

การปรับปรุงการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มเอชดีพีอีด้วยอีเอ็มเอ
เพื่อใช้งานบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด

IMPROVEMENT OF WATER VAPOR PERMEABILITY
PROPERTY OF HDPE FILMS WITH EMA FOR PACKAGING

APPLICATION OF FRESH PRODUCES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

การปรับปรุงการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มเอชดีพีอีด้วยอีเอ็มเอ
เพื่อใช้งานบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด

IMPROVEMENT OF WATER VAPOR PERMEABILITY
PROPERTY OF HDPE FILMS WITH EMA FOR PACKAGING
APPLICATION OF FRESH PRODUCES



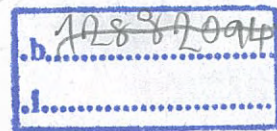
T149216



บุญระรักษ์ โคสุต
ปาลิตา ช่วยสกุล
ภัศรา บัวแก้ว

2/ค
2/474/1
2558

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....149216
วันเดือนปี.....29.ต.ค. 2561



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2558 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPROVEMENT OF WATER VAPOR PERMEABILITY
PROPERTY OF HDPE FILMS WITH EMA FOR PACKAGING
APPLICATION OF FRESH PRODUCES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การปรับปรุงการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มเอชดีพีอีด้วยอีเอ็มเอเพื่อใช้งานบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด

Improvement of Water Vapor Permeability Property of HDPE Films with EMA for Packaging Application of Fresh Produces

ชื่อนักศึกษา

นางสาวบุญนะรักษ์ โคชุต รหัสนักศึกษา 55050714
นางสาวปาลิตา ช่วยสกุล รหัสนักศึกษา 55050732
นางสาวภัสรา บัวแก้ว รหัสนักศึกษา 55050763

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2558


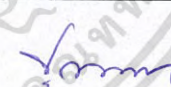
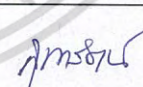
อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

รศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย

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

| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
|---|--|
| ผศ.ดร. ชลลดา ถตวิรุฬห์ ประธานกรรมการ |  |
| ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน กรรมการ |  |
| ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา |  |
| รศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม |  |

ลิสสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|----------------------|---|-----------------------|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การปรับปรุงการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มเอชดีพีอีด้วยอีเอ็มเอเพื่อใช้งานบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด | |
| ชื่อนักศึกษา | นางสาวบุญนระรักษ์ โคสุต | รหัสนักศึกษา 55050714 |
| | นางสาวปาลิตา ช่วยสกุล | รหัสนักศึกษา 55050732 |
| | นางสาวภัศรา บัวแก้ว | รหัสนักศึกษา 55050763 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) | |
| ภาควิชา | เคมี | |
| คณะ | วิทยาศาสตร์ | |
| มหาวิทยาลัย | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) | |
| ปีการศึกษา | 2558 | |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ | |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | รศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย | |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยเอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EMA) เพื่องานบรรจุภัณฑ์ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสด โดยศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม HDPE:EMA เป็น 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 65:35 ทำการผสมสูตรพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป ฟิล์มที่ได้ถูกนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิเตอร์ เครื่องทดสอบเนกประสงค์ เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ เครื่องทดสอบมุมสัมผัส และเครื่องทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ จากนั้นเลือกฟิล์มนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อห่อพริกชี้หูสด จากการศึกษาพบว่า EMA มีการกระจายตัวดีในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และปริมาณผลึก HDPE ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณ EMA ที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของ EMA ทำให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม HDPE/EMA มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์ม HDPE โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ EMA เพิ่มขึ้น แสดงด้วยค่าดรรชนีคาร์บอนิลที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสของน้ำที่พื้นผิวพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง และสอดคล้องกับค่าการซึมผ่านไอน้ำที่มีค่ามากขึ้นตามปริมาณ EMA เนื่องจาก EMA ช่วยเพิ่มวิถึภาคอสัณฐานและควมมีขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และเมื่อใช้ฟิล์ม HDPE/EMA ทำเป็นบรรจุภัณฑ์พบว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีปริมาณ EMA สูง (H65M35) มีมวลไอน้ำที่กักเก็บสะสมน้อย จึงลดโอกาสในการเน่าเสียจากไอน้ำที่ได้จากการหายใจทำให้สามารถคงคุณภาพของพริกชี้หูสดได้นานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พิทมบรรจุภัณฑ์
เอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|----------------------|---|---------------------|
| Title | Improvement of Water Vapor Permeability Property of HDPE Films with EMA for Packaging Application of Fresh Produces | |
| Students | Miss Boonnarak Kohud | Student ID 55050714 |
| | Miss Palita Chuaysakul | Student ID 55050732 |
| | Miss Patsara Buakaew | Student ID 55050763 |
| Degree | Bachelor of Science (Industrial Chemistry) | |
| Department | Chemistry | |
| Faculty | Science | |
| University | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) | |
| Academic Year | 2015 | |
| Advisor | Assist. Prof. Dr. Suparat Rukchonlatee | |
| Co-Advisor | Assoc. Prof. Dr. Tawan Sooknoi | |

Abstract

This research attempted to improve water vapor permeability of high density polyethylene (HDPE) film blended with ethylene methyl acrylate copolymer (EMA) for packaging application to prolong shelf-life of fresh produces. The HDPE:EMA ratios of 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 and 65:35 were studied. The polymer compounds were prepared using an internal mixer and made into shape using a blown film process. The films were characterized by SEM, DSC, Universal testing machine, FT-IR, Contact angle tester, and Water vapor permeation analyzer. Moreover, the films were hot sealed to be packages for testing shelf-life performance of Bird's eye chili. The results revealed that EMA was well dispersed in blend film. HDPE crystallinity remained independent of EMA content. The increase in EMA resulted in lowering tensile strength and tear strength of HDPE/EMA films, as compared with HDPE films. The amount of polar functional groups was increased with EMA content, as seen from the higher carbonyl index, and lower contact angle of water on polymer specimen surface. Permeation test results showed that the more content of EMA, the more water vapor permeability. This was because EMA provided higher fraction of amorphous region and polarity of the blend films. When using HDPE/EMA film as a packaging, the film containing higher amount of EMA (H65M35) gave lower content of

เอเปค การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

condensed water vapor in the package. Therefore, it gave the decrease in spoilage from respiratory water vapor and provided longer shelf-life of Bird's eye chili.

Keywords : Water vapor permeability, High Density Polyethylene, packaging film, Ethylene Methyl Acrylate copolymer



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับการสนับสนุน ความช่วยเหลือ ดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีจากหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุภรัตน์ รักชลธิ์ และ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย ขอขอบคุณคณะกรรมการ ผศ.ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ซึ่งได้ให้คำแนะนำในประเด็นต่างๆ ในการศึกษาและชี้แนวทาง ในการแก้ปัญหา การค้นคว้าข้อมูลเพิ่มเติม อันเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ สรุปผลการศึกษารวมทั้งการแก้ไขงานให้สมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างยิ่ง และขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ นายฐิตินันท์ ศิริจันทน์นัท ที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการพอลิเมอร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

ขอขอบคุณ ครอบครัว พี่ๆ และเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุน และคอยเป็นกำลังใจในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีมาโดยตลอด หากโครงการพิเศษฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้สนใจในเรื่องการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE/EMA นับเป็นความยินดีอย่างยิ่งที่ได้ทำงานวิจัยฉบับนี้ขึ้นมา และหากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยไว้ ณ ที่นี้

บุญนะรักษ์ โคสุต

ปาไลตา ช่วยสกุล

ภัสรา บัวแก้ว

สารบัญ

| | หน้า |
|--|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ค |
| กิตติกรรมประกาศ | จ |
| สารบัญ | ฉ |
| สารบัญตาราง | ฅ |
| สารบัญรูป | ฉ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว | 4 |
| 2.1.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของพืช | 5 |
| 2.1.1.1 การหายใจ | 5 |
| 2.1.1.2 การคายน้ำ | 8 |
| 2.1.1.3 การสุก | 9 |
| 2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้ | 9 |
| 2.2.1 การซึมผ่านของก๊าซ | 9 |
| 2.2.2 สมการการแพร่และการดูดซับ | 10 |
| 2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านของฟิล์มพลาสติก | 10 |
| 2.2.4 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ | 14 |
| 2.2.4.1 การตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ | 15 |
| 2.2.5 การใช้ฟิล์มพลาสติกในการเก็บรักษา | 16 |
| 2.3 พอลิเอทิลีน | 17 |
| 2.3.1 สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีน | 18 |
| 2.3.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง | 20 |
| 2.3.2.1 ลักษณะทั่วไปของ HDPE | 20 |
| 2.3.2.2 สมบัติทั่วไปของ HDPE | 21 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 2.3.2.3 การประยุกต์ใช้งาน | 22 |
| 2.3.3 ความแข็งแรงดึงของถุงพลาสติกที่ผลิตจาก PE | 22 |
| 2.4 เอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ | 23 |
| 2.4.1 ลักษณะทั่วไปของเอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ | 23 |
| 2.4.2 สมบัติบางประการของ EMA | 24 |
| 2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน | 24 |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 24 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย | 28 |
| 3.1 สารเคมี | 28 |
| 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง | 29 |
| 3.3 ขั้นตอนการทดลอง | 30 |
| 3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ | 30 |
| 3.3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มโดยเทคนิคการเป่าฟิล์ม | 30 |
| 3.3.3 ความหนาของฟิล์ม | 31 |
| 3.3.4 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก | 31 |
| 3.3.5 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม | 32 |
| 3.3.6 การศึกษาการกระจายตัวของเอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ | 32 |
| 3.3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล | 32 |
| 3.3.7.1 สมบัติความแข็งแรงดึง | 32 |
| 3.3.7.2 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด | 34 |
| 3.3.8 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ | 34 |
| 3.3.9 การทดสอบมุมสัมผัสผิวน้ำ | 34 |
| 3.3.10 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ | 35 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล | 36 |
| 4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA | 36 |
| 4.1.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม HDPE/EMA | 36 |
| 4.1.2 การศึกษาผลของการกระจายตัวของ EMA ในฟิล์ม HDPE/EMA | 38 |
| 4.1.3 สมบัติทางความร้อน | 42 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|-----------|
| 4.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล | 42 |
| 4.1.5 การทดสอบมุมสัมผัสน้ำ | 45 |
| 4.1.6 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ | 46 |
| 4.2 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ | 47 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 52 |
| เอกสารอ้างอิง | 53 |
| ภาคผนวก | 58 |
| ภาคผนวก ก | 59 |
| ภาคผนวก ข | 63 |
| ภาคผนวก ค | 64 |
| ภาคผนวก ง | 65 |
| ภาคผนวก จ | 70 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 การเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ LDPE และ HDPE | 2 |
| 2.1 อัตราการหายใจของผลไม้แต่ละชนิดประเภท Climacteric | 7 |
| 2.2 อัตราการหายใจของผลไม้แต่ละชนิดประเภท Non climacteric | 8 |
| 2.3 ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ | 10 |
| 2.4 ผลของโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน | 11 |
| 2.5 ผลของการจัดระเบียบโมเลกุลต่อค่า Pm (O ₂) ของพลาสติก | 11 |
| 2.6 ผลของร้อยละความเป็นผลึกต่อค่า Pm (O ₂) ของพลาสติก | 12 |
| 2.7 ขนาดโมเลกุลและสัดส่วนของค่าอัตราซึมผ่านของก๊าซไนโตรเจน ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ | 13 |
| 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) การละลาย (S) และค่าอัตราการซึมผ่าน (Pm) ของคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไนโตรเจน ของ LDPE ที่ 25°C | 13 |
| 2.9 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ | 16 |
| 2.10 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดต่างๆ | 22 |
| 2.11 ระยะระหว่างปากจับ และอัตราการเคลื่อนที่ของปากจับ | 23 |
| 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE | 28 |
| 3.2 สมบัติบางประการของ EMA | 28 |
| 3.3 พอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมดโดยน้ำหนัก | 30 |
| 4.1 สูตรพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA และความหนาฟิล์ม | 36 |
| 4.2 อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T _m), อุณหภูมิการตกผลึก (T _c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE | 42 |
| 4.3 ปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้ต่อน้ำหนักฟริก 1 กรัม หลังการเก็บรักษา 20 วัน | 50 |
| ข.1 ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง | 63 |
| ค.1 ค่ามุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิวภาคตัดขวางของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม | 64 |
| ง.1 บรรจุภัณฑ์ระหว่างบรรจุฟริกชิ้นหุสในฟิล์ม HDPE/EMA | 65 |
| ง.2 ผลการทดสอบการเก็บรักษาฟริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร H100M0 | 67 |
| ง.3 น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร H100M0 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์ | 67 |
| ง.4 ผลการทดสอบการเก็บรักษาฟริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร H80M20 | 68 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| ง.5 น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร H80M20 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออก จากบรรจุภัณฑ์ | 68 |
| ง.6 ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร H65M35 | 69 |
| ง.7 น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร H65M35 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออก จากบรรจุภัณฑ์ | 69 |
| จ.1 ค่า Solubility parameter ของ Polymer | 70 |
| จ.2 ค่า Solubility parameter ของ Solvent | 70 |



สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้ก๊าซ O_2 และไม่ใช้ก๊าซ O_2 | 6 |
| 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตรรกะของการไหลกับความสามารถในการขึ้นรูป และสมบัติทางกายภาพ | 19 |
| 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลกับเศษส่วนโดยมวล | 19 |
| 2.4 โครงสร้างของ HDPE | 20 |
| 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ PE | 21 |
| 2.6 โมเดลแสดงความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน | 21 |
| 2.7 โครงสร้างของ EMA | 23 |
| 3.1 บริเวณที่วัดความหนาของฟิล์ม | 31 |
| 3.2 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงดึง | 33 |
| 3.3 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาด | 34 |
| 4.1 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม HDPE/EMA ด้วยเทคนิค FT-IR | 37 |
| 4.2 ค่าตรรกะคาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE/EMA | 38 |
| 4.3 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์ม HDPE/EMA ที่มีการสกัดวัฏภาคของ EMA ออก | 39 |
| 4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HDPE/EMA | 43 |
| 4.5 ค่ามุมสัมผัสน้ำของพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA เมื่อมี EMA ในปริมาณต่างๆ | 45 |
| 4.6 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE/EMA เมื่อมี EMA ปริมาณต่างๆ | 46 |
| 4.7 พริกชี้หูสดที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ก่อนและหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $4^{\circ}C$ โดยมี ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40% | 48 |
| 4.8 ปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์ในระยะเวลา 20 วัน | 49 |
| 4.9 ปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ ณ วันที่ 4, 10 และ 20 | 50 |
| 4.10 ปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ และปริมาณไอน้ำที่กักเก็บภายใน บรรจุภัณฑ์เทียบกับปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม | 51 |
| ก.1 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H100M0 | 59 |
| ก.2 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H90M10 | 60 |
| ก.3 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H80M20 | 60 |
| ก.4 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H70M30 | 61 |
| ก.5 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H65M35 | 61 |
| ก.6 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ EMA | 62 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ในท้องตลาดมีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งานและความเหมาะสมของสินค้าที่ต้องการบรรจุ โดยทั่วไปบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการบรรจุสินค้าที่มีขนาดใหญ่หรือมีปริมาณมาก อาจเลือกใช้เป็นตะกร้าพลาสติกเพื่อเสริมความแข็งแรง ความปลอดภัยกับสินค้า และสามารถนำมาใช้ได้อีกในภายหลัง สำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อใช้ในการบรรจุสินค้าที่มีขนาดเล็กหรือมีปริมาณน้อย อาจเลือกใช้เป็นถาดรองสินค้าและมีการห่อพลาสติกหุ้มด้านบนสินค้าหรือใช้เป็นฟิล์มห่อหรือรอบสินค้า นอกจากนี้การใช้ถุงพลาสติกสำหรับการบรรจุสินค้าโดยตรงยังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก

การเลือกชนิดของถุงพลาสติกที่นำมาใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของสินค้าที่นำมาบรรจุ เช่น อาหารแห้ง อาหารกึ่งสำเร็จรูปต้องการถุงพลาสติกที่ขึ้นรูปจากฟิล์มที่สามารถป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซ ไอน้ำ และแสงแดดได้ ในขณะที่อาหารสดประเภทเนื้อสัตว์ต้องการฟิล์มที่สามารถให้ออกซิเจนแพร่ผ่านเข้าออกได้ และผลไม้บางชนิดต้องการฟิล์มที่สามารถให้ก๊าซเอทิลีนแพร่ออกไปได้ ในทำนองเดียวกันผักหลังจากการเก็บเกี่ยวจะมีการหายใจและการคายน้ำอยู่ ซึ่งน้ำที่มาจากการคายน้ำของผักถูกสะสมอยู่ในบรรจุภัณฑ์ หากมีน้ำในปริมาณมากจะนำไปสู่การเน่าเสียของสินค้าเร็วขึ้น

พอลิเอทิลีน (Polyethylene) เป็นพลาสติกที่นิยมอย่างมากในการทำบรรจุภัณฑ์ทั้งในรูปของขวด กล่อง ถัง ถุง ฯลฯ เนื่องจากมีข้อดีคือ ขึ้นรูปได้ง่าย ราคาถูก ไม่เป็นพิษ จึงเหมาะต่อการนำมาทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร แต่โดยทั่วไปแล้วพอลิเอทิลีนมีการซึมผ่านไอน้ำได้ต่ำเนื่องจากมีความเป็นผลึกสูงและไม่มีขั้วทำให้ไม่เหมาะในการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อบรรจุผักสด โดยส่วนใหญ่บรรจุภัณฑ์ที่นำมาบรรจุผักสดในปัจจุบันจึงมีการเจาะรูเพื่อช่วยในการระบายไอน้ำที่ผักคายน้ำออกมา แต่การเจาะรูนั้นทำให้บรรจุภัณฑ์ขาดความสวยงาม ความแข็งแรงลดลง และทำให้จุลินทรีย์ในอากาศสัมผัสกับผักได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะนำมาสู่การเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของบรรจุภัณฑ์โดยไม่ต้องทำการเจาะรูที่บรรจุภัณฑ์

งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาและพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อให้ได้ฟิล์มพอลิเอทิลีนที่มีการซึมผ่านไอน้ำได้ดี โดยนันทวรรณ ม่วงมี [1] ได้ศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มีการปรับปรุงด้วยเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) ผสมกับซีไอโอดีเอ พบว่า EVA สามารถกระจายตัวได้ดีใน LDPE และเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA และซีไอโอดีเอ ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้นเนื่องจากความมีขั้วของซีไอโอดีเอและการที่วัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วของ EVA เพิ่มขึ้น จากงานวิจัยที่ศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันของโคพอลิเมอร์ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE โดยใช้เอทิลีนไวนิล-

แอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl alcohol copolymer, EVOH) และ EVA [2] ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของ LDPE/EVOH เปรียบเทียบกับ LDPE/EVA โดยควบคุมจำนวนหมู่ฟังก์ชันให้ใกล้เคียงกัน พบว่า EVOH และ EVA มีการกระจายตัวในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ดี และฟิล์มทั้งสองชนิดมีการซึมผ่านไอน้ำที่ไม่แตกต่างกันเนื่องจากฟิล์ม LDPE/EVOH เกิดการแข่งขันกันระหว่างสัณฐานวิทยาและความมีขั้ว กล่าวคือ EVOH มีขั้วสูงกว่า EVA เมื่อปริมาณ EVOH เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงจึงเพิ่มขึ้นเนื่องจาก EVOH มีพันธะไฮโดรเจนซึ่งสามารถเกิดผลึกได้ แต่ไม่ทำให้การซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากการซึมผ่านไอน้ำจะผ่านวัฏภาคอสัณฐานเป็นหลัก ดังนั้นพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับ LDPE ต้องเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วและมีความเป็นอสัณฐานสูง

ฐิตินันท์ ศิริจันทน์ [3] ศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีผลต่อการซึมผ่านไอน้ำโดยมีการควบคุมให้ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วให้ใกล้เคียงกันโดยเลือกใช้เอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene methyl acrylate copolymer, EMA) เป็นโคพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมกับ LDPE เนื่องจาก EMA มีอุณหภูมิในการขึ้นรูปและมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า EVA และได้ทำการเปรียบเทียบกับ EVA และ เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene ethyl acrylate copolymer, EEA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วและมีหมู่ข้างเคียง (Side group) ที่มีความเกะกะมากกว่า EMA พบว่า โคพอลิเมอร์ทุกตัว (EMA, EVA และ EEA) สามารถกระจายตัวได้ดีในวัฏภาค LDPE ส่งผลให้ฟิล์มเกิดการซึมผ่านไอน้ำได้ดี และมีการซึมผ่านไอน้ำที่ยิ่งขึ้นเมื่อมีการเติมซีไอไลต์เอ

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ LDPE และ HDPE [4]

| สมบัติ | LDPE | HDPE |
|----------------------------------|-----------|-----------|
| ความเป็นผลึก (%) | 50-60 | >90 |
| ความสามารถในการทนต่อแรงดึง (GPa) | 4.1-16 | 21-38 |
| ยังมอดุลัส (GPa) | 0.10-0.26 | 0.41-1.24 |
| การยืดที่จุดขาด (%) | 515 | 1350 |
| ความแข็งแรงกระแทก (J/m) | ไม่แตก | 27-1068 |

ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ LDPE และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พบว่า HDPE มีสมบัติเชิงกลในด้านความสามารถในการทนต่อแรงดึง และ ยังมอดุลัสดีกว่า LDPE เนื่องจากมีความเป็นผลึกสูงทำให้มีความแข็งแรง เหมาะสำหรับนำไปใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการรับน้ำหนักที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม HDPE มีความเป็นผลึกสูงกว่า LDPE ซึ่งส่งผลให้การซึมผ่านไอน้ำลดลง

งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ EMA เพื่อปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสำหรับบรรจุภัณฑ์ผักสดโดยเอกรเตรียมฟิล์มจากเทคนิคการเป่าฟิล์ม เพื่อให้มีความต่อเนื่องและอัตราการผลิตสูงขึ้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับเอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ที่มีการซึมผ่านของไอน้ำมาก

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ผสม HDPE:EMA ในอัตราส่วน 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 65:35 โดยน้ำหนัก
2. ขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ จากกระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown film process)
3. ศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)
4. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)
5. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)
6. ศึกษาสมบัติความมีขี้ด้วยวิธีการทดสอบมุมสัมผัสด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส
7. ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
8. ศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติการซึมผ่านไอน้ำ
9. ศึกษาทดลองการยืดอายุสำหรับเก็บรักษาพริกชี้หนูสดโดยทำเป็นบรรจุภัณฑ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตฟิล์มที่มีการซึมผ่านไอน้ำได้ดี มาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสดเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้น และนำความรู้ที่ได้ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงฟิล์มพอลิเมอร์อื่นๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว

หลังการเก็บเกี่ยวผลิตผลจะถูกตัดขาดจากแหล่งน้ำที่เคยได้รับจากราก แต่การสูญเสียน้ำเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา เนื่องจากผลิตผลนั้นยังคงมีการหายใจและคายน้ำอยู่เหมือนกับขณะที่อยู่บนต้น การสูญเสียน้ำนอกจากจะทำให้น้ำหนักลดลงไปแล้ว ยังทำให้รูปร่างลักษณะของผลิตผลนั้นเปลี่ยนไปในทางที่แย่ลง ทำให้รสชาติและคุณภาพของผลิตผลนั้นๆ เปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นการป้องกันการสูญเสียน้ำเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่ง การสูญเสียน้ำออกจากพืชนั้นขึ้นกับความชื้นบรรยากาศภายนอก ความชื้นนี้จะแปรผันไปตามสภาพแวดล้อม จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มาของน้ำและอุณหภูมิ ดังนั้นหลังการเก็บเกี่ยวควรมีวิธีการเก็บรักษาที่ดี เพราะการเก็บรักษาเป็นวิธีการสำคัญในการยืดอายุผลิตผลทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยวให้มีอายุการใช้ประโยชน์ได้นานขึ้น โดยที่ยังมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ในผลไม้บางชนิด เช่น แอปเปิ้ล สามารถเก็บเกี่ยวไว้เพื่อการจำหน่ายในท้องตลาดได้ตลอดทั้งปี นอกจากนี้การเก็บรักษายังมีประโยชน์ในเรื่องของการชะลอไม่ให้ผลิตผลออกสู่ตลาดมากเกินไป ทำให้ราคาผลิตผลไม่ตกต่ำ รวมทั้งสามารถเก็บรักษาไว้เพื่อจำหน่ายในช่วงตลาดขาดแคลน ทำให้ขายได้ราคาดีอีกด้วย

ในการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรนั้นจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานเพียงใดเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้ [5]

- ความชื้นในบรรยากาศ ความชื้นหรือความดันไอน้ำในบรรยากาศปกติจะมีอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าความชื้นอิ่มตัว นั่นคือความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 100% จึงมีโอกาสที่บรรยากาศจะรับน้ำได้อีก ส่วนผักและผลไม้ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่า 70% และส่วนใหญ่มีน้ำอยู่ถึง 90% ความดันไอน้ำในผลไม้มีค่าค่อนข้างสูงเพราะผลไม้เปรียบเสมือนภาชนะปิด ไอน้ำรอบๆ เซลล์จะอยู่สมดุลกับน้ำภายในเซลล์ ซึ่งอาจถือได้ว่าความดันไอน้ำภายในผลิตผลจะมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว เพราะฉะนั้นจึงมีการสูญเสียน้ำออกจากผลิตผลอยู่ตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับว่าบรรยากาศภายนอกมีความชื้นมากน้อยเพียงใด ในกรณีที่ความชื้นของบรรยากาศรอบๆ อิ่มตัวด้วยน้ำหรือมีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100% น้ำยังมีโอกาสสูญเสียน้ำจากผลิตผลให้กับบรรยากาศได้ เนื่องจากผลิตผลเป็นสิ่งที่ชีวิตมีการหายใจทำให้มีพลังงานความร้อนออกสู่บรรยากาศรอบๆ ทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นและทำให้อากาศรับน้ำได้มากขึ้นกว่าเดิม

