      | 10               | ไม่รับรอง  |
| หัวหอมหั่น                           | 0-5              | 2-5                    | 10-15            | ดี         |
| พริกหั่น                             | 0-5              | 3                      | 5-10             | ปานกลาง    |
| มันฝรั่งทั้งลูกปอกเปลือก, สไลด์      | 0-5              | 1-3                    | 6-9              | ดี         |
| มะเขือเทศสไลด์                       | 0-5              | 3                      | 3                | ปานกลาง    |
| แอปเปิ้ลสไลด์                        | 0-5              | <1                     | -                | ปานกลาง    |
| แคนตาลูปหั่นเต๋า                     | 0-5              | 3-5                    | 6-15             | ดี         |
| กีวี่สไลด์                           | 0-5              | 2-4                    | 5-10             | ดี         |
| ส้มสไลด์                             | 0-5              | 14-21                  | 7-10             | ปานกลาง    |
| พีชสไลด์                             | 0-5              | 1-2                    | 5-12             | ไม่ค่อยดี  |
| ลูกแพร์สไลด์                         | 0-5              | 0.5                    | <10              | ไม่ค่อยดี  |
| สตอเบอร์รี่สไลด์                     | 0-5              | 1-2                    | 5-10             | ดี         |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 เทคโนโลยีเมมเบรน [10]

### 2.4.1 กระบวนการเมมเบรน

กระบวนการเมมเบรนเป็นกระบวนการที่อาศัยเยื่อเมมเบรนในการแยกสารหรือเพิ่มความเข้มข้นหรือทำสารให้บริสุทธิ์ขึ้นสำหรับสารละลายหรือก๊าซผสม ซึ่งมีความแตกต่างจากกระบวนการแยกทั่วไป เช่น กระบวนการดูดซับ (Absorption) กระบวนการไล่ออก (Stripping) กระบวนการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid-liquid extraction) และการกลั่น (Distillation) หลักการสำคัญของกระบวนการเมมเบรน คือ อาศัยแรงขับเคลื่อนทำให้สารละลายไหลผ่านเมมเบรนแล้วเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้นหรือผลต่างของความดัน ลักษณะสำคัญของเมมเบรนคือ มีคุณสมบัติในการเลือกสารหนึ่งมากกว่าสารอื่น การเลือกผ่านสารเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีหรือทางกายภาพ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากกรณี Affinity ของเมมเบรนต่อสารนั้นๆ หรือจากขนาดรูพรุน ซึ่งสารละลายที่ผ่านเมมเบรนได้เรียกว่า เพอร์มิเอต (Permeate) ส่วนสารที่ไม่ผ่านเมมเบรนเรียกว่า รีเทนเตตหรือคอนเซนเทรต (Retentate หรือ Concentrate) หลักการกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หลักการของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน [10]

ฟลักซ์ (Flux) คือ อัตราการไหลผ่านเมมเบรน มีหน่วยเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักหรือโมเลกุลของเพอร์มิเอตต่อพื้นที่แผ่นเมมเบรน

### 2.4.2 การจำแนกกระบวนการเมมเบรน

การจำแนกกระบวนการแยกตามขนาดโมเลกุลและแยกเมมเบรนตามหลักการของแรงดัน สามารถแยกได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระบวนการไดอะไลซิส (Dialysis process, D) ให้ผลต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลายระหว่างสองด้านของเมมเบรน เป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการถ่ายเทผ่านเมมเบรน ตัวถูกละลายขนาดเล็กจะถ่ายเทโดยการแพร่ผ่านเมมเบรนจากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่อด้านที่มีความเข้มข้นต่ำ

2. กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis, ED) เป็นกระบวนการแยกองค์ประกอบที่มีประจุออกจากสารอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนมาต่ออนุกรมกันและอยู่ระหว่างขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) มีความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเป็นแรงขับเคลื่อนร่วมกับการเลือกผ่านไอออนของเมมเบรน โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไอออนบวก ส่วนไอออนลบจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไอออนลบ เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสูงและสารละลายเจือจาง

3. กระบวนการออสโมซิสผกกลับ (Reverse osmosis, RO) หรืออาจเรียกว่า Hyperfiltration เช่น กระบวนการแยกสลายโดยใช้ผลต่างระหว่างแผ่นความดันของเมมเบรน เช่น แรงขับเคลื่อนซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1-10 มิลลิปาสคาล หรือ 10-100 บรรยากาศ มีความสามารถในการกักเก็บโมเลกุลขนาดเล็ก (น้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 1000 หรือมีขนาด 0.1-1 นาโนเมตร) การผ่านเมมเบรนของสารเกิดจากความสามารถในการละลายและการแพร่ (Solution diffusion) ในเมมเบรน

4. กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) เป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) สำหรับแยกสาร โมเลกุลขนาดใหญ่ที่เรียกว่า คอลลอยด์ (Colloid) ออกจากน้ำและสาร โมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่งเมมเบรนมีรูพรุนประมาณ 2-20 นาโนเมตร แรงขับเคลื่อนที่ใช้ในการแยกต่ำกว่าออสโมซิสผกกลับ คือ 100-800 กิโลปาสคาล

5. กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) เป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรนที่มีรูพรุนค่อนข้างใหญ่ คือ 0.1-10 นาโนเมตร สำหรับแยกโมเลกุลขนาดใหญ่ สารแขวนลอย หรืออนุภาคเล็กๆ ออกจากของเหลว โดยใช้ความดันอยู่ในช่วง 100-500 กิโลปาสคาล

6. กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) เป็นเมมเบรนที่ใช้ขนาดรูพรุนค่อนข้างใหญ่ คือ 2-5 นาโนเมตร โดยกักเก็บไอออนไว้บางส่วน ไอออนที่มีขนาดเล็กและสารอินทรีย์น้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้

7. กระบวนการการแยกก๊าซ (Gas separation) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกก๊าซผสมแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ กลไกก๊าซเพอร์มิเอชัน (Gas permeation, GP) ซึ่งโมเลกุลของก๊าซหรือไอผ่านเมมเบรนแบบแน่นไม่มีรูพรุนด้วยกลไกการละลายและการแพร่ (คล้ายออสโมซิสผกกลับ) ใช้

แรงดันในการแยก 100 กิโลปาสกาล–10 เมกะปาสกาล และกลไกก๊าซดิฟฟิวชัน (Gas diffusion, GD) เป็นการแยกก๊าซผ่านเมมเบรนรูพรุนขนาดเล็ก แรงขับเคลื่อนเป็นผลต่างของความเข้มข้นหรือความดันย่อย

8. กระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน (Pervaporation, PV) เป็นการแยกองค์ประกอบหนึ่งออกจากสารผ่านเมมเบรนแบบแน่นด้วยกลไกการละลายและการแพร่ องค์ประกอบที่ผ่านเมมเบรนอยู่ในรูปของไอ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการควบคุมความดันด้านเพอร์มิเอตให้ต่ำกว่าความดันย่อยของสารที่ผ่านเมมเบรนและการเก็บตัวอย่างที่เป็นไอ สามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิให้สารนั้นกลั่นตัวกลับมาเป็นของเหลว และในปัจจุบันพบว่ามีการนำเมมเบรนมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมของกระบวนการการแยกด้วยเมมเบรน [10]

|   |
|---|
| 1) Reverse osmosis;<br>- กระบวนการผลิตน้ำจืดจากน้ำกร่อย<br>- กระบวนการบำบัดสิ่งสกปรกออกจากน้ำเสีย<br>- กระบวนการบำบัดน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน<br>- กระบวนการแยกแอลกอฮอล์ออกจากเบียร์และไวน์  |
| 2) Electrodialysis;<br>- การผลิตเกลือจากน้ำทะเล<br>- การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำทะเลจากกระบวนการ RO<br>- การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating)<br>- กระบวนการผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม Semiconductor |
| 3) Microfiltration;<br>- กระบวนการฆ่าเชื้อโรคของยาและเครื่องดื่ม<br>- การทำยาปฏิชีวนะให้มีความบริสุทธิ์ขึ้น<br>- กระบวนการแยกเซลล์สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมออกจากของเหลว   |
| 4) Dialysis;<br>- กระบวนการแยกนิกเกิลซัลเฟตออกจากกรดซัลฟิวริก<br>- กระบวนการแยกของเสียออกจากกระบวนการเผาผลาญอาหาร   |
| 5) Ultrafiltration;<br>- กระบวนการทำน้ำผลไม้ให้ใสขึ้น   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  |
|--|
| 6) Pervaporation;<br>- การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล-น้ำที่จุดอะซิโโทรอป<br>- การแยกน้ำออกจากสารละลายอินทรีย์<br>- การแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำ   |
| 7) Gas permeation;<br>- กระบวนการแยก CO <sub>2</sub> หรือ H <sub>2</sub> ออกจากมีเทนหรือสารไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ<br>- การปรับปรุงอัตราส่วน H <sub>2</sub> /CO ในก๊าซสังเคราะห์<br>- กระบวนการการแยกไนโตรเจนออกจากออกซิเจนในอากาศ<br>- การแยกคีนีอีเลียมและการแยกคีนีมีเทนจากก๊าซชีวภาพ |

### 2.4.3 อุปกรณ์เมมเบรน (Membrane module types)

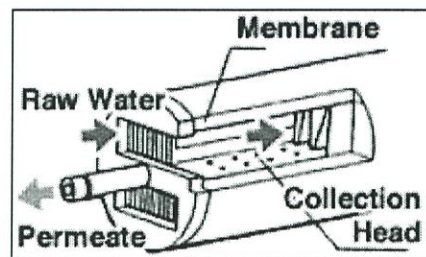
ในการใช้งานต้องบรรจุหรือประกอบเมมเบรนในหน่วยอุปกรณ์ เพื่อให้มีพื้นที่ของเมมเบรนตามต้องการซึ่งเรียกว่า โมดูล (Module) การออกแบบอุปกรณ์ที่มีรูปร่างต่างกันโดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ แบบแผ่นและแบบกรอบ แบบท่อ แบบท่อม้วนและแบบเส้นใยกลวง หลักการออกแบบต้องคำนึงถึงการใช้งาน คือ ต้องมีอัตราการไหลผ่านสูง ลดการสะสมที่ผิวหน้าของเมมเบรน กะทัดรัด คือ มีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง ตัวอย่างการนำอุปกรณ์เมมเบรนแบบต่างๆ ไปใช้งาน แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างการนำอุปกรณ์เมมเบรนแบบต่างๆ ไปใช้งาน [10]

|  | แผ่นเรียบ     | ท่อม้วน       | ท่อ    | เส้นใยกลวง |
|--|---------------|---------------|--------|------------|
| พื้นที่/ปริมาตร (m <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> ) | 30-500        | 200-800       | 30-200 | 500-9,000  |
| การเกิด Fouling                                    | ปานกลาง       | ปานกลาง       | ต่ำ    | สูง        |
| การทำความสะดวก                                     | ปานกลาง       | ปานกลาง       | ง่าย   | ยาก        |
| ราคา   | สูง           | ต่ำ           | สูง    | ต่ำ        |
| Main application                                   | D,RO,PV,UF,MF | D,RO,GP,UF,MF | RO,UF  | D,RO,GP,UF |

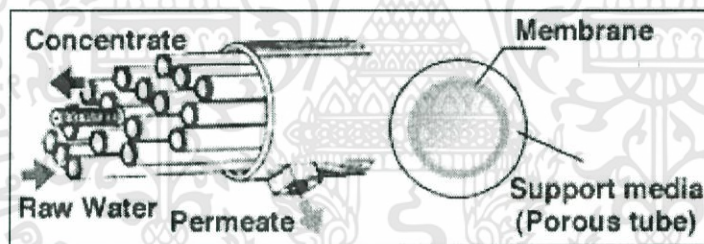
1. อุปกรณ์แบบแผ่นและแบบกรอบ (Plant and frame module) เมมเบรนแบบแผ่นจะใช้อุปกรณ์แบบแผ่นและแบบกรอบ มีลักษณะภาคตัดขวางเป็นวงกลมและสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมมเบรนจะประกบติดกันด้วยแผ่นกันซึ่งจะมีช่องว่างเพื่อให้ส่วนของเพอร์มิเอตสามารถไหลผ่านได้ แสดงดังรูปที่ 2.4 อุปกรณ์แบบนี้มีการออกแบบโครงสร้างอย่างง่ายและสามารถนำมาใช้งานได้สะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



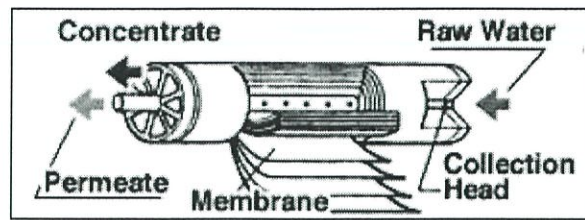
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์แบบแผ่นและแบบกรอบ [10]

2. อุปกรณ์แบบท่อ (Tubular module) เมมเบรนท่อ แสดงดังรูปที่ 2.5 มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าหรือเท่ากับ 10 มิลลิเมตร โดยปกติในตัวบรรจุ (Housing) ประกอบด้วยท่อเมมเบรนหลายๆ ท่อรวมกัน และอาจสูงถึง 30 ท่อ สารละลายป้อนจะไหลเข้าด้านในท่อและเพอร์มิเอตซึ่งไหลผ่านจะถูกเก็บมารวมกัน ชุดอุปกรณ์แบบนี้มีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์ต่ำกว่าแบบแผ่นและแบบกรอบ นอกจากเมมเบรนจะผลิตมาจากพอลิเมอร์แล้วยังนิยมผลิตเมมเบรนจากเซรามิกส์แบบท่อ



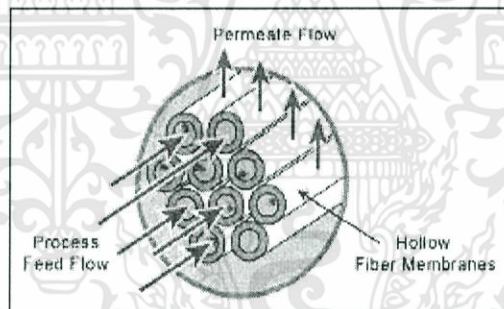
รูปที่ 2.5 อุปกรณ์แบบท่อ [10]

3. อุปกรณ์แบบท่อม้วน (Spiral wound module) เป็นการนำเมมเบรนแผ่นเรียบมาม้วนรอบแกนโดยมีแผ่นกั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงถึง 40 เซนติเมตร แผ่นเมมเบรนชั้นหนึ่งๆ ประกอบด้วยแผ่นเมมเบรน 2 แผ่น โดยเมมเบรนทั้ง 2 แผ่นจะถูกกั้นด้วยแผ่นกั้น เพื่อให้เพอร์มิเอตและสารป้อนสามารถไหลผ่านได้ สารละลายป้อนจะไหลตามแนวแกนและเพอร์มิเอตจะไหลภายในท่อ ข้อดีของอุปกรณ์แบบท่อม้วน คือ มีความแข็งแรงสามารถทนต่อการใช้งานที่ความดันสูงๆ ได้ ขนาดกะทัดรัดและโอกาสในการเกิด Concentration polarization มีน้อย อุปกรณ์แบบท่อม้วนแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์แบบท่อม้วน [10]

4. อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber module) เมมเบรนแบบนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากคือน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ภายในชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยเมมเบรนเส้นใยจำนวนมากคือมากกว่า 1 ล้านเส้นใย สารละลายป้อนจะถูกป้อนจากด้านในของเส้นใยและเก็บเพอร์มิเอตจากด้านนอกของเส้นใย ข้อดีของเมมเบรนแบบนี้คือ เป็นเมมเบรนที่มีความยืดหยุ่นอุปกรณ์จะมีขนาดเล็กกว่าอุปกรณ์เมมเบรนแบบอื่นๆ แต่ให้ประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียคือ มีราคาแพง การวิจัยและพัฒนาเมมเบรนแบบนี้มีน้อยและเกิดการอุดตันได้ง่าย อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวงแสดงดังรูปที่ 2.7 จะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-0.25 เมตร และยาว 1 เมตร



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง [10]

#### 2.4.4 กระบวนการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน

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

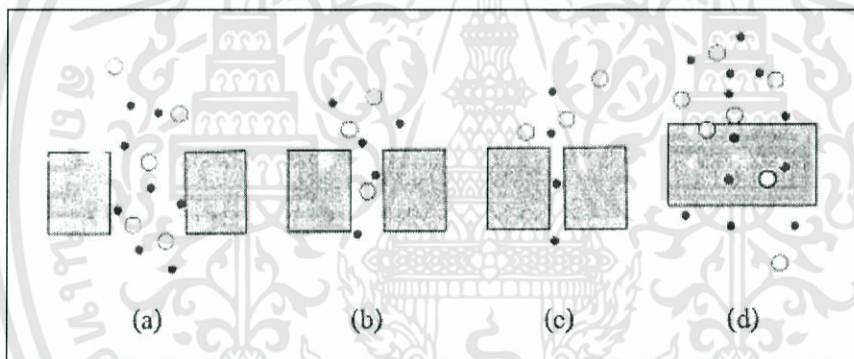
##### 2.4.4.1 กลไกก๊าซดิฟฟิวชัน (Gas diffusion)

ในการแยกก๊าซโดยใช้เยื่อแผ่นรูพรุน แรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทอาจเป็นผลต่างของความเข้มข้นหรือความดันย่อย และยังแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

1) ถ้ารูพรุนของเมมเบรนใหญ่กว่าโมเลกุลของก๊าซมาก โมเลกุลของก๊าซภายใต้ความดันสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุน โดยการพามวล ทำให้โมเลกุลของก๊าซทุกชนิดผ่านเมมเบรนได้เท่าๆกัน และจะไม่เกิดการแยก

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

3) รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กมาก ทำให้ก๊าซที่มีโมเลกุลใหญ่กว่าไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้จึงเกิดการแยกขึ้น และเรียกกลไกนี้ว่าการคัดขนาด หรือ Molecular sieving ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กลไกการถ่ายโอนในเมมเบรน กลไกของก๊าซดิวไฟวชัน; (a) รูพรุนของเมมเบรนใหญ่กว่าโมเลกุลของก๊าซมาก (b) รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กกว่าระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ได้โดยไม่ชนกัน (c) รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กมาก (d) กลไกก๊าซเพอร์มิเอชัน [10]

ในทางปฏิบัติการผลิตเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กพอที่จะกักกันโมเลกุลของก๊าซทำได้ยาก เนื่องจากโมเลกุลของก๊าซมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของตัวถูกละลายอื่นๆมาก นอกจากนี้การแยกก๊าซโดยใช้เมมเบรนรูพรุนยังมีข้อจำกัดตรงที่ค่าการแยกต่ำ

#### 2.4.4.2 กลไกก๊าซเพอร์มิเอชัน (Gas permeation)

ถ้าเมมเบรนที่ใช้ในการแยกก๊าซเป็นเมมเบรนแบบเนื้อแน่น แรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทเป็นผลจากความต่างของความดันหรือความเข้มข้นของก๊าซ การเคลื่อนที่ผ่าน

เมมเบรนสามารถอธิบายด้วยกลไกการละลายการแพร่ (Solution-diffusion mechanism) สมมติฐานพื้นฐานของการซึมผ่านเมมเบรน คือ

- 1) ไอผสมที่ป้อนเข้าสู่เมมเบรนถูกละลายหรือดูดซับเข้าสู่ผิวเมมเบรน
- 2) ไอผสมเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนโดยกลไกการแพร่
- 3) องค์กรประกอบที่สามารถซึมผ่านเมมเบรนจะเคลื่อนที่มาด้านเพอร์มิเอต

พลักซ์ของเมมเบรน ขึ้นอยู่กับการที่โมเลกุลก๊าซต่างชนิดมีการละลายในเมมเบรนและสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเมมเบรนที่แตกต่างกัน การแพร่ของก๊าซเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นสามารถคำนวณค่าพลักซ์จากสมการของฟิคส์ (Fick's law) ดังสมการ

$$J_i = \frac{-D_i dC_i}{dx}$$

|       |       |   |  |
|-------|-------|---|--|
| เมื่อ | $J_i$ | = | พลักซ์เชิงโมลของก๊าซ i ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )           |
|       | $D_i$ | = | สัมประสิทธิ์การแพร่ของ i ในเมมเบรน ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) |
|       | $C_i$ | = | ความเข้มข้นเชิงโมลของก๊าซ ( $\text{kg/m}^3$ )                |
|       | $d$   | = | ความหนาของเมมเบรน (m)  |

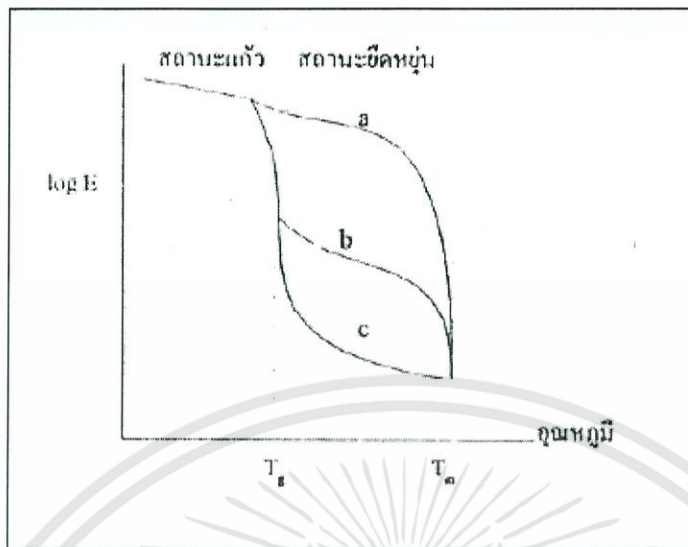
พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเมมเบรนสำหรับกระบวนการแยกก๊าซ ส่วนมากเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (Random orientation) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  โมเลกุลพอลิเมอร์อสัณฐานเคลื่อนที่ได้จำกัด (หรืออยู่สถานะคล้ายแก้ว) มีการซึมผ่านต่ำแต่มีการเลือกผ่านเนื่องจากขนาดและรูปร่างของโมเลกุลก๊าซ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $T_g$  สายโซ่มีความยืดหยุ่นสูง (อยู่สถานะยืดหยุ่น) การซึมผ่านสูงแต่การเลือกผ่านลดลง

สภาพการซึมผ่าน  $P_i$  (Permeability) เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับการละลายขององค์กรประกอบของก๊าซและสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์กรประกอบนั้นในเมมเบรน อัตราการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน สามารถทำได้โดยใช้เมมเบรนแบบบางๆ และความดันด้านสารป้อนสูง สภาพการซึมผ่านขององค์กรประกอบก๊าซเมมเบรนพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับการละลายของก๊าซในพอลิเมอร์ซึ่งพบว่า ถ้าก๊าซมี Affinity กับพอลิเมอร์สูงทำให้การละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของโมเลกุลก๊าซในพอลิเมอร์ดีขึ้น ซึ่งสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นอยู่กับการละลายและชนิดพอลิเมอร์ โมเลกุลขนาดเล็กจะมีสัมประสิทธิ์การแพร่สูง

#### 2.4.5 วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน

เมมเบรนที่ใช้สำหรับกระบวนการก๊าซเพอร์มิเอชันส่วนใหญ่ผลิตมาจากสารอินทรีย์ที่ทำจากพอลิเมอร์แต่ในปัจจุบันเริ่มมีการใช้สารอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ โลหะ แก้ว และ เซรามิกส์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาและพัฒนาเมมเบรนอนินทรีย์ชนิดใหม่จากซีโอไลต์ (Zeolite) การเลือกชนิดของวัสดุเพื่อนำมาผลิตเมมเบรนขึ้นอยู่กับ การนำไปใช้งานและชนิดของวัสดุที่นำมาผลิตเมมเบรนในทางการค้ามีดังนี้

1. พอลิเมอร์ เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เรียกว่า โมโนเมอร์ (Monomer) มาต่อกันสายโซ่ยาว ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลจึงขึ้นอยู่กับจำนวนหน่วยในสายโซ่และน้ำหนักโมเลกุลของหน่วยย่อย โดยที่พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยชนิดเดียวกันในสายโซ่ เรียกว่า โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) มีพอลิเมอร์หลายชนิดที่ผลิตจากโมโนเมอร์มากกว่า 1 ชนิด เรียกว่า โคพอลิเมอร์ (Copolymer) สถานะของพอลิเมอร์ สถานะคล้ายแก้วหรือสถานะยึดหยุ่นมีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติทางเชิงกล ทางความร้อนและสภาพการซึมผ่านเมมเบรน เมื่อพอลิเมอร์ได้รับความร้อนจนอุณหภูมิสูงถึงค่าหนึ่งจะเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วไปเป็นสถานะยึดหยุ่น อุณหภูมินั้น คือ Glass transition temperature ( $T_g$ ) ในสถานะคล้ายแก้วสายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้จำกัด คือ ไม่สามารถหมุนรอบแกนของสายโซ่หลักได้อย่างอิสระ ซึ่งมีผลทำให้สภาพการซึมผ่านสารของเมมเบรนต่ำ ในสถานะยึดหยุ่นหรือที่อุณหภูมิสูงกว่า  $T_g$  พอลิเมอร์มีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะความแข็งแรงของพันธะได้จึงเคลื่อนไหวได้มากขึ้น สภาพการซึมผ่านของก๊าซดีขึ้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เมื่อมีการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วไปเป็นสถานะยึดหยุ่นอธิบายได้ตามรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นมอดูลัสสะสม (E') เทียบกับอุณหภูมิ สำหรับพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง ได้แก่ เส้น a ซึ่งค่า E' เปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปลี่ยนสถานะจากคล้ายแก้วไปเป็นสถานะยึดหยุ่น ส่วนเส้น b สำหรับพอลิเมอร์กึ่งผลึกมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างช้าๆ เส้น c สำหรับพอลิเมอร์อสัณฐานเมื่อถึงจุด  $T_g$  ค่า E' มีการเปลี่ยนแปลงที่มากที่สุด พอลิเมอร์ที่มี  $T_g$  สูงจะมีความคงทนต่อความร้อนและสารเคมีที่ดี เพราะการเคลื่อนไหวของสายโซ่ต่ำและอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่แข็งแรง ดังนั้นเราจึงควรทราบถึงค่า  $T_g$  เพื่อใช้เลือกพอลิเมอร์ในการผลิตเมมเบรน ตัวอย่าง  $T_g$  ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.9 โมดูลัสสะสม (E) ของพอลิเมอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะคล้ายแก้วไปเป็นสถานะยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ (a) พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกอย่างสมบูรณ์ (b) พอลิเมอร์กึ่งผลึก (c) พอลิเมอร์อสัณฐาน [10]

ตารางที่ 2.6 Glass transition temperature ( $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [10]

| พอลิเมอร์               | $T_g$ (องศาเซลเซียส) | พอลิเมอร์               | $T_g$ (องศาเซลเซียส) |
|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| Polydimethylsiloxane    | -123                 | Cellulose diacetate     | 80                   |
| Polyethylene            | -120                 | Polyvinyl alcohol       | 85                   |
| Natural rubber          | -72                  | Polyvinyl chloride      | 87                   |
| Polyvinylidene fluoride | -40                  | Polyacrylonitrile       | 120                  |
| polymethylacrylate      | 10                   | Polytetrafluoroethylene | 126                  |
| Nylon 6                 | 50                   | Polycarbonate           | 150                  |
| Cellulose nitrate       | 53                   | Polysulfone             | 190                  |

2. สารอนินทรีย์สำหรับผลิตเมมเบรน เมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุอนินทรีย์มีสมบัติทางเคมีและความร้อนที่เหนือกว่าเมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ สารอนินทรีย์ที่นิยมนำมาผลิตเมมเบรนสังเคราะห์ ได้แก่ เซรามิกส์ โลหะ แก้ว และซีโอไลต์ ในปัจจุบันได้มีการนำเมมเบรน อนินทรีย์มาใช้ในกระบวนการอัลตราฟิวเตรชัน ไมโครฟิวเตรชันและการแยกก๊าซเท่านั้น สำหรับกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน การผลิตเมมเบรนอนินทรีย์ยังมีการวิจัยและกำลังพัฒนาอยู่โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุอนินทรีย์ชนิดใหม่ที่น่าสนใจนำมาผลิตเมมเบรน ได้แก่ สารจำพวกซีโอไลต์ เช่น Silicalite, Zeolite Na-A, Zeolite Na-X และ Zeolite Na-Z เนื่องจากพบว่ามีการกระจายของรูพรุนแคบจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทั้งในกระบวนการเพอร์เวปอเรชันและกระบวนการเวเปอร์เพอร์มิเอชัน

#### 2.4.6 วิธีการผลิตเมมเบรนสังเคราะห์แบบเนื้อแน่น

การเตรียมเมมเบรนแบบเนื้อแน่นสามารถผลิตได้หลายวิธี ดังนี้คือ

1. เมมเบรนผลิตจากสารละลายพอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์และตัวทำละลาย นำสารละลายทำเป็นแผ่นบางๆ หรือ Cast ลงบนแผ่นรองรับแล้วให้ตัวทำละลายระเหยออกจนหมดได้เมมเบรนแบบเนื้อแน่น และมีความเป็นผลึกสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดอื่นๆ ตัวแปรสำคัญในการกำหนดสมบัติเมมเบรนแบบนี้ คือ อัตราการระเหยของตัวทำละลาย (Evaporation/Desolvation) องค์ประกอบของสารละลายและความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศขณะระเหย

2. เมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเมอร์หลอมเหลว พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก เมื่อหลอมเหลวสามารถทำให้มีรูปร่างตามต้องการได้ เมื่อทำให้เย็นตัวเป็นเมมเบรนจะมีรูปร่างที่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ เช่น แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุล และการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวหรือทำให้หลอมเหลว เป็นต้น

3. เมมเบรนที่เกิดระหว่างพอลิเมอร์ไรเซชัน ในขณะที่เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งอาจมีการเชื่อมขวางและการเกิดการเคลื่อนย้ายของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ (Chain transfer) เกิดขึ้นด้วย มีการทำให้พอลิเมอร์ตกผลึกอย่างช้าๆ และทำให้เป็นแผ่นฟิล์ม อัตราเร็วของปฏิกิริยามีผลต่อโครงสร้างของเมมเบรน ถ้าเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันช้าๆ จะได้เมมเบรนเนื้อแน่นหรือมีความเป็นผลึกสูง

4. เมมเบรนแบบบางมาก (Ultrathin membrane) เป็นเมมเบรนแบบเนื้อแน่นที่มีความหนาแน่นระหว่าง 50-5,000 Å ข้อดีของเมมเบรนแบบนี้คือ มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient) สูง เพราะบางมาก การพัฒนาเมมเบรนแบบนี้นำไปสู่การผลิตเมมเบรนแบบไม่สมมาตรซึ่งใช้กันอยู่เป็นส่วนใหญ่ การผลิตเมมเบรนแบบบางมากอาจเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์เจือจาง โดยการจุ่มแผ่นแก้วลงในสารละลาย สารละลายจะเกาะบนแผ่นแก้ว เมื่อแช่ลงในน้ำเมมเบรนจะลอกหลุดออกหรืออาจทำเป็นแผ่นบางบนแผ่นรองรับ

#### 2.4.7 ข้อดีของเทคโนโลยีเมมเบรน [11]

กระบวนการเมมเบรนมีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการอื่นๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การแยกตามขนาดของโมเลกุล (รูปร่างหรือขนาดประจุ) ทำให้สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิปกติ เหมาะสมสำหรับการแยกสารที่อาจเสื่อมสภาพเพราะความร้อนได้
2. กระบวนการเมมเบรนส่วนใหญ่ ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำ เพราะสามารถแยกโดยไม่ต้องเปลี่ยนเฟส
3. ไม่ก่อให้เกิดของเหลือทิ้ง เนื่องจากกระบวนการเมมเบรนทำให้สามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งเพอร์มิเอตและรีเทนเทต
4. สามารถขยายขนาดจากระดับต้นแบบในห้องทดลองให้เป็นระดับอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากชุดเมมเบรนมีลักษณะเป็น โมดูล (Module) หรือหน่วยและสามารถนำหน่วยย่อยๆ มาต่อเรียงกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแยกได้
5. การลงทุนในกระบวนการต่ำ ติดตั้งง่าย สามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย มีขนาดเล็กกะทัดรัด และไม่เปลืองพื้นที่ในการดำเนินการ

## 2.5 พอลิเมอร์ผสม

### 2.5.1 พอลิเมอร์ผสม

จากความต้องการผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่หลากหลายของตลาด ทำให้ผู้ผลิตพอลิเมอร์ได้มีการพัฒนาพอลิเมอร์ผสมขึ้นมาเป็นทางเลือกหนึ่งในการเตรียมพอลิเมอร์ชนิดใหม่ให้ตรงตามความต้องการของตลาด เนื่องพอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend) คือสารผสมที่เกิดจากผสมพอลิเมอร์อย่างน้อย 2 ชนิดขึ้นไป หรือพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) ดังนั้นการเตรียมพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติเฉพาะจึงเกิดจากการนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติที่ไม่สามารถได้จากพอลิเมอร์ชนิดเดียว การเตรียมพอลิเมอร์ส่วนใหญ่มักใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงวิศวกรรมที่มีความทนทานต่อแรงเชิงกลและอุณหภูมิสูงซึ่งได้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ดังนั้นจึงทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่น โดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่า การผสมถือว่าการผสมที่ง่าย สะดวก และราคาไม่สูงมาก เมื่อเทียบกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่จากมอนอเมอร์ นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณขยะจากเศษพอลิเมอร์จากผลิตภัณฑ์โดยการนำเศษขยะพอลิเมอร์มาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นกลายเป็นพอลิเมอร์ผสมได้

พอลิเมอร์ผสมแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ [12]

### 1. พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend)

Miscibility คือ ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ในระดับโมเลกุล ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ ทำให้พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันมีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์สองชนิด โดยมีปัจจัยเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ ได้แก่ ความมีขั้ว คล้ายกัน น้ำหนักโมเลกุลและความเป็นผลึกต่ำ รวมทั้งการสร้างพันธะไฮโดรเจนร่วมกัน เป็นต้น

### 2. พอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend)

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

วัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสม

1. เพื่อให้สมบัติดีขึ้นและมีราคาถูกลง
2. เพื่อพัฒนาสมบัติให้ได้ตามต้องการ
3. เพื่อให้สมบัติเด่นของพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น
4. เพื่อปรับปรุงส่วนประกอบของการผสมตามที่ลูกค้าต้องการ
5. เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น การนำเศษพลาสติกหลายชนิดกลับมาขึ้นรูปใหม่

ในการเลือกพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมต้องคำนึงถึงข้อดีข้อเสียของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งต้องชดเชยข้อเสียของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

#### 2.5.2 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมมีหลากหลายวิธี ดังนี้

1. การผสมด้วยแรงเชิงกล (Mechanical mixing) เป็นการผสมพอลิเมอร์โดยใช้แรงเชิงกล รวมถึงกระบวนการแปรรูปซึ่งเป็นกระบวนการหลอมเหลวพอลิเมอร์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Melting temperature,  $T_m$ )

2. การผสมด้วยการละลาย (Solution casting) เป็นการผสมพอลิเมอร์ด้วยการละลายพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดในตัวทำละลาย โดยการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับค่าบ่งชี้การละลาย (Solubility parameter) ข้อเสียของวิธีนี้คือ เมื่อได้พอลิเมอร์ผสมแล้วต้องทำการระเหยตัวทำละลาย

3. การผสมในสถานะของเหลว (Latex blending) เป็นการผสมพอลิเมอร์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization reaction)

4. การผสมในสถานะผง (Fine powder mixing) เป็นการผสมพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะผง เช่น การผสมแบบความเร็วสูง (High speed mixer)

5. การผสมแบบสอดประสาน (IPNs) เป็นการผสมพอลิเมอร์โดยการเติมมอนอเมอร์ที่ทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวทำละลายลงไปในพอลิเมอร์อีกตัวหนึ่งแล้วทำให้เกิดการปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

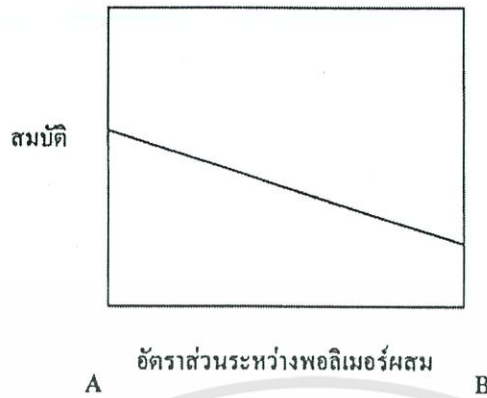
สำหรับวิธีการผสมที่ได้รับความนิยม คือ การผสมด้วยแรงเชิงกล เนื่องจากความสะดวก รวดเร็ว ความง่ายในการผสม ส่งผลให้ระยะเวลา ต้นทุนการผสมในการผลิตผลิตภัณฑ์น้อยกว่าวิธีอื่น ซึ่งการผสมด้วยแรงเชิงกลเป็นกระบวนการผสมโดยมีการหลอมเหลวพอลิเมอร์ด้วยความร้อน (Melt blending)

### 2.5.3 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเมอร์ผสม

เมื่อนำพอลิเมอร์ A และ B มาผสมในอัตราส่วน 100/0 ถึง 0/100 และเขียนกราฟระหว่างสมบัติกับอัตราส่วน A/B สมบัติที่ได้จะแบ่งเป็น 2 แบบ ดังนี้

แบบที่ 1 ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible)

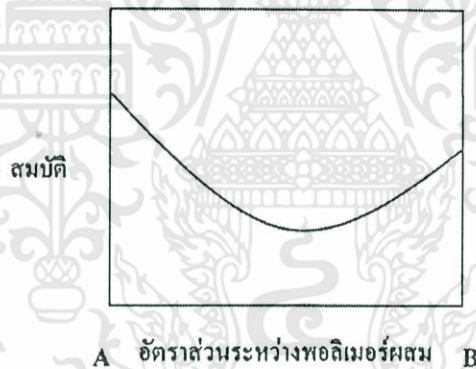
ถ้าพอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยทั่วไปสมบัติที่ได้ขึ้นกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรงหรืออย่างน้อยที่สุดเป็นเส้นโค้งสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน [13]

แบบที่ 2 ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible)

ถ้าพอลิเมอร์สองชนิดไม่สามารถผสมเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์และแยกออกเป็นวัฏภาค (Interphase) มีแรงดึงดูดระหว่างกันน้อยมาก ดังนั้นอาจทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมลดต่ำลงมากกว่าพอลิเมอร์เดิม จึงทำให้กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงายขึ้น ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน [13]

## 2.6 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น [14]

### 2.6.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ LLDPE

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) เป็นเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดใหม่ที่เกิดโดยใช้กระบวนการความดันต่ำ สามารถควบคุมโครงสร้างของโมเลกุลพอลิเอทิลีนได้ดีกว่ากระบวนการผลิตแบบเก่าที่ใช้ความดันสูง ทำให้เม็ดพลาสติกที่ผลิตได้เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นเส้นตรง มีกิ่งก้านสาขาเล็กๆ กระจายตลอดความยาวของเส้นตรงและมีการกระจายของ

น้ำหนักของโมเลกุลแคบ ทำให้ LLDPE เป็นพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงโมเลกุลเป็นระเบียบกว่า LDPE (ซึ่งมีกิ่งที่มีความยาวและมีตำแหน่งแบบสุ่ม) ความเป็นระเบียบของโครงสร้างของกิ่งใน LLDPE ได้มาจากการทำปฏิกิริยาของเอทิลีนร่วมกับโคมอนอเมอร์ เช่น พวกกิวเทน (Butane), พรอพิลีน (Propylene), เฮกเซน (Hexane), ออกเทน (Octane) เป็นต้น โดยโคมอนอเมอร์เหล่านี้จะมีจำนวนคาร์บอนอะตอมเพิ่มขึ้นตามลำดับ ความยาวของกิ่งใน LLDPE ที่ผลิตจะขึ้นอยู่กับจำนวนคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลโคมอนอเมอร์ที่ใช้ตัวเร่งที่ใช้ในการเตรียม LLDPE เช่น ไททาเนียม-เฮไลด์สังเคราะห์ชนิดต่างๆ เช่น อะลูมินา เป็นต้น

### 2.6.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LLDPE

1. มีความทนแรงกระแทกของอุณหภูมิต่ำกว่า LDPE
2. ความต้านแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ ประมาณ  $-40^{\circ}\text{C}$  พลาสติก LLDPE ที่ดรรชนีการไหลเดียวกันกับ LDPE จะมีความต้านทานแรงกระแทกดีกว่า
3. มีความต้านทานแรงเฉาะทะลุดีกว่า 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 เข้าไปปรับกวนการตกผลึกของโมเลกุลของ LLDPE ทำให้ได้ฟิล์มใสขึ้น
8. สมบัติเชิงกลดีกว่า LDPE เช่น ทนแรงฉีกขาด ทนต่อแรงที่มึนทะลุได้ดีกว่า
9. ชุ่มกว่า LDPE
10. สามารถใช้ที่อุณหภูมิต่ำได้

### 2.6.3 การนำไปใช้งานในปัจจุบัน

LLDPE นิยมนำมาใช้ประโยชน์สำหรับงานฟิล์ม เนื่องจากมีสมบัติเด่นในเรื่องของความใสความสามารถในการขึ้นรูป ยืดเกาะได้ดีกับซับสเตรตต่างๆ และสมบัติเชิงกลที่ดี จากสมบัตินี้ทำให้ผลิตภัณฑ์ InnoPlus LLDPE ในกลุ่มฟิล์มสามารถผลิตฟิล์มที่มีความหลากหลาย เช่น บรรจุภัณฑ์อาหารฟิล์มแช่แข็ง ฟิล์มที่ต้องการความแข็งแรงสูง ฟิล์มเกษตรถุงอุตสาหกรรม ฟิล์มยืด ฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลามิเนตหรือฟิล์มที่มีหลายชั้นใช้กับบรรจุภัณฑ์ปลอดเชื้อ (Aseptic packaging) โดยใช้เป็นชั้นหรือตัวกลางปิดผนึกสำหรับ Sealing layer เป็นต้น

## 2.7 ยางเทอร์โมพลาสติก

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomers, TPEs) เป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยาง นิ่มตัว ยืดหยุ่นได้ แต่ต่างจากยางทั่วไป คือ สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งเหมือนเทอร์โมพลาสติก TPEs มีสมบัติเป็นของไหล (Fluid) ที่อุณหภูมิสูง และทำให้กลายเป็นวัสดุแข็ง โดยการหล่อเย็น (Cooling) ทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติคล้ายยาง [15] แต่สามารถขึ้นรูปได้โดยใช้อุปกรณ์เครื่องมือเดียวกันกับพลาสติก เช่น เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) เครื่องเป่าขึ้นรูป (Blow molders) และเครื่องอัดรีด (Extruder) เป็นต้น ดังนั้นจึงตัดขั้นตอนการคอมพาวด์และการเชื่อมโยงของกระบวนการขึ้นรูปข้างออกไปได้ เศษเหลือทิ้งจากกระบวนการสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และด้วยขั้นตอนที่ลดลงทำให้การใช้กำลังคนลดลงตามไปด้วย

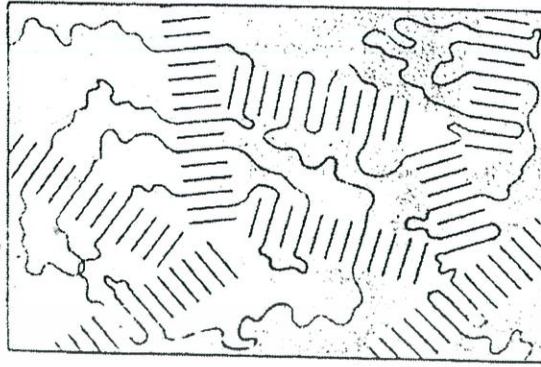
อย่างไรก็ตาม TPEs ยังมีข้อด้อยกว่ายาง เช่น สมบัติการเปลี่ยนรูปร่างถาวรเมื่อได้รับแรงกดอัด (Compression set) สมบัติที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการใช้งาน (Service temperature) และสมบัติการต้านทานต่อน้ำมันและตัวทำละลาย (Resistance to oil and solvents) ซึ่งสมบัติเหล่านี้ต้องคำนึงสำหรับการใช้งานบางประเภท เช่น การใช้งานภายในรถยนต์ ในขณะเดียวกันการใช้งานบางประเภทมีการคำนึงถึงสมบัติดังกล่าวน้อยมาก เช่น อุตสาหกรรมพื้นรองเท้า ฉนวนหุ้มไฟฟ้า ท่อ และของเล่นเด็ก เป็นต้น

การที่ TPEs มีสมบัติต่างๆ เช่น สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งเหมือนพลาสติกและยืดหยุ่นได้คล้ายยาง [16] เนื่องจากโครงสร้างของ TPEs ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1) ส่วนแข็ง (Hard segments) เป็นส่วนของเทอร์โมพลาสติก ทำหน้าที่เหมือนจุดเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslink) ทำให้ TPEs มีความแข็งแรง (Strength) โครงสร้างส่วนแข็งนี้สามารถย้อนกลับไปได้เมื่อให้ความร้อน กล่าวคือ สามารถหลอมเหลวแยกออกจากกัน เมื่อให้ความร้อนในการขึ้นรูป และกลับเข้ามารวมกันใหม่ได้เมื่อเย็นตัว [16]

2) ส่วนอ่อน (Soft segment) มีลักษณะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) มีอิสระในการเคลื่อนที่มากกว่าส่วนแข็ง เป็นส่วนที่อุณหภูมิละลายสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ต่ำ ดังนั้นที่อุณหภูมิใช้งาน จึงมีความยืดหยุ่นคล้ายยาง