- อุณหภูมิ มีความสัมพันธ์ที่ใกล้ชิดกับความชื้นและการสูญเสียน้ำ ทั้งนี้เพราะสสารทุกอย่างมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลาโดยเฉพาะของเหลวและก๊าซ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนไหวของโมเลกุลจะมีมาก โอกาสของน้ำที่จะหลุดออกจากผักและผลไม้จึงมีค่าสูงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามความดันไอน้ำของอากาศที่อยู่รอบๆ ไม่ได้สูงตามไปด้วย เพราะมีปริมาณโมเลกุลของน้ำอยู่

เอกลีกรีนเซ็นเตอร์ หรือที่รู้จักกันในชื่อ เอกลีกรีนเซ็นเตอร์ เป็นศูนย์วิจัยและพัฒนาสินค้าเกษตรอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงและปลอดภัยต่อผู้บริโภค โดยมีการนำเทคโนโลยีการเกษตรอินทรีย์มาใช้ในการผลิตสินค้าเกษตรอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงและปลอดภัยต่อผู้บริโภค โดยมีการนำเทคโนโลยีการเกษตรอินทรีย์มาใช้ในการผลิตสินค้าเกษตรอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงและปลอดภัยต่อผู้บริโภค

เท่าเดิม แต่ไม่ได้ถูกจำกัดปริมาณเหมือนในผลไม้ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำระหว่างภายในผลิตภัณฑ์กับภายนอกผลิตภัณฑ์จึงเพิ่มสูงขึ้น โอกาสที่ไอน้ำจะออกจากผลิตภัณฑ์สู่อากาศจึงมีมากขึ้นจนกระทั่งอากาศรอบๆ อิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงไอน้ำจะควบแน่นเป็นหยดน้ำอยู่ตามภาชนะบรรจุหรือผนังห้องเก็บรักษา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีกอากาศจะรับไอน้ำจากผลิตภัณฑ์ได้อีกเรื่อยๆ ทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียน้ำไปมาก สภาพในที่เก็บเกี่ยวรักษาจะขึ้นและทำให้ผลิตภัณฑ์เน่าเสียได้ง่าย

- การถ่ายเทอากาศ ในระหว่างการเก็บรักษาจำเป็นต้องมีการระบายถ่ายเทอากาศเนื่องจากสภาพบรรยากาศปกติประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ซึ่งชนิดที่มีความสำคัญและมีความจำเป็นต่อการทำงานของผลิตภัณฑ์คือ ก๊าซออกซิเจน (O_2) ฉะนั้นสภาพของการเก็บรักษาที่ดีจะต้องมีการถ่ายเทของอากาศที่ดี

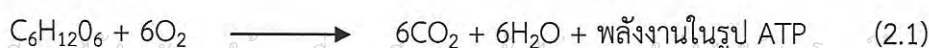
2.1.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของพืช

ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังมีชีวิตอยู่ กระบวนการต่างๆ ทั้งทางกายภาพและชีวเคมียังคงดำเนินอยู่เช่นเดียวกับที่ยังไม่ได้เก็บเกี่ยว ดังนั้นผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังคงหายใจต่อไป โดยดูดก๊าซออกซิเจน (O_2) เข้าไปและคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) กับความร้อนออกมา มีการคายน้ำและสูญเสียน้ำหนัก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในพืชหลังการเก็บเกี่ยวคือ

2.1.1.1 การหายใจ [6]

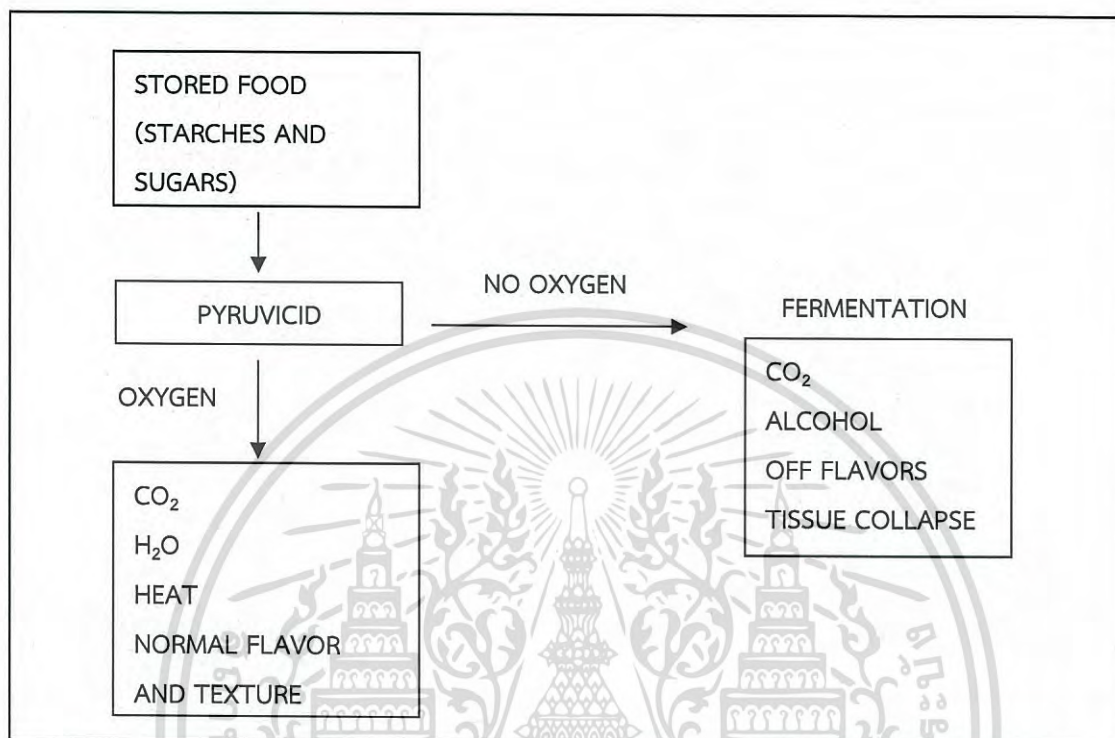
ผลิตภัณฑ์ทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวจะมีการหายใจอย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลาที่ยังมีชีวิตอยู่เนื่องจากสิ่งมีชีวิตต้องการพลังงานในการดำเนินปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลง ที่สำคัญพลังงานที่ได้มานั้นมาจากการหายใจ ซึ่งอัตราการหายใจของผักและผลไม้จะถูกเก็บเกี่ยวในระยะเวลาที่เหมาะสมกับความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งผักและผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูงหลังการเก็บเกี่ยวมักเสียเร็วกว่าผักและผลไม้ที่มีอัตราการหายใจต่ำ ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีแล้ว ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพและอายุการเก็บรักษา จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงการปฏิบัติต่อผลิตภัณฑ์ภายหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความสมดุลในการรักษาสภาพหรือลดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีให้น้อยที่สุดที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพการเก็บรักษาได้นานที่สุด ผลิตภัณฑ์ที่ยังมีชีวิตอยู่มีการหายใจตลอดเวลา ซึ่งการหายใจของผลิตภัณฑ์นั้นมี 3 ขั้นตอน ดังนี้

- การย่อยคาร์โบไฮเดรตพวกที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายๆ โมเลกุลให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว
- ขั้นตอนการเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นให้เป็นกรดไพรูวิก
- ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไพรูวิกและกรดอินทรีย์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นให้กลายเป็นก๊าซ CO_2 น้ำ และพลังงาน ซึ่งเกิดในการหายใจของผลิตภัณฑ์หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ สรุปได้เป็นสมการอย่างง่ายคือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่การหายใจในสภาพที่มีก๊าซ O_2 สมบูรณ์ได้ปริมาณ ATP (Adenosine triphosphate) ต่อโมเลกุลน้ำตาลมากกว่าการหายใจในสภาพที่มีก๊าซ O_2 น้อยหรือไม่มีก๊าซ O_2



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้ก๊าซ O_2 และไม่ใช่ก๊าซ O_2 [6]

รูปแบบการหายใจ (Respiratory pattern) [7] แม้ว่าผลไม้ชนิดต่างๆ จะมีวิธีและกระบวนการหายใจที่เหมือนกันก็ตาม แต่อัตราและรูปแบบของการหายใจของผลไม้หลังเก็บเกี่ยวมีความแตกต่างกัน ผลไม้บางชนิดอาจถูกเก็บเกี่ยวมาตั้งแต่ยังไม่สุก และเมื่อเก็บเกี่ยวมาแล้วสามารถทำให้ผลไม้สุกหรือมีพัฒนาการขั้นต่อไปที่ปกติได้ เช่น มะม่วง กัลย ทุเรียน เป็นต้น แต่ผลไม้บางอย่าง เช่น ส้ม ลิ้นจี่ ลำไย จำเป็นต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลไม้เหล่านั้นมีการสุกตั้งแต่ออยู่บนต้น หากเก็บเกี่ยวมาก่อน ผลไม้เหล่านั้นอาจมีพัฒนาการที่ผิดปกติไปจากลักษณะการสุกของผลไม้ซึ่งมีความเกี่ยวพันอย่างใกล้ชิดกับการหายใจ ทำให้สามารถแบ่งผลไม้ตามรูปแบบของการหายใจ ออกได้เป็น 2 กลุ่ม

1. ผลไม้ที่มีรูปแบบการหายใจแบบ Climacteric

ผลไม้พวก Climacteric เช่น กัลย, มะละกอ, ฝรั่ง, มะเขือเทศ, ละมุด, แดงโม, มะม่วง, แอปเปิ้ล และบลูเบอร์รี่ (Blueberry) เป็นต้น ซึ่งมักเป็นผลไม้ที่มีการเก็บสะสมอาหารในรูปของแป้งหรือไขมัน และผลไม้เหล่านี้สามารถเก็บเกี่ยวมาแล้วนำมาทิ้งไว้ให้สุกได้เนื่องจากในระหว่างการสุก ผลของการหายใจจะเกิดการสร้างก๊าซเอทิลีน (Ethylene gas) ขึ้นภายในเนื้อเยื่อ ก๊าซเอทิลีนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเนื้อเยื่อที่ถูกสร้างขึ้นจะไปกระตุ้นให้ผลไม้มีการสุก ผลไม้เหล่านี้สามารถบ่มให้สุกได้โดยใช้ก๊าซเอทิลีนจากภายนอก เมื่อผลไม้พวก Climacteric ได้รับการกระตุ้นโดยใช้ก๊าซเอทิลีนในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมจะสามารถเพิ่มอัตราหรือปริมาณการสร้างเอทิลีนภายในเนื้อเยื่อให้สูงขึ้นไปอีก และการสร้างก๊าซเอทิลีนภายในจะดำเนินต่อไปได้เอง ซึ่งเรียกว่า ระบบการเร่งปฏิกิริยาแบบอัตโนมัติ (Autocatalytic system)

ตารางที่ 2.1 อัตราการหายใจของผลไม้แต่ละชนิดประเภท Climacteric [8]

| ผลไม้ | พันธุ์ | อุณหภูมิ (°C) | อัตราการหายใจ (mL/CO ₂ /kg/hr) | |
|-----------|------------------|---------------|---|--------|
| | | | ต่ำสุด | สูงสุด |
| แอปเปิ้ล | Barnley Seedling | 23 | 10 | 16 |
| อโวคาโด | Fuerte | 20 | 35 | 155 |
| กล้วย | Grous michel | 20 | 20 | 60 |
| มะเดื่อ | Mission | 20 | 22 | 40 |
| มะม่วง | Kent | 20 | 15 | 22 |
| ท้อ | Alberta | 20 | 25 | 35 |
| สาลี่ | Bartlett | 20 | 8 | 23 |
| มะเขือเทศ | Grand rapids | 18 | 8 | 20 |

2. ผลไม้ที่มีรูปแบบการหายใจแบบ Non climacteric

ผลไม้พวกที่มีรูปแบบการหายใจแบบ Non climacteric เช่น ส้ม, พริก, ทับทิม, สับปะรด, แตงกวา, องุ่น, มะนาว, เกรฟฟรุต, ราสเบอร์รี่ (Raspberry) และแบลคเบอร์รี่ (Blackberry) เป็นต้น ซึ่งเมื่อถูกเก็บเกี่ยวมาแล้วจะมีอัตราการหายใจค่อนข้างต่ำและคงที่ตั้งแต่เริ่มเข้าสู่ระยะการสุกไปจนกระทั่งผลไม้เน่าและตายไป ผลไม้เหล่านี้จะมีการสะสมอาหารในรูปของน้ำตาลหรือกรดอินทรีย์ ผลไม้พวกนี้ไม่สามารถนำมาทิ้งไว้ให้สุกได้เหมือนกับผลไม้พวก Climacteric ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวเมื่อสุกแล้วเท่านั้น ผลไม้พวก Non climacteric อาจมีการสร้างก๊าซเอทิลีนภายในเนื้อเยื่อในอัตราหรือปริมาณที่ต่ำ ทำให้กระบวนการสุกเกิดขึ้นอย่างช้าๆ นอกจากนี้การใช้ก๊าซเอทิลีนจากภายนอกกระตุ้นให้มีการสุก ผลไม้เหล่านี้จะตอบสนองโดยมีอัตราการหายใจสูงขึ้นได้ตลอดระยะเวลาที่มีการใช้ก๊าซเอทิลีน เมื่อหยุดการใช้ก๊าซเอทิลีนอัตราการหายใจของพวก Non climacteric จะกลับเข้าสู่ระดับเดิมอีก โดยไม่มีการเพิ่มอัตราการหายใจให้สูงขึ้นเหมือนที่เกิดกับพวก Climacteric

ตารางที่ 2.2 อัตราการหายใจของผลไม้แต่ละชนิดประเภท Non climacteric [8]

| ผลไม้ | พันธุ์ | อุณหภูมิ (°C) | อัตราการหายใจ (mL/CO ₂ /kg/hr) Non climacteric ตลอดเวลาการแก่และการสุก |
|---------|----------|---------------|--|
| องุ่น | Vi 5061 | 20 | 15 |
| มะนาว | Eureka | 20 | 5 |
| ส้ม | Valencia | 21 | 13 |
| สับปะรด | Cayne | 15 | 21 |

2.1.1.2 การคายน้ำ [9-10]

ในกระบวนการคายน้ำจะมีการระเหยน้ำออกจากใบและช่องเปิดที่มีอยู่ ซึ่งการสูญเสียไอน้ำภายในผักและผลไม้เกิดจากการแพร่ของไอน้ำซึ่งมีอยู่ในเซลล์พืชมากกว่าไอน้ำในบรรยากาศ การคายน้ำจะผ่านทางปากใบเป็นส่วนมาก ระหว่างการเก็บรักษาผักและผลไม้สดจะมีการคายน้ำตลอดเวลาทำให้น้ำหนักลดลง เหี่ยวเฉา ความกรอบลดลง คุณภาพของเนื้อสัมผัส กลิ่น และรสชาติลดลง การสูญเสียน้ำหนักจากการคายน้ำนี้เมื่อมีค่าประมาณร้อยละ 3-10 ของน้ำหนักจะทำให้คุณภาพของผักและผลไม้สดไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยปัจจัยที่มีผลต่อการคายน้ำของผักและผลไม้สดมีดังนี้

- ปริมาณของออกซิเจนในอากาศ ปกติจะมีอยู่ร้อยละ 20-21 ซึ่งมากเกินไปสำหรับการหายใจ การเพิ่มปริมาณออกซิเจนจะมีผลต่อการหายใจน้อยมาก ในทางกลับกันการลดปริมาณออกซิเจนลงจะมีผลในการลดอัตราการหายใจด้วย

- อุณหภูมิ มีผลต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ในผักและผลไม้ โดยอุณหภูมิช่วงที่เหมาะสมในการหายใจอยู่ระหว่าง 25-35°C ซึ่งเมื่อผักและผลไม้ถูกตัดออกมาจากต้นจะขาดการส่งน้ำ ปากใบจะปิดแต่การหายใจยังคงมีอยู่ อุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้นเนื่องจากไม่มีการช่วยลดความร้อนซึ่งความร้อนมาจากสภาวะแวดล้อม และความร้อนที่เกิดจากการหายใจของพืชจะเร่งอัตราการคายน้ำของพืช ดังนั้นควรเก็บผักและผลไม้สดที่อุณหภูมิต่ำ จากการคายน้ำพบว่าหากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C อัตราการหายใจจะเพิ่มขึ้น 2-4 เท่า ดังนั้นส่งผลให้มีไอน้ำเพิ่มขึ้นด้วย

- รอยขีด ซึ่งเกิดจากแรงกระทำต่างๆ เช่น แรงกด แรงกระแทก หรือเกิดจากการตัดหรือการหั่น จะเร่งอัตราการคายน้ำของพืช

- สัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของผักและผลไม้สด อัตราการคายน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น ดังนั้นผักใบทั่วไปจึงเหี่ยวเฉาได้ง่ายกว่าผลไม้และพืช

- สารเคลือบผิว ผักและผลไม้สดหลายชนิดมีไขเป็นสารเคลือบผิวตามธรรมชาติช่วยลดการคายน้ำทำให้เก็บรักษาได้นานขึ้น เช่น มะนาว องุ่น แอปเปิ้ล และส้ม เป็นต้น อย่างไรก็ตามไขธรรมชาติเหล่านี้มักถูกทำลายไปบ้างระหว่างเก็บเกี่ยวและเก็บรักษา พืชบางชนิดมีไขน้อยมากทำให้

อัตราการคายน้ำของพืชยังสูงอยู่ จึงมีการใช้สารเคลือบหรือการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกหรือฟิล์มธรรมชาติกับพืชที่ต้องเก็บไว้นานๆ

- ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) ของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการสูญเสียน้ำของพืช อัตราการคายน้ำของพืชจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันไอน้ำในอากาศมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำสมดุลของพืช โดยปกติผักและผลไม้มีปริมาณน้ำในเซลล์ร้อยละ 80-95 หากความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์มากการคายน้ำจะลดลง โดยทั่วไปควรเก็บผักและผลไม้สดในที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงๆ และที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามต้องระวังการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ง่าย ผักและผลไม้เน่าเสียเร็วขึ้น

2.1.1.3 การสุก [8]

การสุกเป็นการพัฒนาขั้นสุดท้ายของผลไม้ก่อนเข้าสู่ระยะร่วงโรย การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับไม่ได้ และเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนหลายขั้นตอน การเปลี่ยนแปลงของผลไม้สุกที่อาจพบได้คือ เมล็ดแก่เต็มที่ สีเปลี่ยนแปลง ผลหลุดออกจากขั้ว อัตราการหายใจเปลี่ยนแปลง เนื้อนิ่มลง มีการสร้างสารให้กลิ่นรส

2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้

ปัจจัยหนึ่งที่ช่วยทำให้ก๊าซต่างๆ ที่ล้อมรอบผลิตภัณฑ์เป็นไปตามที่ต้องการตลอดเวลาที่เก็บรักษาผลิตภัณฑ์คือ ภาชนะบรรจุ สมบัติที่สำคัญของวัสดุบรรจุหรือภาชนะบรรจุที่ต้องพิจารณา มีดังนี้

2.2.1 การซึมผ่านของก๊าซ

การซึมผ่าน (Permeation) หมายถึง กระบวนการแพร่โมเลกุลของก๊าซ ไอน้ำ หรือของเหลวผ่านเมมเบรน (Membrane) ทั้งนี้ไม่รวมการแพร่ผ่านรูรั่วหรือรอยปริแตกของเมมเบรนนั้นๆ โมเลกุลที่แพร่ผ่านเมมเบรนนี้ เรียกว่า Permeant และค่าที่แสดงอัตราการแพร่ผ่านเมมเบรน หรืออัตราการซึมผ่านเมมเบรนนี้ เรียกว่า Permeability [9]

การกำหนดค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซ (Gas permeability) เพื่อเลือกชนิดของวัสดุที่นำมาใช้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ ชนิดของผลิตภัณฑ์ อายุการเก็บรักษา และสภาวะการเก็บรักษา โดยทั่วไปเมื่อต้องการใช้วัสดุที่ป้องกันก๊าซได้ดีมาก ควรเลือกวัสดุที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่เกิน $2 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ ส่วนวัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซดีพอควรมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนประมาณ $20-30 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ สำหรับผักและผลไม้สดต้องใช้วัสดุที่ยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ดี โดยทั่วไปค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าตั้งแต่ $2,000 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [11]

| ชนิดของพลาสติก | ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (cc/25 μ m/m ² .day ที่ 23°C, 50%RH) |
|--------------------------------------|--|
| พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) | 47-94 |
| พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) | 80-9,000 |
| พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) | 2,100-2,900 |
| พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) | 7,100-7,800 |
| พอลิพรอพิลีน (PP) | 2,400-3,800 |

2.2.2 สมการการแพร่และการดูดซับ [9]

อัตราการซึมผ่านเมมเบรนของโมเลกุลต่างๆ ที่สถานะคงตัว หรือ Permeability coefficient หรือนิยมเรียกว่า Permeability เขียนด้วยสัญลักษณ์ P_m (บางครั้งใช้ P) P_m นี้เป็นผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient หรือ D) กับค่าสัมประสิทธิ์การละลาย (Solubility coefficient หรือ S) ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$P_m = D \times S \quad (2.2)$$

- D เป็นค่าที่แสดงอัตราการแพร่ผ่านของโมเลกุลผ่านเมมเบรน จากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า และ D ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของโมเลกุลที่แพร่
- S เป็นค่าที่แสดงปริมาณของโมเลกุลของสารที่ละลายในเมมเบรน ที่สภาวะสมดุล

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านของฟิล์มพลาสติก [9]

ก. โครงสร้างทางเคมีของพลาสติก

โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกมีผลต่อทั้งค่า D และ ค่า S นั่นคือผลโดยตรงต่อค่า P_m ของพลาสติกนั้นๆ ตารางที่ 2.4 แสดงผลต่อโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกต่อค่าการซึมผ่านของออกซิเจน โดย X เป็นโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของพลาสติก ค่าอัตราการซึมผ่านนี้เป็นค่าสัมพัทธ์ที่เปรียบเทียบกับค่าอัตราการซึมผ่านของพลาสติกที่มี X เป็นหมู่ (-OH)

ข. สัณฐานวิทยาของพลาสติก (Morphology of plastic)

สัณฐานวิทยาของพลาสติก หมายถึง โครงสร้างทางกายภาพของพลาสติกที่มีทั้งบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous region) และบริเวณที่เป็นผลึก (Crystalline region) อยู่ด้วยกัน โดยการเกิดโครงสร้างลักษณะนี้มาจากการจัดระเบียบโมเลกุล ความสำคัญของสัณฐานวิทยาต่อการซึมผ่านพลาสติก แบ่งออกเป็น 2 ประเด็นสำคัญคือ

1. สมมาตรและสภาพมีขั้วของมอนอเมอร์ มีผลโดยตรงต่อการเกิดโครงสร้างผลึก พลาสติกที่มีสมมาตรจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าพลาสติกที่ไม่มีสมมาตรหรือมีสมมาตรน้อยกว่า นั่นคือ

ไม่วาร์ณิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการซึมผ่านของก๊าซจะต่ำกว่าด้วย ตัวอย่าง PE มีโครงสร้างสมมาตรมากกว่ายาง ค่าอัตราการซึมผ่านของ PE จึงต่ำกว่ายาง

2. การจัดระเบียบสายโซ่โมเลกุล ทำให้เกิดโครงสร้างแบบผลึกมากขึ้น พลาสติกที่มีร้อยละความเป็นผลึก (Crystallinity) เพิ่มขึ้น มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายลดลง นั่นคือค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซลดลงด้วย เนื่องจากโครงสร้างผลึกขัดขวางเส้นทางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่แพร่เข้ามา ทำให้โมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่เป็นเส้นทางวกวน (Tortuous path) เป็นผลให้การแพร่ออกมาได้ยากและใช้เวลามากขึ้น

ตารางที่ 2.4 ผลของโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน [9]

| Structure | X | Relative Pm (O ₂) |
|---|--------------------------------|-------------------------------|
| $\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{X} \end{array} \right]_n$ | -OH | 1 ^a |
| | -CN | 4 |
| | -Cl | 800 |
| | -F | 1,500 |
| | -COOCH ₃ | 1,700 |
| | -CH ₃ | 15,000 |
| | -C ₆ H ₅ | 42,000 |
| | -H | 48,000 |

^aPm (O₂) เมื่อ x หมายถึง -OH มีค่าเท่ากับ 0.038 cc.mm/m².atm.day ที่ 23°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 0%

ตารางที่ 2.5 ผลของการจัดระเบียบโมเลกุลต่อค่า Pm (O₂) ของพลาสติก [9]

| Polymer | Degree of orientation | Pm (O ₂) (cc.mm/m ² .atm.day ที่ 23°C) |
|---------|-----------------------|--|
| PP | 0 | 57 |
| | 300% | 30 |
| PS | 0 | 160 |
| | 300% | 114 |
| PET | 0 | 3.8 |
| | 500% | 1.9 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง พิล์ม PET ที่ผ่านการจัดระเบียบของสายโซ่โมเลกุลที่ 90°C และ 115°C มีความเป็นผลึกร้อยละ 22 และ 31 ตามลำดับ พบว่าค่าอัตราการซึมผ่านของฟิล์ม PET ตัวอย่างแรกมีค่าเป็น 4 เท่าของตัวอย่างที่สอง ผลของการจัดระเบียบสายโซ่โมเลกุลต่อค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซแสดงได้ในตารางที่ 2.5