ส่วนแข็งและส่วนอ่อนของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



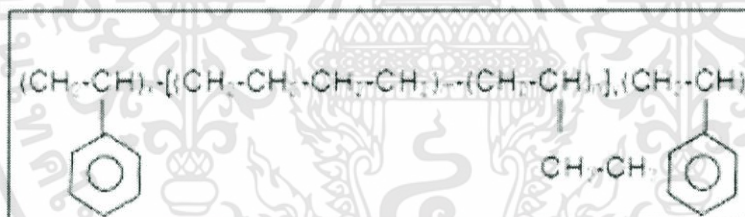
รูปที่ 2.12 แบบจำลองโครงสร้างเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [17]

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ สามารถแบ่งออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่ [18]

- 1) เทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic polyolefin elastomers, TPOs) เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโอเลฟินกับอีลาสโตเมอร์ เช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างไอโซแทกติกพอลิเมอร์พโรพิลีนกับยางเอทิลีน-พโรพิลีน-ไดอีน (EPDM)
- 2) เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต (Thermoplastic vulcanizates, TPVs) ต่างจาก TPOs ในส่วนของวัฏภาคขงที่มีการเชื่อมโยงสูงกว่า TPOs สมรรถนะของ TPVs ใกล้เคียงกับยางเทอร์โมเซต
- 3) เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic polyester elastomers) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก ซึ่งประกอบด้วยส่วนแข็งและส่วนอ่อน โดยส่วนแข็งคือพอลิอัลคิลีนเทอเรพทาเลต และส่วนอ่อนคือพอลิอัลคิลีนอีเทอร์
- 4) เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic polyurethane elastomer, TPUs) เป็นพอลิเมอร์แบบชั้นระหว่างไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและไอโซไซยาเนต
- 5) เทอร์โมพลาสติกพอลิเอไมด์อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic polyamide elastomers) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกที่มีโครงสร้างเป็นพอลิอีเทอร์กับพอลิเอไมด์ และพอลิเอสเทอร์กับพอลิเอไมด์
- 6) เทอร์โมพลาสติก (พอลิสไตรีน-ไดอีน) อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic poly(styrene-diene) elastomers) เป็นพอลิเมอร์ร่วมที่มีความหนืดสูงมาก โดยส่วนที่เป็นอีลาสโตเมอร์หรือส่วนอ่อนคือโมเลกุลที่มีพันธะคู่ และส่วนแข็งคือพอลิสไตรีน

## 2.8 พอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน [19]

พอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (Poly(styrene-ethylenebutylene-styrene), SEBS) จัดเป็นยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomers, TPEs) ที่มีทั้งสมบัติของยางและพลาสติก จึงมีสมบัติคล้ายยางเทอร์โมเซต (Thermoset rubber) คือ มีสมบัติเป็นอีลาสติก โดย TPEs จะสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก และสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อแรงกระทำนั้นหมดไป ในขณะที่เดียวกัน TPEs มีสมบัติของเทอร์โมพลาสติกด้วย โดยจะหลอมเมื่อได้รับความร้อน และกลับมาแข็งตัวได้เมื่อเย็นตัวลง SEBS มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่มาจากส่วนของ Ethylene-butylene (Soft segment) และที่  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  มาจากส่วนของ Polystyrene (Hard segment) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 จากสององค์ประกอบนี้ ส่งผลให้ SEBS มีความแข็งแรงสูง มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนและโอโซนสูง มีความเหนียวต่ำ และยังสามารถในการรักษาสมบัติความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงได้ดี โดยทั่วไป SEBS สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เนื่องจากมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจึงเหมาะที่จะใช้ผลิตผลิตภัณฑ์กลางแจ้ง SEBS สามารถขึ้นรูปได้โดยใช้กระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการอัดรีด (Extrusion) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เป็นต้น



รูปที่ 2.13 สูตรโครงสร้างของ SEBS [19]

## 2.9 ซีโอไลต์

### 2.9.1 สมบัติทั่วไป

Zeolite คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) 1 อะตอม และออกซิเจน 4 อะตอม ( $\text{SiO}_4$  หรือ  $\text{AlO}_4$ ) สร้างพันธะกันเป็นรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) [20] โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างทรงเหลี่ยมสี่หน้านี้เชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างหรือ

โพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอม เท่ากับ  $1 \times 10^{-10}$  เมตร) นอกจากซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก

การจัดประเภทซีโอไลต์กำหนดจากลักษณะองค์ประกอบของโพรงและช่องว่าง เหล่านี้จากโครงสร้างที่เฉพาะตัวของซีโอไลต์จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายอย่างซึ่งแต่เดิมมักถูกนำไปใช้เพียงในด้านสมบัติ Molecular sieve ปัจจุบันพบว่าซีโอไลต์มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งซีโอไลต์ประเภทที่มีการแทนที่ตำแหน่งของอะตอม Si ด้วย Al หรือธาตุอื่นๆ ซึ่งทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติเป็น Acid catalyst ลักษณะและขนาดของโพรงและช่องว่างต่างๆ ที่มีอยู่ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในโพรงซีโอไลต์มี Selectivity สูง ทำให้สมบัติในการเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์มีความเฉพาะตัวและเป็นที่น่าสนใจ ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์

ซีโอไลต์นั้นมีมากกว่า 600 ชนิด แต่สามารถแบ่งกลุ่มตามชนิดของโครงสร้างได้ประมาณ 40 ชนิด ซึ่งความแตกต่างของโครงสร้างมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของซีโอไลต์ เช่น โครงสร้างผลึก ความหนาแน่น ขนาดของโพรง ความแข็งแรงของพันธะ เป็นต้น การจำแนกชนิดของซีโอไลต์นั้นอาศัยขนาดและรูปร่างของโพรงซีโอไลต์เป็นหลัก ซึ่งจะทำให้ นำซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ในงานที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ Si/Al ratio แสดงดังตารางที่ 2.7

1. ซีโอไลต์ที่มี Si/Al ratio ต่ำ ทำให้เกิดโครงสร้างแบบ Cage Structure เช่น Zeolite A
2. ซีโอไลต์ที่มี Si/Al ratio สูง ทำให้เกิดโครงสร้าง Channel Structure เช่น ZSM-5 Ferrierite

ตารางที่ 2.7 Si/Al ratio ของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ [20]

| ชนิด              | โครงสร้าง | Si/Al  |
|-------------------|-----------|--------|
| Zeolite A         | LTA       | 1-1.25 |
| Alpha             | LTA       | 2-3    |
| Ferrierite        | FER       | 6-12   |
| Zeolite Y         | FAU       | 1.5-3  |
| Gmelinite GME 3-4 | GME       | 3-4    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

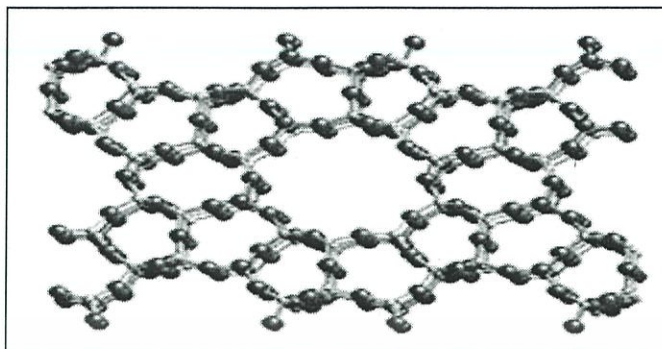
## ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

| ชนิด   | โครงสร้าง | Si/Al       |
|--------|-----------|-------------|
| ZSM-20 | FAU       | 3.5-5       |
| ZSM-5  | MFI       | 15-Infinity |
| EU-1   | Novel     | 50-2500     |
| SSZ-23 | CHA       | 250-750     |
| Beta   | BEA       | 12-Infinity |

ซีโอไลต์ที่มีค่า Si/Al ต่ำ มีขั้วสูง ในขณะที่ซีโอไลต์ที่มีค่า Si/Al สูง มีขั้วน้อยมากหรือไม่มีขั้วเลย ซึ่งความมีขั้วนี้มีความสำคัญในการเลือกใช้ซีโอไลต์

### 2.9.2 ซีโอไลต์ ZSM-5

ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดกลาง มี Si/Al ratio สูงคือ 15-Infinity ซึ่ง Si/Al ratio สูง [20] มักจะเกิดโครงสร้าง Channel structure แสดงดังรูปที่ 2.14 แต่จะตกผลึกช้ากว่าซีโอไลต์ที่มี Si/Al ratio ต่ำ ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) ได้ดี ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 มีขนาดความกว้างของหน้าต่าง 5.5 อังสตรอม [21] โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ปฏิกิริยาที่ได้รับความสนใจ คือปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากการเพิ่มมูลค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จัดเป็นก๊าซเรือนกระจกซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถสังเคราะห์ได้จากหลายปฏิกิริยา เช่น การสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ได้จากกากของเสียของโรงงานอุตสาหกรรมหล่อหลอมเหล็ก และโรงงานชุบอะลูมิเนียม การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากเพอร์ไลต์และเถ้าแกลบ [22] ซึ่งเพอร์ไลต์เป็นหินภูเขาไฟเนื้อแก้วเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของแมกมา จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่าเพอร์ไลต์ประกอบด้วย ซิลิกา (Silica, SiO<sub>2</sub>) 70-75 wt%, อะลูมินา (Alumina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 12-14 wt% และน้ำ 2-6 wt% ส่วนแกลบเป็นผลผลิตพลอยได้จากการสีข้าว เพื่อแยกเปลือกข้าวออกจากเมล็ด ในแกลบมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ ซิลิกาในปริมาณสูง เมื่อเผาแกลบภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะได้เถ้าของแกลบที่มีซิลิกาประมาณ 95 wt% ซึ่งสามารถนำไปผลิตเป็นซีโอไลต์ได้



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 [21]

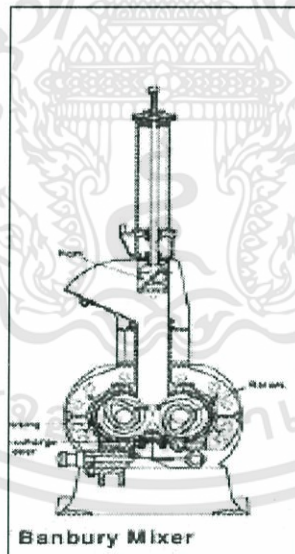
### 2.9.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์ในชีวิตประจำวัน

ลักษณะสำคัญที่ทำให้ซีโอไลต์กลายเป็นสารที่มีประโยชน์มากมาย คือ โครงสร้างที่เป็นรูพรุนอย่างเป็นระเบียบของซีโอไลต์ ซึ่งอาจใช้เป็นตัวกรองสารที่ต้องการโดยโมเลกุลที่เล็กกว่าขนาดโพรงซีโอไลต์จะสามารถผ่านไปได้ ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านออกมา และโมเลกุลที่ต้องการซึ่งมีขนาดพอคืบโพรงซีโอไลต์จะถูกกักไว้ภายในโพรง แต่ในการประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในการกลั่นปิโตรเลียมให้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมอื่นๆ นั้น ปัจจัยสำคัญมิใช่เรื่องขนาดของโพรงซีโอไลต์อย่างเดียว แต่ยังมีสมบัติทางเคมีของอะตอมที่อยู่รอบๆ โครงสร้างผลึกมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น ในบางกรณีที่เราต้องการทำให้สารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ (ในกระบวนการปิโตรเคมี) แยกออกกลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลงเพื่อให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้นั้น การแตกออกของโมเลกุลใหญ่ๆ เกิดจากการที่โมเลกุลทำปฏิกิริยากับอะตอมที่อยู่รอบๆ โพรงซีโอไลต์นั่นเอง โดยสรุปแล้วการใช้ประโยชน์จากซีโอไลต์จะถูกกำหนดด้วยสมบัติพื้นฐานในระดับโมเลกุลของสารซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์สามด้านหลักๆ ด้วยกัน ได้แก่ ตัวแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) ตัวดูดซับ (Adsorber) และตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysis)

ประโยชน์อื่นๆ ยังมีการใช้งานซีโอไลต์ในประโยชน์ด้านอื่นๆ อีก เช่น ใช้ในการเกษตร ลดการใช้ปุ๋ยสามารถเก็บกักปุ๋ยอยู่ในดินได้นาน พืชได้ใช้ประโยชน์จากปุ๋ยในดินได้อย่างเต็มที่ที่สามารถเก็บกักปุ๋ยได้มากกว่า 80% และสามารถดูดจับสารพิษตกค้างในดินลดความเป็นพิษให้ดินที่มีสาเหตุจากสารตกค้างของยาฆ่าหญ้าและยาฆ่าแมลง และช่วยทำให้ดินร่วนซุยดินซึมน้ำผ่านน้ำได้ง่ายระบายน้ำได้ดี

## 2.10 เครื่องผสมแบบปิด

เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) นับว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งในการกำหนดคุณภาพของพอลิเมอร์ผสม (Polymer blends) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการผสมพอลิเมอร์สองชนิดที่เข้ากันได้ยาก วิธีหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ การอาศัยแรงเชิงกล (Mechanical force) โดยเฉพาะแรงเฉือน (Shear force) ซึ่งแรงเชิงกลดังกล่าว ทำให้นขนาดของวัฏภาคที่กระจายตัว (Dispersed phase size) เล็กลงนั้นหมายถึงการเข้ากันได้ที่ดีขึ้นของระบบพอลิเมอร์ผสม เครื่องผสมแบบปิดมีองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ ห้องผสม (Chamber) ตัวผสม (Rotor) แท่งกด (Ram) และระบบหล่อเย็น (Cooling system) [23] ดังแสดงในรูปที่ 2.15 อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวที่ดีและการลดขนาดของวัฏภาคที่กระจายตัวสามารถเกิดขึ้นได้ดีในระบบการผสมที่ประกอบด้วยการไหลแบบเฉือน (Shear flow) ร่วมกับการไหลแบบดึงยืด (Extensional flow) นอกจากการไหลแล้วยังมีตัวแปรอีกหลายชนิดที่มีผลต่อคุณภาพการผสม อาทิ อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม (Mixing temperature) ความเร็วรอบการผสม (Mixing speed) สัดส่วนปริมาตรของวัสดุต่อความจุของห้องผสม (Fill factor) และลำดับการเติมสารเคมี (Charging sequence) เป็นต้น



รูปที่ 2.15 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) [23]

ข้อดีของเครื่องผสมแบบปิด

- ผลิตได้ครั้งละมากๆ
- ใช้เวลาในการผลิตน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

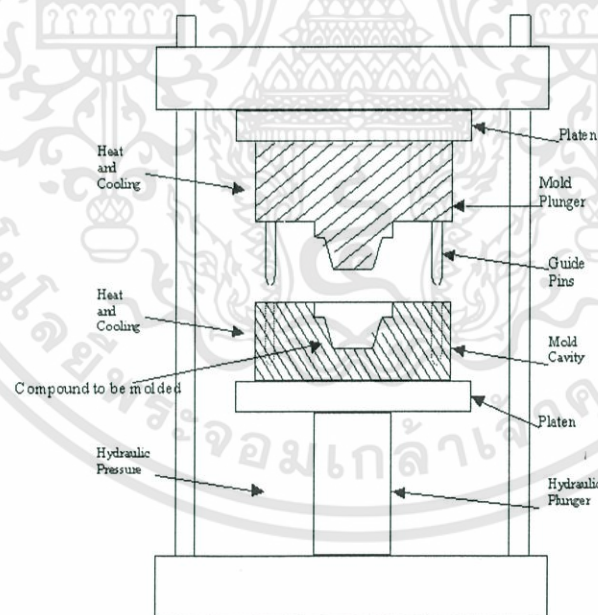
- ประหยัดแรงงาน
- สารที่ใส่ไม่เกิดการรั่วไหลหรือฟุ้งกระจาย

ข้อเสียของเครื่องผสมแบบปิด

- มีความร้อนสะสมในเครื่องมาก อุณหภูมิในการผสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
- ผสมสารได้ที่ละเบตซ์ (Batch)

## 2.11 เครื่องกดอัด

กระบวนการกดอัด (Compression molding) เป็นเทคนิคการแปรรูปพลาสติกที่ไม่ซับซ้อน โดยหลักการการทำงานของกระบวนการอัด คือ การนำเม็ดหรือผงพลาสติกมาอัดในแม่แบบ (Mold) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อให้พลาสติกหลอมและไหลเข้าสู่ช่องว่างภายในแม่แบบ (Cavity) [24] ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ (Movable platen) ส่วนอีกแผ่นหนึ่งถูกยึดติดกับที่ (Fixed platen) แม่แบบสำหรับการแปรรูปพลาสติกทั้งตัวผู้และตัวเมียถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่นนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เครื่องกดอัด (Compression molding machine) [24]

ระบบให้ความร้อนและหล่อเย็น ระยะเวลาการทำงานต่อวัฏจักรของการอัดนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของผนังชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตที่เป็นตัวนำความร้อนที่

ไม่ดีและในการอัดต้องให้อุณหภูมิถึงจุดที่เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลได้ ซึ่งหากเดิมเม็ดหรือผงพลาสติกลงในแม่แบบโดยตรงจะทำให้ระยะเวลาในการอัดนานมาก ดังนั้นจึงควรมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนนำเข้าแม่แบบ เพื่อให้พลาสติกสามารถไหลได้ดีขึ้น ลดระยะเวลาในการทำงานต่อวัฏจักรให้สั้นลง และยังสามารถลดความดันที่ใช้ในการอัดด้วย

ปัจจุบันเทคนิคนี้ใช้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งการแปรรูปยางและพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต เช่น ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) เมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde) และยูเรียฟอรัมาลดีไฮด์ (Urea formaldehyde) เป็นต้น

ข้อดีของกระบวนการกดอัด เมื่อเทียบกับการขึ้นรูปแบบต่างๆ

- แม่แบบมีราคาถูกและผลิตได้ง่าย
- มีการสูญเสียวัสดุ น้อยมาก คือ มีกรีบหรือ Flash เกิดขึ้นน้อยมาก ประมาณ 2-5% เท่านั้น
- โมเลกุลของพลาสติกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Reorientation) น้อยมาก เนื่องจากในระหว่างการอัดเกิดการไหลของพลาสติกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น
- เครื่องอัดมีราคาถูกกว่าเครื่องแปรรูปพลาสติกชนิดอื่น ๆ
- ไม่เกิดเส้นรอยเชื่อม (Weld line) บนชิ้นงาน ซึ่งเส้นรอยเชื่อมนี้เป็นจุดบกพร่องที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย
- แม่แบบสำหรับกระบวนการกดอัดไม่มีส่วนของท่อวิ่ง (Runners) ท่อนำ (Sprue) และประตูเข้า (Gates) ทำให้ไม่มีรอยดำบนชิ้นงาน

ข้อเสียของกระบวนการกดอัด เมื่อเทียบกับการขึ้นรูปแบบต่างๆ

- ไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้
- เวลาของวัฏจักรการผลิต (Cycle time) ค่อนข้างยาว ทำให้กำลังการผลิต (Productivity) ต่ำ
- การผลิตชิ้นงานที่หนาต้องใช้เวลาาน
- จำเป็นต้องมีการตัดครีบทิ้งเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฮอร์โมนพืชมีความสำคัญมากต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาของพืช และมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับการตอบสนองของพืชต่อสภาพแวดล้อมภายนอก [25] เอทิลีนจัดเป็นฮอร์โมนพืชชนิดหนึ่งซึ่งเร่งให้ผลไม้เกิดกระบวนการสุกงอมเร็วขึ้นเมื่อได้รับก๊าซนี้ นอกจากเก็บผลไม้ดิบไว้ในที่มีอุณหภูมิต่ำ เพื่อชะลอกระบวนการหายใจของพืชแล้ว ยังต้องหาวิธีกำจัดก๊าซเอทิลีนที่ผลไม้ปล่อยออกมา เพื่อไม่ให้ผลไม้สุกก่อนกำหนด [1] ผลไม้ประเภท Climacteric มีการผลิตก๊าซเอทิลีนเมื่อเริ่มสุกสูงกว่าผลไม้ประเภท Non-climacteric ทำให้ผลไม้มีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและผลิตผลเกิดการเน่าเสียเร็วขึ้น [26] จึงได้มีการพัฒนามาเป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีสมบัติพิเศษในการดูดหรือคายก๊าซบางชนิด ได้แก่ สารดูดซับออกซิเจน สารดูดกลิ่น สารควบคุมความชื้น สารคายคาร์บอนไดออกไซด์ หรือสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ [27] ส่วนสารดูดซับเอทิลีนที่ใช้ ได้แก่ ค่างทับทิม [28] แต่ค่างทับทิมเป็นพืช สามารถทำลายเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้และละลายน้ำได้ง่ายจึงเกิดการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ ทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับต่อการบริโภค

วรรณิ ฉินศิริกุล และอศิรา เฟื่องฟูชาติ [29] ได้พัฒนาฟิล์มพลาสติกสำหรับบรรจุภัณฑ์คัดแปลงสภาวะบรรยากาศ ทำให้ฟิล์มพลาสติกที่พัฒนาขึ้นใหม่มีอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen transmission rate, OTR) เพิ่มขึ้น แผ่นฟิล์มมีลักษณะใส เกิดฝ้าน้อย และมีความหนาแน่นน้อยกว่าฟิล์มพลาสติกทั่วไปประมาณร้อยละ 25 แต่ความแข็งแรงเท่าฟิล์มพลาสติกที่จำหน่ายตามท้องตลาด สมบัติพิเศษอีกอย่างของฟิล์มพลาสติกที่พัฒนาขึ้นคือ ยอมให้ก๊าซแต่ละชนิดผ่านฟิล์มในอัตราที่แตกต่างกัน (Permeability) ซึ่งสมบัติพิเศษนี้เป็นผลมาจากการควบคุม โครงสร้างระดับโมเลกุลของพอลิเมอร์และการควบคุม โครงสร้างรูพรุน โดยขึ้นรูปฟิล์มแบบสองชั้น ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ทดสอบมี 10 ชนิด โดยอยู่ในรูปของฟิล์มทั่วไป ถุงบรรจุ ถุงเจาะรู และฟิล์มที่มีสารเติมแต่ง พบว่าผลิตภัณฑ์ยังคงรักษาความสดไว้ได้กว่า 5 สัปดาห์ มีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดประมาณ 2.1% โดยเทียบกับการใช้บรรจุภัณฑ์จากฟิล์ม HDPE ทั่วไป และถุงบรรจุภัณฑ์ผลิตผลไม้อชนิดหนึ่งจากต่างประเทศ และพัฒนาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

พอลิเมอร์ผสมเป็นทางเลือกในการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ใหม่ๆ โดยเฉพาะการผสมสารตัวเติมกับพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก สารตัวเติมที่นิยมใช้คือ ซีโอไลต์ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นผลึก มีรูพรุน และเหมาะสำหรับใช้เป็นสารดูดซับก๊าซเอทิลีนในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ ซีโอไลต์ที่ใช้มีค่า Si/Al สูง ซึ่งเป็นซีโอไลต์ชนิดไม่มีขั้ว จากงานวิจัยศึกษาผลซีโอไลต์เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกผสมกับ

LDPE, LLDPE และ HDPE [30] โดยการนำสารละลายกรดเตียริกเคลือบบนผิวของซี-โอไลด์ โดยเตรียมอัตราส่วนของน้ำหนักต่อปริมาตร (ซีโอไลด์/กรดเตียริก) เป็น 1:0.6 แล้วอบให้แห้ง จากนั้นนำซีโอไลด์ที่ผ่านการเคลือบผิวมาผสมกับพอลิเมอร์ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) โดยใช้ซีโอไลด์ปริมาณ 5-50 wt% จากนั้นเตรียมฟิล์มโดยใช้เครื่องอัดรีดผ่านหัวคายแบบร่องยาว (Slit die) ความหนาประมาณ 40  $\mu\text{m}$  และนำฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ผลการศึกษาพบว่าซีโอไลด์ที่เคลือบผิวด้วยกรดเตียริกมีการกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีกว่าซีโอไลด์ที่ไม่เคลือบผิว และซีโอไลด์กระจายตัวได้ดีที่สุดใน HDPE และค่า Tensile modulus ของพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลด์ที่เคลือบผิวมีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลด์ที่ไม่เคลือบผิว และค่า Tensile modulus เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซีโอไลด์เพิ่มขึ้น ส่วนการศึกษาสมบัติทางความร้อน พอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลด์เคลือบผิวมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) เพียงเล็กน้อย คือ ลดลง 2-3  $^{\circ}\text{C}$

เนตรนภา ลามอ [31] ได้พัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและใช้ซีโอไลด์ (5A) เป็นสารตัวเติมในการปรับปรุงความสามารถในการซึมผ่านคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ โดยมีพอลิเอทิลีนที่ต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-graft-MA) เป็นสารช่วยผสม เพื่อเพิ่มการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม พัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์นี้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะนาว การเตรียมฟิล์ม คือ นำ LDPE ซีโอไลด์ (5A) และ PE-graft-MA ผสมลงในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ ในอัตราส่วน 100:3:9 (LDPE:Zolite:PE-graft-MA) เพื่อตัดเป็นเม็ดก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบเป่าฟิล์ม (Blown-film extrusion) จากการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D 882 ผลการทดลองพบว่า เมื่อใส่ซีโอไลด์เป็นสารตัวเติมทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นทั้งตามแนวขวางและตามแนวเครื่องจักร แสดงว่ามีการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคมากขึ้น นอกจากนี้ค่าออกซิเจนของฟิล์มคอมโพสิตยังมีค่ามากกว่าฟิล์ม LDPE ทั้งสองแนว อย่างไรก็ตาม การเติมซีโอไลด์ทำให้ความสามารถในการยึดตัวของฟิล์มลดลง การใช้สารช่วยผสม PE-graft-MA ทำให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมโพสิตลดลง เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่า ยังทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สั้นลงด้วย ส่วนสมบัติการซึมผ่านก๊าซพบว่า ฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลด์มีความสามารถในการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไอน้ำเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจน พบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีการซึมผ่านมากกว่าเนื่องจากมีความเป็นขั้วที่สูงกว่า และเมื่อทดลองใช้

ฟิล์มคอมพอลิติกเป็นบรรจุภัณฑ์บรรจุมะนาวและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 °C สามารถคงคุณภาพของมะนาวได้นานกว่ามะนาวที่ไม่ได้บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์และมะนาวที่เก็บภายในบรรจุภัณฑ์ LDPE

พรพรรณ มั่นประสิทธิ์ [3] ได้ทำการเตรียมฟิล์มคอมพอลิติกสองชั้นเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อเก็บรักษาผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีน (SEBS) ซึ่ง SEBS เป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประกอบด้วย Ethylene-butylene ที่มีความยืดหยุ่น มีลักษณะเป็นอสัณฐานและไม่มีขั้วเหมือนก๊าซเอทิลีน ก๊าซเอทิลีนจึงสามารถซึมผ่าน SEBS ได้ดี นอกจากนี้มีการเติมซีโอไลต์ (ชนิดไม่มีขั้ว) ZSM-5 และนำฟิล์มที่นำไปวิเคราะห์ 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) พบว่าการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ในปริมาณ 5-10% สามารถเพิ่มการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน แต่ถ้าปริมาณที่เติมมากกว่า 10% การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มคอมพอลิติกเพิ่มไม่มากนักและการกระจายตัวที่ต่างกันของซีโอไลต์ไม่ส่งผลต่อการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน เนื่องจากมีขั้ว LDPE ที่มีความเป็นผลึก (Crystallinity) ขัดขวางการซึมผ่านของก๊าซ (Barrier) ทำให้ก๊าซซึมผ่านได้ช้า

รุจิเรข วิวัฒนานุกูล [4] ได้มีการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS จากผลการทำงานวิจัยพบว่า กระบวนการและความเร็วในการผสม รวมถึงองค์ประกอบของฟิล์ม เช่น เกรดของ SEBS, ชนิดและปริมาณการเติม SEBS และปริมาณพลาสติกไซเซอร์ ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติต่างๆ และการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของพอลิเมอร์ผสม การเตรียมพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ด้วยเครื่อง Twin-screw extruder และเครื่อง Internal mixer แล้วขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัดด้วยสภาวะเดียวกัน ทำให้ได้ลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติการรับแรงดึงและความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์มที่มีปริมาณ SEBS เท่ากันใกล้เคียงกัน โดยที่เครื่องผสมแบบปิดสามารถให้ปริมาณ SEBS ใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการมากกว่า เมื่อปรับเปลี่ยนความเร็วโรเตอร์ในการผสมสูตร LLDPE/SEBS (55/45) เป็น 40, 60 และ 80 rpm พบว่าการผสมที่ความเร็วโรเตอร์ 40 rpm วัฏภาคกระจาย SEBS ที่ได้มีขนาดใหญ่และมีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงกว่าการผสมด้วยความเร็วโรเตอร์ 60 และ 80 rpm การเลือกใช้ SEBS เกรดที่มีปริมาณสไตรีนและเอทิลีน/บิวทิลีนต่างกัน ส่งผลโดยตรงต่อสัณฐานวิทยาและการซึมผ่าน



## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 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             |
|--|-----------|-------------------|
| ครรชนีการไหล (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<sup>®</sup> G1657 จากบริษัท Kraton Performance Polymer จำกัด

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ SEBS Kraton<sup>®</sup> G1657

| สมบัติ  | G1657         | หน่วย         |
|---|---------------|---------------|
| ปริมาณสไตรีน (Styrene content)                    | 12.3 ถึง 14.3 | wt%           |
| ครรชนีการไหล (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. น้ำกลั่น (Distilled water)
6. ก๊าซเอทิลีน (Ethylene gas) ความบริสุทธิ์อย่างน้อย 99.9% จากบริษัท ไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด
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. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter) บริษัท Perkin Elmer จำกัด รุ่น DSC 7
7. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาลิเซอร์ (Thermogravimetric analyzer) บริษัท Hetszsch จำกัด รุ่น TG 209 F3 Taraus
8. เครื่องทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน (เครื่องประกอบ Home-made)
9. เซลล์เพอร์มิเอชัน (Permeation cell)
10. เครื่องชั่งแบบดิจิทัลความละเอียด 4 ตำแหน่ง (g)
11. ไมโครมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ครอบอกไนโตรเจนเหลว
13. บริษัทเครื่องแก้ว
14. เครื่องบดผง บริษัท ฮิตาชิ จำกัด รุ่น BEBICON 400
15. เครื่อง Gas Chromatograph (GC) บริษัท Varian จำกัด รุ่น CP-3800
16. อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า
17. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath)
18. ตู้อบความร้อน

### 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 ตั้งสถานะของเครื่อง 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<br>(g)           | Zeolite (ZSM-5)<br>(g) | LLDPE<br>(g)           | SEBS<br>(g) | Zeolite (ZSM-5)<br>(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                      |

สถานะที่ใช้ในการผสม ดังนี้

1. สูตรพอลิเมอร์ผสม LL70S30Z5 โดยผสม LLDPE และ Zeolite (ZSM-5) (5 wt%) 2.8 กรัม ที่อุณหภูมิ 170 °C ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นตักคอมปาวด์ (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด โดยใช้สภาวะของเครื่องกดอัด ดังนี้

- ขนาดแม่พิมพ์แผ่นเรียบ  $20 \times 20 \times 1 \text{ cm}^3$
- ความดันในการกดอัด 1800 psi
- อุณหภูมิในการกดอัด  $190 \text{ }^\circ\text{C}$
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์ 3 นาที
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์ผสม 3 นาที
- เวลาในการกดอัดร้อน 3 นาที
- อุณหภูมิในการกดอัดเย็น  $12 \text{ }^\circ\text{C}$
- 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  $25-160 \text{ }^\circ\text{C}$  ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  ต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) นำข้อมูลที่ได้มาหาค่า  $T_m$ ,  $T_c$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ตามมาตรฐาน ASTM E794 โดยนำค่า Heat of fusion ( $\Delta H_f$ ) มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

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

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

เมื่อ  $\Delta H_f$  คือ พื้นที่ใต้กราฟของ  $T_m$

$\Delta H_f^0$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่า  $293 \text{ J/g}$  [32]

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร เพื่อหาปริมาณซีโอไลต์ที่มีอยู่จริงในสูตรพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง TGA โดยชั่งน้ำหนักประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนตั้งแต่  $25-700 \text{ }^\circ\text{C}$  ด้วยอัตราการให้ความร้อน  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของอากาศ (Air zero)

### 3.3.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM

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

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

- กรณีที่ 2 ทำการสกัดตัวภาค SEBS ออกจากชิ้นงาน LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5) โดยนำแผ่นฟิล์มใส่ในหลอดทดลองและแช่ด้วยตัวทำละลายเทระไฮโดฟورانใส่ในเครื่องอัลตราโซนิค (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

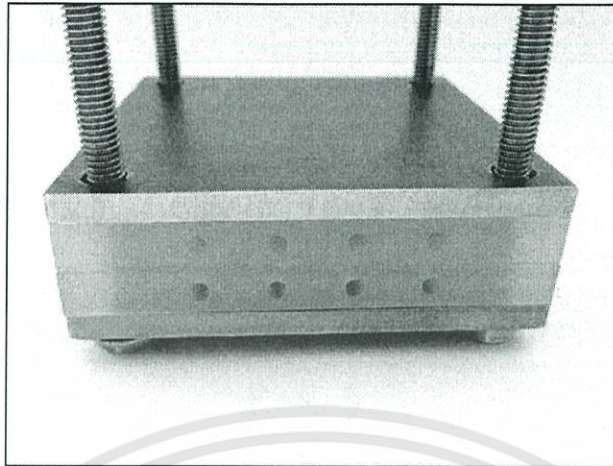
ทำการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม เพื่อหาค่าความเค้น ณ จุดคราก (Stress at yield) ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของชิ้นงานโดยเตรียมฟิล์มตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D 882 และใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ตัดตัวอย่างให้มีขนาด  $10 \times 80 \text{ mm}^2$  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 ดังรูปที่ 3.1 ส่วนประกอบนี้เรียกว่า เซลล์เมมเบรน (Membrane cell) การทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนทำตามลำดับขั้นตอน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เซลล์เมมเบรน

1) ปรับอัตราการไหลของก๊าซ

อัตราการไหล (Flow rate) ของสารป้อน (Feed, ก๊าซเอทิลีน) และ ก๊าซพา (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

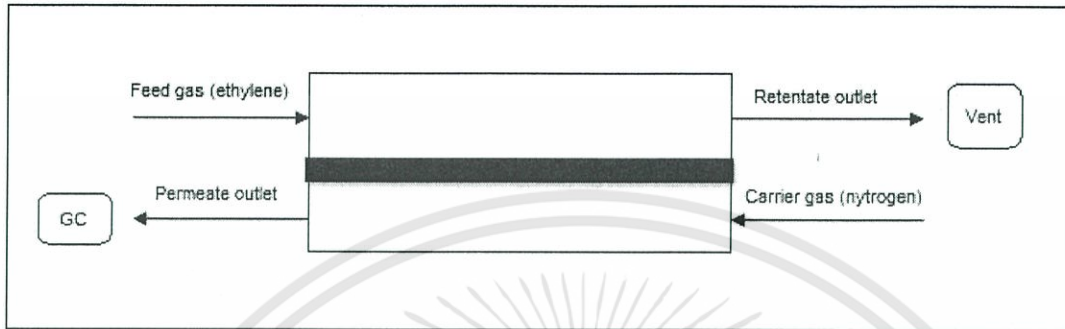
3) การทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มตัวอย่าง

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

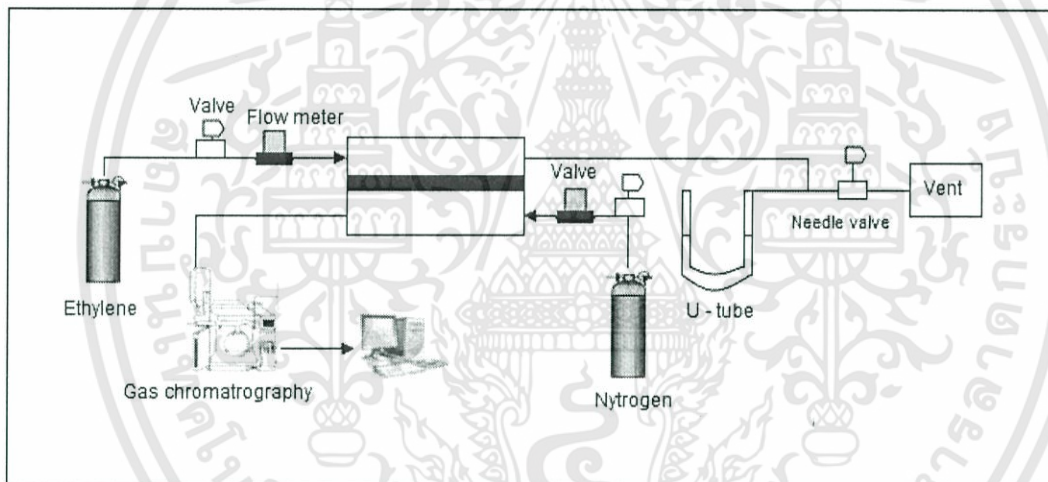
|                  |        |
|------------------|--------|
| - Injection port | 200 °C |
| - Column oven    | 150 °C |

- Flame ionization detector (FID) 200 °C

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



รูปที่ 3.2 แผนภาพทิศทางการซึมผ่านก๊าซในเซลล์เพอร์มิเมชัน



รูปที่ 3.3 แผนภาพแบบทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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

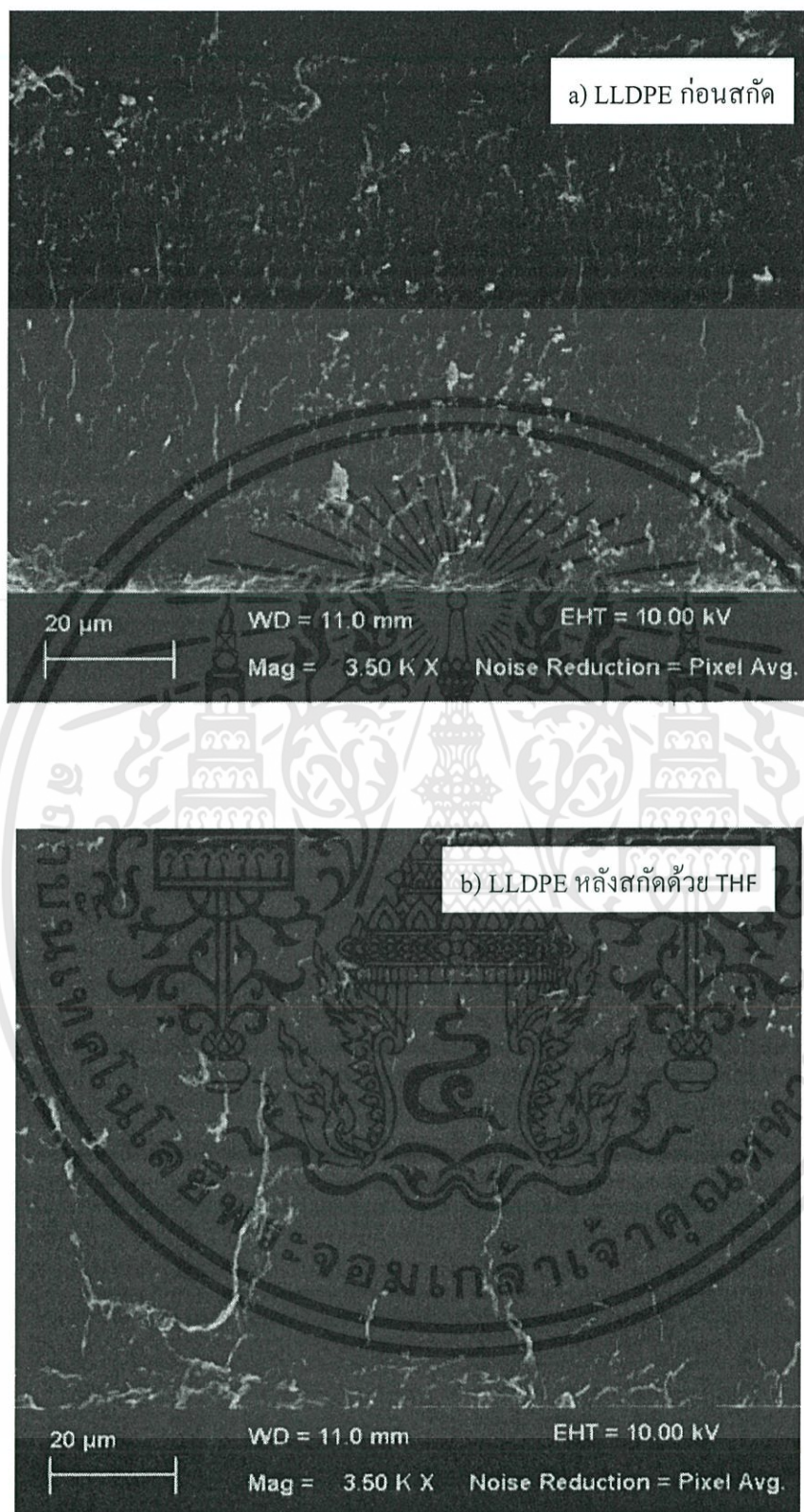
การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/SEBS ด้วย DSC แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1 พบว่าค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) และอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ของ LLDPE ในพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS มีค่าใกล้เคียงกันในทุกสูตรฟิล์ม แสดงว่าการเติม SEBS ไม่รบกวนการเติบโตของผลึก LLDPE อาจเนื่องมาจาก LLDPE และ 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               |

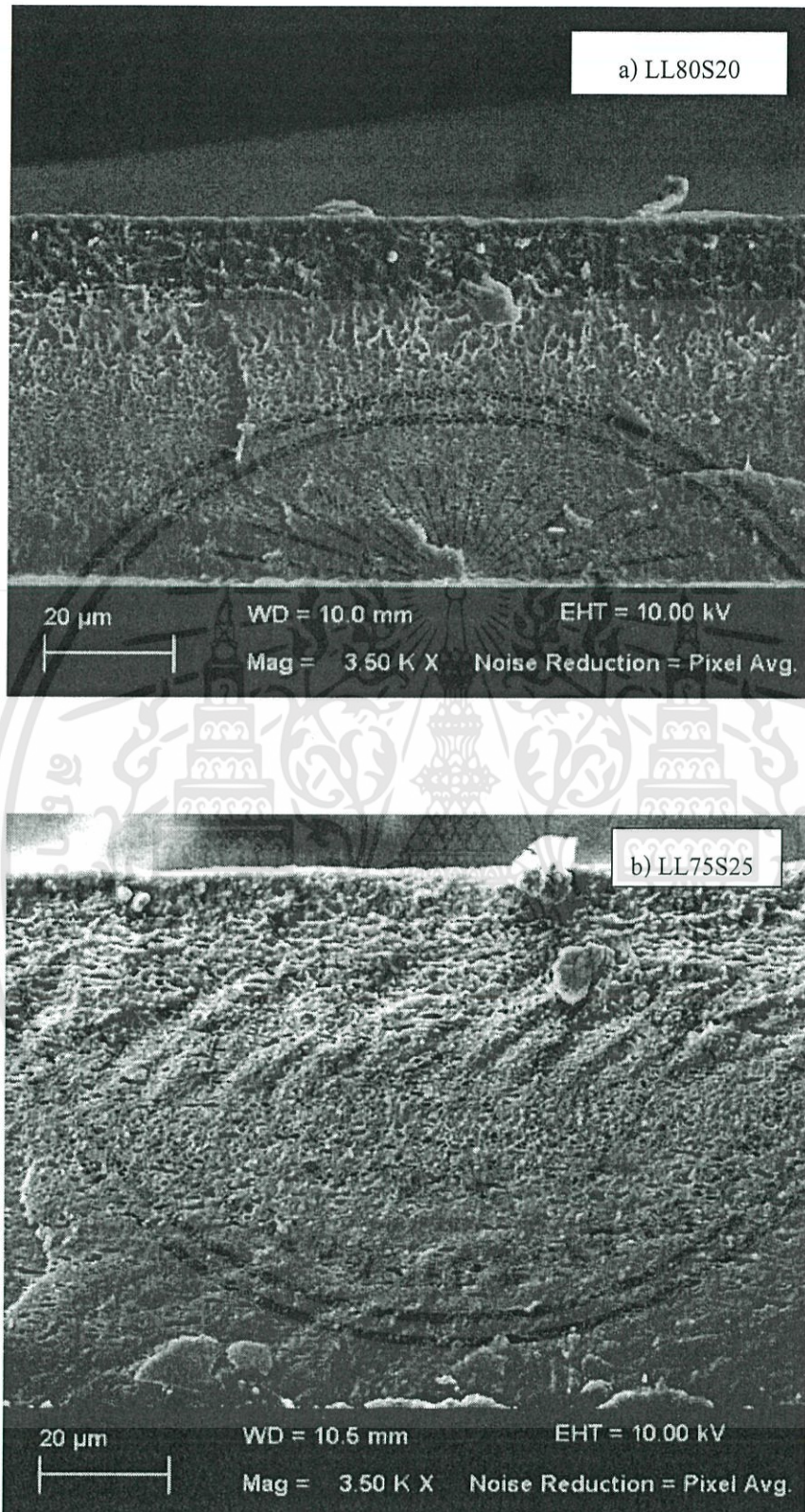
#### 4.1.2 ลักษณะวิทยาของฟิล์ม LLDPE/SEBS

จากรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะวิทยาภาคตัดขวางของ LLDPE ก่อนและหลังสกัดด้วยตัวทำละลายเทระไฮโดรฟูราน จากภาพทั้งก่อนและหลังสกัด LLDPE ด้วยเทระไฮโดรฟูราน พบว่าฟิล์ม LLDPE มีผิวเรียบ ไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น แสดงว่าไม่มีการละลายออกของ LLDPE ในตัวทำละลายเทระไฮโดรฟูราน และจากรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะวิทยาภาคตัดขวางของ LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า LLDPE ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และมี SEBS ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคกระจาย เห็นได้ว่าเมื่อทำการสกัดด้วยเทระไฮโดรฟูราน ทำให้วัฏภาคของ SEBS ละลายออกกลายเป็นช่องว่างสีดำในวัฏภาคของ LLDPE โดยแสดงลักษณะวิทยาแบบทรงกลม (Spherical) มีการกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม แต่เนื่องจากกระบวนการอัดเย็นส่งผลให้บริเวณผิวด้านนอกของแผ่นฟิล์มที่สัมผัสกับแม่พิมพ์มีการจัดเรียงตัวและเกิดผลึกก่อน 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

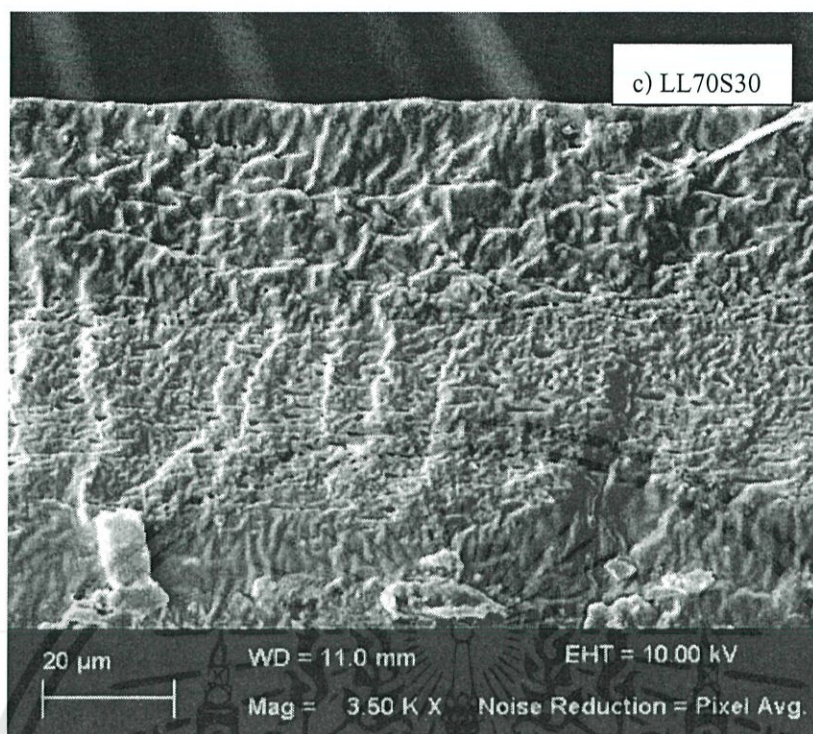


รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE ก่อนและหลังสกัดด้วย THF ที่กำลังขยาย 3500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



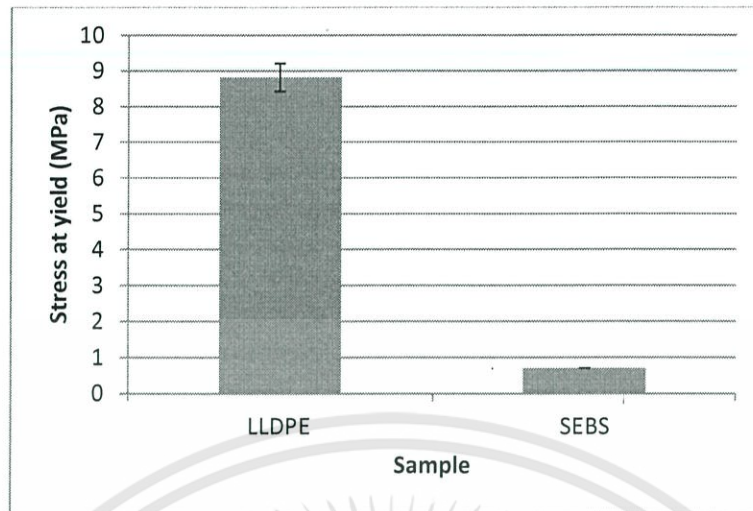
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



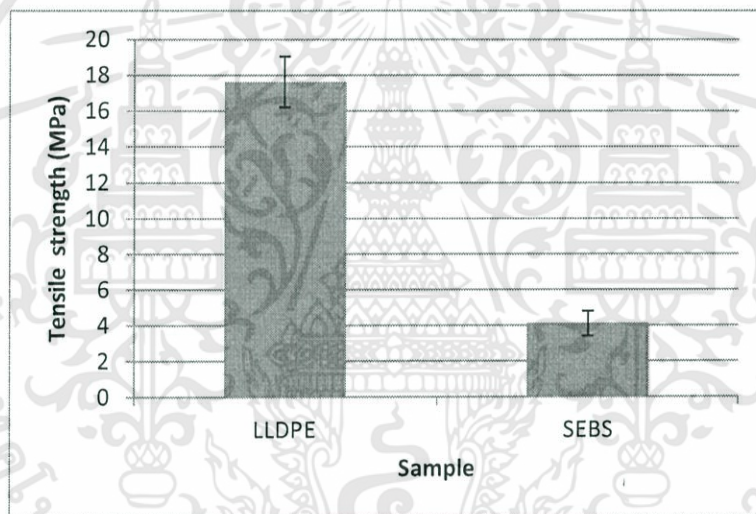
รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ ที่สกัด SEBS ด้วย THF กำลังขยาย 3500 เท่า

#### 4.1.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE/SEBS

จากรูปที่ 4.3-4.6 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE กับ SEBS พบว่าฟิล์ม SEBS มีค่าความแข็งแรงดึง ความเค้น ณ จุดคราก และค่ามอดูลัสของยังต่ำกว่าฟิล์ม LLDPE เนื่องจาก SEBS เกรด Kraton<sup>®</sup> G1657 ที่ใช้เป็นพอลิเมอร์ออสันฐาน ประกอบด้วยส่วนของพอลิ-สไตรีน 12.3-14.3 wt% ที่มีความแข็ง และเอทิลีน/บิวทิลีน 85.7-87.7 wt% ที่มีความนิ่มคล้ายยาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำ ขณะที่ LLDPE เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่เป็นระเบียบ จึงสามารถรับแรงได้มากกว่าก่อนเกิดการเสียรูป สำหรับร้อยละการยืด ณ จุดขาด พบว่าฟิล์ม SEBS มีค่าต่ำกว่าฟิล์ม LLDPE เนื่องจากมีโครงสร้างของสไตรีนใน SEBS ทำหน้าที่เหมือนจุดเชื่อมโยงทางกายภาพคล้ายโครงสร้างร่างแห ทำให้ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดต่ำ

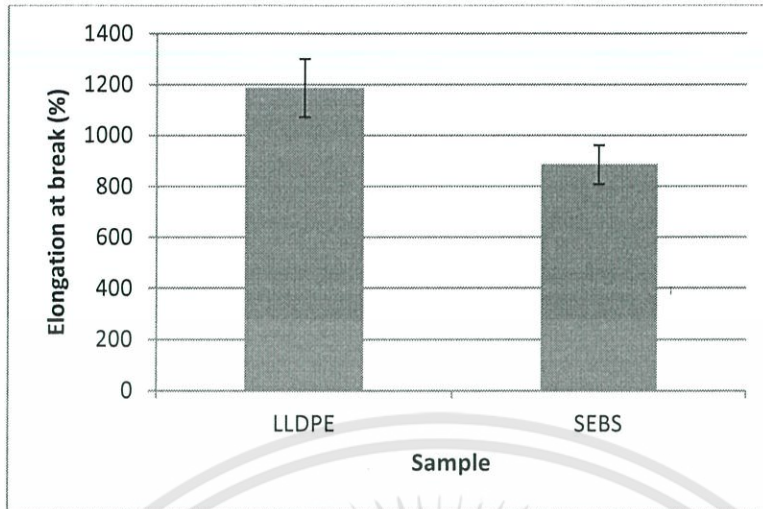


รูปที่ 4.3 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE และ SEBS

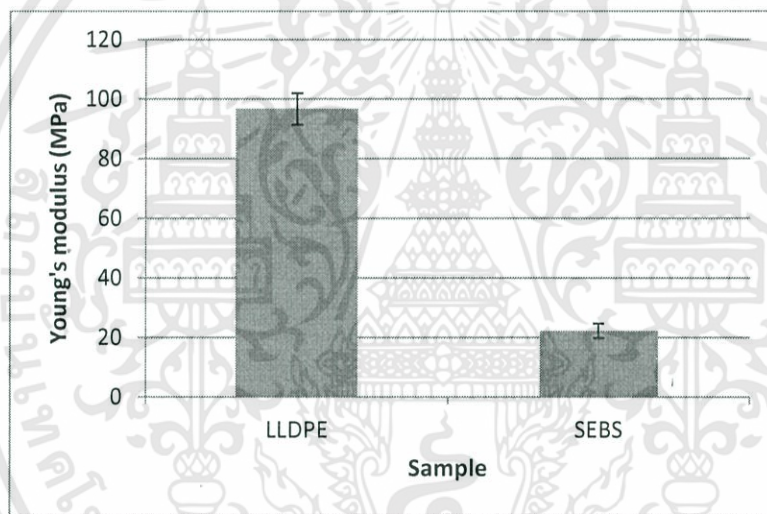


รูปที่ 4.4 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE และ SEBS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



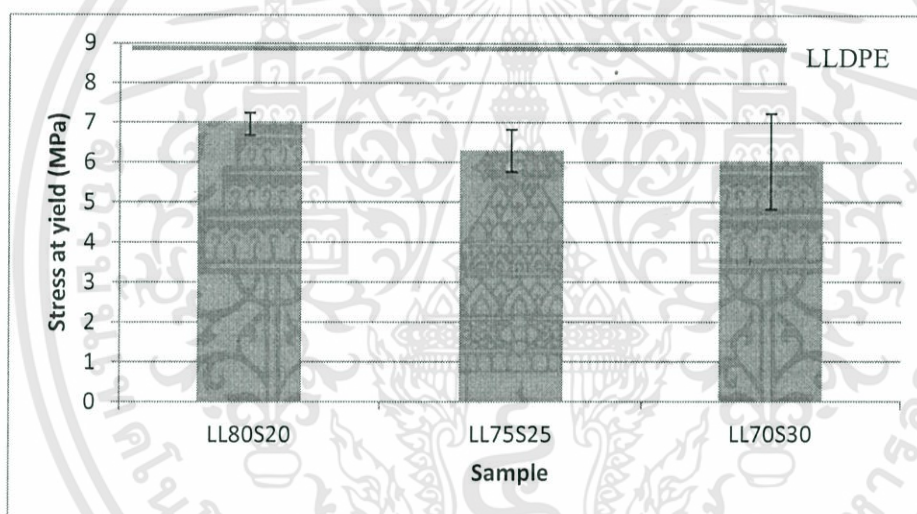
รูปที่ 4.5 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE และ SEBS



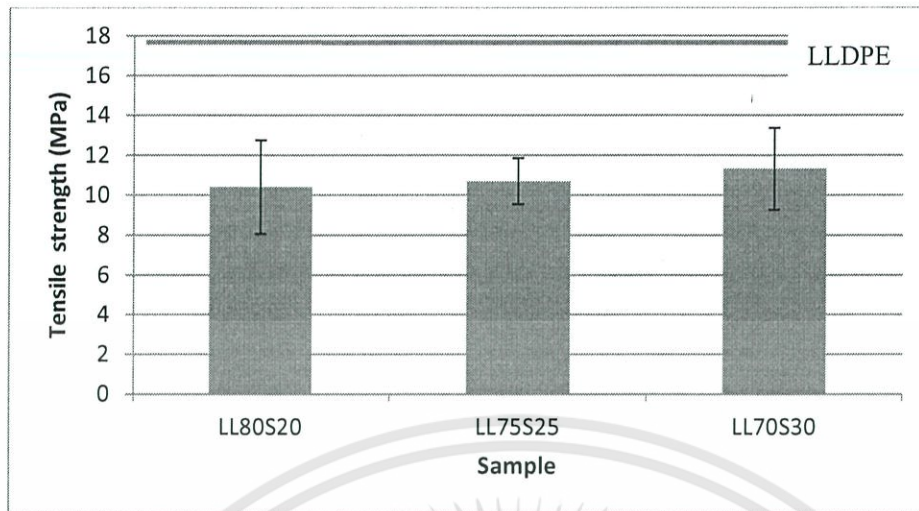
รูปที่ 4.6 มอดุลัสของยังของฟิล์ม LLDPE และ SEBS

รูปที่ 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 เป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่แทรกตัวอยู่ในภูมิภาค LLDPE จึงทำให้ความต่อเนื่องของภูมิภาค LLDPE ลดลง ดังนั้นแรงที่ใช้ในการเสียหาย ณ จุดครากจึงมีค่าลดลง ส่วนค่าความ

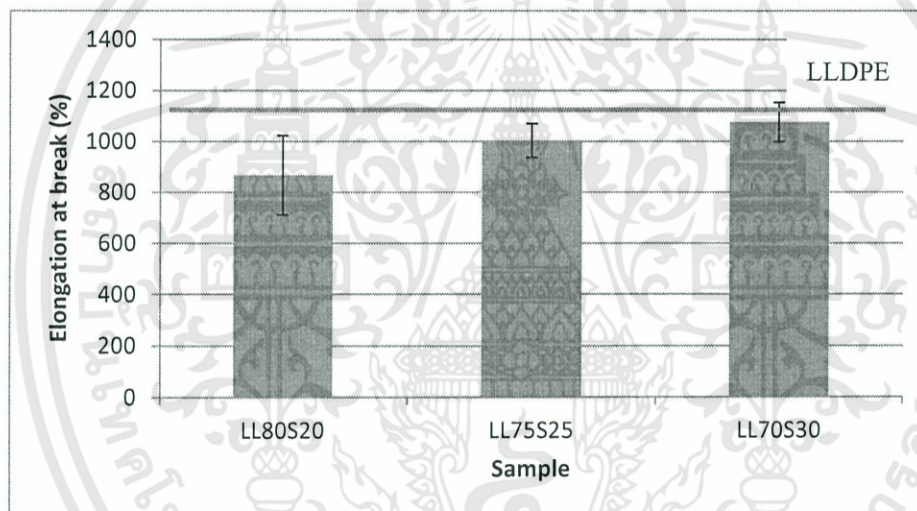
แข็งแรงดึงในทางทฤษฎีมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก SEBS เป็นวัสดุกระจาย เมื่อได้รับแรงกระทำสไตรีนใน SEBS ซึ่งทำหน้าที่เหมือนจุดเชื่อมโยง ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นก่อนขาด และจากผลการทดลอง เมื่อเพิ่มปริมาณ SEBS เป็น 20%, 25% และ 30% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดคราก (6-7 MPa) ไม่เปลี่ยนแปลง อาจเนื่องจากการผสมที่ไม่ดี มีความเข้ากันได้ต่ำระหว่างพอลิเมอร์ผสม LLDPE และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ SEBS ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดคราก ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (น้อยกว่า 1 MPa) เนื่องจาก SEBS เป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ซึ่งมีความนิ่มยืดหยุ่นคล้ายยาง ใน SEBS มีส่วนของเอทิลีน/บิวทิลีน 87 wt% จึงทำให้ค่ามอดูลัสของยังลดลง ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ SEBS เพราะขณะทำการดึงยืด SEBS ส่วนของเอทิลีน/บิวทิลีนสามารถเสียรูปเกิดเป็นทรงรีจึงช่วยในการกระจายแรง เปรอ์เช่นการยืดตัวสูง



รูปที่ 4.7 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ

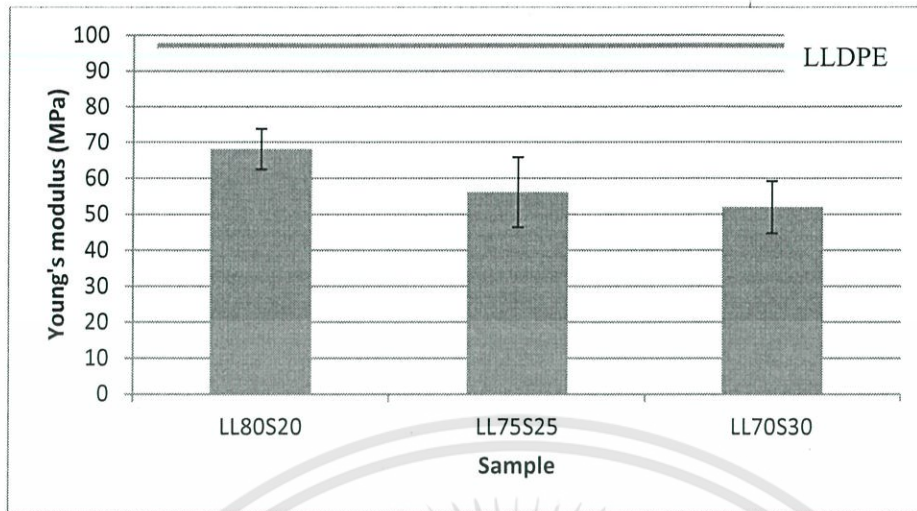


รูปที่ 4.8 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ



รูปที่ 4.9 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ

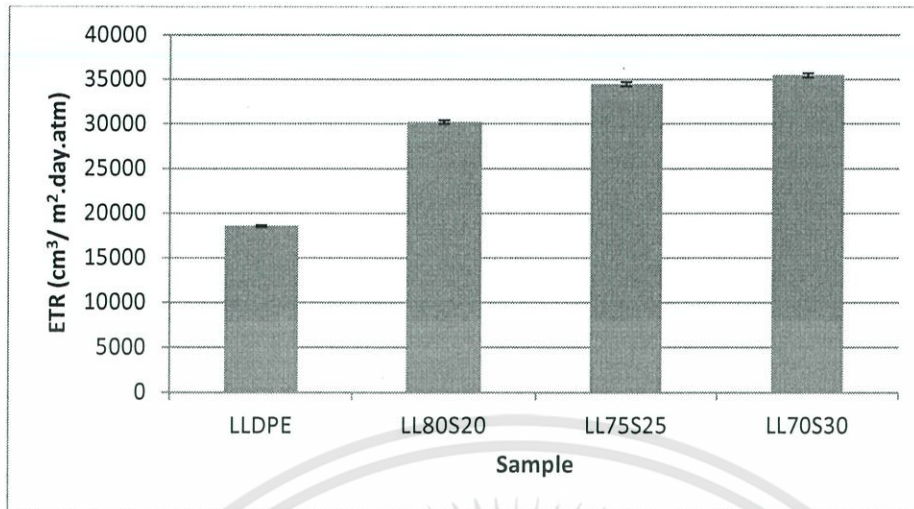
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 มอดุลัสของยังของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ

#### 4.1.4 การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE/SEBS

จากรูปที่ 4.11 แสดงอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ พบว่าฟิล์ม LLDPE มีค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนต่ำ เพราะความเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกของ LLDPE จึงมีโครงสร้างที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ สายโซ่อยู่ชิดติดกัน ก๊าซเอทิลีนผ่านได้ในส่วนที่เป็นอสัณฐานของ LLDPE ส่วน SEBS มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ มีปริมาตรอิสระสูง (Free volume) มีส่วนของเอทิลีน/บิวทิลีนที่มีความนิ่มทำให้ก๊าซเอทิลีนซึมผ่านได้ดี และเมื่อปริมาณของ SEBS เพิ่มขึ้น จึงมีส่วนที่เป็นอสัณฐานมากขึ้น และยังพบว่าการเติม SEBS ทำให้ความเป็นผลึกลดลง ส่วนที่เป็นอสัณฐานของ LLDPE เพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงขึ้น



รูปที่ 4.11 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณ SEBS ต่างๆ

#### 4.2 การศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์ต่อสมบัติของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite

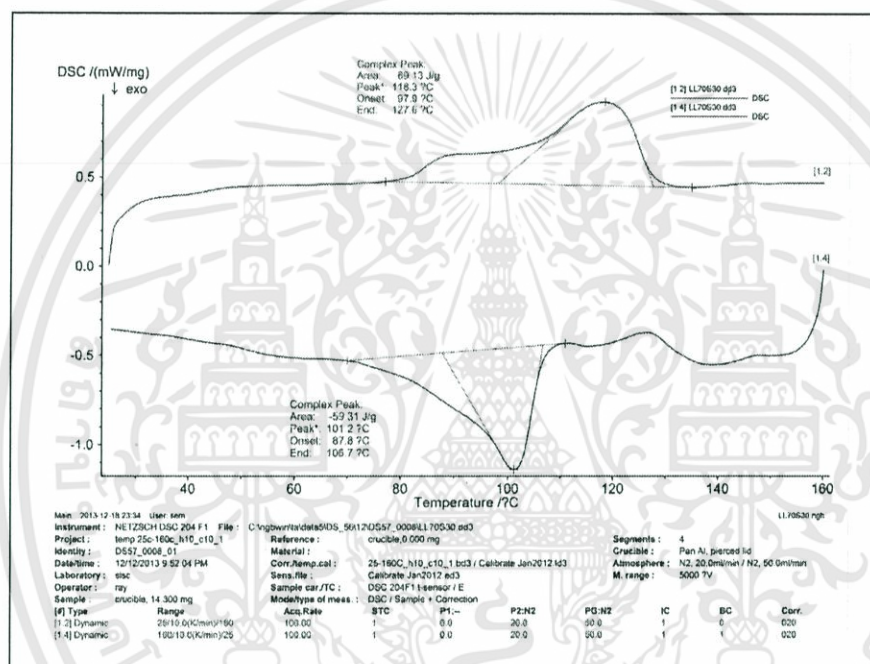
นำพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วน 70/30 โดยใช้ SEBS Kraton<sup>®</sup> G1657 และ นำมาผสมกับซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดแล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด จากนั้นนำฟิล์มมาทดสอบสมบัติต่างๆ

##### 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 จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าการเติมซีโอไลต์ (LL70S30Z5) ทำให้ LLDPE เกิดผลึกขนาดเท่าเดิม ( $T_m$  มีค่า 118-120 °C) และมีผลึกขนาดเล็ก เห็นได้จากการพบไหล่ฟีกที่กว้างขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรพอลิเมอร์ผสม LL70S30 จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมซีโอไลต์ ส่วนการเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์ไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของ LLDPE