3. ความหนาแน่น (Density) โดยทั่วไปค่าความหนาแน่นของพลาสติกนั้น ขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน กระบวนการแปรรูป โดยเฉพาะขณะทำให้เย็น และกระบวนการจัดระเบียบโมเลกุล อัตราการซึมผ่านของก๊าซลดลงเมื่อค่าความหนาแน่นของพลาสติกเพิ่มขึ้น และค่าความหนาแน่นของพลาสติกจะแปรผันตรงกับร้อยละความเป็นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลของร้อยละความเป็นผลึกต่อค่า $P_m (O_2)$ ของพลาสติก [9]

| Polymer | % Crystallinity | $P_m (O_2)$ (cc-mm/m ² .atm.day ที่ 23°C) |
|---------------------|-----------------|---|
| LDPE | 50 | 182 |
| HDPE | 80 | 42 |
| Nylon 66 (Soaked) | 20 | 3 |
| Nylon 66 (Annealed) | 40 | 0.6 |

ค. วัตถุเติมแต่งในพลาสติก (Plastic additive)

1. พลาสติกไซเซออร์ (Plasticizer) มอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่เติมลงไปในพลาสติก โดยทั่วไปจะทำได้ให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซของพลาสติกนั้นสูงขึ้น แต่อาจมีข้อยกเว้นสำหรับพลาสติกไซเซออร์บางประเภท เช่น การเติมยางใน PVC อาจทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า หรือการเติมพลาสติกไซเซออร์ใน PVC อาจทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้นถึง 20 เท่า กรณีฟิล์มพลาสติกที่ไวต่อความชื้นนิยมเรียก Hydrophilic plastic เช่น nylon และ Ethylene vinyl alcohol (EVOH) เมื่ออยู่ในที่มีความชื้นสูง จะดูดซับน้ำเข้าไปในพลาสติกได้ น้ำส่วนนี้ทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไซเซออร์ ทำให้โมเลกุลของพลาสติกเคลื่อนที่ได้มากขึ้น

2. สารตัวเติม (Filler) โดยเฉพาะสารอนินทรีย์ที่ใช้เติมในพลาสติกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความเสถียรต่อรูปร่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต โทเทเนียมไดออกไซด์ และทัลคัม มีผลให้อัตราการซึมผ่านของพลาสติกนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นกับปริมาณที่เติม ขนาด และรูปร่างของสาร แต่สารตัวเติมส่วนใหญ่ทำให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น

3. สารคู่ควบ (Coupling agent) ใช้เพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างพลาสติกกับสารตัวเติม เช่น ทิทาเนต (Titanate) และซิลเลน (Silane) จะทำให้การซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำลดลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง. สมบัติของสารแพร่

ขนาด รูปร่าง และสภาพผิวของสารแพร่มีผลต่อการซึมผ่านฟิล์มพลาสติก ซึ่งต้องพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะเนื่องจากมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทั่วไปสารแพร่ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กแพร่ได้เร็วกว่าสารแพร่ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เมื่อพิจารณาตารางที่ 2.7 พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าทั้งออกซิเจน และไนโตรเจน แต่ค่าอัตราการซึมผ่านกลับสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากขนาดโมเลกุลมีผลต่อการแพร่แต่ไม่มีผลกับการละลาย จากตารางที่ 2.8 พบว่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าก๊าซอื่นมากทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านสูงกว่าก๊าซอื่นไปด้วย

ตารางที่ 2.7 ขนาดโมเลกุลและสัดส่วนของค่าอัตราซึมผ่านของก๊าซไนโตรเจน ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ [9]

| Gas | Molecular diameter, Å | Pm (X) : Pm (O ₂) |
|-----------------|-----------------------|-------------------------------|
| N ₂ | 3.0 | 0.25 |
| O ₂ | 3.1 | 1 |
| CO ₂ | 3.4 | 6 |

ตารางที่ 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) การละลาย (S) และค่าอัตราการซึมผ่าน (Pm) ของคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไนโตรเจน ของ LDPE ที่ 25°C [9]

| Gas | D × 10 ⁶ cm ² /S | S × 10 ² ml (STP)/ml.atm | Pm × 10 ¹⁰ ml (STP)/ml.atm |
|-----------------|--|-------------------------------------|---------------------------------------|
| CO ₂ | 0.37 | 25.8 | 12.6 |
| O ₂ | 0.46 | 4.78 | 2.88 |
| N ₂ | 0.32 | 2.31 | 1.969 |

สารแพร่ที่มีโมเลกุลเป็นเส้นตรงแพร่ได้ดีกว่าโมเลกุลเป็นวงหรือเป็นกิ่งก้าน และสารที่มีขั้วแพร่ผ่านแผ่นพลาสติกที่มีขั้วได้ดี โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแพร่ผ่านพลาสติกที่ไม่มีขั้วได้ดีกว่าพลาสติกที่มีขั้ว

จ. อุณหภูมิ

ค่าการซึมผ่าน การแพร่ และการละลายจะขึ้นตรงกับอุณหภูมิแบบเอกซ์โพเนนเชียลตาม

สมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius' equation) ดังนี้คือ

$$Pm = Pm_0 \exp\left(-\frac{E_p}{RT}\right) \quad (2.3)$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = S_0 \exp \left(- \frac{E_s}{RT} \right) \quad (2.5)$$

| | | |
|------------------|---------|---|
| Pm_0, D_0, S_0 | หมายถึง | ค่าคงที่ของการซึมผ่าน การแพร่ และการละลาย ตามลำดับ |
| E_p, E_D, E_s | หมายถึง | พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ของการซึมผ่าน การแพร่ และการละลาย ตามลำดับ |
| R | หมายถึง | ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas constant) |
| T | หมายถึง | อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature) |

การใช้สมการของอาร์เรเนียสอธิบายผลของอุณหภูมิต่อการซึมผ่านมีข้อจำกัดเกี่ยวกับช่วงค่าอุณหภูมิ โดยใช้สำหรับช่วงอุณหภูมิที่ไม่กว้างและไม่อยู่ในช่วงเดียวกับค่า T_g ของพลาสติกนั้น เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า T_g พลาสติกอยู่ในสถานะที่เรียกว่า คล้ายยาง (Rubbery state) โมเลกุลจะเคลื่อนไหวได้มาก ทำให้การแพร่การซึมผ่านของก๊าซเกิดได้ง่าย ค่า E_p และ E_D จึงต่ำ ทำให้ค่า Pm มีค่าสูง (สมการที่ 2.3) ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g ของพลาสติก จะอยู่ในสถานะที่เรียกว่า คล้ายแก้ว (Glassy state) การเคลื่อนไหวของโมเลกุลพลาสติกเกิดได้ยากขึ้น และมีค่า E_p และ E_D สูง ทำให้มีค่า Pm ลดลง

ฉ. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

พลาสติกบางชนิดสามารถดูดซับความชื้นได้ง่าย เช่น EVOH และ Nylon ความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้โมเลกุลของพลาสติกมีความยืดหยุ่นและเคลื่อนไหวได้มากขึ้น การซึมผ่านของก๊าซจึงสูงขึ้น ซึ่งนำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไฮเซออร์ ทำให้ E_p ลดลง ค่า Pm จึงสูงขึ้น พลาสติกพวกนี้เมื่ออยู่ในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูง การซึมผ่านของก๊าซจะสูงขึ้น สำหรับพลาสติกที่ไม่ดูดน้ำหรือความชื้น เรียก Hydrophobic plastic เช่น LDPE, PP และพอลิไวนิลดีนคลอไรด์ (PVDC) พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศไม่มีผลต่อการซึมผ่านของก๊าซ

2.2.4 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

การเลือกวัสดุที่นำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์จากค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ต้องระมัดระวังปัญหาที่เกิดจากหยดน้ำภายในภาชนะบรรจุภัณฑ์ และปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันไอน้ำได้ดีจะช่วยลดปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่มักเกิดปัญหาหยดน้ำในภาชนะ และในทางกลับกันวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้ไอน้ำผ่านได้มักเกิดปัญหาผลิตภัณฑ์แห้งเพราะสูญเสียความชื้น การแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยการเติมสารป้องกันการเกิดหยดน้ำ (Antifogging agent) ในฟิล์มพลาสติกหรือการเจาะรูเล็กๆ เพื่อช่วยระบายไอน้ำบางส่วนออกจากภาชนะ

2.2.4.1 การตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ [9]

การตรวจวัดการซึมผ่าน (Permeation measurement) การแพร่ และการละลายของสารสำหรับพลาสติก อาศัยหลักการตรวจวัดการถ่ายเทมวลของสารนั้นผ่านพลาสติก ซึ่งอาจใช้การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารอื่นที่ทำปฏิกิริยากับสารที่ถ่ายเทผ่านพลาสติกมา

การแสดงค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeation) มีดังนี้

- Water vapor transmission rate หรือ WVTR

$$\text{WVTR} = \frac{\text{weight of water vapor}}{\text{area} \times \text{time}} \quad (2.6)$$

$$\text{WVTR} = \frac{Q}{A \times T} \quad (2.7)$$

WVTR นิยมแสดงเป็นหน่วย $\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$

- Water vapor permeability หรือ WVP

$$\text{WVP} = \text{WVTR} \times \frac{1}{\Delta p} \quad (2.8)$$

$$\text{WVP} = \frac{Q}{A \times T} \times \frac{1}{\Delta p} \quad (2.9)$$

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

- Permeance หรือ WVP/l

$$\text{Permeance} = \frac{\text{WVTR}}{\Delta p} \quad (2.10)$$

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

- Q หมายถึง น้ำหนักของไอน้ำ
- A หมายถึง พื้นที่ของฟิล์มที่มีการซึมผ่าน
- l หมายถึง ความหนาของฟิล์มพลาสติก
- Δp หมายถึง ผลต่างของความดันก๊าซทดสอบกับความดันอีกด้านหนึ่งของแผ่นพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [11]

| ชนิดของพลาสติก | ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ($g/25\mu m^2 \cdot day$ ที่ $38^\circ C$, $90\%RH$) |
|----------------|---|
| PET | 16-20 |
| PVC | 80-500 |
| HDPE | 4.7 |
| LDPE | 16-24 |
| PP | 11 |

2.2.5 การใช้ฟิล์มพลาสติกในการเก็บรักษา

พลาสติกเป็นวัสดุหนึ่งที่มีการใช้ในการเก็บรักษาผลิตผลหลายชนิด สามารถทำให้เกิดสภาวะบรรยากาศดัดแปลง (Modified atmosphere) คือมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น และมีความเข้มข้นของออกซิเจนลดลงโดยธรรมชาติ [12] เพราะสามารถควบคุมการถ่ายเทอากาศรอบๆ ผลิตผลกับอากาศภายนอก และยังคงความแข็งแรง [13-14] การเลือกใช้ฟิล์มพลาสติกที่ยอมให้อากาศแพร่ผ่านได้จะช่วยให้สามารถควบคุมการสูญเสียน้ำ รักษาลักษณะ และลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของรสชาติของผลิตผล [15-16]

ฟิล์มพลาสติกที่ใช้ในการบรรจุผักและผลไม้หลายชนิด แต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน อัตราการสูญเสียของผลิตผลจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ Permeability ของฟิล์มนั้นๆ [14] การเลือกใช้ควรคำนึงถึงการยอมให้อากาศและไอน้ำผ่าน ความใส ความหนาของฟิล์ม [13] รวมทั้งความชื้น ระยะเวลาที่เก็บรักษา ชนิด และน้ำหนักของผลิตผลด้วย [6] เพราะชนิดของฟิล์มมีผลต่ออาการผิวดกของผลิตผล และอาจทำให้เกิดความเสียหายในการเก็บรักษาได้ [16-17] โดยปกติฟิล์มยอมให้คาร์บอนไดออกไซด์ผ่านเข้าออกได้ดีกว่าออกซิเจน และทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในสูงขึ้นเกือบถึง 100% [6]

ชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้สำหรับเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ขึ้นกับการนำไปใช้งานที่ต่างๆ กันที่นิยมใช้ [18] เช่น

- พอลิเอทิลีน (PE) เป็นพลาสติกฟิล์มที่ยอมให้ก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านได้ ป้องกันการผ่านของไอน้ำได้

- พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ฟิล์มประเภทนี้สามารถให้ไอน้ำ และก๊าซผ่านไปได้ นิยมใช้กันมากในการปิดด้านบนของถาดโฟมที่ใส่ผลิตผล แต่ฟิล์มชนิดนี้ไม่เหมาะในการทำถุง

- พอลิพรอพิลีน (PP) มีลักษณะโปร่งใสกว่าพวก LDPE สามารถทำเป็นถุง และใช้ทำถาดที่สามารใช้ความร้อนปิดผนึกได้

- เซลโลเฟน (Cellophane) มีใช้กันอยู่หลายชนิด อาจใช้ปิดด้านบนของถาดโฟม ทำเป็นถุง

เอมีลักษณะโปร่งแสง ไม่สามารถทำให้ติดกันด้วยความร้อน ยอมให้ความชื้นผ่านได้ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Rubber hydrochloride หรือ Pliofilm เป็นฟิล์มที่มีความแข็งแรงมาก สามารถป้องกันการผ่านของไอน้ำได้ดีใช้เป็นถุงบรรจุผักและผลไม้ที่มีน้ำหนักมากๆ อากาศและความชื้นผ่านไปได้ยากมาก ในการนำมาใช้ต้องมีการเจาะรูเพื่อระบายอากาศและความชื้น

สมบัติการซึมผ่านของฟิล์มขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผลิตพอลิเมอร์ เช่น พอลิเอทิลีนกึ่งผลึก ในส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือส่วนที่เป็นผลึก เป็นส่วนที่ไม่ยอมให้ก๊าซหรือไอน้ำซึมผ่าน และส่วนที่เป็นอสัณฐานสายโซ่พอลิเมอร์จะอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเป็นส่วนที่ก๊าซและไอน้ำสามารถซึมผ่านได้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) การเคลื่อนที่ของสายโซ่และปริมาตรอิสระ (Free volume) ถูกจำกัด แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสายโซ่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระมากขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรอิสระ การเปลี่ยนแปลงนี้มีความสำคัญมากต่อความสามารถของโมเลกุลที่แพร่ผ่านวัสดุ ความแตกต่างของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของพอลิเมอร์ขึ้นกับ

- ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการซึมผ่านของก๊าซ
- ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันของสายโซ่พอลิเมอร์
- อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ต่อการละลายของก๊าซในส่วนที่เป็นอสัณฐานของสายโซ่พอลิเมอร์

โซ่พอลิเมอร์

ความสามารถในการซึมผ่านจะลดลงถ้าส่วนของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น และการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์โดยการยืด (Stretching) ฟิล์มเป็นการเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกและลดความสามารถในการซึมผ่านลง

2.3 พอลิเอทิลีน [19]

พอลิเอทิลีน (PE) นับเป็นพลาสติกที่มีการใช้มากที่สุดและราคาถูก เนื่องจากพอลิเอทิลีนมีจุดหลอมเหลวต่ำเมื่อเทียบกับพลาสติกชนิดอื่นๆ ทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำ พอลิเอทิลีนผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของก๊าซเอทิลีนภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงโดยอยู่ในสภาวะปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ (Metal catalyst) การจับตัวของโมเลกุลในลักษณะสายโซ่สั้นและยาวส่งผลให้พอลิเอทิลีนที่ได้ออกมามีความหนาแน่นแตกต่างกัน พอลิเอทิลีนแบ่งเป็น 3 ประเภทตามความหนาแน่น คือ

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ความหนาแน่น 0.910-0.925 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Polyethylene, MDPE) ความหนาแน่น 0.926 -0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
3. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ความหนาแน่น 0.941-0.965 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดและ **149216** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1. สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีน [20]

สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีนที่พิจารณามีอยู่ 3 ประการ คือ

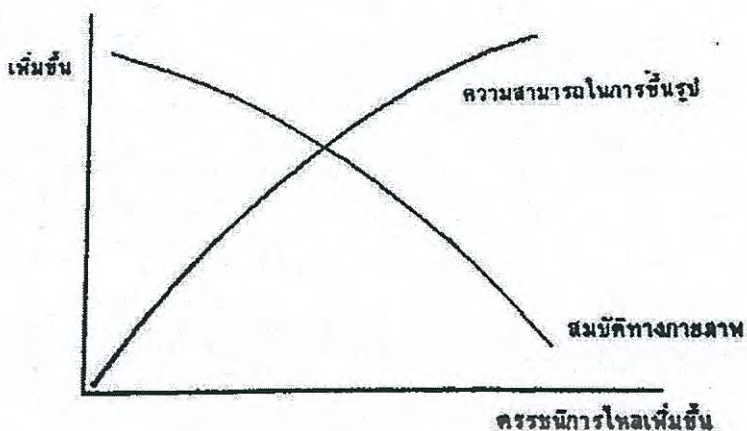
1. ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของพลาสติก หมายถึง น้ำหนักของพลาสติกต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งทาง ASTM ใช้หน่วยของความหนาแน่นเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

พอลิเอทิลีนมีความหนาแน่นสูงหรือต่ำขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ กระบวนการผลิต และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ โครงสร้างของโมเลกุล และขนาดน้ำหนักโมเลกุล แต่ละปัจจัยมีผลต่อความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกที่แตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลมาก คือ โครงสร้างของโมเลกุล โครงสร้างของโมเลกุลที่มีกิ่งยาวและจำนวนมากทำให้ได้ความหนาแน่นต่ำเพราะการที่มีกิ่งมากจะทำให้ความหนาแน่นของโมเลกุลมีน้อยแสงทะลุผ่านง่าย จึงมีความใสแต่มีความแข็งแรงต่ำ ส่วนโครงสร้างที่มีกิ่งสั้นจำนวนน้อยจะทำให้ความหนาแน่นสูงเพราะโมเลกุลอยู่อย่างเป็นระเบียบและใกล้กัน มีความแข็งแรงแต่ไม่ใสเพราะแสงทะลุผ่านได้ยาก จึงเรียกส่วนที่เป็นระเบียบนี้ว่า “ส่วนที่เป็นผลึก” (Crystalline) และส่วนที่อยู่ไม่เป็นระเบียบ เรียกว่า “ส่วนที่เป็นอสัณฐาน” (Amorphous)

2. ดรรชนีการไหล (Melt index)

ดรรชนีการไหลในบางครั้งอาจเรียกว่า “อัตราการไหลเมื่อหลอมเหลว” (Melt flow rate) ในที่นี้ขอใช้คำว่าดรรชนีการไหล หรือเรียกย่อว่า “MI” คำว่า “ดรรชนีการไหล” หมายถึง การวัดการไหลของพลาสติกขณะหลอม โดยกำหนดความยาวขนาดของช่องทางการไหลที่อุณหภูมิและน้ำหนักกดทับมาตรฐาน หลักการนี้ใช้ควบคุมคุณภาพของเทอร์โมพลาสติก ค่าดรรชนีการไหลของเม็ดพลาสติกควรมีค่าสม่ำเสมอ ถ้ามีค่าไม่สม่ำเสมอทางผู้ใช้งานมีปัญหาในการปรับเครื่อง เม็ดพลาสติกที่ใช้ในงานต่างกันมีค่าดรรชนีการไหลที่เหมาะสมแตกต่างกันด้วย ค่าดรรชนีการไหลสามารถแสดงถึงสมบัติและขนาดของโมเลกุลได้ดังนี้ ถ้าขนาดของโมเลกุลมีขนาดใหญ่จะทำให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ดีขึ้น การที่ค่าดรรชนีการไหลสามารถแสดงถึงน้ำหนักโมเลกุลได้ เพราะถ้าโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น การเคลื่อนไหลการไหลตัวต้องใช้พลังงานมากขึ้น ดังนั้นถ้าใช้พลังงานที่เท่ากันในการทดสอบการไหลตัว ขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะไหลตัวได้น้อยกว่า ในด้านความสัมพันธ์ของดรรชนีการไหลกับสมบัติอื่นที่สำคัญ ได้แก่ เรื่องของความยากง่ายในการผลิตขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพทั่วไป ซึ่งแสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้

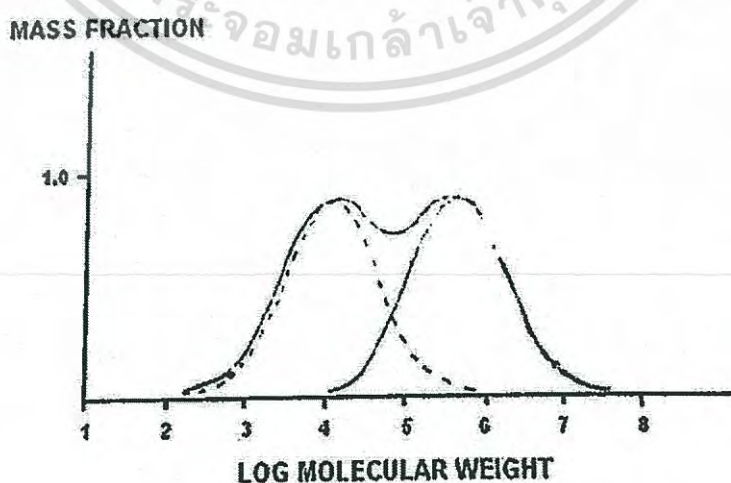


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกรรมวิธีการไหลกับความสามารถในการขึ้นรูป และสมบัติทางกายภาพ [20]

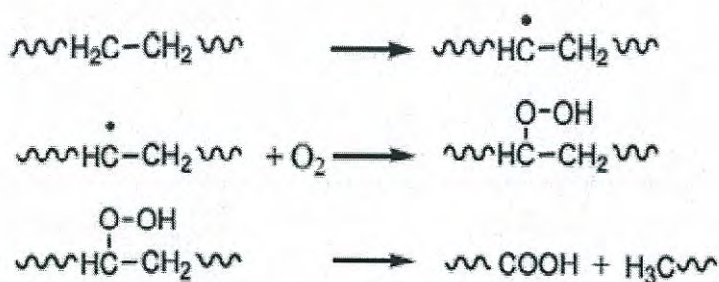
จากกราฟแสดงว่าเมื่อกรรมวิธีการไหลเพิ่มขึ้น การผลิตขึ้นรูปจะง่ายขึ้น แต่สมบัติทางกายภาพส่วนใหญ่ลดลงเพราะขนาดโมเลกุลเล็กลง

3. การกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution)

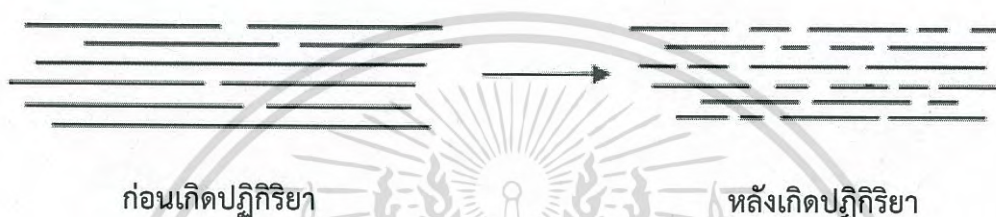
การกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุลเป็นสมบัติพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อสมบัติบางประการ ทั้งการผลิตขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพด้วย ในการผลิตพอลิเมอร์ซึ่งเกิดจากสารหน่วยเล็กที่เรียกว่า “มอนอเมอร์” เกิดพันธะเคมีต่อกันเป็นสายโซ่ยาว แต่จำนวนหน่วยมอนอเมอร์ในแต่ละสายโซ่โมเลกุลมีจำนวนไม่เท่ากัน ดังนั้นขนาดโมเลกุลจึงไม่เท่ากันในทุกสายโซ่ ถ้าความแตกต่างของขนาดโมเลกุลในเนื้อพลาสติกมีมากเรียกว่า “การกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุลกว้าง” ซึ่งพออธิบายได้คร่าวๆ จากกราฟต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสาร รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลกับเศษส่วนโดยมวล [23] ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ PE [22]



รูปที่ 2.6 โมเดลแสดงความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [22]

2.3.2.2 สมบัติทั่วไปของ HDPE [24]

- ความหนาแน่น (Specific density) : 0.95
- อัตราการดูดซับน้ำ (Water adsorption rate (%)) : 0.01
- การยืดตัว (Elongation (%)) : 100
- การทนแรงดึง (Tensile strength (psi)) : 4550
- การทนแรงอัด (Compression strength (psi)) : 2900
- การทนแรงกด (Flexural strength (psi)) : 5800
- ความทรงรูปในแนวแรงกด (Flexural modulus (psi)) : 120000
- อุณหภูมิที่เสียรูป (Deflection temperature (°C))
 - at 66 psi : 80
 - at 264 psi : 55
- อุณหภูมิการใช้งาน (Utilization temperature (°C))
 - at Min : -117.78
 - at Max : 120
- จุดหลอมเหลว (Melting point (°C)) : 130
- สัมประสิทธิ์การขยายตัว (Coefficient of expansion) : 0.00007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 การประยุกต์ใช้งาน [21-22]

เนื่องจาก HDPE มีสมบัติเด่นหลายด้าน ทำให้สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์มากมายหลายชนิด แสดงตัวอย่างในตารางที่ 2.10 จึงเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางทั้งตลาดในประเทศและต่างประเทศ