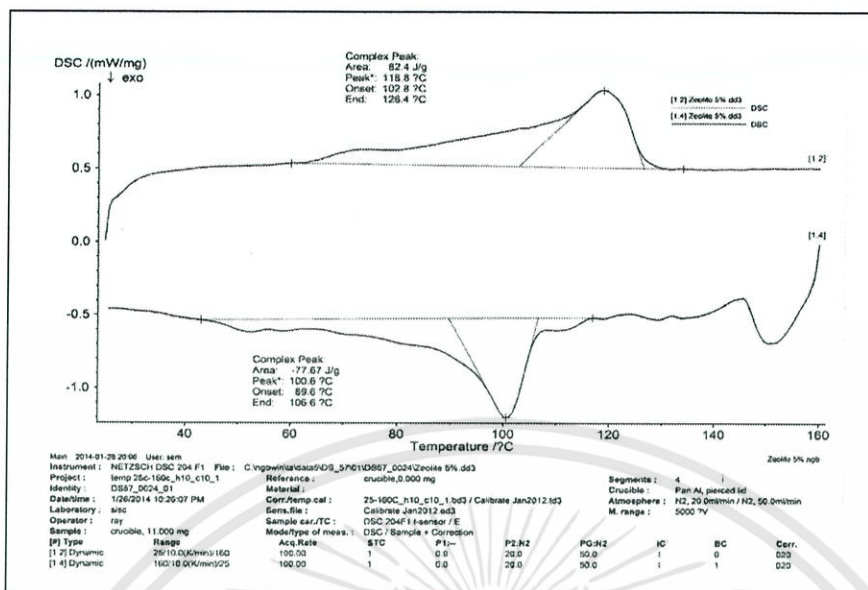
ตารางที่ 4.2  $T_m$ ,  $T_c$  และความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5)

| สูตร       | $T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | $T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | ความเป็นผลึก (%) |
|------------|------------------------------|------------------------------|------------------|
| LL70S30    | 118                          | 101                          | 34               |
| LL70S30Z5  | 118                          | 101                          | 40               |
| LL70S30Z10 | 119                          | 100                          | 38               |
| LL70S30Z15 | 120                          | 101                          | 37               |



รูปที่ 4.12 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z5

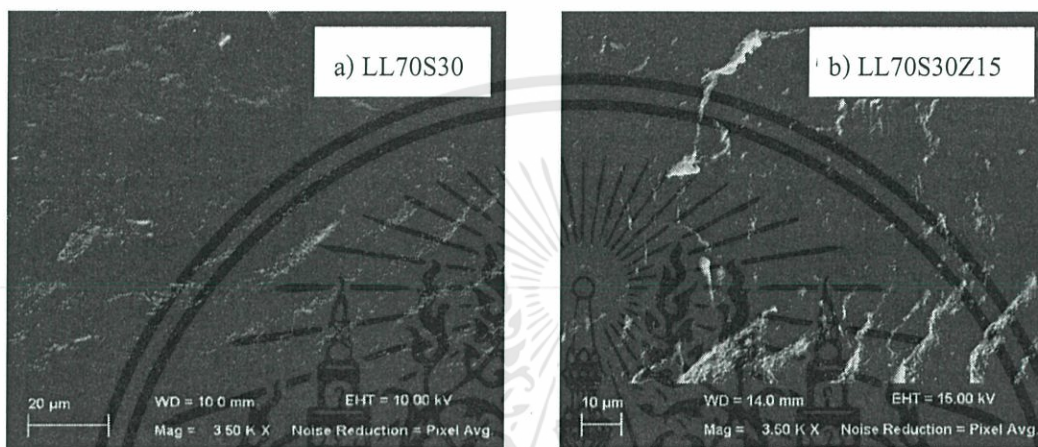
การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร เพื่อหาปริมาณซีโอไลต์ที่มีอยู่จริง ในสูตรพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5) ด้วยเครื่อง TGA แสดงผลการทดสอบดัง ตารางที่ 4.3 จากผลการทดลองพบว่า ซีโอไลต์ที่มีอยู่จริงในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณน้อยกว่าซีโอไลต์ที่เติม อาจเนื่องจากการผสมซึ่งมีสองขั้นตอนคือ ผสม LLDPE และซีโอไลต์ก่อน และมีการ ตักสารออกเพื่อเติม SEBS จึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ซีโอไลต์คลาดเคลื่อน และการผสมนี้อาจมีการ กระจายตัวของซีโอไลต์ที่ไม่ดี อีกทั้งเมื่อทำการทดสอบโดยใช้สารในปริมาณน้อย (5-10 mg) จึง อาจทำให้ปริมาณซีโอไลต์ที่วิเคราะห์หามีค่าคลาดเคลื่อนจากซีโอไลต์ที่มีอยู่จริง

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 ลักษณะวิทยาของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zelite (ZSM-5)

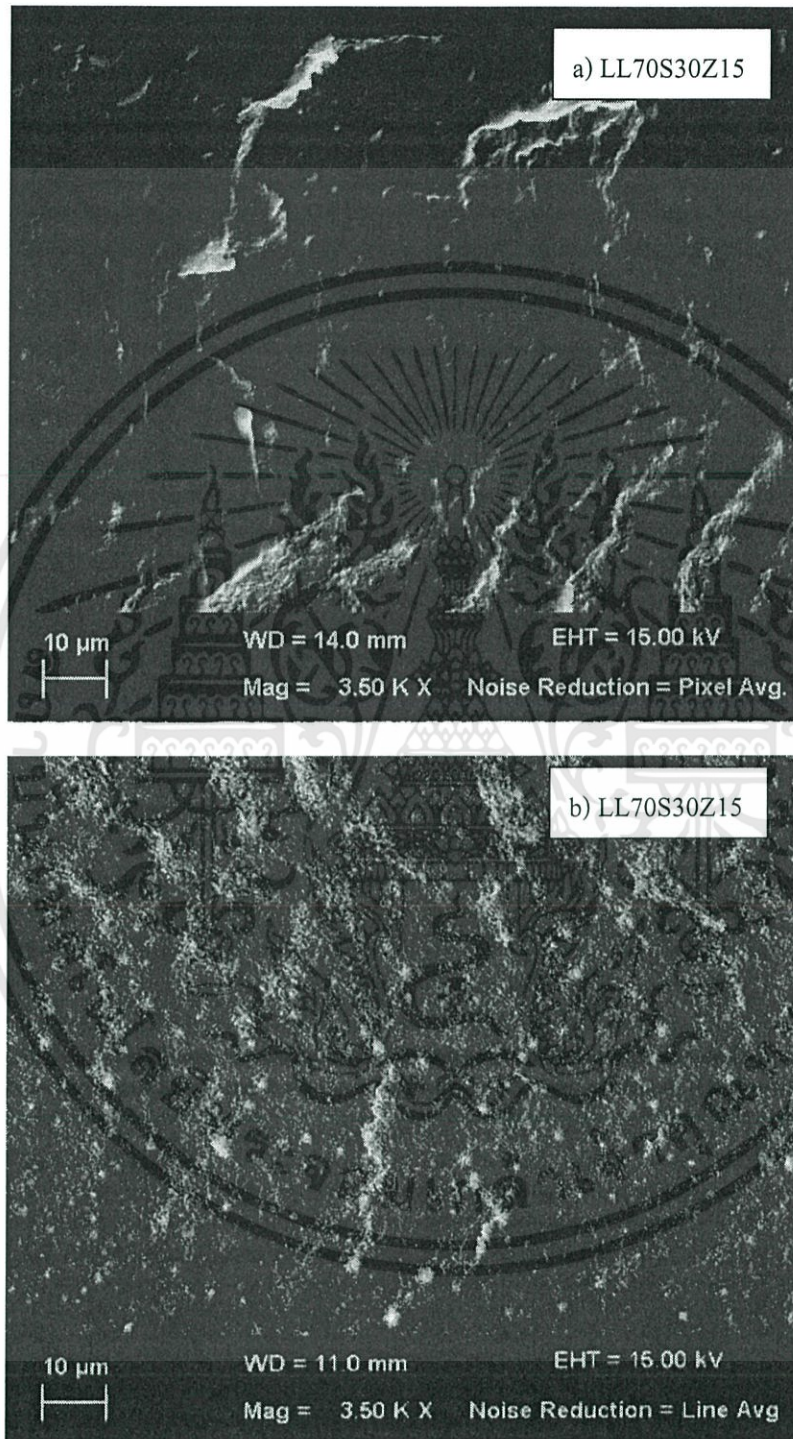
ลักษณะวิทยาภาคตัดขวางของ LLDPE/SEBS (รูปที่ 4.14) ที่ไม่เติมและเติมซีโอไลต์ก่อนสกัดด้วยตัวทำละลายเทระไฮโดรฟوران โดยฟิล์ม LLDPE/SEBS มีผิวเรียบ ส่วนฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zelite (ZSM-5) พบว่ามีอนุภาคทรงกลมสีขาวกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งคือ ซีโอไลต์ ZSM-5



รูปที่ 4.14 ลักษณะวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LL70S30 และ LL70S30Z15 ก่อนสกัดด้วย THF ที่กำลังขยาย 3500 เท่า

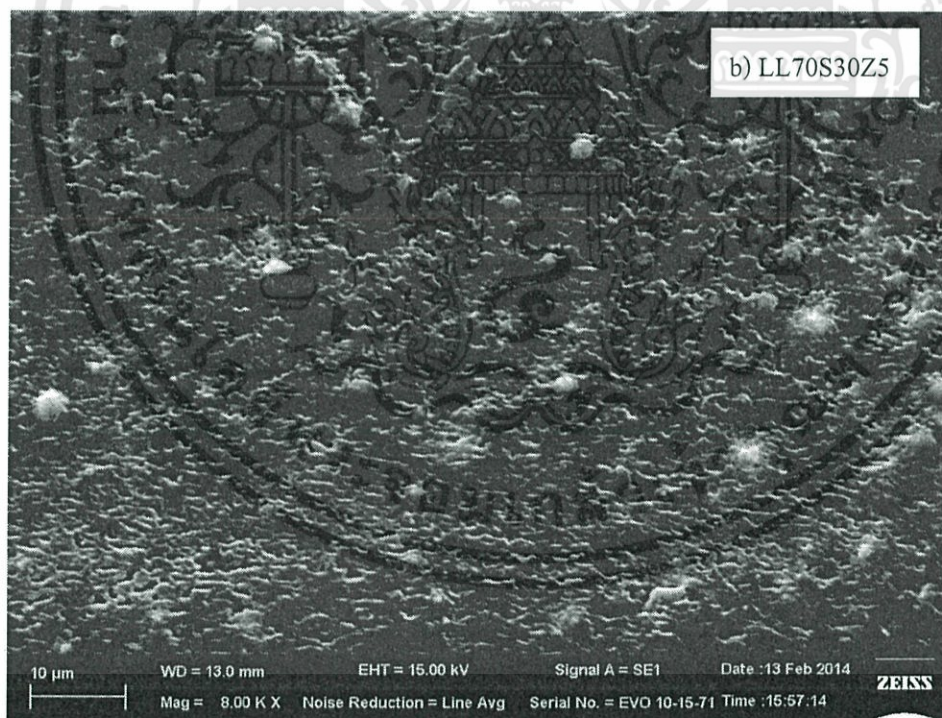
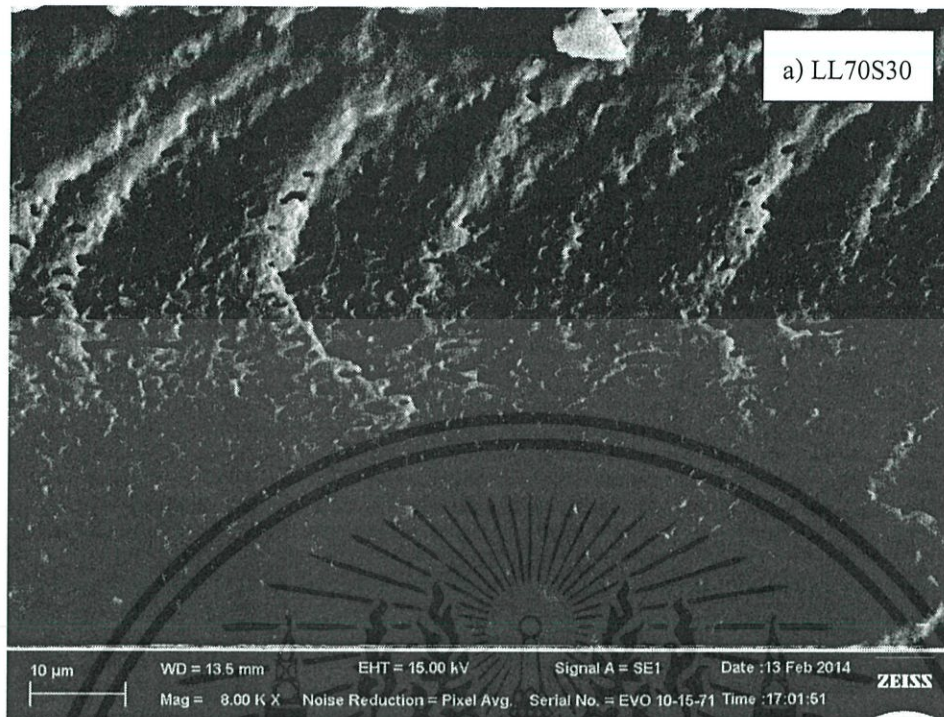
จากรูปที่ 4.15 แสดงลักษณะวิทยาภาคตัดขวางของ LLDPE/SEBS ที่เติมซีโอไลต์ปริมาณ 15 wt% ก่อนและหลังสกัดด้วยตัวทำละลายเทระไฮโดรฟوران โดย LLDPE ทำหน้าที่เป็นวัสดุภาคต่อเนื่อง โดยมี SEBS และซีโอไลต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุภาคกระจาย หลังการสกัดพบว่า มีช่องว่างสีดำและอนุภาคทรงกลมสีขาว ซึ่งอนุภาคทรงกลมสีขาวน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับ LL70S30Z15 ก่อนสกัด เนื่องจากการสกัดส่งผลให้ซีโอไลต์บางส่วนถูกสกัดออกพร้อมกันกับวัสดุภาค SEBS แสดงว่าซีโอไลต์กระจายตัวอยู่ในวัสดุภาคของ LLDPE และ SEBS และจากรูปที่ 4.16 เมื่อปริมาณของซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ซีโอไลต์มีการกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าค่า  $T_g$  ของ SEBS เพิ่มขึ้น ซึ่งซีโอไลต์ ZSM-5 เกิดอันตรกิริยากับ SEBS ได้ดี [3] ทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น จึงเห็นวัสดุภาคของ SEBS มีการกระจายตัวดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มการยึดติดของวัสดุภาค SEBS กับซีโอไลต์ได้มากขึ้น เนื่องจากมีอนุภาคของแข็งอยู่ในระบบ เมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้นพบว่ามีซีโอไลต์บางส่วนรวมกลุ่มกัน (Agglomerate) เนื่องจากซีโอไลต์เป็น

สารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) ซึ่งมีความเป็นขี้วมมากกว่า LLDPE และ SEBS

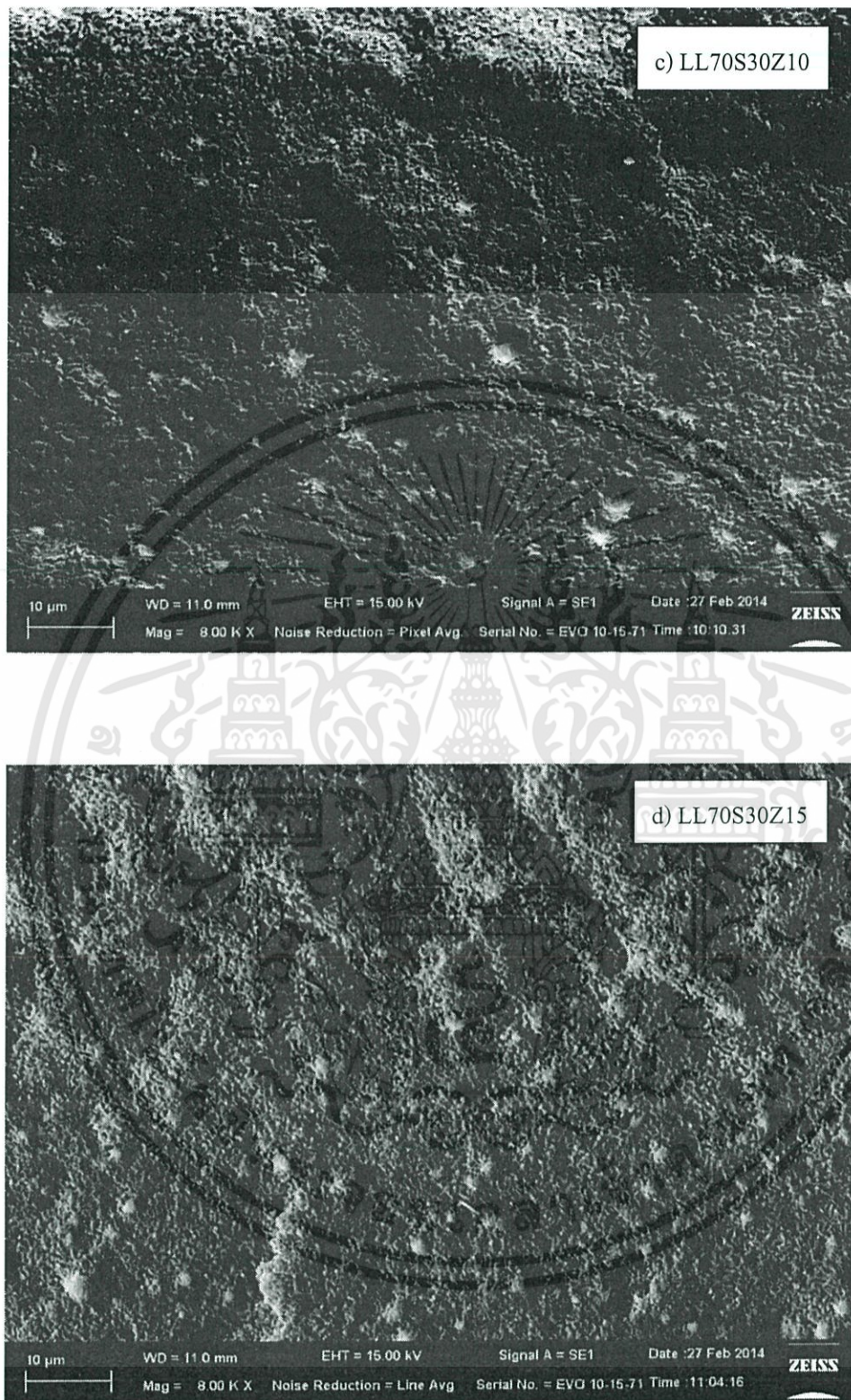


รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LL70S30Z15 ก่อนและหลังสกัดด้วย THF ที่กำลังขยาย 3500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

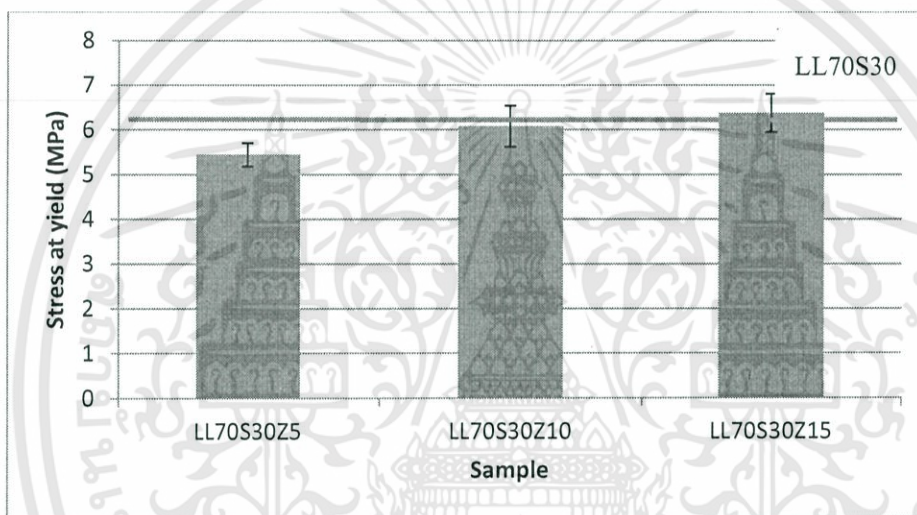


รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ซีโอไลต์ปริมาณต่างๆ หลังสกัดด้วย THF ที่กำลังขยาย 8000 เท่า

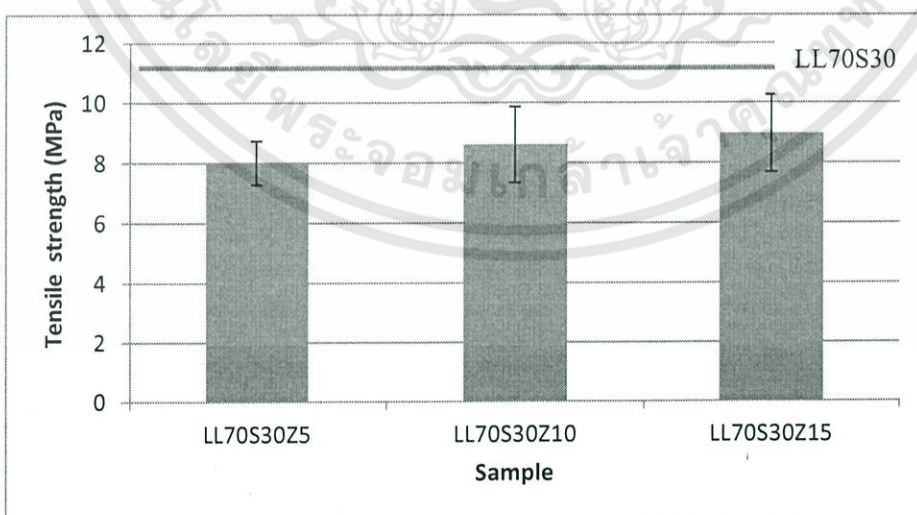
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากรูปที่ 4.17-4.20 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่มีปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ พบว่าฟิล์มที่มีซีโอไลต์ มีค่าความเค้น ณ จุดคราก ค่าความแข็งแรงดึง ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดต่ำ เนื่องจากซีโอไลต์เป็นอนุภาคของแข็งที่เกิดอันตรกิริยาได้ดีในระดับหนึ่งกับ LLDPE และ SEBS อย่างไรก็ตามอาจไม่แข็งแรงมากนัก เมื่อให้แรงดึงกับชิ้นงานสามารถเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งกับวัฏภาคของพอลิเมอร์ ส่วนค่ามอดูลัสของยัง โดยปกติการใส่อนุภาคของแข็งลงไปในพอลิเมอร์ผสม ทำให้มอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่า มอดูลัสของยังลดลงเมื่อมีซีโอไลต์

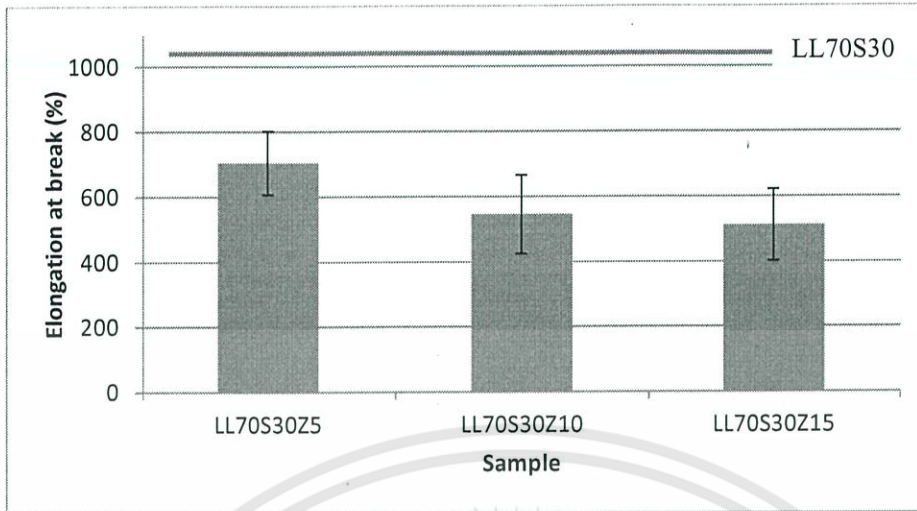


รูปที่ 4.17 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่มีปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ

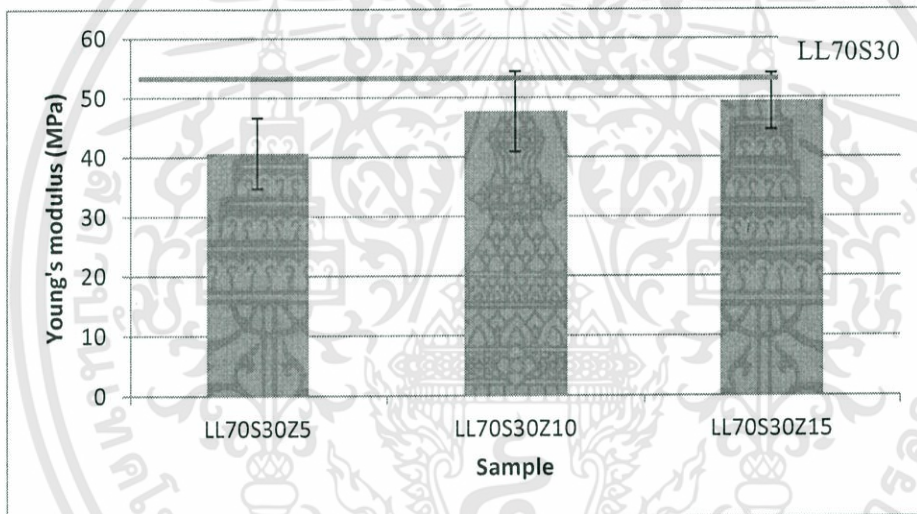


รูปที่ 4.18 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่มีปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโโอลิต์ต่างๆ



รูปที่ 4.20 มอดุลัสของยังของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโโอลิต์ต่างๆ

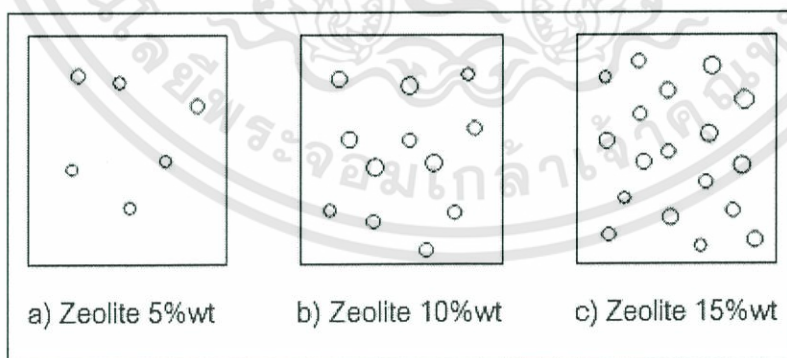
การเพิ่มปริมาณซีโโอลิต์ 5-15 wt% ทำให้มอดุลัสของยังเพิ่มขึ้น เพราะมีอนุภาคของแข็งเพิ่มขึ้น และมีผลให้ร้อยละการยืด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากการเพิ่มจุดบกพร่องในชิ้นงานขณะรับแรงดึง อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดคราก มีค่าใกล้เคียงกัน ในทางทฤษฎี การเพิ่มปริมาณซีโโอลิต์ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็ง เนื่องจากโครงสร้างของซีโโอลิต์เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) ทำให้ฟิล์มมีความแข็งมากขึ้น โดยซีโโอลิต์สามารถก่อให้เกิดผลึกขนาดเล็กของ LLDPE ได้ ทำให้ค่าความเค้น ณ จุดครากและค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จากผลการทดลองพบว่า ค่าความเค้น ณ จุดครากและค่าความแข็งแรงดึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง อาจเนื่องจากการผสมยังไม่ดีพอ สืบเนื่องจากการมีอนุภาคของแข็งของซี-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

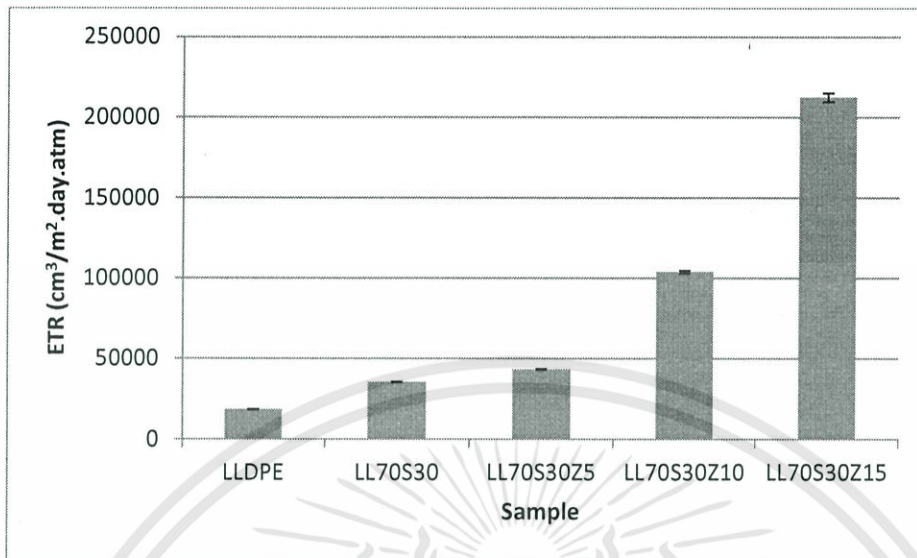
โพลีเอทิลีนที่รวมเป็นกลุ่มก้อน (รูปที่ 4.16) อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/SEBS/Zeolite (ZSM-5) (8-9 MPa) ยังมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานอุตสาหกรรม (ไม่น้อยกว่า 7 MPa)

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

การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสามารถซึมผ่านในส่วนที่เป็นอสัณฐานได้ดี เนื่องจากการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ มีปริมาตรอิสระ และเมื่อเติมซีโอไลต์ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น จึงขัดขวางการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน แต่เนื่องจากซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ขนาดความกว้างของหน้าตาต่าง  $5.5 \text{ \AA}$  ( $0.55 \text{ nm}$ ) ซึ่งก๊าซเอทิลีนมีขนาดเชิงจลนศาสตร์ (Kinetic diameter)  $0.39 \text{ nm}$  [33] รูพรุนของซีโอไลต์จึงยอมให้ก๊าซเอทิลีนซึมผ่านได้ จากรูปที่ 4.22 แสดงอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ พบว่าฟิล์ม LLDPE/SEBS มีค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนต่ำกว่าฟิล์ม LLDPE/SEBS ที่เติมซีโอไลต์ และเมื่อมีปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ทำให้มีโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากขึ้น (รูปที่ 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  $212,581 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$



รูปที่ 4.21 แบบจำลองการกระจายตัวของซีโอไลต์ที่ปริมาณต่างๆ ในฟิล์ม LLDPE/SEBS



รูปที่ 4.22 อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE และ LLDPE/SEBS ที่ปริมาณซีโอไลต์  
ต่างๆ

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของการเติม SEBS Kraton® G1657 ลงในฟิล์ม พบว่าการเพิ่มปริมาณ SEBS ทำให้ได้ฟิล์มมีค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดคราก (6-7 MPa) มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่ามอดูลัสของยังลดลง และความเป็นผลึกลดลงเนื่องจากมีวิฎภาคอสัณฐาน (SEBS) เข้ามาแทรกตัวกับวิฎภาคกึ่งผลึก (LLDPE) จากหลักฐานวิทยาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ SEBS ขนาดวิฎภาคของ SEBS มีแนวโน้มที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จากทรงกลมกลายเป็นทรงรีซึ่งมีความต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความต่อเนื่องของวิฎภาค อสัณฐานสูง ก๊าซเอทิลีนจึงสามารถซึมผ่านฟิล์มได้มากขึ้น

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

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เลือกสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย SEBS ในปริมาณมากและสามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในเชิงพาณิชย์ โดยฟิล์ม

บรรจุภัณฑ์นี้ใช้ในการบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อก๊าซเอทิลีนและมีอายุการเก็บรักษาสั้น เช่น กล้วย มะม่วง มะเขือเทศ เป็นต้น

2. เลือกพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุภาคต่อเนื้อให้มีความเป็นผลึกต่ำ เพื่อให้ก๊าซเอทิลีนสามารถซึมผ่านได้ดีขึ้น

3. ศึกษาการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไอน้ำ เพื่อดูความเป็นไปได้ในการพัฒนาเป็นฟิล์มในเชิงพาณิชย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์. “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] P. Monprasit. “Selective Ethylene-Permeable Zeolite Composite Double-Layered Film for Novel Modified Atmosphere Packaging.” Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang. 2011.
- [4] รุจิเรข วิวัฒน์านุกุล. “การศึกษาพอลิเมอร์ผสมของแอลแอลดีพีอี/เอสอีพีเอส เพื่อเพิ่มการแพร่ผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [5] สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดลำปาง. “การเปลี่ยนแปลงในพืชผักผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว.” [Online]. Available: <http://www.korsorlampang.com/?name=knowledge&file=readknowledge&id=164>. 2556.
- [6] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานพนนท์. “การเปลี่ยนแปลงของผักผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว.” [Online]. Available:<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3369>. 2556.
- [7] วาสนา แก้วหุ้ง. “สมการการหายใจแบบไม้ออกซิเจน.” [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/%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B8%97%E0%B8%B4%E0%B8%A5%E0%B8%B5%E0%B8%99%E0%B8%81%E0%80>

- B8%B1%E0%B8%9A%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%AA%E0%B8%B8%E0%B8%81%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%9C%E0%B8%A5%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%89.html. 2556.
- [10] มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. “กระบวนการเมมเบรน.” [Online]. Available: [http://kb.psu.ac.thpsukbbitstream255329418270056\\_ch1.pdf](http://kb.psu.ac.thpsukbbitstream255329418270056_ch1.pdf). 2556.
- [11] มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. “การแยกน้ำออกจากสารละลายแอลกอฮอล์.” [Online]. Available: [http://kb.psu.ac.th/psukb/bistream/2553/2588/7/296259\\_ch1.pdf](http://kb.psu.ac.th/psukb/bistream/2553/2588/7/296259_ch1.pdf). 2556.
- [12] L.K. Loon. “Morphological, mechanical and thermal properties of amorphous copolyester/polyoxymethylene blends.” [Online]. Available: [eprints.usm.my/6366/1/MORPHOLOGICAL,\\_MECHANICAL\\_AND.pdf](http://eprints.usm.my/6366/1/MORPHOLOGICAL,_MECHANICAL_AND.pdf). 2011.
- [13] สมศักดิ์ วรรณกลชัย. “เอกสารประกอบการสอน วิชาสารปรับแต่งพอลิเมอร์.” กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [14] 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.
- [15] B. Junhasavasdikul. “Basic Concepts of Polymer Blends and TPEs.” Technical Seminar by Chemical Innovation Co.,Ltd. 2002.
- [16] อธิพิล แจ่มชัด. “เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีการยาง.” กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [17] บัญชา ชุณหสวัตติกุล. “การพัฒนายางและผลิตภัณฑ์ยาง.” เคมีน่ารู้. 1(1): 077-084. 2545.
- [18] C.A. Harper “Handbook of Plastic, Elastomers and Composites.” 3<sup>rd</sup> ed. Newyork: The McGraw-Hill Companies. 1998.
- [19] นเรนทร์ อาศัยพานิชย์. “การพัฒนาเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2550.
- [20] จุฬารัตน์ อุปชาย์ และนาคยา วัฒนพงษ์ “การสังเคราะห์ซีโอไลต์.” [Online]. Available:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<http://chem.flas.kps.ku.ac.th/01403443/01403443-REPORT-SYNTHESIS-ZEOLITE.pdf>.  
2556.

- [21] คลพร ชูเกียรติสกุล, นันทพร เสรีประชารัตน์ และสุวณีย์ นาทะคำ. “การแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.” วิทยานิพนธ์ (วศ.บ.(วิศวกรรมเคมี)) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [22] มกรา ทัพพุน, ผึ้งผาย พรธรวดี และเมตตา เจริญพานิช. “เอกติวิตีของเหล็กบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่เตรียมจากถ้ำลอยลิ้นในด้านการเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.” ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2556.
- [23] สถาบันพลาสติก. “เทคโนโลยีการผสมยาง.” [Online]. Available:  
<http://rubber.oie.go.th/Article.aspx?aid=3403>. 2556.
- [24] ดร.ชนัน พัทธวรการ. “เอกสารประกอบการสอน กระบวนการวิชา 262481 เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ (Polymer processing technology).” ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรมคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2556.
- [25] เฉลิมชัย วงศ์วัฒน์. “ฮอร์โมนที่เกี่ยวข้องกับพืช.” [Online]. Available:  
<http://mylesson.swu.ac.th/bi456/Plant%20hormone/Index/Index%20first.html>. 2556.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] สัมฤทธิ์ เศรษฐวงศ์. “ฮอร์โมนและการใช้ฮอร์โมนกับผลไม้.” พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: ไทยเส็ง. 2552.
- [29] วรณี ฉินศิริกุล และอศิรา เฟื่องฟูชาติ. “Science and technology of modified atmosphere packaging.” [Online].  
Available:<http://www.foodscience.afisc.csiro.au/actpac-text.htm>. 2556.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] H. Kim, J. Biswas and S. Choe. “**Effects of stearic acid coating on zeolite in LDPE, LLDPE, and HDPE composites.**” *Journal of Polymer* 47:3981-3992. 2006.
- [31] เนตรนภา ลามอ, อนงค์นาฏ สมหวังชนโรจน์ และอภิธา บุญศิริ. “**การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ-ซีโอไลต์ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะนาว.**” [Online]. Available: [http://hucon.lib.ku.ac.th/cgi-bin/KUCON.exe?rec\\_id=011457&database=KUCON&search\\_type=link&table=mona&back\\_path=/KUCON/mona&lang=thai&format\\_name=TFMON.2552](http://hucon.lib.ku.ac.th/cgi-bin/KUCON.exe?rec_id=011457&database=KUCON&search_type=link&table=mona&back_path=/KUCON/mona&lang=thai&format_name=TFMON.2552).
- [32] F.W. Billmeyer **Textbook of Polymer Science**. New York: John Wiley and Sons Inc. 1984.
- [33] A. Fuougfuchat, W. Boonchareon and S. Apisitinet. “**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.



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

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

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

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

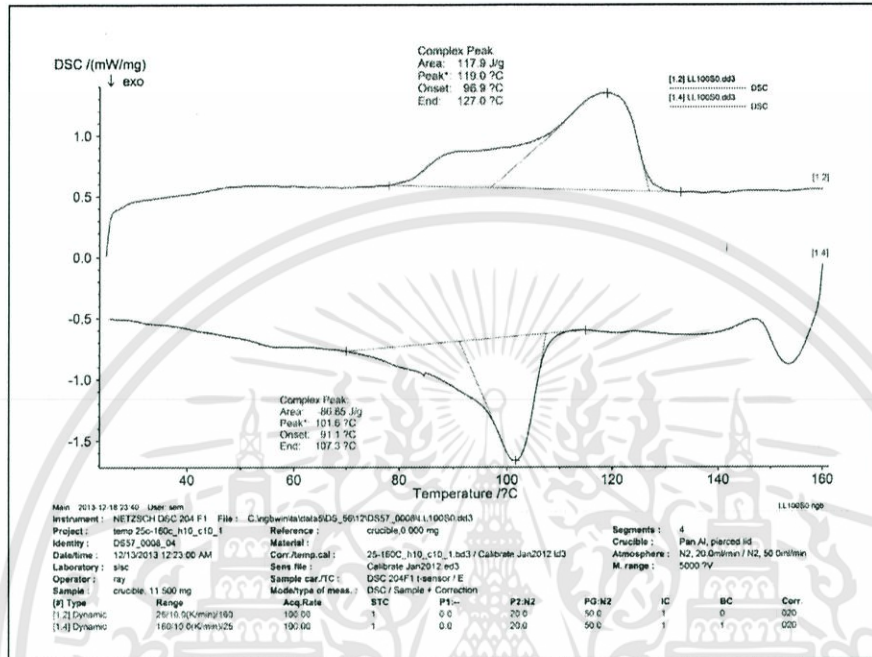
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  |   |   |
|--|---|---|
| อัตราการไหลของก๊าซ ( $F_x$ )             | = | 30.0 ml/min   |
| อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนต่อเวลา (J) | = | 1.0845 ml/L $\times$ 30.00 ml/min                     |
|  | = | 32.5355 ml $\times$ ml/L $\times$ min                 |
|  | = | 0.003253 ml/min                                       |
| พื้นที่ของฟิล์มตัวอย่าง ( $A_F$ )        | = | 0.0025 m <sup>2</sup>                                 |
| ความหนาของฟิล์ม ( $\Delta x$ )           | = | 0.055 mm  |
| ฟลักซ์ของก๊าซเอทิลีน (Flux)              | = | J / $A_F$   |
|  | = | 0.003253 / 0.0025                                     |
|  | = | 13.0142 ml/min. m <sup>2</sup>                        |
|  | = | 18740.4614 cm <sup>3</sup> / m <sup>2</sup> .day      |
| อัตราเร็วการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน (ETR)  | = | J / ( $A_F \times \Delta p$ )                         |
|  | = | $\frac{18740.4614}{1.01}$                             |
|  | = | 18554.9 cm <sup>3</sup> / m <sup>2</sup> .day.atm     |
| การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน (EP)            | = | (J $\times$ $\Delta x$ ) / ( $A_F \times \Delta p$ )  |
|  | = | ETR $\times$ ความหนาของฟิล์ม                          |
|  | = | 18554.9 $\times$ 0.055                                |
|  | = | 1020.52 cm <sup>3</sup> .mm / m <sup>2</sup> .day.atm |

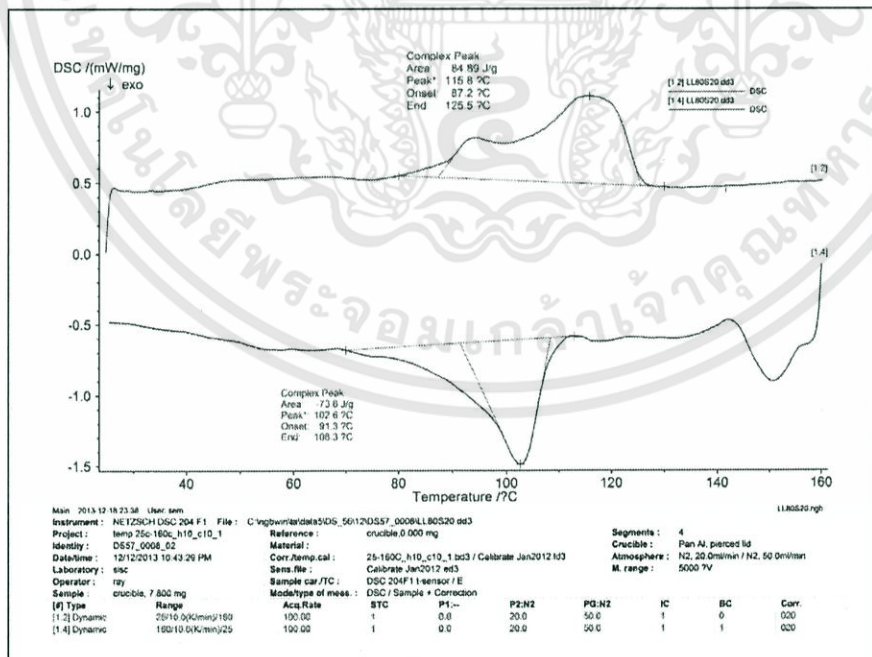
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เทอร์โมแกรม DSC

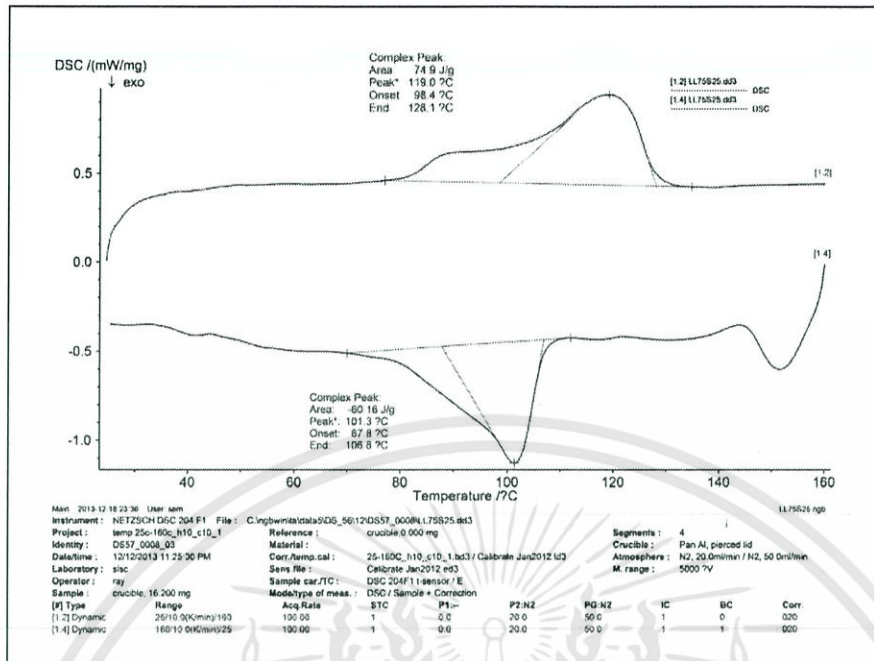


รูปที่ ข.1 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LLDPE

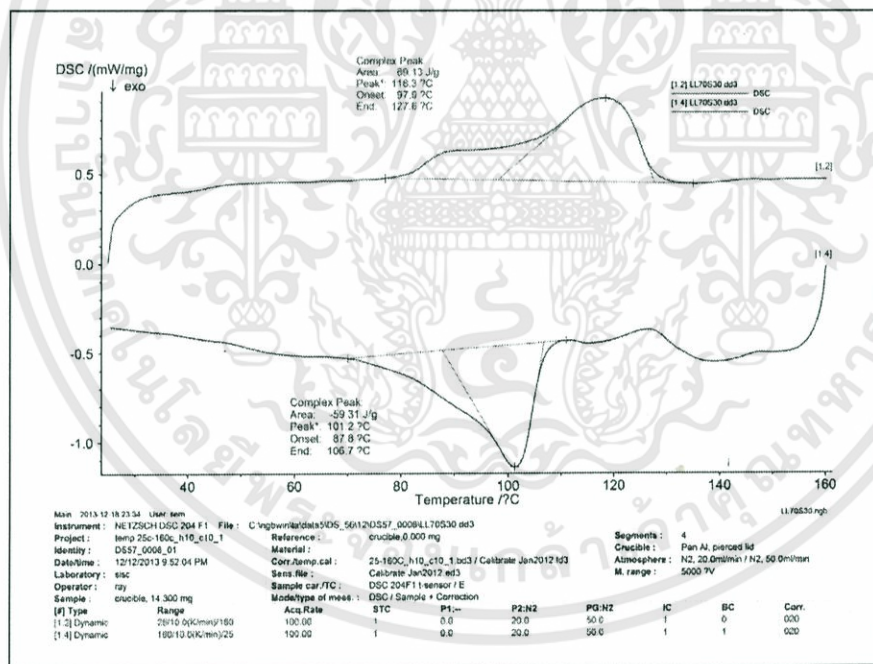


รูปที่ ข.2 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL80S20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