ตารางที่ 2.10 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดต่างๆ [21]

| เกรดของ HDPE | ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ |
|-------------------------|--|
| Injection molding grade | ถังแก๊สพลาสติก ถังขยะ ถาดใส่ขนมปัง ถังใส่ขวดของเล่น และพวกชิ้นงานที่มีโครงสร้างซับซ้อน |
| Blow molding grade | ขวดต่างๆ เช่น ขวดนม ขวดน้ำ ขวดแชมพู และแก๊สลอน |
| Film extrusion grade | ถุงซิปปีงต่างๆ |
| Extrusion sheet grade | แท และเชือก |
| Pipe extrusion grade | ท่อน้ำ ท่อร้อยสายไฟ และสายเคเบิล |

นอกจากนี้ HDPE นิยมนำกลับมาขึ้นรูปใช้ใหม่ หรือนำกลับไปผสมกับพลาสติกบริสุทธิ์แล้วทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ผลิตภัณฑ์ HDPE ที่นิยมนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดแชมพู ถังแก๊สพลาสติก ถังขยะ ถาดใส่ขนมปัง ถัง และพวกพลาสติก HDPE ที่มีความแข็งโดยส่วนใหญ่เป็นเกรดฉีด (Injection grade) เป็นที่ทราบกันดีว่าพลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้วจะมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่าพลาสติกบริสุทธิ์ ดังนั้นในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่จึงนิยมผสมพลาสติกเหล่านี้ร่วมกับสารเติมแต่ง เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ

2.2.3 ความแข็งแรงดึงของถุงพลาสติกที่ผลิตจาก PE [25]

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหารมาตรฐานเลขที่ มอก. 1027 – 2553 กล่าวถึง

- ความต้านทานแรงดึงในแต่ละแนวต้องไม่น้อยกว่า 11.8 MPa
- ความยืดเมื่อขาดต้องไม่น้อยกว่า ร้อยละ 150

ตามการทดสอบ ดังนี้

1. ภาวะทดสอบ

ให้ทดสอบที่อุณหภูมิ $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 65 ± 5

2. เครื่องมือ

- เครื่องทดสอบแรงดึงที่มีอุปกรณ์ระบุแรงดึงขึ้นทดสอบมีความเที่ยง \pm ร้อยละ 1
- ไมโครมิเตอร์ละเอียด 0.001 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องวัดละเอียด 0.25 mm

3. การเตรียมชิ้นทดสอบ

- ตัดตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 5 mm ถึง 25.4 mm และยาวมากกว่า

ระยะระหว่างปากจับตามตารางที่ 2.11 อย่างน้อย 50 mm เป็นชิ้นทดสอบจำนวน 10 ชิ้น ใช้ทดสอบ
แนวละ 5 ชิ้น

4. วิธีทดสอบ

- หาพื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานทดสอบ (กว้าง x หนา) โดยวัดความหนาด้วย
ไมโครมิเตอร์ วัดความกว้างด้วยเครื่องวัด

- ยึดชิ้นงานทดสอบด้วยปากจับของเครื่องทดสอบแรงดึงตามแนวเครื่องดึงชิ้น
ทดสอบด้วยอัตราการเคลื่อนที่ของปากจับ ตามที่กำหนดในตารางที่ 2.11

- ดึงจนกระทั่งชิ้นงานทดสอบขาด บันทึกเป็นแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบขาด
(F) มีหน่วยเป็นนิวตัน

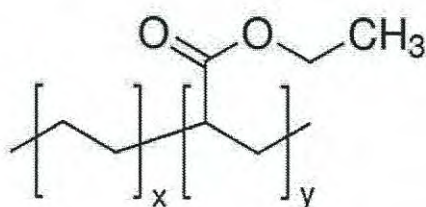
ตารางที่ 2.11 ระยะระหว่างปากจับ และอัตราการเคลื่อนที่ของปากจับ [25]

| ร้อยละความยืดเมื่อขาด | ระยะระหว่างปากจับบน - ล่าง (mm) | อัตราการเคลื่อนที่ของปากจับ (mm/min) |
|-----------------------|------------------------------------|---|
| ไม่เกิน 20 | 125 | 12.5 |
| 20 ถึง 100 | 100 | 50 |
| เกิน 100 | 50 | 500 |

2.4 เอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของเอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ [26]

เอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene methyl acrylate copolymer, EMA) เป็น
เทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง เอทิลีนกับเมทิลอะคริเลต (Methyl
acrylate, MA) โดยทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายใต้ความดันสูง โดยมีการฉีดยอนอเมอร์
เมทิลอะคริเลต เข้าไปยังถังปฏิกรณ์ที่มีก๊าซเอทิลีนเพื่อผลิตโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.7 โครงสร้างของ EMA [27] มอนูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 สมบัติบางประการของ EMA [28]

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

2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน [26]

EMA เป็นหนึ่งในอัลฟาโอเลฟินโคพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพ ซึ่งมีการประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ ด้าน เช่น

- Tie layer เพื่อเพิ่มการยึดติดกับพอลิโอเลฟิน (Polyolefin), ไอโอโนเมอร์ (Ionomer), พอลิเอสเทอร์ (Polyester), พอลิคาร์บอนเนต (PC), EVA, พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์ (PVDC), เอทิลีนอะคริลิก แอซิดโคพอลิเมอร์ (EAA), PET ชนิดจัดเรียงโมเลกุล (OPET) และ PP ชนิดจัดเรียงโมเลกุล (OPP)
- ท่อที่มีความยืดหยุ่นที่มีความต้านทานต่อการแตกและความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ (Low-temperature impact strength) ที่ดี
- EMA ถูกนำมาผสมกับ LDPE, PP, PS, Nylon และ PC เพื่อปรับปรุงสมบัติความแข็งแรง กระแทก ความเหนียว สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นผิว และการยึดติดเพิ่มขึ้นแต่ทำให้ความแข็งแรงลดลง
- นิยมใช้งาน Extrusion coating เนื่องจาก EMA มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J.S. Borah และ T.K. Chaki [29] ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลเชิงพลวัต (Dynamic rheology) สัมพันธวิทยา และสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE/EMA ในอัตราส่วน 60:40 โดยมีการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (LLDPE-g-MA) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (0, 1, 3, 5 และ 7% โดยน้ำหนัก) ทำการเตรียมฟิล์มด้วยการกดอัด พบว่าปริมาณของ LLDPE-g-MA ที่เหมาะสมคือ 3% โดยน้ำหนัก เพราะ LLDPE-g-MA ทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interphase) ของ EMA และ LDPE มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้พฤติกรรมการไหลเชิงพลวัต เช่น โมดูลัสสะสม (Storage modulus) สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดึง โมดูลัส การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงกระแทก และสมบัติทางความร้อน เช่น อุณหภูมิที่เริ่มสลายตัว (Initial decomposition temperature, IDT) อุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) มีค่าสูงขึ้น อีกทั้ง LLDPE-g-MA ยังส่งผลให้วัฏภาคการกระจาย EMA ใน LDPE/EMA มีขนาดเล็กลง เนื่องจาก LLDPE-g-MA ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial tension) EMA และ LDPE นอกจากนี้ยังยับยั้งการเกิดกักรกลับมารวมตัวกันของวัฏภาคกระจาย (Coalescence) ทำให้ได้สัมพันธวิทยาที่เสถียรไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นันทวรรณ ม่วงมี [1] ได้ทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVA และซีโอโลต์เอ โดยใช้อัตราส่วน LDPE:EVA เป็น 100:0, 90:10, 80:20, และ 75:25 และมีการใช้ซีโอโลต์เอเป็นสารตัวเติม 0-25 % โดยน้ำหนัก ผสมสูตรพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่และขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่า โดยใช้อุณหภูมิที่หัวตาย 170°C จากการศึกษาผลของกระบวนการผสมสูตรฟิล์มที่เตรียมจากสูตรเข้มข้นของ EVA กับซีโอโลต์เอ พบว่า อนุภาคของซีโอโลต์เอมีการกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของ EVA และมีการกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ได้ดีกว่าฟิล์มที่เตรียมจากการผสม LDPE, EVA และซีโอโลต์เอพร้อมกัน และจากการศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE:EVA ที่มีต่อฟิล์ม LDPE/EVA พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด มอดุลัสมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยางทำให้เกิดความยืดหยุ่นมากขึ้น ทั้งนี้ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณซีโอโลต์เอมากขึ้น เนื่องจากการเติมซีโอโลต์เอเป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งให้แก่ชิ้นงาน และแรงกระทำระหว่างซีโอโลต์เอกับวัฏภาค EVA เป็นแรงกระทำระหว่างขั้วที่เกิดที่พื้นผิวเท่านั้น ทำให้การยึดเกาะไม่ดี เมื่อมีการให้แรงกระทำแก่ชิ้นงานจึงเกิดช่องว่างระหว่างซีโอโลต์เอกับพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้มีการรับแรงดึงลดลงและขาดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อมีการเติมซีโอโลต์เอ และ EVA ในปริมาณสูงทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) สูงด้วย เนื่องจากความมีขั้วของซีโอโลต์เอที่ทำให้สามารถเหนี่ยวนำโมเลกุลของไอน้ำได้ดีและไอน้ำสามารถผ่านส่วนอสัณฐานของ EVA ได้ดีกว่าส่วนอสัณฐานของ LDPE และ WVP มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมซีโอโลต์เอมากขึ้น โดยในฟิล์มที่มีอัตราส่วน LDPE:EVA เป็น 80:20 โดยน้ำหนัก (LE(80/20)) มีค่า WVP มากกว่าฟิล์ม LDPE 29% และเมื่อเติมซีโอโลต์เอ 25% โดยน้ำหนัก ในสูตรฟิล์ม LE(80/20)Z25 ทำให้ค่า WVP สูงจากฟิล์ม LE(80/20) 60% และสูงกว่าฟิล์ม LDPE 106% และจากการทดสอบฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์บรรจุมะเขือเทศ พบว่าฟิล์มสูตร LE(80/20)Z25 มีมวลไอน้ำกักเก็บสะสมอยู่น้อย จึงสามารถเก็บรักษามะเขือเทศได้นานขึ้น

จิตรา ศักดาพิสุทธิ และคณะ [2] ได้ปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVOH เพื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA โดยการสังเคราะห์ EVOH จาก EVA ที่มีไวโนลอะซิเตต (VA) เท่ากับ 18.0% และ 27.5% โดยน้ำหนัก ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ได้ EVOH ที่มีไวโนลแอลกอฮอล์ (VOH) เท่ากับ 10.0% และ 16.2% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เตรียมสูตรพอลิเมอร์ LDPE/EVOH และ LDPE/EVA โดยใช้อัตราส่วน 100:0, 90:10, 85:15 และ 80:20 ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) และนำไปขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันให้ใกล้เคียงกัน พบว่า EVOH และ EVA มีการกระจายตัวดีในทุกสูตรฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และ EVOH ในฟิล์ม LDPE/EVOH เกิดผลึกได้ ในขณะที่ EVA ในฟิล์ม LDPE/EVA ไม่เกิดผลึกส่งผลให้ฟิล์ม LDPE/EVA มีความนิ่ม เสียรูปร่างกว่าฟิล์ม LDPE/EVOH และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EVOH ส่งผลให้มอดุลัสของฟิล์ม LDPE/EVOH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก EVOH มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้นและทำให้ฟิล์มเสียรูปร่างได้ยากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการดึงยืด ณ จุดคราก และการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง การเพิ่มปริมาณ

EVOH เป็นการเพิ่มความมีขั้วให้แก่ฟิล์ม LDPE/EVOH ซึ่งสอดคล้องกับค่ามอดุลัสที่ลดลง แต่ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVOH ทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันที่มีการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA แม้ว่าจะมีขั้วต่ำกว่า แต่ EVA ไม่สามารถเกิดผลึกได้ จึงให้ความเป็นอสัณฐานที่มากกว่า นอกจากนี้จากการศึกษาผลของการใช้ซีโอไลต์เอ (20% โดยน้ำหนัก) พบว่าซีโอไลต์เอส่วนมากจะอยู่ในวัฏภาคของ EVOH และมีแนวโน้มที่จะเกาะกลุ่มเป็นก้อนมากกว่าที่จะอยู่เป็นอนุภาคเดี่ยว การมีซีโอไลต์เอไม่ได้ทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มเปลี่ยนแปลงไป แต่ทำให้ความสามารถในการดัดยัดลดลงและมีค่า Young's Modulus เพิ่มขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เอ มีอันตรกิริยาที่ดีกับ EVOH ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงขึ้นและเสียรูปได้ยากขึ้น และจากการเติมซีโอไลต์เอลงในฟิล์ม LDPE/EVOH ทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVOH มีค่าเพิ่มขึ้น

ฐิตินันท์ ศิริจันทน์ [3] ทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วยเอทิลเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EMA) และซีโอไลต์เอ โดยศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม LDPE:EMA เป็น 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ทำการผสมสูตรพอลิเมอร์ โดยใช้เครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ LDPE/EMA มีการกระจายตัวของ EMA ที่ดี โดย EMA ช่วยเพิ่มวัฏภาคอสัณฐานและความมีขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ค่า Young's Modulus มีค่าน้อยกว่าฟิล์ม LDPE และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ EMA ส่วนค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ EMA ให้ผลสอดคล้องกับค่ามอดุลัสที่ลดลง การศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันซึ่งโคพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ในการเปรียบเทียบคือ EMA, เอทิลเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) และเอทิลเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EVA) พบว่าเมื่อควบคุมปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วใกล้เคียงกัน ความสามารถในการกระจายตัวในวัฏภาค LDPE และสมบัติเชิงกลของฟิล์มแต่ละสูตรมีค่าไม่แตกต่างกัน ฟิล์มสูตร L70E30 มีค่า WVP สูงกว่าฟิล์มชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีปริมาณของโคพอลิเมอร์ที่เป็นอสัณฐานที่มีขั้วมากกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ การศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอ (20% โดยน้ำหนัก) พบว่าซีโอไลต์เอกระจายตัวได้ดีในวัฏภาคของโคพอลิเมอร์ที่มีขั้ว แต่ไม่มีอันตรกิริยาที่ดีกับพอลิเมอร์ผสม จึงไม่รบกวนการเกิดผลึกของ LDPE โดยฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ นั้น มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากไม่แตกต่างกัน ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 มีค่า WVP มากกว่าฟิล์ม LDPE 180% และมีค่ามากกว่าฟิล์มสูตร L80M20 83% จากผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกชี้หนูสดที่ 5°C เป็นเวลา 20 วัน พบว่าบรรจุภัณฑ์จากฟิล์ม L80M20Z20 ซึ่งมีทั้ง EMA ที่มีความเป็นอสัณฐานที่มีขั้วสูงและมีซีโอไลต์เอที่มีความชอบน้ำสูง สามารถระบายไอน้ำที่เกิดจากการหายใจของพริกออกมาได้มาก ทำให้มีไอน้ำกักเก็บที่คงเหลืออยู่ในบรรจุภัณฑ์น้อยกว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่นๆ โดยฟิล์ม L80M20Z20 มีสมบัติความแข็งแรงดึงต่ำกว่าฟิล์ม LDPE แต่มีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในงานบรรจุภัณฑ์ งานวิจัยนี้สรุปได้ว่า ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของ LDPE สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มวัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมซีโอไลต์เอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์จาก LDPE ที่ผสมด้วย EVOH, EVA, EEA, EMA และซีโอไลต์เอ ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด (Compression) พบว่า EMA เป็นสารที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงและมีขี้ เพื่อให้ฟิล์มที่จะนำมาใช้ในการบรรจุผลิตผลสดสามารถรับแรงได้มากขึ้นและผลิตได้อย่างต่อเนื่อง จึงนำ HDPE มาผสมกับ EMA ซึ่งเป็นส่วนที่มีขี้และทำให้ฟิล์มมีวิฤภาคอณูฐานเพิ่มมากขึ้น สามารถเหนียวทำให้เกิดการซึมผ่านของไอน้ำได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เกรดเป่าฟิล์ม HD7000F จากบริษัท พีทีที โกลบอลเคมีคอล จำกัด (มหาชน)
2. เอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene methyl acrylate copolymer, EMA) เกรด ELVALOY[®] AC 1224 resin จากบริษัท ดูปองท์ จำกัด
3. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N₂) จากบริษัท ลินเด้ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
4. ไซลีน (Xylene) เกรดการค้า จากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE [30]

| สมบัติ | HD7000F* | หน่วย |
|---|----------|--------------------|
| ดรรชนีการไหล (Melt flow rate, 190°C /2.16 kg) | 0.4 | g/10min |
| ความหนาแน่น (Density) | 0.956 | g/cm ³ |
| ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) | 300 | kg/cm ² |
| การดึงยืด ณ จุดขาด (Extension at break) | 390 | % |
| จุดหลอมเหลว (Melting point) | 129 | °C |

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ EMA [31]

| สมบัติ | EMA* | หน่วย |
|---------------------------------|---------|-------------------|
| หมู่แทนที่/ปริมาณ ในโคพอลิเมอร์ | MA/24.0 | %wt |
| ดรรชนีการไหล (190°C /2.16 kg) | 2.0 | g/10 min |
| ความหนาแน่น | 0.944 | g/cm ³ |
| จุดหลอมเหลว | 91 | °C |

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) บริษัท CHAROEN TUT จำกัด รุ่น MX500-D75L90
2. เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบเป่า บริษัท SPL machinery จำกัด รุ่น SPL 25G-LAB
3. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) บริษัท Bosco Engineering จำกัด รุ่น Bosco A600
4. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) บริษัท LLOYD Instrument จำกัด รุ่น JSM-5410LV
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท Carl Zeiss จำกัด รุ่น EVO[®] MA10
6. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) บริษัท Perkin Elmer จำกัด รุ่น FTIR Spectrum Gx
7. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) บริษัท Perkin Elmer จำกัด รุ่น DSC7
8. เครื่องวิเคราะห์สมบัติการซึมผ่านไอน้ำ บริษัท Illinois instrument จำกัด รุ่น M7002
9. เครื่องทดสอบมุมสัมผัสผิวน้ำ บริษัท Dataphysics จำกัด รุ่น Contact angle system OCA
10. เครื่องบีบลม บริษัท Hitachi จำกัด รุ่น BEBICON 400
11. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) บริษัท Labtech Engineering จำกัด รุ่น LP20
12. คีม
13. เครื่องชั่งละเอียดดิจิทัลความละเอียด 0.0001 g
14. ไมโครมิเตอร์
15. กระบอกละไนโตรเจน
16. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 ml
17. เครื่องพ่นกึ่งพลาสติก
18. อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Ultrasonic cleaner) บริษัท Densplyneytech จำกัด รุ่น 136H
19. ตู้อบความร้อน
20. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว บริษัท AXON AB จำกัด รุ่น BX-18
21. เครื่องตัดเม็ดพลาสติก บริษัท AXON AB จำกัด รุ่น BDB-G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ โดยทำการผสมตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.3 โดยชั่งส่วนผสม HDPE และ EMA ให้ได้ตามตาราง ในการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณพอลิเมอร์ผสมรวม 300 กรัม เขย่าเพื่อผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำมาเทใส่ในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 180°C
- ความเร็วโรเตอร์ (Rotor speed) 60 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 20 min

นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้มีขนาดเล็กเพื่อนำไปผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 170-180°C ความเร็วสกรู 60 rpm จากนั้นตัดเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติกเพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมสำหรับการเป่าขึ้นรูปฟิล์มต่อไป

ตารางที่ 3.3 พอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมดโดยน้ำหนัก (%wt)

| สูตร | HDPE (%wt) | EMA (%wt) |
|--------|------------|-----------|
| H100M0 | 100 | 0 |
| H90M10 | 90 | 10 |
| H80M20 | 80 | 20 |
| H70M30 | 70 | 30 |
| H65M35 | 65 | 35 |

3.3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มโดยเทคนิคการเป่าฟิล์ม

นำพอลิเมอร์ที่ตัดเป็นเม็ดแล้วมาขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการเป่า ที่มีเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวที่ต่อกับเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มที่ใช้ตายประเภทวงแหวน (Annular die) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm โดยตั้งสภาวะเพื่อควบคุมความหนาฟิล์ม 25-35 μm ดังนี้

- เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว

- อุณหภูมิ
 - Die 180°C
 - Adaptor 175°C
 - Barrel 1 170°C
 - Barrel 2 170°C
- Screw speed 80-90 rpm

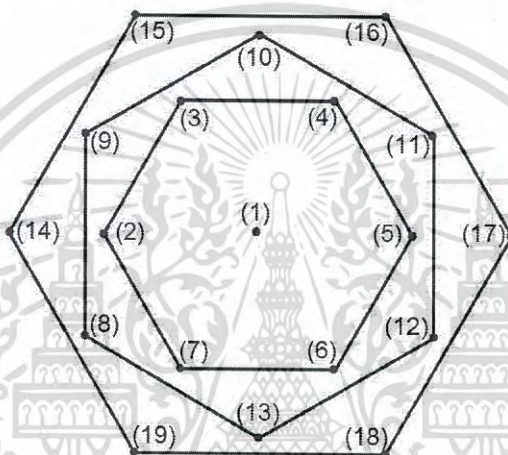
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สภาวะเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม

- ความดัน 60-70 psi
- ความเร็วลูกกลิ้งที่ 1 30-45 rpm
- ความเร็วลูกกลิ้งที่ 2 30-45 rpm

3.3.3 ความหนาของฟิล์ม

วัดความหนาของฟิล์มทุกสูตรที่ผลิตขึ้นมา โดยใช้ไมโครมิเตอร์วัด 19 จุด ดังรูปที่ 3.1 แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.1 บริเวณที่วัดความหนาของฟิล์ม

3.3.4 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก

นำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC ซึ่งนำหนักฟิล์มประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50°C ด้วยอัตราในการให้ความร้อน 10°C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 180°C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 10°C/min จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น และให้ความร้อนอีกครั้งหนึ่งด้วยอัตราในการให้ความร้อนและอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับครั้งแรก นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกตามมาตรฐาน ASTM E794

การคำนวณหา Heat of fusion (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสามารถหาได้จากสมการดังนี้

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

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

เอกลีกรีนเป็นเอกลีกรีนที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อการใช้ประโยชน์ที่ต่างกันไม่เหมือนกันแต่ใช้ประโยชน์ร่วมกันได้ ไม่ว่าจะเป็นใครๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกลีกรีนทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ΔH_f คือ พื้นที่ใต้กราฟของ T_m

ΔH_f° คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่า 293 J/g [32]

3.3.5 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้มาทำการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FT-IR ในโหมดทรานสมิชชัน ช่วงเลขคลื่น 400 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1} เพื่อหาค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index, CI) โดยคำนวณจากอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของพีค C=O Stretching ที่ 1738 cm^{-1} กับค่าการดูดกลืนแสงของพีค C-H Rocking ที่ 730 cm^{-1}

3.3.6 การศึกษาการกระจายตัวของเอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์

นำพอลิเมอร์ผสมมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดให้เป็นแผ่นที่มีความหนา 2 mm ด้วยสภาวะดังนี้

- อุณหภูมิในการกดอัด 200°C
- ความดันในการกดอัด 1800 psi
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์ 5 min
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์ 10 min
- เวลาในการกดอัด 15 min
- อุณหภูมิในการเย็นตัว 20°C
- เวลาในการเย็นตัว 15 min

นำชิ้นงานที่ได้มาตัดให้มีขนาด $1 \times 3\text{ cm}^2$ แล้วนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 40 นาที จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ และนำชิ้นงานที่หักได้ไปแช่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 ml ที่มีโซลินเป็นตัวทำละลายเพื่อสกัด EMA ออกจากชิ้นงานในอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่าที่อุณหภูมิ $42\text{--}45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงครึ่ง จากนั้นนำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานพื้นที่ภาคตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของ EMA ด้วย SEM

3.3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล

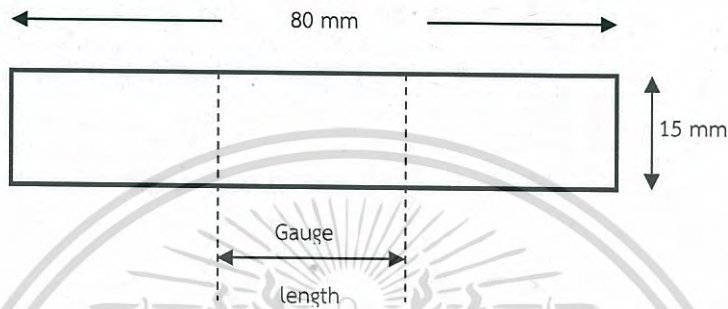
3.3.7.1 สมบัติความแข็งแรงดึง

การทดสอบสมบัติเชิงกลในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบแรงดึง ซึ่งสมบัติที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break) ค่าคอร์ดมอดุลัส (Chord modulus) และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D882 [33] โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ซึ่งจะทำการตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างตามแนวไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องจักร (Machine direction, MD) และตามแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction, TD)
ให้มีขนาด $15 \times 80 \text{ mm}^2$

โดยใช้สภาวะที่ทดสอบดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell) 100 N
- ความเร็วในการดึง (Test speed) 100 mm/min
- ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) 25 mm



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงดึง

ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด, คอรัลมอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด} = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

$$\text{คอรัลมอดุลัสที่ตำแหน่งการยืด 1 และ 3\%} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \quad (3.4)$$

$$\text{ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด} = \left(\frac{l - l_0}{l_0} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