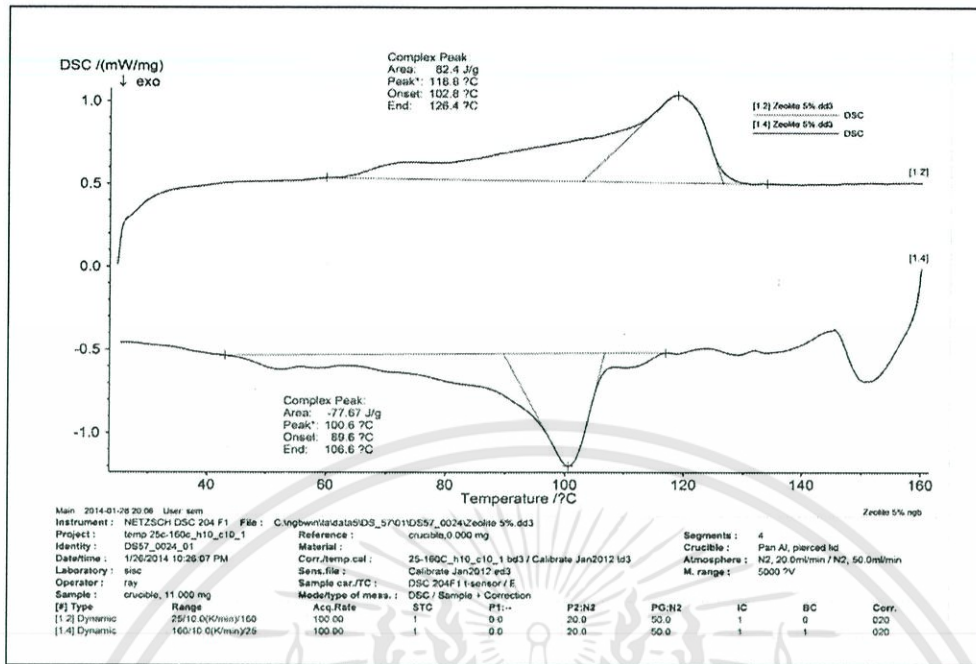


รูปที่ ข.3 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL75S25

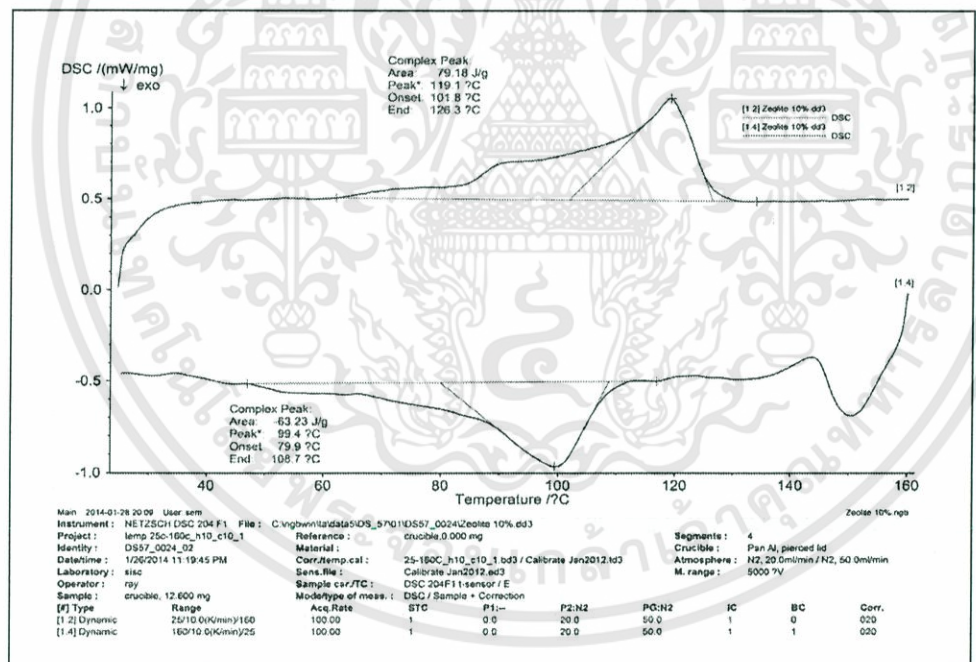


รูปที่ ข.4 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

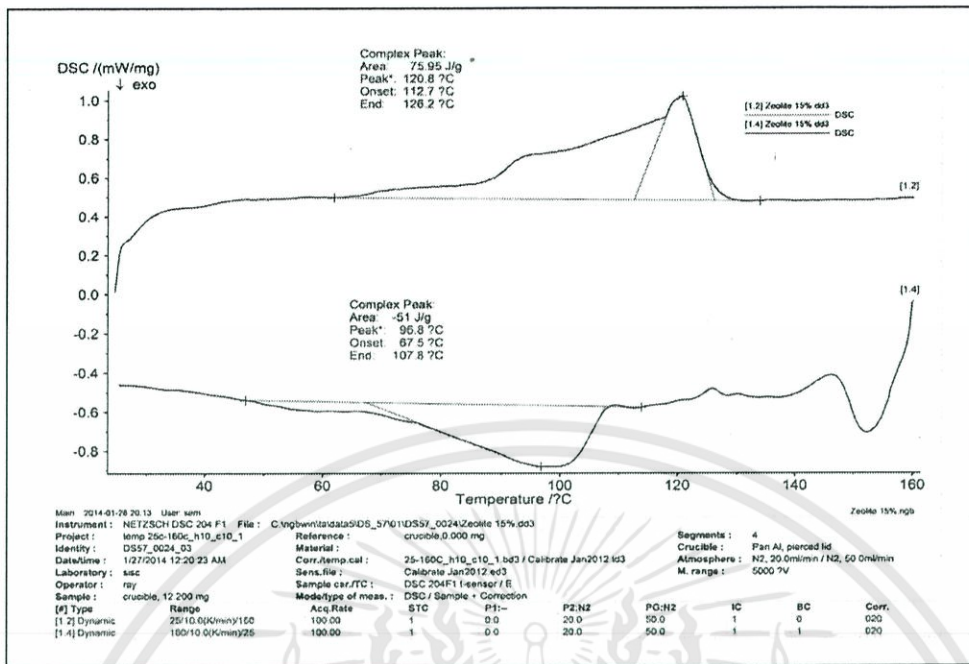


รูปที่ ข.5 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z5



รูปที่ ข.6 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

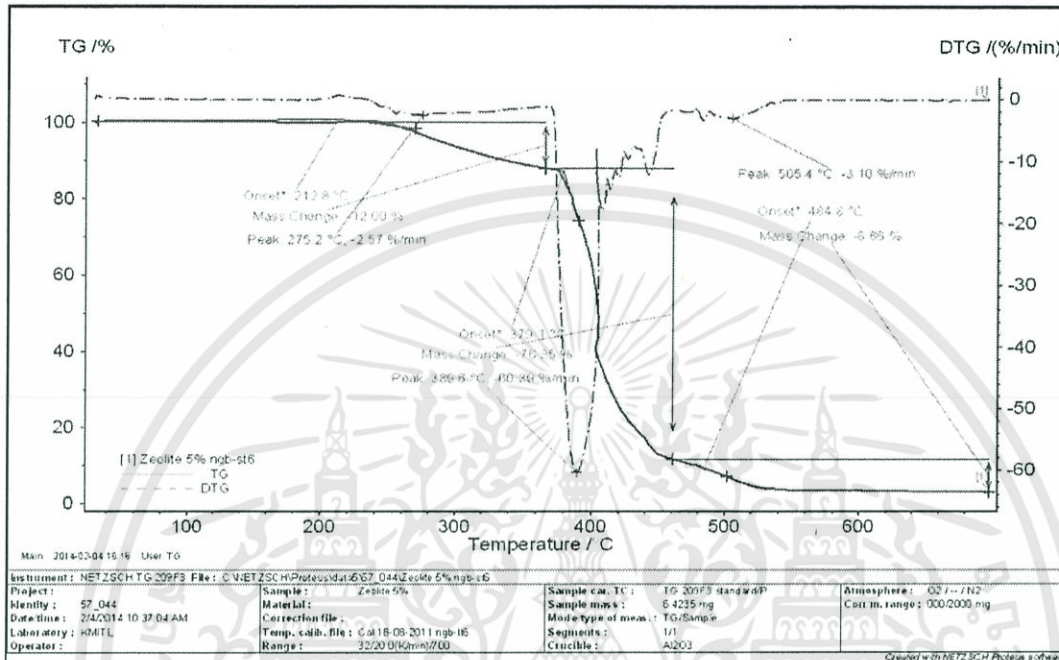


รูปที่ ข.7 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z15

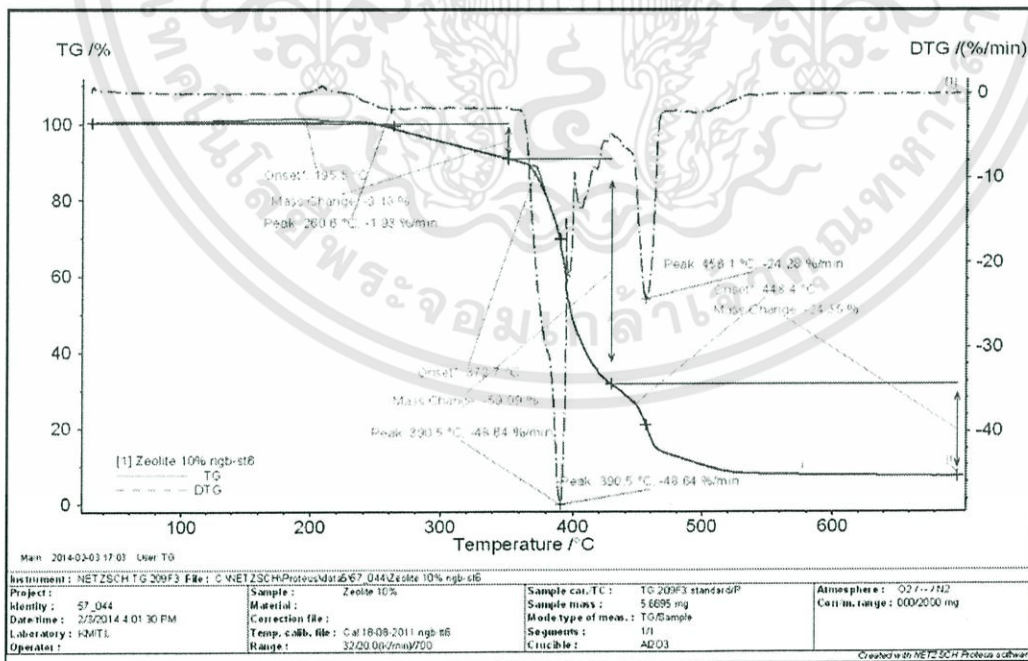
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เทอร์โมแกรม TGA

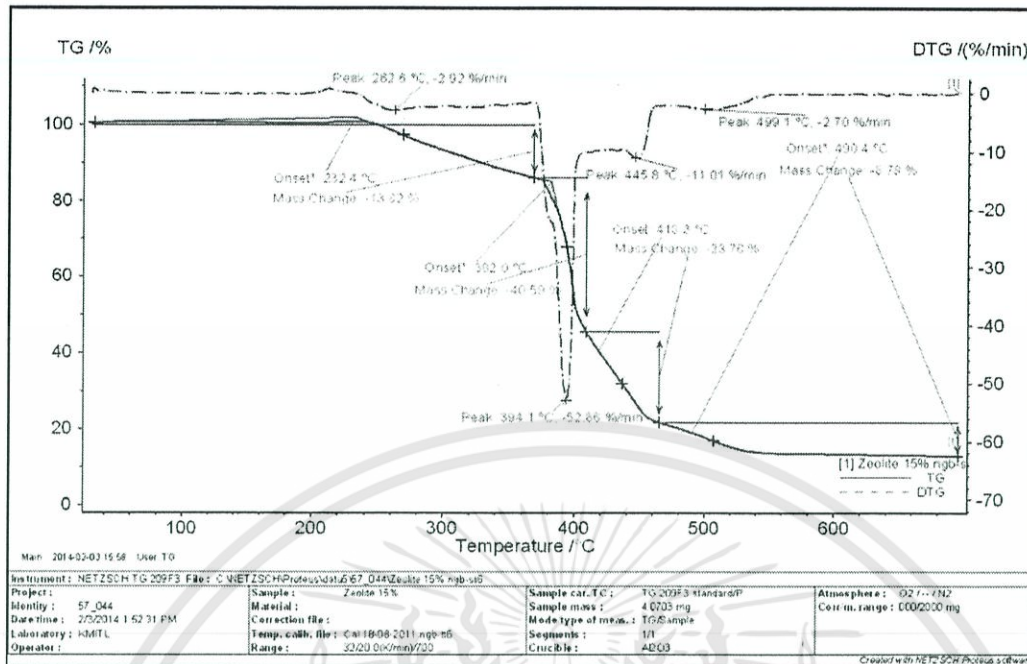


รูปที่ ค.1 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z5



รูปที่ ค.2 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

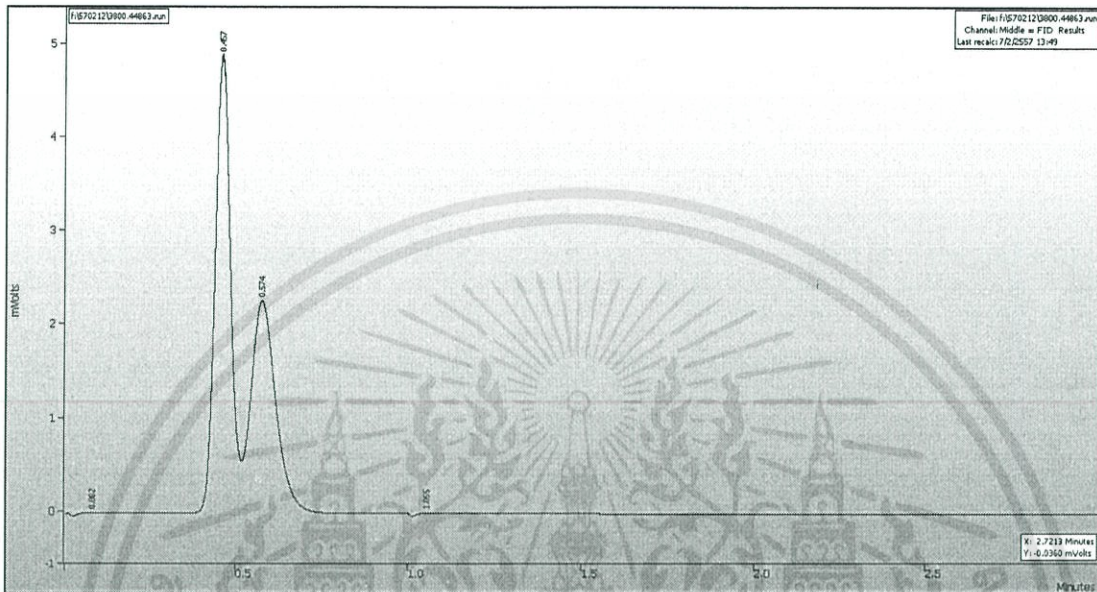


รูปที่ ค.3 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LL70S30Z15

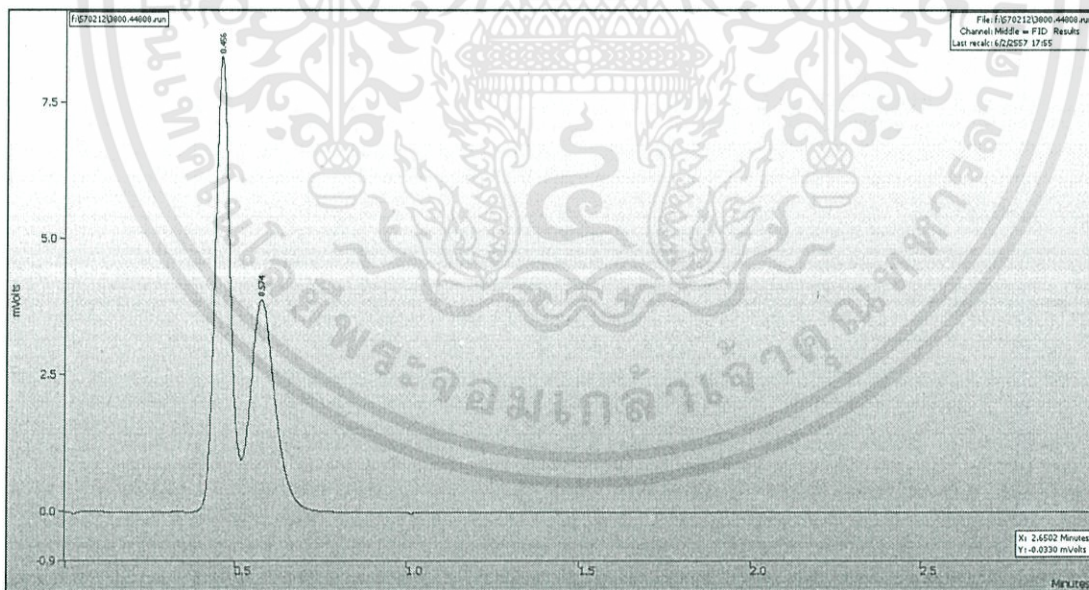
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## โครมาโทแกรม

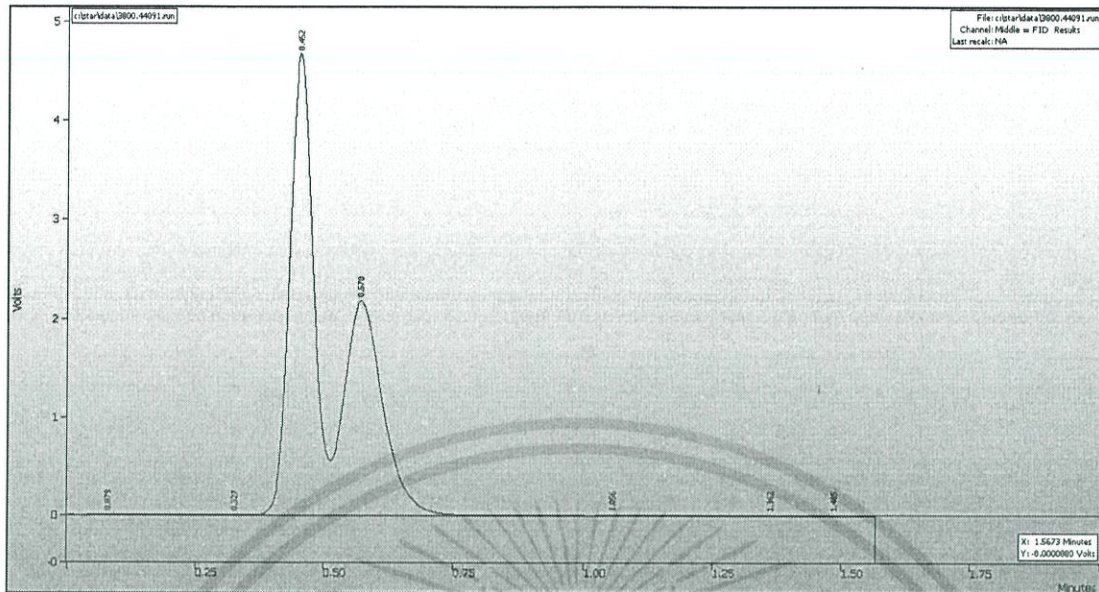


รูปที่ ง.1 โครมาโทแกรมของฟิล์ม LLDPE

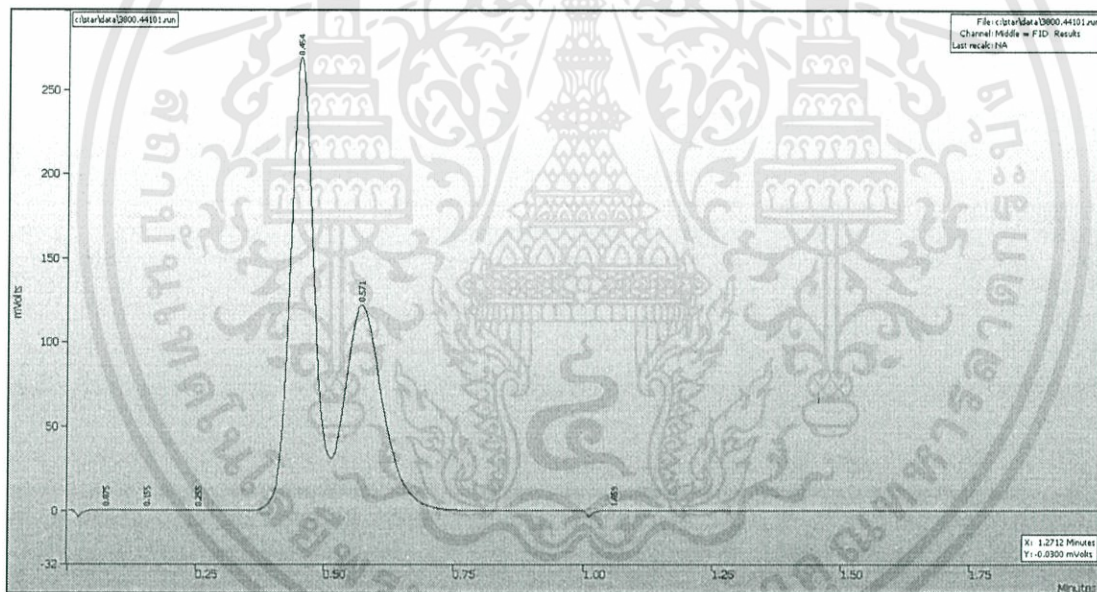


รูปที่ ง.2 โครมาโทแกรมของฟิล์ม LL70S30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.3 โครมาโทแกรมของฟิล์ม LL70S30Z15



รูปที่ ง.4 โครมาโทแกรมของก๊าซเอทิลีนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

## สมบัติเชิงกล

จ.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มตัวอย่างในอัตราส่วนต่างๆ

| ตัวอย่าง   | ความหนา<br>( $\mu\text{m}$ ) | ความเค้น<br>ณ จุดคราก<br>(MPa) | ความ<br>แข็งแรงดึง<br>(MPa) | ร้อยละการยืด<br>ณ จุดขาด | มอดุลัสของยัง<br>(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         |

## ภาคผนวก จ

## การซึมผ่านก๊าซเอทิลีน

จ.1 อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มตัวอย่าง

| ตัวอย่าง   | ความหนา<br>( $\mu\text{m}$ ) | ETR<br>( $\text{cm}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$ ) | EP<br>( $\text{cm}^3 \cdot \text{mm} / \text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$ ) |
|------------|------------------------------|---|--|
| 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   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้