- เมื่อ F = แรงดึงยืดชิ้นงาน ณ จุดขาด
 A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)
 l = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด
 l_0 = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 25 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7.2 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด

นำฟิล์มตัวอย่างมาตัดเป็นชิ้นงานรูปปีกนกแบบ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D1938 [34] ทดสอบด้วยเครื่องอเนกประสงค์ใช้โหลดเซลล์ 100 N ความเร็วในการดึง 100 mm/min โดยทดสอบตามแนว MD และ TD



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาด [35]

3.3.8 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

ส่งตัวอย่างทดสอบที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ทำการหาปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มพลาสติก ในระยะเวลาที่กำหนดและภายใต้สภาวะที่คงที่ มีหน่วยเป็น $g/m^2 \cdot day$ ที่อุณหภูมิ $38^\circ C$ ความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ 90% โดยวิธี Transfer time method โดยใช้เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ ตัดชิ้นงานฟิล์มให้มีขนาด $11 \times 11 \text{ cm}^2$ ตามมาตรฐาน ASTM F1249 และรายงานผลในค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ มีหน่วยเป็น $g \cdot \mu m/m^2 \cdot day$

3.3.9 การทดสอบมุมสัมผัสน้ำ

การทดสอบหยดน้ำที่พื้นผิวโดยนำพอลิเมอร์ผสมมาทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดเป็นชิ้นงานหนา 6 mm และทดสอบหยดน้ำลงบนผิวของพื้นที่ตัดขวางของชิ้นงาน

การขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดใช้แม่พิมพ์ขนาด $40 \times 40 \times 6 \text{ mm}^3$ และใช้สภาวะเครื่องกดอัดดังนี้

- อุณหภูมิในการกดอัด $200^\circ C$
- ความดันในการกดอัด 1800 psi
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์ 5 min
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์ 10 min
- เวลาในการกดอัด 15 min
- อุณหภูมิในการเย็นตัว $20^\circ C$
- เวลาในการเย็นตัว 15 min

หลังจากนั้นตัดชิ้นงานทำการทดสอบผิวของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์ม ใช้ปริมาตรหยดน้ำ $2 \mu L$ ทำการบันทึกค่ามุมสัมผัสเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที วัดมุมที่หยดน้ำกระทำกับผิววัสดุด้วยเครื่อง Contact angle system OCA ตามมาตรฐาน ASTM D 5946-09 [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.10 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

1. นำฟิล์มตัวอย่างขนาด $11 \times 11 \text{ cm}^2$ จำนวน 2 แผ่นต่อถุงบรรจุภัณฑ์ มาผลิตเป็นถุงบรรจุภัณฑ์โดยการปิดผนึกร้อน โดยมีการชั่งน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ซึ่งบันทึกเป็นค่าน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ก่อนการเก็บรักษา

2. คัดเลือกพริกชี้หูสดให้มีขนาดใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นล้างพริกให้สะอาด และผึ่งให้แห้งจำนวนถุงละ 5 กรัม โดยประมาณ และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน บันทึกเป็นค่าน้ำหนักพริกเริ่มต้น

3. บรรจุพริกชี้หูสดลงในบรรจุภัณฑ์แล้วจึงทำการปิดผนึกร้อนทั้ง 4 ด้าน ให้มีพื้นที่ภายใน $9 \times 9 \text{ cm}^2$ ปริมาตรภายในบรรจุภัณฑ์ประมาณ 130 cm^3 แล้วทำการชั่งน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ บันทึกเป็นค่าน้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ก่อนเก็บรักษา

4. เก็บรักษาถุงบรรจุภัณฑ์ในช่องแช่แข็งของตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40% เป็นระยะเวลา 20 วัน [37] ในขณะที่เก็บรักษานั้นมีการชั่งน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์ทุกๆ 2 วัน จนครบเวลา 20 วัน บันทึกเป็นน้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ทุก 2 วัน

5. เมื่อเก็บรักษาถุงบรรจุภัณฑ์จนครบ 20 วัน นำถุงบรรจุภัณฑ์นั้นมาชั่งน้ำหนัก เพื่อบันทึกเป็นค่าน้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์หลังการเก็บรักษา

6. จากนั้นตัดถุงบรรจุภัณฑ์และทำการซับไอน้ำภายในถุงบรรจุภัณฑ์และพื้นผิวของพริกออกเพื่อชั่งน้ำหนักของพริกและบรรจุภัณฑ์ แล้วบันทึกค่าน้ำหนักพริกหลังการเก็บรักษาและน้ำหนักบรรจุภัณฑ์หลังการเก็บรักษา ตามลำดับ

7. นำค่าน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านบรรจุภัณฑ์ออกไปได้และปริมาณไอน้ำกักเก็บที่เหลือในถุงบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักของพริก 1 กรัม ดังสมการ

$$\blacktriangleright \text{ปริมาณไอน้ำทั้งหมดที่พริกหายใจได้ทั้งหมดต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (\%)} = A + B \quad (3.6)$$

เมื่อ A คือ ปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากถุงบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (ในแต่ละวัน) (%)

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

ได้จาก

B คือ ปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (ในวันที่ 20) (%)

$$= \frac{(\text{น้ำหนักรวมหลังเก็บรักษา} - (\text{น้ำหนักพริกหลังเก็บรักษา} + \text{น้ำหนักบรรจุภัณฑ์}))}{\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น}} \times 100$$

ได้จาก

น้ำหนักพริกเริ่มต้น

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA

การศึกษาผลของอัตราส่วน HDPE/EMA ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและฟิล์มที่ผ่านการขึ้นรูป โดยนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมาวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ใช้อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมดังตารางที่ 4.1 ซึ่งฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 25-35 μm

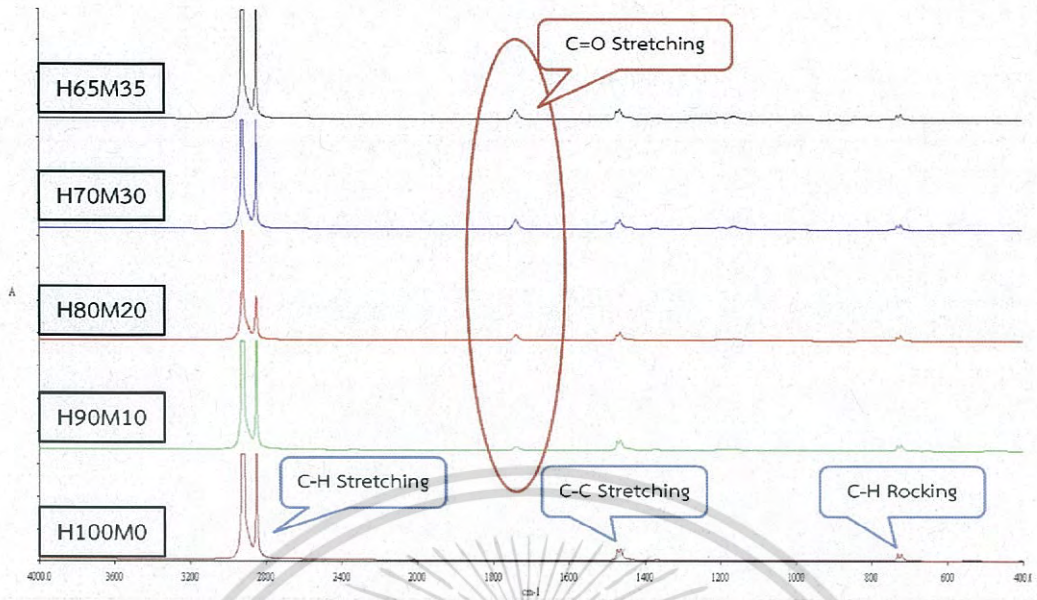
ตารางที่ 4.1 สูตรพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA และความหนาฟิล์ม

| ตัวอย่าง | อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมโดยน้ำหนัก | | ความหนาเฉลี่ย (μm) |
|----------|------------------------------------|-----|------------------------------------|
| | HDPE | EMA | |
| H100M0 | 100 | 0 | 26 \pm 2 |
| H90M10 | 90 | 10 | 25 \pm 2 |
| H80M20 | 80 | 20 | 31 \pm 2 |
| H70M30 | 70 | 30 | 35 \pm 1 |
| H65M35 | 65 | 35 | 29 \pm 1 |

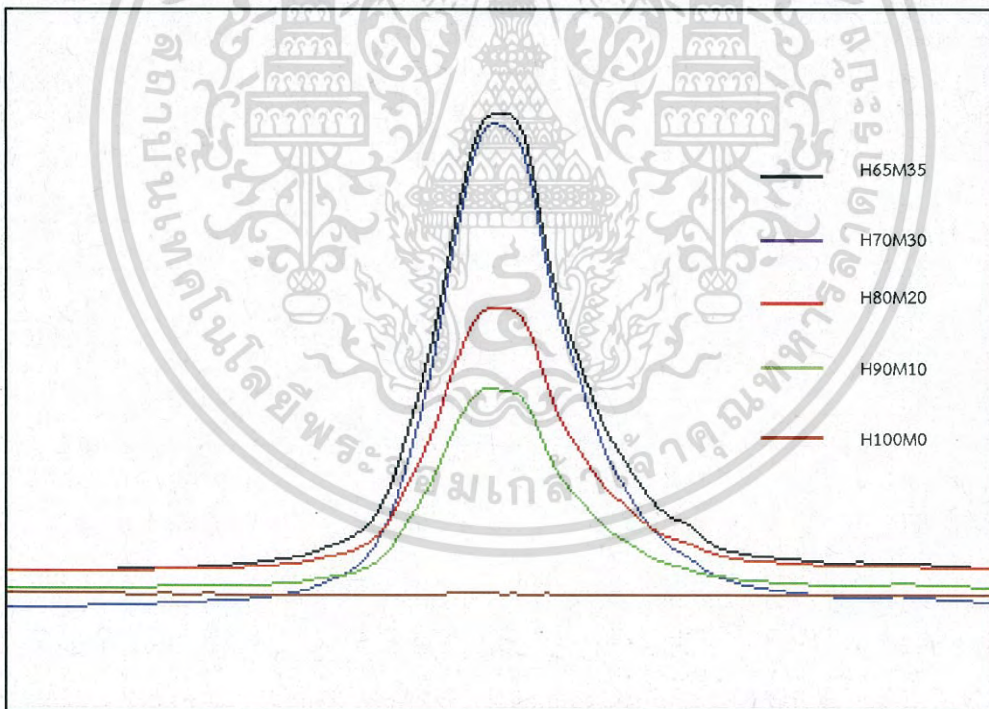
4.1.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม HDPE/EMA

การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยศึกษาจากเทคนิค FT-IR เพื่อแสดงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่ม EMA ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยคำนวณเชิงปริมาณได้จากค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index, CI) จากค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C=O Stretching ที่ 1738 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีตัวของหมู่เอสเทอร์ใน EMA เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C-H Rocking ที่ 730 cm^{-1} ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนสายโซ่หลักของ HDPE และ EMA ที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ดังสมการที่ 4.1

$$\text{ค่าดัชนีคาร์บอนิล (CI)} = \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C=O Stretching ที่ } 1738\text{ cm}^{-1}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C-H Rocking ที่ } 730\text{ cm}^{-1}} \quad (4.1)$$



(a) ตำแหน่งของพีคที่ปรากฏในช่วง 400 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1}

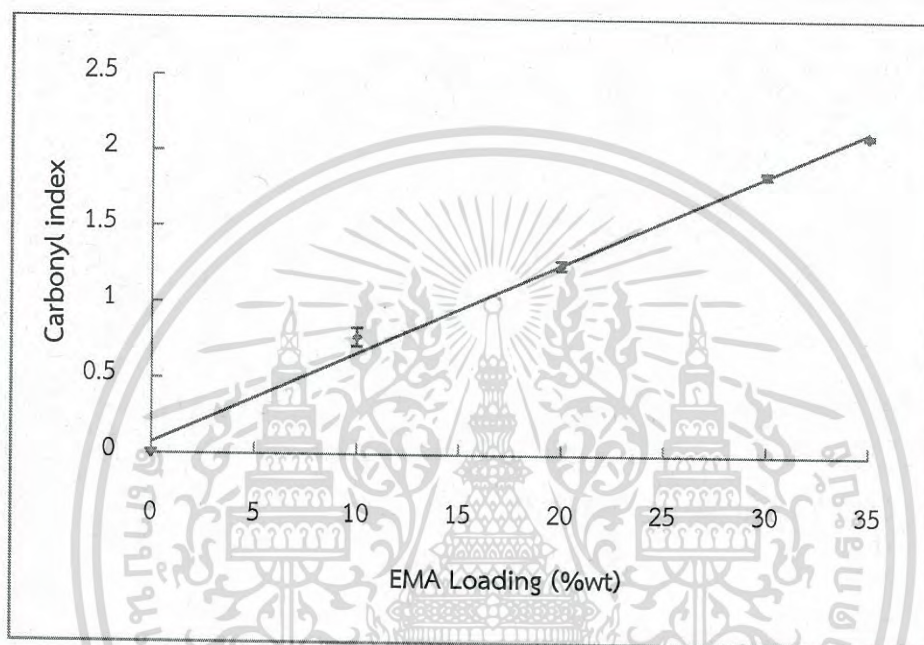


(b) ตำแหน่งของพีคของ C=O Stretching ที่ 1738 cm^{-1}

รูปที่ 4.1 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม HDPE/EMA ด้วยเทคนิค FT-IR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากรูปที่ 4.1 (a) พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร H100M0 ปรากฏพีค C-H Stretching ที่ $\sim 3000\text{ cm}^{-1}$, C-C Stretching ที่ 1472 cm^{-1} และ 1463 cm^{-1} และ C-H Rocking ที่ 730 cm^{-1} เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ EMA ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ปรากฏพีคของ C=O Stretching ที่ 1738 cm^{-1} เพิ่มขึ้นมา ซึ่งแสดงการมีอยู่ของ EMA และเมื่อเพิ่มปริมาณ EMA ค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C=O มีค่าสูงขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.1 (b) โดยสามารถคำนวณหาค่าดัชนีคาร์บอนิลได้จากสมการที่ 4.1 และแสดงค่าดังรูปที่ 4.2

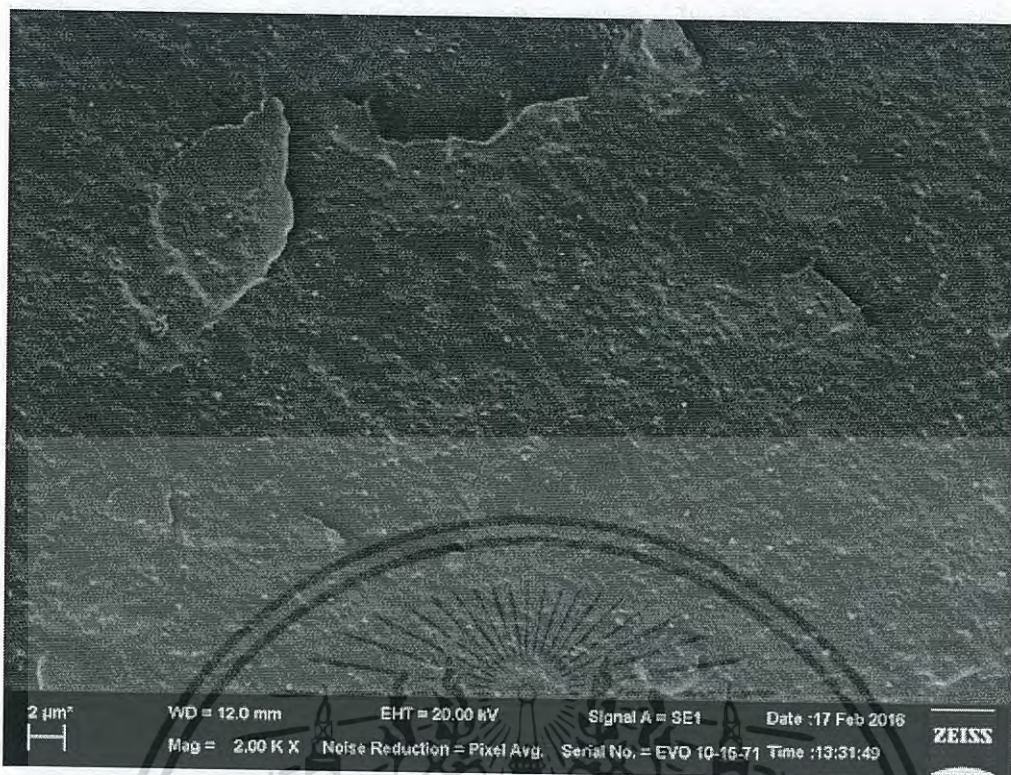


รูปที่ 4.2 ค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE/EMA

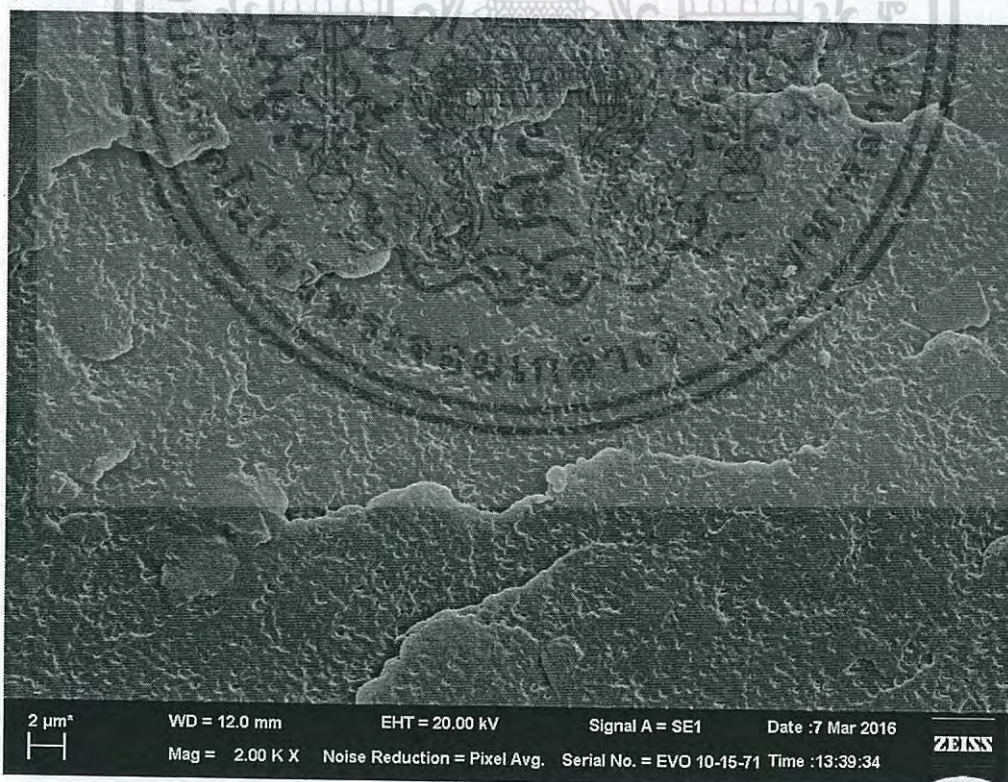
จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อปริมาณ EMA มากขึ้น ค่าดัชนีคาร์บอนิลมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกัน แสดงว่าฟิล์มแต่ละสูตรได้อัตราส่วนของพอลิเมอร์ตามต้องการ และความมีขี้ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณ EMA ที่เพิ่มขึ้น

4.1.2 การศึกษาผลของการกระจายตัวของ EMA ในฟิล์ม HDPE/EMA

การศึกษาการกระจายตัวของ EMA ในฟิล์ม HDPE/EMA ในอัตราส่วนต่างๆ โดยวิเคราะห์ด้วย SEM ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [1-2] เมื่อนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ทำการสกัดโคพอลิเมอร์ออกมาวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าพื้นที่ตัดขวางของชิ้นงานมีความเรียบดี ไม่มีช่องว่าง ไม่พบรอยต่อระหว่างภูมิภาคกระจายและภูมิภาคต่อเนื่อง ดังนั้นในการศึกษาการกระจายตัวของ EMA จึงต้องทำการสกัด EMA ออกจากฟิล์ม HDPE/EMA ก่อนนำมาตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM

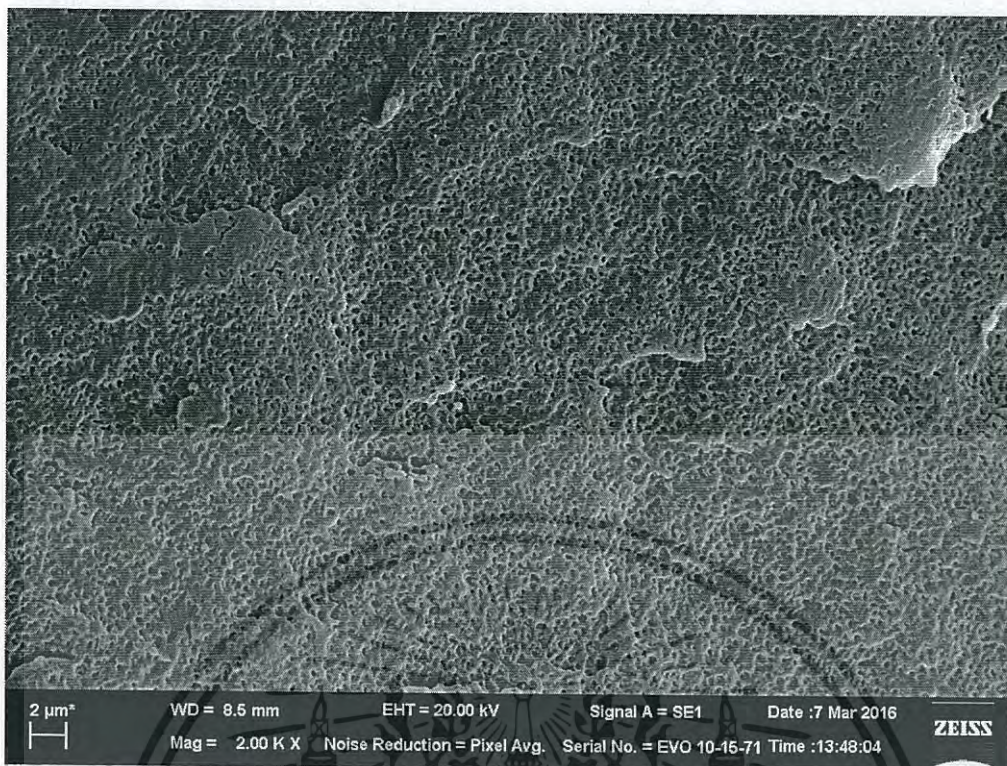


(a) H100M0

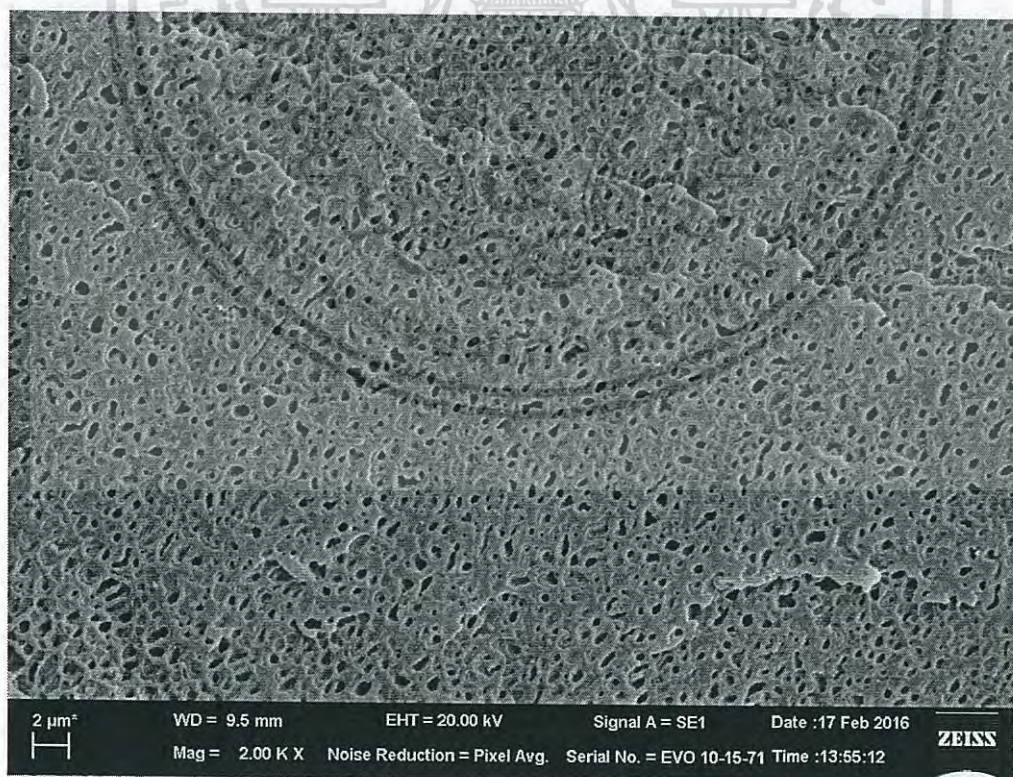


(b) H90M10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

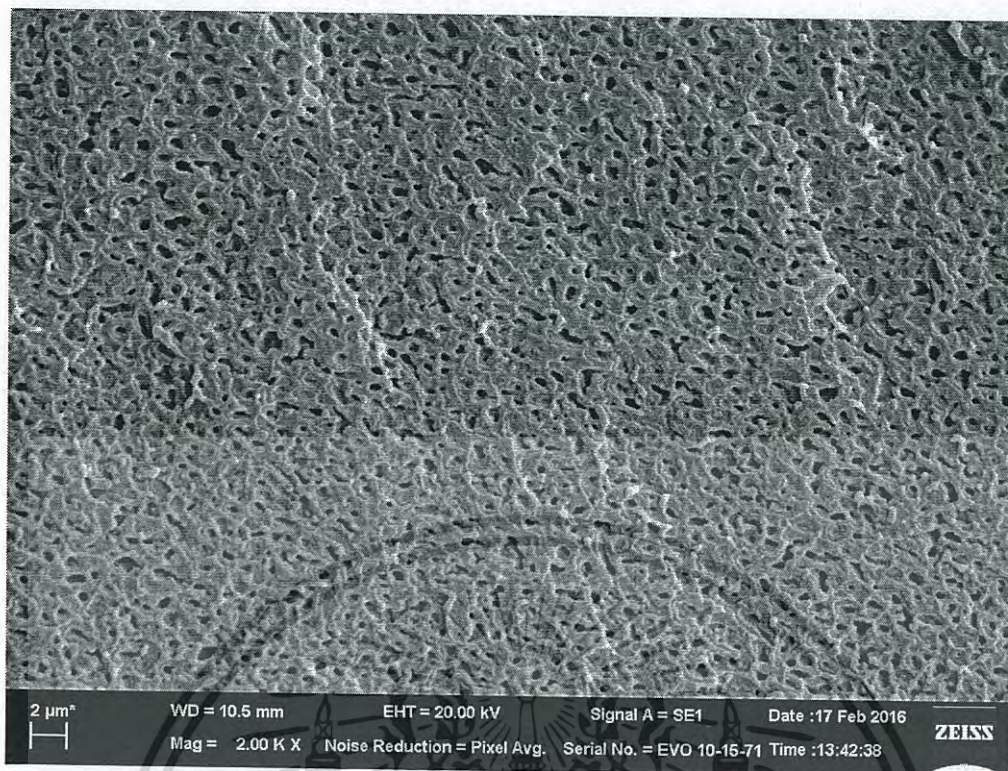


(c) H80M20



(d) H70M30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) H65M35

รูปที่ 4.3 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์ม HDPE/EMA ที่มีการสกัดวัฏภาค EMA ออก (กำลังขยาย 2000 เท่า) (H \rightarrow 2 μm)

จากรูปที่ 4.3 (a) H100M0 มีลักษณะเป็นฟิล์มเนื้อแน่น เรียบ แสดงว่าตัวทำละลายอินทรีย์ และสถานะที่ใช้สกัดไม่สามารถสกัดวัฏภาค HDPE ได้ ส่วนรูปที่ 4.3 (b), (c), (d) และ (e) ซึ่งเป็นฟิล์มที่มี EMA พบว่ามีช่องว่างเกิดขึ้นซึ่งเป็นบริเวณที่เคยมี EMA อยู่ โดย EMA เป็นวัฏภาคกระจายอยู่ใน HDPE ที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง โดยในทุกสูตรพอลิเมอร์ผสมมีการกระจายตัวของ EMA ดี คาดว่าเป็นผลมาจากสภาวะการผสมที่ดี (อุณหภูมิผสม 180°C, ความเร็วโรเตอร์ 60 rpm และเวลา 20 นาที) ทั้งนี้ HDPE และ EMA มีค่าความสามารถในการละลาย (Solubility parameter) เท่ากับ 7.90 (cal/cm³)^{1/2} และ 9.72 (cal/cm³)^{1/2} ตามลำดับ [39-40] ซึ่งค่อนข้างแตกต่างกันทำให้ HDPE และ EMA ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (จัดเป็น Immiscible blend) การเลือกเกรดของพอลิเมอร์ที่มีค่าดรรชนีการไหล (190°C/2.16 kg) ของ HDPE และ EMA ที่ใกล้เคียงกันคือ 0.4 g/10 min และ 2.0 g/10 min ตามลำดับ อาจช่วยให้ EMA สามารถแตกตัวและกระจายตัวไปในวัฏภาคของ HDPE ได้ดี เมื่อใช้สภาวะการผสมที่ดี และเมื่อปริมาณ EMA เพิ่มขึ้นปริมาณช่องว่างในฟิล์มตามรูปที่ 4.3 (b), (c), (d) และ (e) มีมากขึ้นและมีโอกาสกระจายมาชิดติดกันมากขึ้น ทำให้ขนาดวัฏภาค EMA ที่กระจายตัวใน HDPE มีขนาดใหญ่ขึ้นเห็นได้จากช่องว่างในฟิล์มที่ใหญ่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 สมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม HDPE/EMA ด้วยเครื่อง DSC

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m), อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE

| สูตร | T_m (°C) | T_c (°C) | เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก |
|--------|------------|------------|-------------------------|
| H100M0 | 129 | 116 | 63 |
| H90M10 | 129 | 116 | 62 |
| H80M20 | 128 | 116 | 61 |
| H70M30 | 128 | 116 | 63 |
| H65M35 | 128 | 116 | 63 |
| EMA | 75 | 70 | 15 |

จากข้อมูล DSC (ภาคผนวก ก) พบว่า HDPE ในฟิล์มพอลิเมอร์ทุกสูตร มี T_m ที่ประมาณ 128-129°C T_c ที่ประมาณ 116°C และความเป็นผลึกที่ประมาณ 61-63% ส่วน EMA มีค่า T_m ประมาณ 75°C และ T_c ประมาณ 70°C แต่มีความเป็นผลึกค่อนข้างต่ำ (15%) เมื่อเทียบกับ HDPE

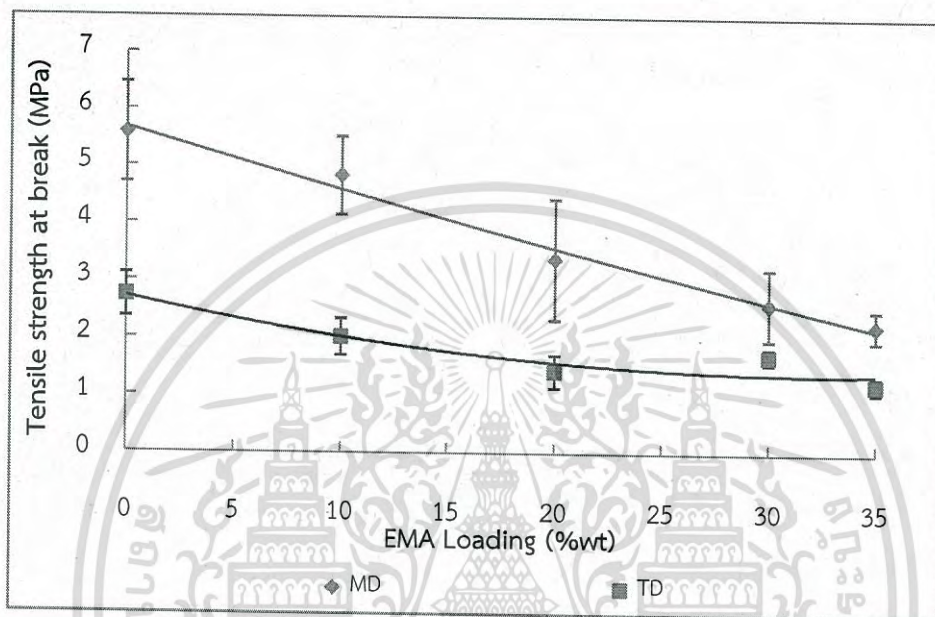
เมื่อนำ HDPE และ EMA มาผสมขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม จะพบเฉพาะพิก T_m และ T_c ของ HDPE โดยปริมาณที่มีอยู่มากของ HDPE ทำให้เกิดเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ส่วน EMA เป็นวัฏภาคกระจายมีโอกาสดเกิดผลึกได้น้อย ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่า EMA ไม่สามารถเกิดผลึกในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้

ดังนั้นองค์ประกอบหลักในการเกิดผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์จึงมาจาก HDPE และสาเหตุที่ค่า T_m , T_c และความเป็นผลึกของ HDPE ไม่เปลี่ยนแปลงแม้มีปริมาณ EMA เพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก HDPE และ EMA มีความเข้ากันได้ต่ำ โดยดูได้จากค่า Solubility parameter (ภาคผนวก จ) ทำให้ EMA ไม่ไปรบกวนระบบในการเกิดผลึกของ HDPE

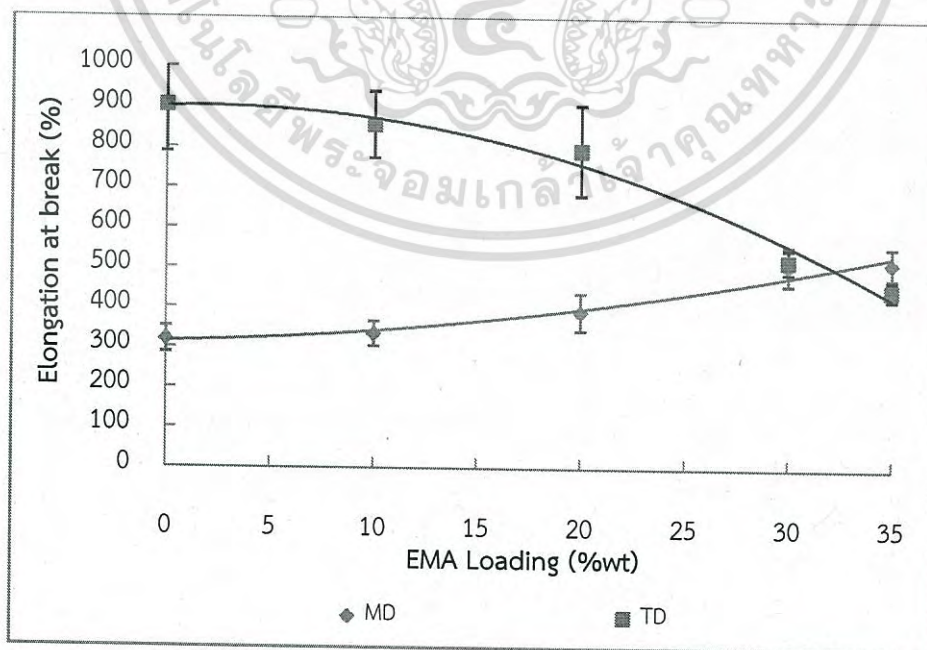
4.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HDPE/EMA พบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break) คอร์ดมอดุลัส (Chord modulus) และการรับแรงฉีกขาด (Tear strength) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA ตามแนวเครื่องจักร (Machine direction, MD) และตามแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction, TD) มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสมบัติของฟิล์ม HDPE (H100M0) และมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อปริมาณ EMA เพิ่มขึ้น และได้ค่าการดึงยืด ณ จุดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขาด (Elongation at break) ดังรูปที่ 4.4 (b) ในแนว MD เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ EMA เพิ่มขึ้น เนื่องจาก EMA เมื่ออยู่ในฟิล์ม HDPE/EMA มีความเป็นอสัณฐานสูง จึงมีความยืดหยุ่นคล้ายสมบัติของยาง ในขณะที่ HDPE แสดงความเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (จากที่กล่าวในหัวข้อ 4.1.3) และพอลิเมอร์ผสมคู่นี้มีสมบัติเป็น Immiscible blend (จากที่กล่าวในหัวข้อ 4.1.2) แรงยึดติดระหว่างภูมิภาค HDPE และ EMA ทำให้ฟิล์ม HDPE/EMA เกิดการเสีรูปร่างได้ง่ายกว่าฟิล์ม HDPE

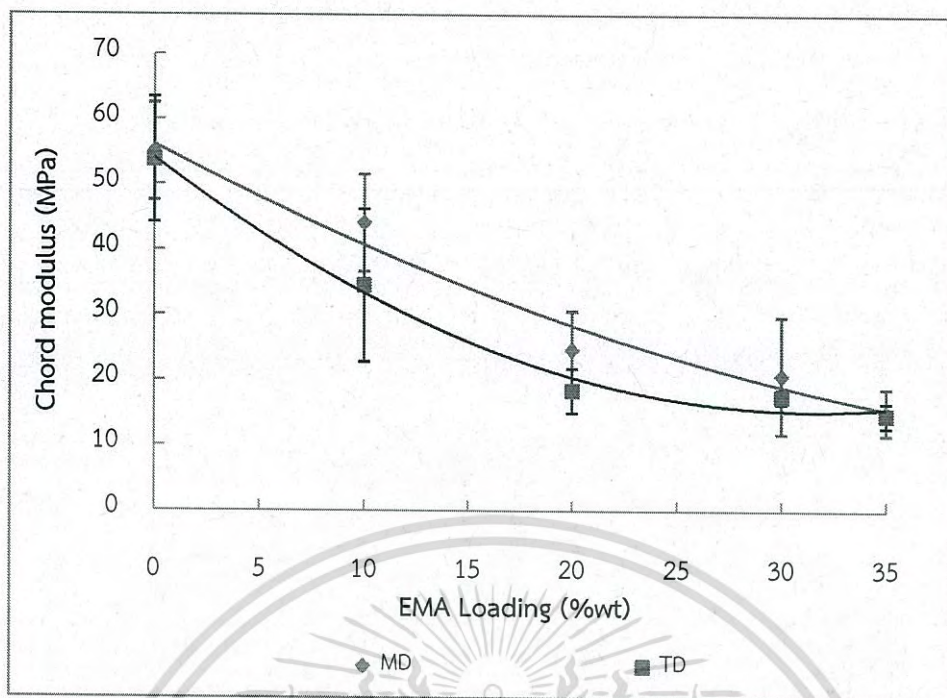


(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดของฟิล์ม HDPE/EMA

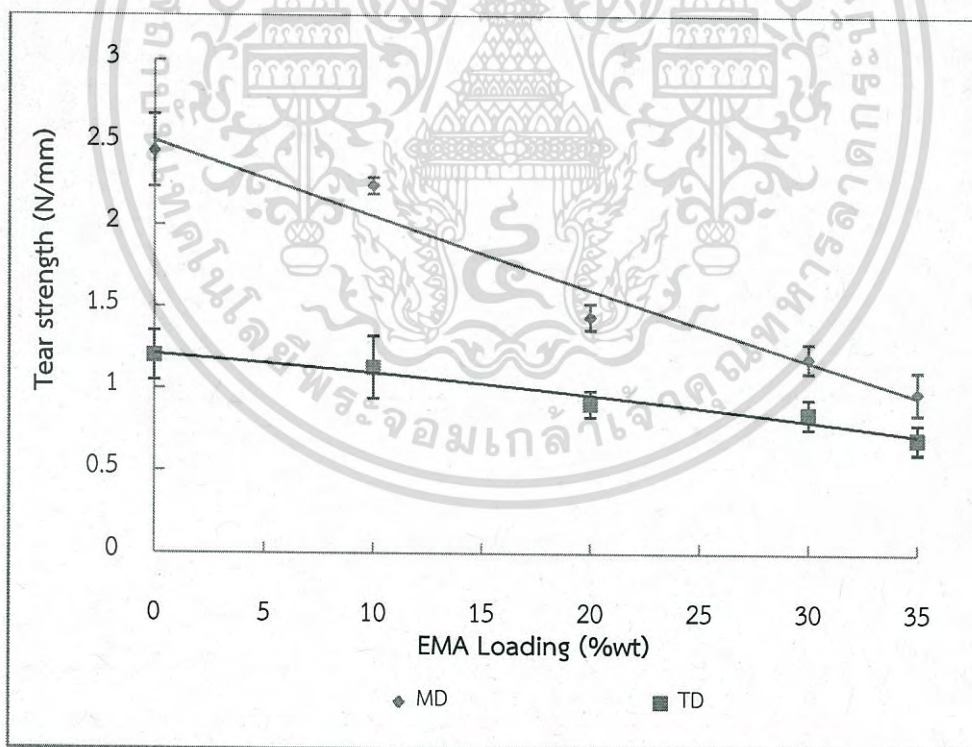


(b) การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม HDPE/EMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพียงการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) คอร์ดมอดุลัสของฟิล์ม HDPE/EMA



(d) การรับแรงฉีกขาดของฟิล์ม HDPE/EMA

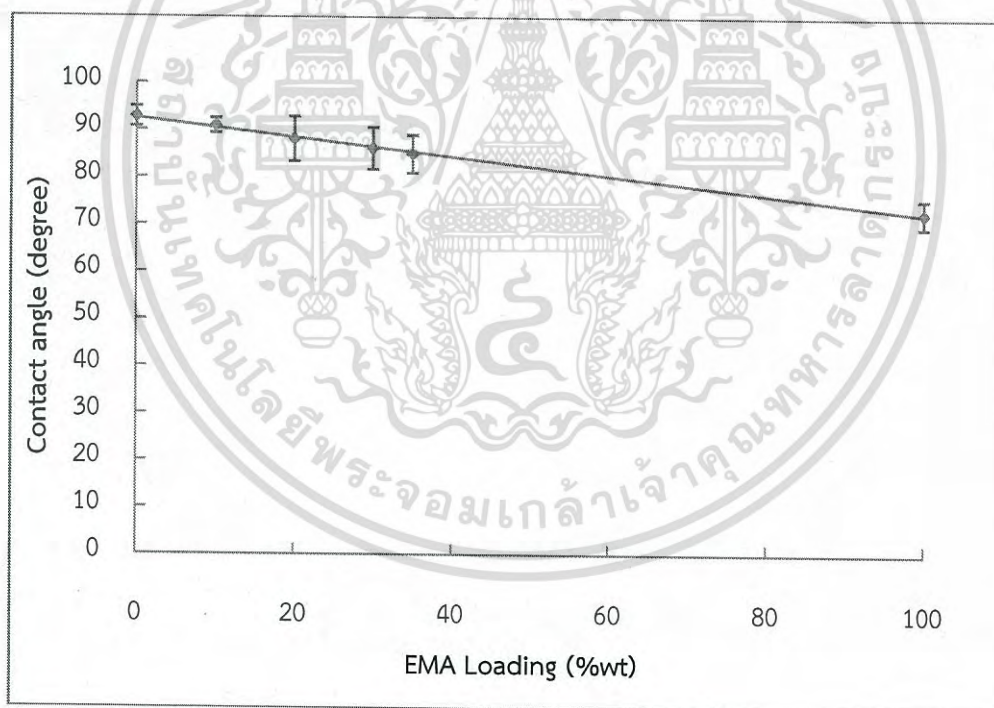
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HDPE/EMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด คอร์ดมอดุลัส และการรับแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA ในแนว MD มีค่าสูงกว่า TD และค่าการดึงยืด ณ จุดขาดในแนว TD มีค่าสูงกว่า MD จึงวิเคราะห์ได้ว่า การผลิตฟิล์มในงานวิจัยนี้มีการดึงฟิล์มในขั้นตอนการม้วนเก็บ เหนี่ยวนำให้เกิดการจัดเรียงสายโซ่ตามแนวเครื่องจักรมากกว่าการจัดเรียงสายโซ่ที่เกิดจากการเป่าขยายตามแนวขวางเครื่องจักร

4.1.5 การทดสอบมุมสัมผัสผิวน้ำ

การวัดมุมสัมผัสที่พื้นผิวของฟิล์มกับน้ำใช้ในการประเมินสภาพผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ทางอ้อม เมื่อทำการวัดค่ามุมสัมผัสผิวน้ำของพอลิเมอร์ จากรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อปริมาณ EMA ในฟิล์มพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ค่ามุมสัมผัสผิวน้ำมีค่าลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ EMA และมุมสัมผัสผิวน้ำเป็นไปในเชิงเส้นตรง ทั้งนี้เนื่องจาก EMA เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีขี้ผึ้ง เมื่อนำไปผสมลงในพอลิเมอร์ทำให้วัสดุภาคอสัณฐานที่มีขี้ผึ้งของฟิล์มพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเพราะ EMA มีความเป็นอสัณฐานและความมีขี้ผึ้งสูง ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์มีความมีขี้ผึ้งและความชอบน้ำมากขึ้น ค่ามุมสัมผัสผิวน้ำจึงมีค่าลดลง

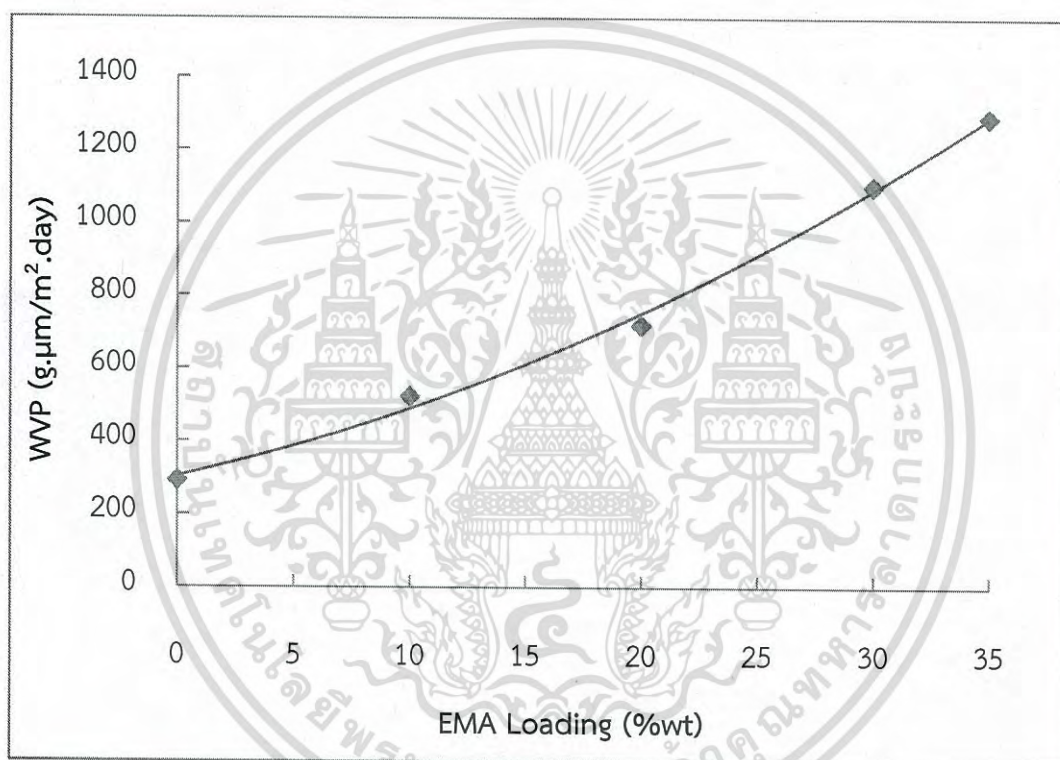


รูปที่ 4.5 ค่ามุมสัมผัสผิวน้ำของพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA เมื่อมี EMA ในปริมาณต่างๆ

4.1.6 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแสดงดังรูปที่ 4.6 โดยทั่วไปการวัดค่าการซึมผ่านไอน้ำด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติการซึมผ่านไอน้ำ นิยมรายงานค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) แต่ในงานวิจัยนี้ฟิล์มที่ใช้ทดสอบนั้นมีความหนาที่แตกต่างกัน เพื่อกำจัดปัจจัยในเรื่องความหนา เนื่องจากฟิล์มที่มีความหนาสูงขึ้นจะมีปริมาตรของเนื้อฟิล์มมากทำให้ไอน้ำเคลื่อนที่ผ่านได้ยาก ดังนั้นจึงแสดงผลการทดลองในรูปของค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability, WVP) โดยคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

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



รูปที่ 4.6 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE/EMA เมื่อมี EMA ปริมาณต่างๆ

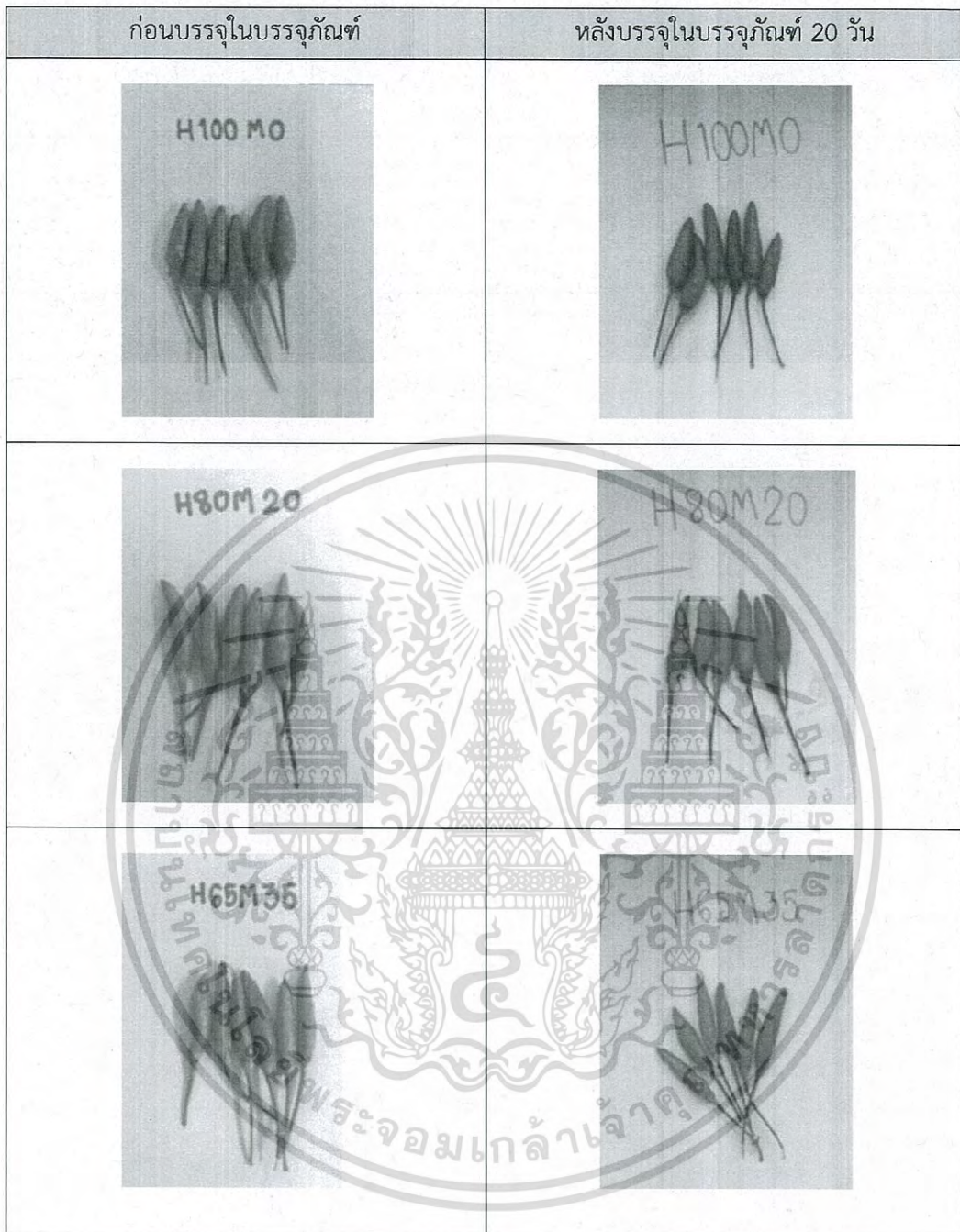
จากรูปที่ 4.5 เมื่อปริมาณ EMA เพิ่มขึ้น ค่ามุมสัมผัสน้ำมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการเปียก (Wettability) ของพื้นผิวดีหรือมีความชอบน้ำมาก ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ โดยจากรูปที่ 4.6 แสดงความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE/EMA ที่มีปริมาณ EMA ต่างๆ พบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ EMA เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ EMA เป็นการเพิ่มสภาพขรุขระให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยสภาพขรุขระที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์เกิดอันตรกิริยาได้ดีกับไอน้ำจึงสามารถเหนี่ยวนำไอน้ำให้ซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้มากขึ้น และผลจาก SEM ในรูปที่ 4.3 เมื่อปริมาณ EMA เพิ่มขึ้น ขนาคิวภาคกระจายซึ่งเป็นบริเวณที่มีขั้วมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้เกิดการคำนวณค่าไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันตรายกับไอน้ำได้มากขึ้น ทำให้เกิดการซึมผ่านของไอน้ำได้มากขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ค่า WVP ของสูตร H80M20, H70M30 และ H65M35 มีค่าสูงกว่าค่า WVP ของฟิล์มทั่วไปในท้องตลาด ซึ่งมีค่า $625 \text{ g}\cdot\mu\text{m}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ [38]

4.2 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

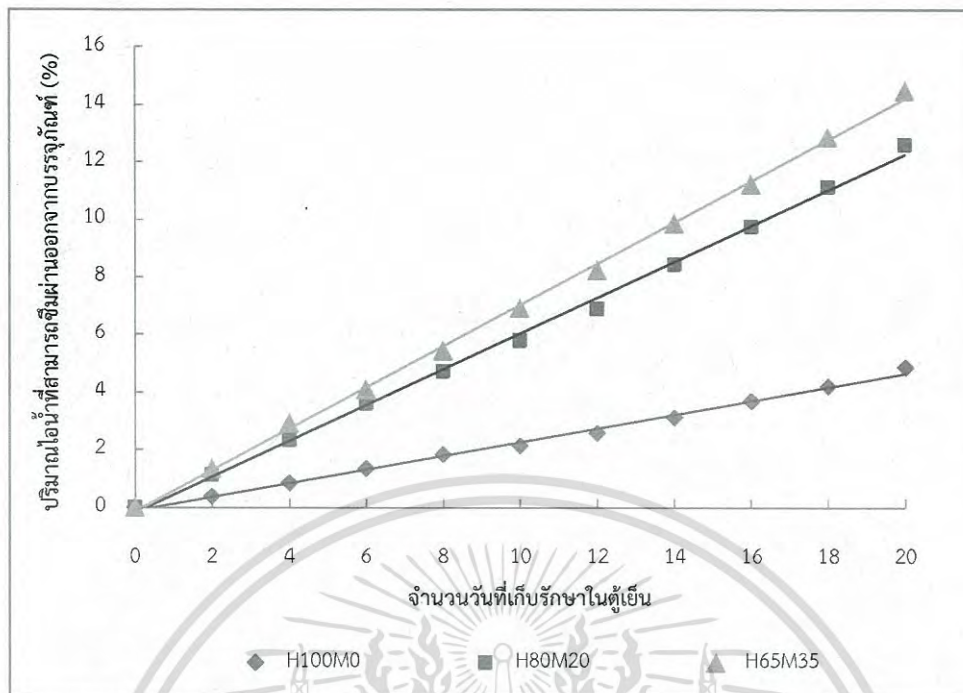
การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ได้เลือกพริกชี้หนูสดมาทำการทดสอบเนื่องจากพริกจัดเป็นผลผลิตสดประเภท Non climacteric ซึ่งไม่มีการสุกตัวหลังการเก็บเกี่ยว อีกทั้งมีการหายใจที่คงที่และการหายใจให้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ซึ่งหากมีการเก็บสะสมไว้จะทำให้ผลผลิตเกิดการเน่าเสียได้ โดยการทดสอบนี้ควบคุมอายุ ปริมาณ และน้ำหนักพริกชี้หนูสดเริ่มต้นให้ใกล้เคียงกันและนำมาเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 20 วัน ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40% จากรูปที่ 4.7 แสดงพริกชี้หนูสดที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ก่อนและหลังการเก็บรักษา พบว่าหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 20 วัน พริกชี้หนูสดยังคงมีสีเขียวเหมือนเดิมเพราะไม่มีการสุกหลังจากเก็บเกี่ยว แต่จะเกิดอาการคล้ำที่บริเวณขั้ว การเหี่ยวที่บริเวณก้าน และมีความแน่นเนื้อลดลง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการเกิดอาการสะท้านหนาว (Chilling injury) ได้แก่ การมีสีคล้ำลงของผลผลิตสด (Darkening) และการเหี่ยว (Wilting) [37]

ขณะที่เก็บพริกชี้หนูสดในบรรจุภัณฑ์ พริกชี้หนูสดยังมีการหายใจและการคายน้ำ ซึ่งไอน้ำที่เกิดจากการหายใจส่วนหนึ่งจะสามารถระบายออกจากบรรจุภัณฑ์ได้ และไอน้ำที่เหลือจะถูกกักเก็บอยู่ในบรรจุภัณฑ์ตั้งในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง.1) ซึ่งปริมาณไอน้ำที่ถ่ายเทขึ้นกับอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของถุงบรรจุภัณฑ์ หากซึมผ่านออกไปได้ดี จะมีปริมาณไอน้ำที่ถ่ายเทมาก ในทางกลับกันปริมาณไอน้ำกักเก็บจึงเหลือน้อยลง แต่หากถุงบรรจุภัณฑ์ถ่ายเทไอน้ำออกไปไม่ดี ทำให้มีปริมาณไอน้ำกักเก็บเหลืออยู่มาก ขณะที่ปริมาณไอน้ำถ่ายเทออกไปน้อย โดยไอน้ำกักเก็บที่เหลืออยู่ในบรรจุภัณฑ์ควบแน่นเป็นหยดน้ำ หากมีหยดน้ำเหล่านี้เกิดขึ้นในบรรจุภัณฑ์มากส่งผลให้ผลผลิตเกิดการเน่าเสียได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาหาปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกจากรูบรรจุภัณฑ์ และปริมาณไอน้ำกักเก็บในบรรจุภัณฑ์ เพื่อหาประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณโคพอลิเมอร์แตกต่างกัน



รูปที่ 4.7 พริกชี้หนูสดที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ก่อนและหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C โดยมีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40%

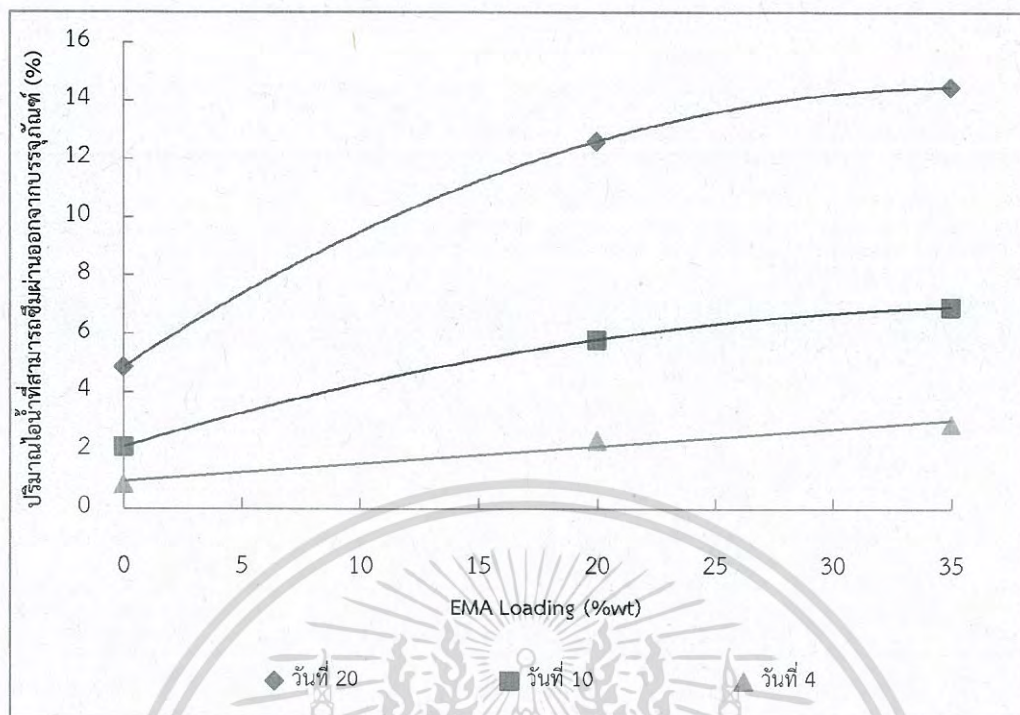
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์ในระยะเวลา 20 วัน

ระหว่างเก็บรักษาบรรจุภัณฑ์ทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปในบรรจุภัณฑ์ทุกๆ 2 วัน จนครบ 20 วัน น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของบรรจุภัณฑ์แสดงให้เห็นถึงการหายใจของพริกซึ่งมีผลิตภัณฑ์หลักคือไอน้ำ และไอน้ำส่วนหนึ่งสามารถซึมผ่านออกนอกถุงบรรจุภัณฑ์ได้ ทำให้น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์และพริกลดลงไปจากวันแรก จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์และจำนวนวันในการเก็บรักษา โดยเมื่อจำนวนวันมากขึ้นพบว่าไอน้ำที่ซึมผ่านออกไปมีปริมาณมากขึ้น โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงไม่ว่าจะเป็นฟิล์มสูตรใด ฟิล์มพอลิเมอร์สูตรที่มี EMA มากที่สุด (H65M35) มีปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านออกไปมากที่สุดเนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีขี้วมาก ทำให้ฟิล์มมีความชอบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ไอน้ำสามารถซึมผ่านออกมาได้มาก

เมื่อศึกษาการระบายนํ้าในแต่ละช่วงของการเก็บรักษา จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์กับปริมาณ EMA ณ วันที่ 4, 10 และ 20 ของการเก็บรักษาพริกชี้หูสด พบว่าการระบายนํ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ EMA ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับที่เห็นในรูปที่ 4.8 โดยพบว่า ณ วันที่ 4 ของการเก็บรักษา กราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ในขณะที่วันที่ 10 และ 20 กราฟเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อ EMA สูงขึ้น เนื่องจากพริกชี้หูสดผ่านการหายใจมาเป็นเวลานาน ทำให้นํ้าในผลิตภัณฑ์เหลือ้น้อยลง ไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการหายใจจึงลดลง



รูปที่ 4.9 ปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ ณ วันที่ 4, 10 และ 20

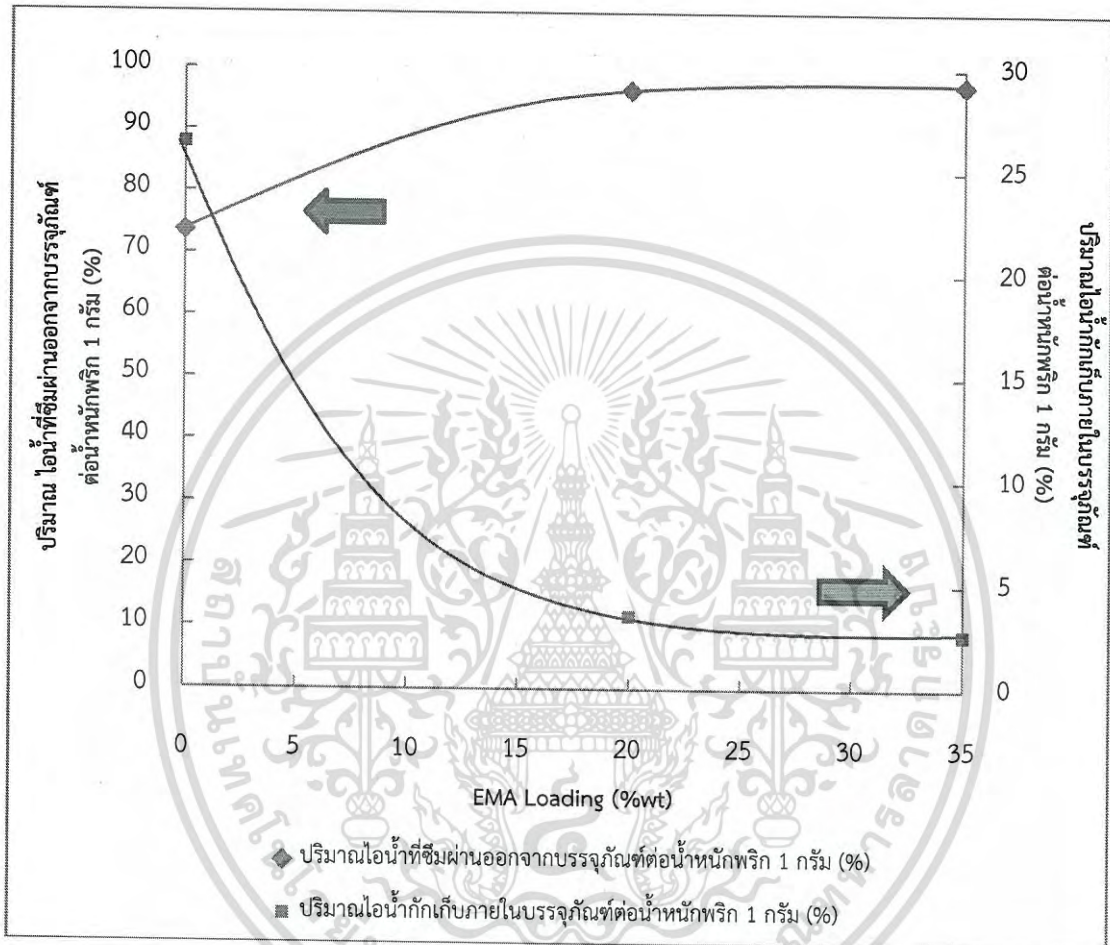
ผลจากการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ในวันที่ 20 สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้จากปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์รวมกับปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง และแสดงค่าที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้อ่อน้ำหนักพริก 1 กรัม หลังการเก็บรักษา 20 วัน

| ตัวอย่าง | ปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (%) | ปริมาณไอน้ำที่กักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (%) | ปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้อ่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (%) |
|----------|--|---|---|
| H100M0 | 4.86 | 1.74 | 6.60 |
| H80M20 | 12.61 | 0.46 | 13.07 |
| H65M35 | 14.47 | 0.39 | 14.86 |

จากตารางที่ 4.3 สามารถหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ และปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม ภายหลังจากเก็บรักษาพริกเป็นเวลา 20 วัน โดยแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีปริมาณ EMA มากที่สุด (H65M35) สามารถระบายไอน้ำออกจากบรรจุภัณฑ์ได้มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการเติม EMA ที่มีวิฤภาคอสัญฐาน

ที่มีขั้วทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์มีความชอบน้ำมากขึ้น จึงเหนียวน้ำให้ออน้ำสามารถซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ได้มากที่สุด ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรดังกล่าวมีปริมาณอน้ำกักเก็บเหลืออยู่น้อยที่สุด ดังนั้นฟิล์มพอลิเมอร์สูตรดังกล่าวจึงน่าจะพัฒนาใช้ในการยืดอายุในการเก็บรักษาผักและผลไม้ได้ดีกว่าสูตรอื่น เนื่องจากมีโอกาสเกิดการควบแน่นของอน้ำน้อยที่สุด



รูปที่ 4.10 ปริมาณอน้ำที่ซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ และปริมาณอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ เทียบกับปริมาณอน้ำรวมที่พืชหายใจได้ต่อน้ำหนักผัก 1 กรัม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำเอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (EMA) ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีผิวและมีวิฎุภาคเป็นอสัณฐานสูงมาพัฒนาความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) จากการทดสอบสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาค่าผลของอัตราส่วน HDPE:EMA (100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 65:35) พบว่า EMA มีการกระจายตัวที่ดีในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นเป็นผลึกที่เกิดจาก HDPE เท่านั้น การเพิ่มขึ้นของ EMA ทำให้สมบัติเชิงกล คือความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด คอร์ดมอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาดน้อยกว่าฟิล์ม HDPE และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ EMA มากขึ้น

2. จากการศึกษาค่าผลของหมู่ฟังก์ชันในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA พบว่าเมื่อปริมาณ EMA มากขึ้น ค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index) มีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าการวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ที่มุมสัมผัสมีค่าลดลง นั่นคือ EMA ที่เติมลงไปช่วยทำให้ฟิล์มมีสภาพผิวสูงขึ้น

3. จากการศึกษาค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม พบว่าเมื่อมีการเติม EMA ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำได้สูงขึ้นด้วย เนื่องจาก EMA ในปริมาณสูงทำให้ฟิล์มมีวิฎุภาคอสัณฐานและความมีผิวสูงขึ้น โดยจากผลของฟิล์ม H80M20, H70M30 และ H65M35 มีค่า WVP สูงขึ้นตามลำดับ และมีค่าสูงกว่าฟิล์มทั่วไปในท้องตลาด เมื่อนำฟิล์มที่ขึ้นรูปได้มาทำเป็นถุงสำหรับบรรจุพริกชี้หนูสด พบว่ามีมวลไอน้ำกักเก็บสะสมอยู่น้อย ทำให้มีโอกาสในการเก็บรักษาพริกชี้หนูสดโดยปราศจากการเน่าเสียอันเนื่องมาจากไอน้ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. อาจเปลี่ยนแปลงชนิดของโคพอลิเมอร์ที่มีสภาพผิวสูงกว่า เพื่อให้ฟิล์มมีสภาพผิวสูงขึ้น และสามารถซึมผ่านไอน้ำได้ดีขึ้น เพื่อที่จะใช้โคพอลิเมอร์ในปริมาณที่ลดลง สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะได้ไม่ต่ำกว่าฟิล์ม HDPE มากนัก

2. อาจมีการใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ในการผลิตฟิล์ม เพื่อให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงโมเลกุลมากขึ้น ซึ่งทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ยังคงสมบัติเชิงกลที่ดีแม้ว่ามีโคพอลิเมอร์ผสมอยู่ แต่การจัดเรียงตัวของโมเลกุลอาจทำให้ปริมาณผลึกของฟิล์มเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดลง จึงต้องหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ให้สมบัติเชิงกลและค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] นันทวรรณ ม่วงมี. 2554. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลดีพีอีด้วยอีวีเอ และ ซีโอไลต์เอ.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] จิตรา ศักดาพิสุทธิ์, เมธาวิ อุตตสุรดี และรันลี บุญตา. 2555. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVOH และซีโอไลต์เอ.” โครงการพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] รุตินันท์ ศิริจันทนันท์. 2557. “สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม แอลดีพีอี/อีเอ็มเอ/ซีโอไลต์เอ เพื่อใช้งานบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] วรณัฐ เรืองโกสม. 2550. การศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีน/เคลย์ นาโนคอมโพสิต. [Online]. Available : http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snmcn/Worant_Roengkosum/Chapter2.pdf. เข้าถึงเมื่อวันที่ 26 มกราคม 2559.
- [5] สมชาย กล้าหาญ. 2543. วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวพืชสวน. ภาควิชาพืชสวน คณะเทคโนโลยีการเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] Pantastico, E. B. 1975. Postharvest Physiology, Handling and Utilization of tropical And subtropical fruits and vegetables. Connecticut : The AVI Publishing Company Inc.
- [7] สังคม เตชะวงศ์เสถียร. 2552. เอกสารประกอบการเรียนวิชาสรีรวิทยาของพืชสวนบทที่4 สรีรวิทยาการสุกของผล. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [8] ดนัย บุญเกียรติ และ นิธรยา รัตนพานนท์. 2535. การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- [9] งามทิพย์ ภู่วโรดม. 2550. การบรรจุอาหาร. กรุงเทพฯ : เอส. พี. เอ็ม. การพิมพ์จำกัด.
- [10] สุธิณี เกิดเทพ. 2552. “ผลของการเคลือบสารลดแรงตึงผิวต่อสมบัติการป้องกันการเกิดฝ้า
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฟิล์ม.” ปัญหาพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[11] Paine, F.A. and Paine, H.Y. 1992. *A Handbook of food Packaging*. New York :
Chapman & Hall.

[12] Exama, A., Arui, J., Lencki, R. W., Lee, L.Z., and Toupin, C. 1993. “Suitability of
Plastic Films for Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables.”
Journal of Food Science. 58(6) : 1365-1370.

[13] จริงแท้ ศิริพานิช. 2544. *สรีรวิทยาและเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้*. พิมพ์ครั้งที่
4. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[14] Wills, R., McGlasson, B., Graham, D., and Joyce, D. 1998. *Postharvest*. 4th ed.
California : CAB International.

[15] Bussel, J. and Keningsberger, Z. 1975. “Packaging Green Bell Peppers in
Selected Permeability Films.” *Journal of Food Science*. 40 : 1300-1303.

[16] Piagentini, A. M., Guemes, D. R., and Pirovani, M.E. 2002. “Sensory Characteristics
of Fresh-Cut Spinach Preserves by Combined Factors Methodology.”
Journal of Food Science. 67(4) : 1544-1549.

[17] Pirovani, M.E., Guemes, D. R., Piagentini, A. M., and Dipentima, J. H. 1997.
“Storage Quality of Minimally Process Cabbage Packaged in Plastic Films.”
Journal of Food Quality. 20(5) : 381-389.

[18] รุ่งนภา วิสฐอุตรการ. 2540. *เอกสารประกอบการสอนการประเมินอายุการเก็บรักษาของ
อาหาร*. ภาควิชาพัฒนาการผลิต คณะอุตสาหกรรมเกษตร,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[19] Billmeyer, F.W. 1984. *Textbook of Polymer Science*. New York : John Wiley &
Sons.

[20] ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยร่วมกับ
บริษัท ไทยโพลิเอทิลีน จำกัด. 2532. *การสัมมนาเรื่อง HDPE...บรรจุภัณฑ์ทันสมัย*.
กรุงเทพฯ : ศูนย์บรรจุหีบห่อไทย.

[21] Fried, J.R. 1995. *Polymer Science and Technology*. New Jersey : Prentice Hall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] Hamid, S.H. and Atiqullah, M. 1995. "Role of Blending Technology in Polyethylene Recycling." *Journal of Macromolecular Science*. 35(3) : 495-498
- [23] Society of Plastics Engineers. 2016. **Hands on Plastics™: History of Polymers & Plastics for Teachers**. [Online]. Available :
<http://www.4spe.org/contentnorelated.aspx?ItemNumber=22532>
 Access on 10 January 2016.
- [24] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2551. **พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง**. [Online]. Available :
<https://th.wikipedia.org/wiki/พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 มกราคม 2559
- [25] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2553. **ถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร**. [Online]. Available :
<http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2553/E/129/16.PDF>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 มกราคม 2016.
- [26] Staff of Modern Plastics Magazine. 1994. **Plastic Handbook**. New York : McGraw hill.
- [27] SIGMA-ALDRICH®. 2013. **Poly (ethylene-co-methyl acrylate)**. [Online]. Available : <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/340502?lang=en®ion=TH>. Access on 10 January 2016.
- [28] eFunda, Inc. 2013. **Ethylene/methyl acrylate**. [Online]. Available :
http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.
 Access on 10 January 2016.
- [29] Borah, J.S. and Chaki, T.K. 2011. "Dynamic rheological, morphology and mechanical properties of compatibilized LLDPE/EMA blends." *Journal of Polymer Research*. 18 : 907-916.
- [30] PTT Polymer Marketing Company Limited. 2010. **HD700F – Innoplus**. [Online]. Available :
http://www.innoplus.in.th/document/TechnicalDatasheet /HD7000F_

เอกสารนี้เป็น [TECH.pdf](#) Access on 10 January 2016. ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[31] E.I. du Pont de Nemours and company, Inc. 2014. **Datasheet - Elvaloy® AC AC 1224-DuPont.** [Online]. Available : <http://www.dupont.com> Access on 10 January 2016.

[32] Khalaf, M.N. 2015. **Green Polymers and Environmental Pollution Control.** Ontario : Canada.

[33] American Standard for Testing and Materials. 1998. “Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet.” ASTM D882. Annual Book of ASTM standard 08.01., Philadelphia.

[34] American Society for Testing and Material. 2007. “Standard Test Method for Tear Propagation Resistance (trouser tear) of Plastic Film and Thin Sheeting by asingle Tear Method.” ASTM D1938. Committee on Standard.

[35] The Prospector® . 2014. **Tear Strength - ASTM D624 Plastic Test Standard.** [Online]. Available : http://www2.ulprospector.com/property_descriptions/ASTMD624.asp Access on 24 January 2016.

[36] ASTM D5946-09 Committee on Standard. 2003. “Standard Test Method for Corona Treated Polymer Film using water Contact Angle measurements” Philadelphia. American Society for Testing and Material.

[37] ญาดา จันทรมบูรณ์. 2549. “ผลของการบรรจุที่มีต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาพริกชี้หูสด.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[38] ณัฐริกา ใจสมบูรณ์. 2556. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลแอลดีพีอีด้วยอีวีเอและซีโอไลต์เอ.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[39] Bessetti, JG. 2012. **Consumable analytical plasticware comprising high solubility plastics.** [Online]. Available : <http://www.google.com/patents/EP2525909A1?cl=en&hl=th>. Access on 29 January 2016.

[40] Bennett, G.S. 1998. **Thermosettable Pressure Sensitive Adhesive.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[Online]. Available :

<http://www.google.com/patents/WO1998021287A1?cl=en&hl>.

Access on 29 January 2016.

[41] Burke, J. 1984. **Solubility Parameters : Theory and Application.**

[Online]. Available :

<http://cool.conservationus.org/byauth/burke/solpar/solpar2.html>.

Access on 29 January 2016.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

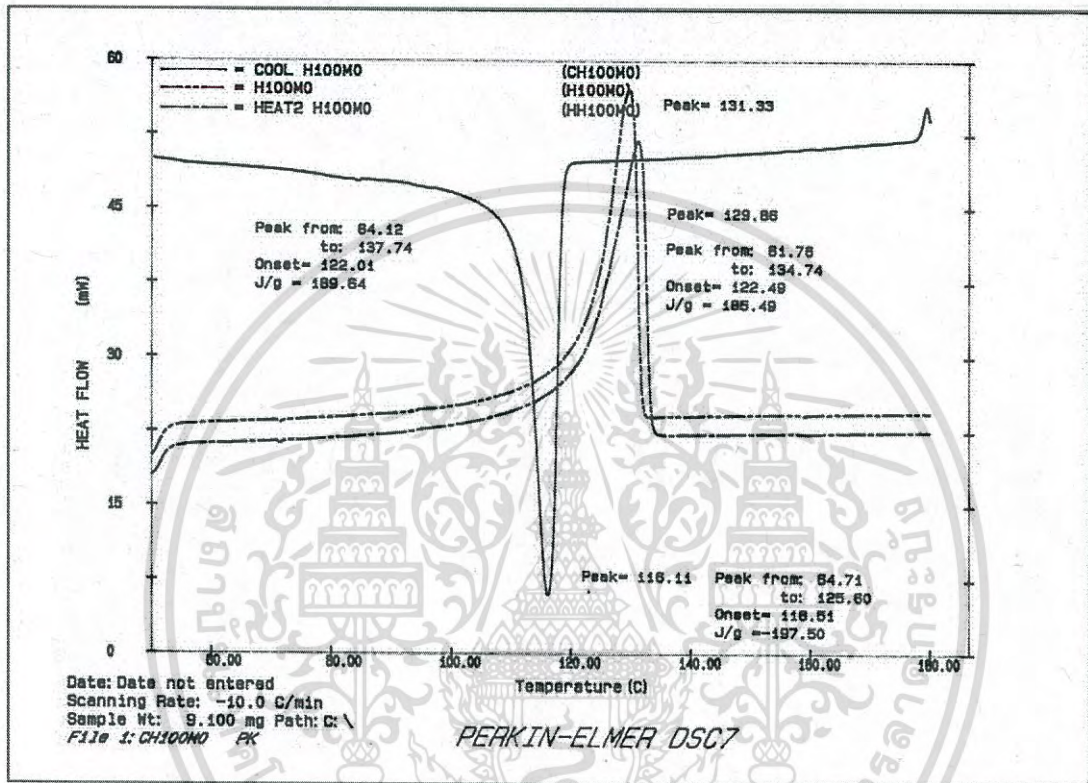


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

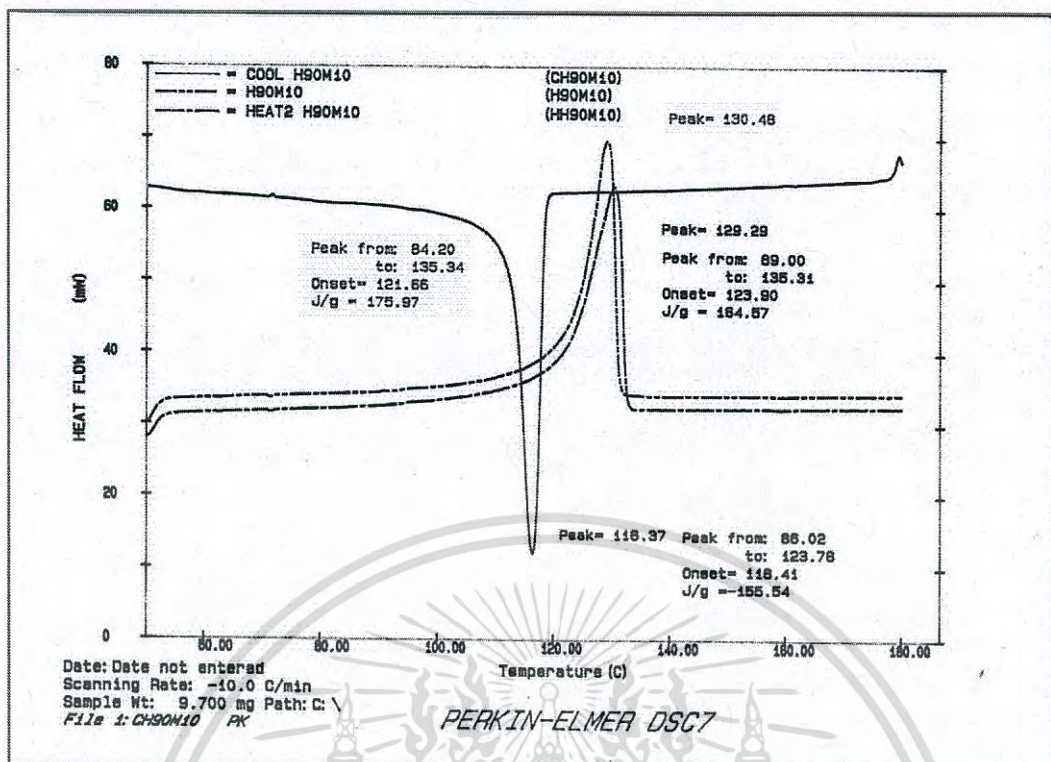
การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter : DSC

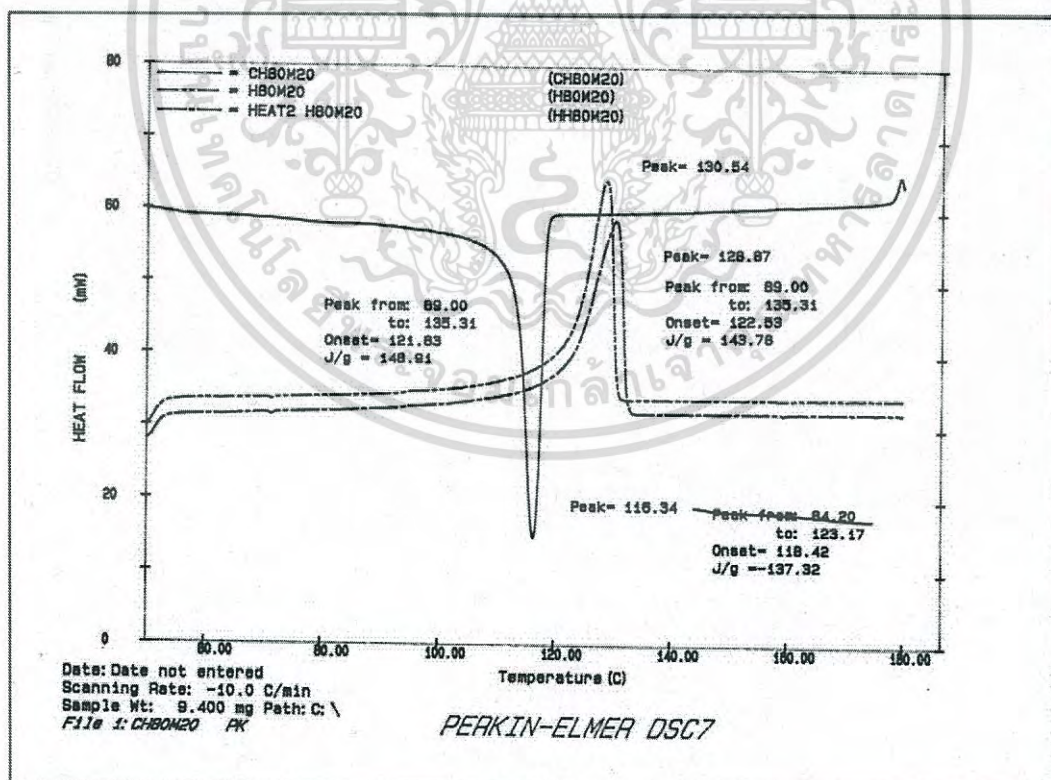


รูปที่ ก.1 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H100M0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

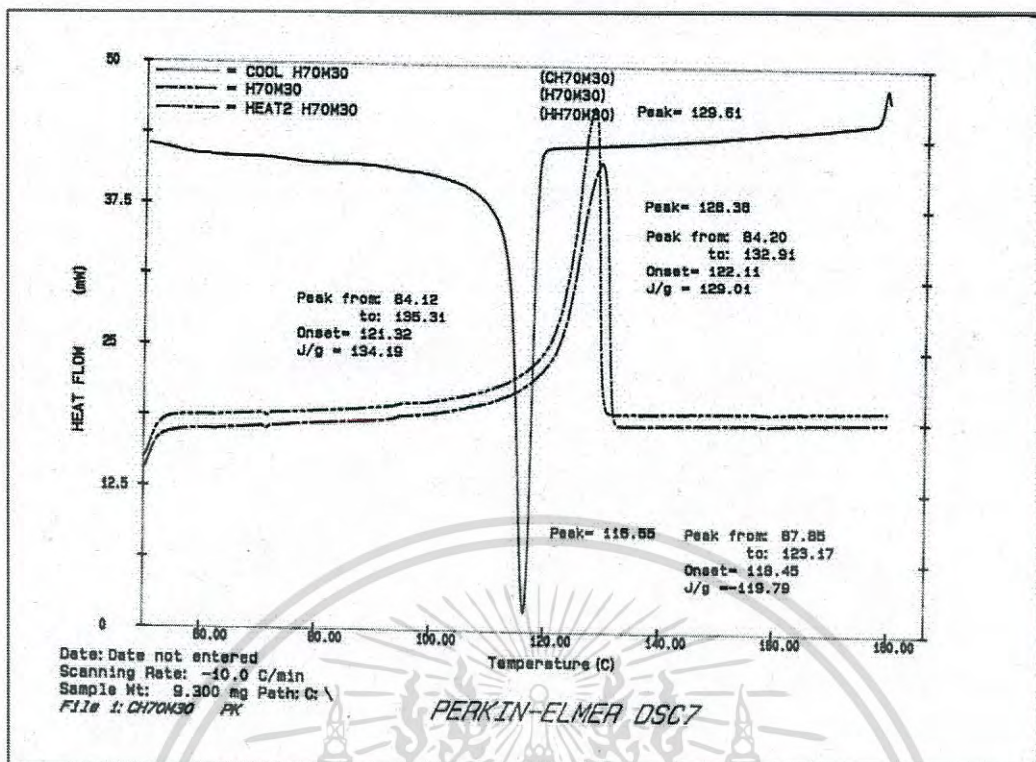


รูปที่ ก.2 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H90M10

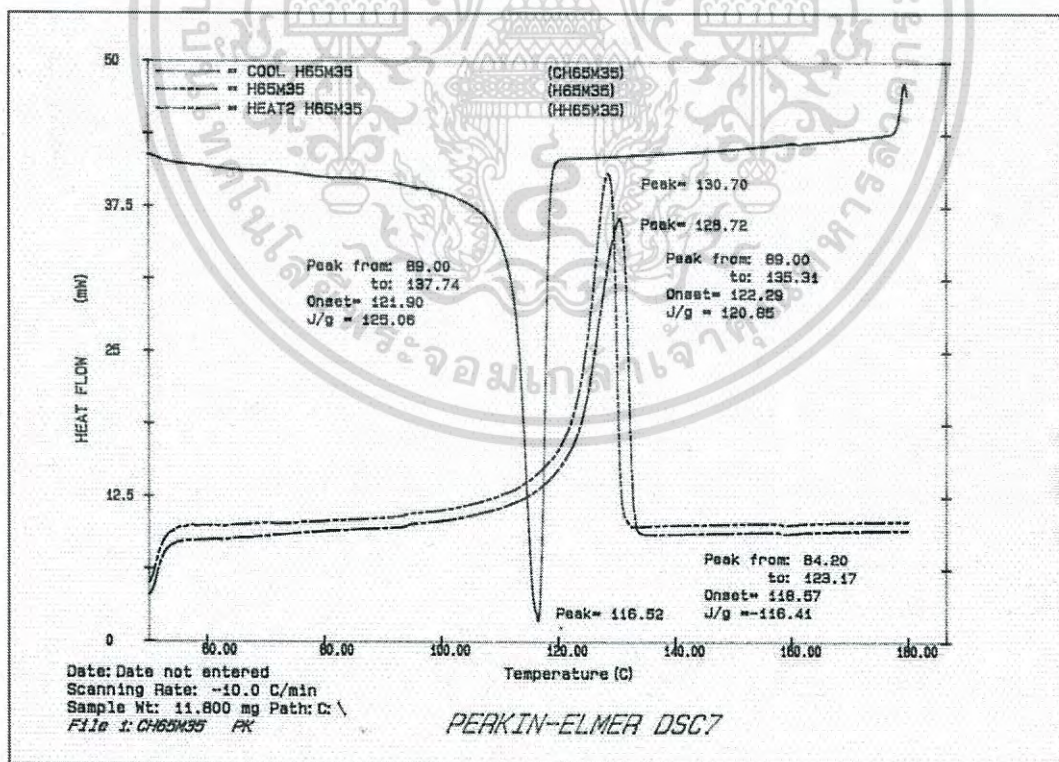


รูปที่ ก.3 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H80M20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

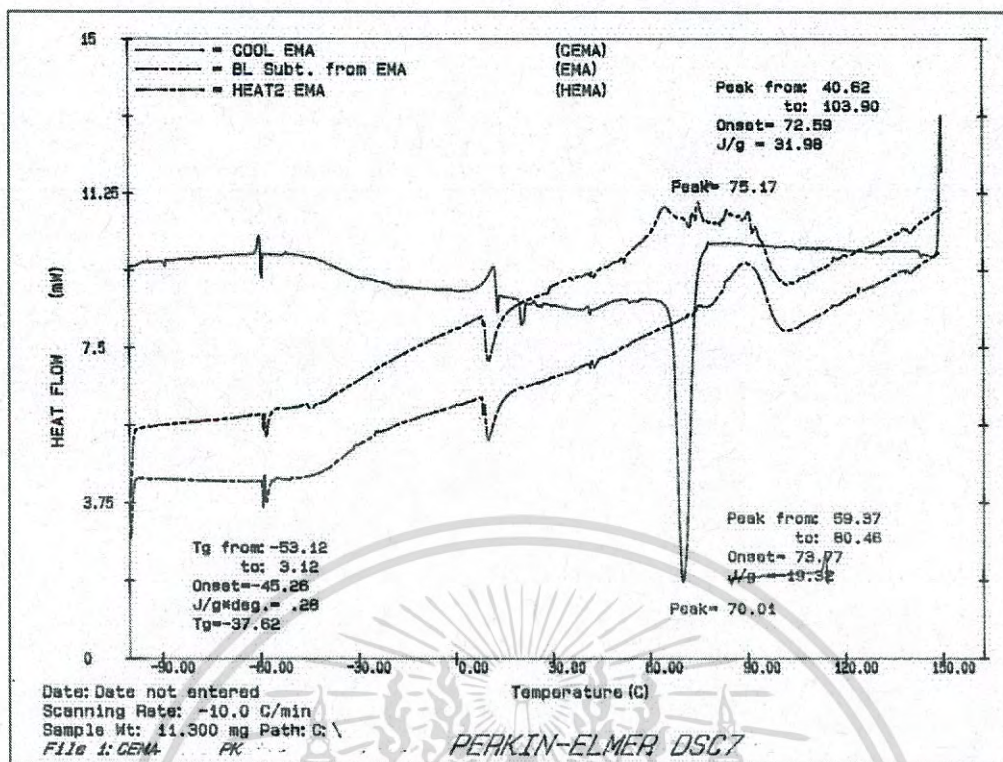


รูปที่ ก.4 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H70M30



รูปที่ ก.5 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H65M35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.6 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ EMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง

| Samples | Thickness (μm) | WVTR ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$) | WVP ($\text{g} \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$) |
|---------|--------------------------------|--|---|
| H100M0 | 19.4 | 15.1 | 293 |
| H90M10 | 19.5 | 26.8 | 523 |
| H80M20 | 26.0 | 33.9 | 881 |
| H70M30 | 29.0 | 38.0 | 1102 |
| H65M35 | 22.0 | 58.7 | 1291 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การทดสอบมุมสัมผัส

ตารางที่ ค.1 ค่ามุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิวภาคตัดขวางของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม

| Sample | Contact angle (degree) |
|--------|------------------------|
| H100M0 | 92.8±2.1 |
| H90M10 | 90.9±1.6 |
| H80M20 | 88.2±4.8 |
| H70M30 | 86.2±4.4 |
| H65M35 | 85.0±4.0 |
| EMA | 72.6±5.9 |






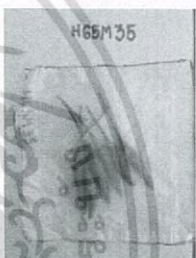








เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

ตารางที่ ง.1 บรรจุภัณฑ์ระหว่างบรรจุพริกชี้หนูสดในฟิล์ม HDPE/EMA

| | | | |
|-------------------------------------|---|---|--|
| บรรจุใน บรรจุ ภัณฑ์ 0 วัน |  |  |  |
| บรรจุใน บรรจุ ภัณฑ์ 4 วัน |  |  |  |
| บรรจุใน บรรจุ ภัณฑ์ 10 วัน |  |  |  |
| บรรจุใน บรรจุ ภัณฑ์ 20 วัน |  |  |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างในการคำนวณ

- หาปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (ในแต่ละวัน) จากบรรจุภัณฑ์ H100M0-1 โดยหาได้จาก
ปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากถุงบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (ในแต่ละวัน) (%)

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

$$= \frac{[(5.0321 + 0.3211) - 5.1121] \times 100}{5.0321}$$

$$= 4.79$$

- หาปริมาณไอน้ำที่กักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (ในวันที่ 20) จากบรรจุภัณฑ์ H100M0-1 โดยหาได้จาก
ปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (ในวันที่ 20) (%)

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

$$= \frac{[5.1121 - (4.6973 + 0.3211)] \times 100}{5.0321}$$

$$= 1.86$$

ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสุตร H100M0

| ตัวอย่าง | น้ำหนักบรรจุภัณฑ์ (g) | ก่อนเก็บรักษา | | หลังเก็บรักษา | | ปริมาณไอน้ำกักเก็บ (%) |
|----------|-----------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|------------------------|
| | | น้ำหนักพริก (g) | น้ำหนักรวม (g) | น้ำหนักพริก (g) | น้ำหนักรวม (g) | |
| H100M0-1 | 0.3211 | 5.0321 | 5.3532 | 4.6973 | 5.1121 | 1.86 |
| H100M0-2 | 0.3545 | 5.0056 | 5.3601 | 4.6780 | 5.1135 | 1.62 |
| เฉลี่ย | | | | | | 1.74 |

ตารางที่ ง.3 น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสุตร H100M0 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์

| จำนวนวันที่เก็บรักษา (วัน) | น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ H100M0-1 | น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ H100M0-2 | ค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์ (%) |
|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|
| 0 | 5.3532 | 5.3601 | 0.00 |
| 2 | 5.3360 | 5.3390 | 0.38 |
| 4 | 5.3128 | 5.3157 | 0.84 |
| 6 | 5.2877 | 5.2918 | 1.33 |
| 8 | 5.2640 | 5.2657 | 1.83 |
| 10 | 5.2492 | 5.2505 | 2.13 |
| 12 | 5.2262 | 5.2285 | 2.58 |
| 14 | 5.1968 | 5.2030 | 3.12 |
| 16 | 5.1754 | 5.1673 | 3.69 |
| 18 | 5.1472 | 5.1446 | 4.20 |
| 20 | 5.1121 | 5.1135 | 4.86 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๔.4 ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร H80M20

| ตัวอย่าง | น้ำหนักบรรจุภัณฑ์ (g) | ก่อนเก็บรักษา | | หลังเก็บรักษา | | ปริมาณไอน้ำกักเก็บ (%) |
|----------|-----------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|------------------------|
| | | น้ำหนักพริก (g) | น้ำหนักรวม (g) | น้ำหนักพริก (g) | น้ำหนักรวม (g) | |
| H80M20-1 | 0.3302 | 5.0286 | 5.3588 | 4.2710 | 4.6292 | 0.56 |
| H80M20-2 | 0.3609 | 4.9998 | 5.3607 | 4.4458 | 4.8248 | 0.36 |
| เฉลี่ย | | | | | | 0.46 |

ตารางที่ ๔.5 น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร H80M20 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์

| จำนวนวันที่เก็บรักษา (วัน) | น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ H80M20-1 | น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ H80M20-2 | ค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์ (%) |
|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|
| 0 | 5.3588 | 5.3607 | 0.00 |
| 2 | 5.2953 | 5.3105 | 1.13 |
| 4 | 5.2210 | 5.2636 | 2.34 |
| 6 | 5.1491 | 5.2076 | 3.62 |
| 8 | 5.0853 | 5.1589 | 4.74 |
| 10 | 5.0213 | 5.1162 | 5.80 |
| 12 | 4.9433 | 5.0846 | 6.89 |
| 14 | 4.8591 | 5.0139 | 8.44 |
| 16 | 4.7898 | 4.9493 | 9.77 |
| 18 | 4.7222 | 4.8804 | 11.13 |
| 20 | 4.6292 | 4.8248 | 12.61 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๖.6 ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร H65M35

| ตัวอย่าง | น้ำหนักบรรจุภัณฑ์ (g) | ก่อนเก็บรักษา | | หลังเก็บรักษา | | ปริมาณไอน้ำที่กักเก็บ (%) |
|----------|-----------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|---------------------------|
| | | น้ำหนักพริก (g) | น้ำหนักรวม (g) | น้ำหนักพริก (g) | น้ำหนักรวม (g) | |
| H65M35-1 | 0.3901 | 5.0151 | 5.4052 | 4.1797 | 4.5884 | 0.37 |
| H65M35-2 | 0.3949 | 5.0112 | 5.4061 | 4.3560 | 4.7717 | 0.42 |
| เฉลี่ย | | | | | | 0.39 |

ตารางที่ ๖.7 น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ของฟิล์มสูตร H65M35 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์

| จำนวนวันที่เก็บรักษา (วัน) | น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ | | ค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์ (%) |
|----------------------------|-------------------------|----------|---|
| | H65M35-1 | H65M35-2 | |
| 0 | 5.4052 | 5.4061 | 0.00 |
| 2 | 5.3252 | 5.3516 | 1.34 |
| 4 | 5.2366 | 5.2833 | 2.91 |
| 6 | 5.1695 | 5.2322 | 4.09 |
| 8 | 5.0924 | 5.1726 | 5.45 |
| 10 | 5.0082 | 5.1094 | 6.92 |
| 12 | 4.9242 | 5.0608 | 8.24 |
| 14 | 4.8352 | 4.9867 | 9.87 |
| 16 | 4.7679 | 4.9191 | 11.21 |
| 18 | 4.6756 | 4.8462 | 12.86 |
| 20 | 4.5884 | 4.7717 | 14.47 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

Solubility Parameters

ตารางที่ จ.1 ค่า Solubility parameter ของ Polymer

| Polymer | Solubility parameter (cal/cm^3) ^{1/2} |
|-------------------|---|
| Polyethylene [39] | 7.90 |
| EMA [40] | 9.72 |

ตารางที่ จ.2 ค่า Solubility parameter ของ Solvent

| Solvent [41] | Solubility parameter (cal/cm^3) ^{1/2} |
|-----------------------|---|
| n-Hexane | 7.24 |
| Freon® TF | 7.25 |
| 1,1,1 Trichloroethane | 8.57 |
| Cyclohexane | 8.18 |
| Xylene | 8.85 |
| Ethyl acetate | 9.10 |
| Toluene | 8.91 |
| Tetrahydrofuran | 9.52 |
| Benzene | 9.15 |
| Chloroform | 9.21 |
| Trichloroethylene | 9.28 |
| Methyl ethyl ketone | 9.27 |
| Acetone | 9.77 |
| Diacetone alcohol | 10.18 |
| Pyridine | 10.61 |
| Dimethylformamide | 12.14 |
| Ethyl alcohol | 12.92 |
| Glycerol | 21.10 |
| Water | 23.50 |