



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
และเอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์

Properties of polymer blend film from high density polyethylene and
ethylene methyl acrylate copolymer

นางสุภารัตน์ รักขลธิ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย
จากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2560
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

และเอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์

Properties of polymer blend film from high density polyethylene and
ethylene methyl acrylate copolymer

นางสุภารัตน์ รักชลธี

เลขหมู่
เลขทะเบียน 149351
รับ เดือน 3 พ.ค. 2561

b. 12883207
i.

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย
จากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2560
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและ
เอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2560 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560

หัวหน้าโครงการวิจัย

นางสุภารัตน์ รักชลธิ์ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยเอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (EMA) เพื่องานบรรจุภัณฑ์ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสด โดยศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม HDPE:EMA เป็น 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 65:35 ทำการผสมสูตรพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป ฟิล์มที่ได้ถูกนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องคิฟเพอเรนเซียสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ เครื่องทดสอบมุมสัมผัส และเครื่องทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ จากนั้นเลือกฟิล์มนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อห่อพริกชี้หนูสด จากการศึกษาพบว่า EMA มีการกระจายตัวดีในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และปริมาณผลึก HDPE ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณ EMA ที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของ EMA ทำให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม HDPE/EMA มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์ม HDPE โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ EMA เพิ่มขึ้น แสดงด้วยค่าดัชนีคาร์บอนิลที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสของน้ำที่พื้นผิวพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง และสอดคล้องกับค่าการซึมผ่านไอน้ำที่มีค่ามากขึ้นตามปริมาณ EMA เนื่องจาก EMA ช่วยเพิ่มวฏภาค ออสซิลันและความมีขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และเมื่อใช้ฟิล์ม HDPE/EMA ทำเป็นบรรจุภัณฑ์พบว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีปริมาณ EMA สูง (H65M35) มีมวลไอน้ำกักเก็บสะสมน้อย จึงลดโอกาสในการเน่าเสียจากไอน้ำที่ได้จากการหายใจทำให้สามารถคงคุณภาพของพริกชี้หนูสดได้นานขึ้น

คำสำคัญ : ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ฟิล์มบรรจุภัณฑ์เอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Properties of polymer blend film from high density polyethylene and ethylene methyl acrylate copolymer

Researcher: Mrs. Suparat Rukchonlatee

Faculty: Science

Department: Chemistry

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 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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง โครงการ สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเอทิลีนเมทิลอะคริเลต โคพอลิเมอร์ (Properties of polymer blend film from high density polyethylene and ethylene methyl acrylate) ดำเนินงาน ได้เป็นอย่างดี โดยได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๐ (สัญญาเลขที่ 2560 01 05 045) ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณบุญระรักษ์ โคสุต ปาลิตา ช่วยสกุล และภัสรา บัวแก้ว นักศึกษาปริญญาตรีนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาเคมีทุกท่านในการอำนวยความสะดวก และช่วยให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี



นางสุภารัตน์ รักขลธิ
หัวหน้าโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
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	11
2.2.4 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ	15
2.2.4.1 การตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ	15
2.2.5 การใช้ฟิล์มพลาสติกในการเก็บรักษา	16
2.3 พอลิเอทิลีน	18
2.3.1 สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีน	18
2.3.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	20
2.3.2.1 ลักษณะทั่วไปของ HDPE	20
2.3.2.2 สมบัติทั่วไปของ HDPE	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2.3 การประยุกต์ใช้งาน	22
2.3.3 ความแข็งแรงดึงของถุงพลาสติกที่ผลิตจาก PE	23
2.4 เอทิลีนเมทิลอะคริเลต โคพอลิเมอร์	24
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของเอทิลีนเมทิลอะคริเลต โคพอลิเมอร์	24
2.4.2 สมบัติบางประการของ EMA	24
2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน	25
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	29
3.1 สารเคมี	29
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	30
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	31
3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์	31
3.3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์ม โดยเทคนิคการเป่าฟิล์ม	31
3.3.3 ความหนาของฟิล์ม	32
3.3.4 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก	32
3.3.5 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม	33
3.3.6 การศึกษาการกระจายตัวของเอทิลีนเมทิลอะคริเลต โคพอลิเมอร์.....	33
3.3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล	34
3.3.7.1 สมบัติความแข็งแรงดึง.....	34
3.3.7.2 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด	35
3.3.8 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ	35
3.3.9 การทดสอบมุมสัมผัสผิวน้ำ	35
3.3.10 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์.....	36
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	38
4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA	38
4.1.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม HDPE/EMA.....	38
4.1.2 การศึกษาผลของการกระจายตัวของ EMA ในฟิล์ม HDPE/EMA.....	40
4.1.3 สมบัติทางความร้อน.....	44
4.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
 4.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล..... 44
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.5 การทดสอบมุมสัมผัสน้ำ.....	47
4.1.6 การทดสอบการซึมผ่าน ใอน้ำ.....	48
4.2 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์	49
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	54
เอกสารอ้างอิง	55
ภาคผนวก - สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย	59
ประวัตินักวิจัย	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	12
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	14
2.9 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ	16
2.10 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดต่างๆ	22
2.11 ระยะระหว่างปากจับ และอัตราการเคลื่อนที่ของปากจับ	24
3.1 สมบัติบางประการของ HDPE	29
3.2 สมบัติบางประการของ EMA	29
3.3 พอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมดโดยน้ำหนัก	31
4.1 สูตรพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA และความหนาฟิล์ม	38
4.2 อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T _m), อุณหภูมิการตกผลึก (T _c) และเปอร์เซ็นต์ความ เป็นผลึกของ HDPE	44
4.3 ปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้ต่อน้ำหนักฟริก 1 กรัม หลังการเก็บรักษา 20 วัน	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้ก๊าซ O ₂ และไม่ใช่ก๊าซ O ₂	6
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการไหลกับความสามารณในการขึ้นรูป และสมบัติทางกายภาพ	19
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลกับเศษส่วนโดยมวล	20
2.4 โครงสร้างของ HDPE	20
2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ PE	21
2.6 โมเดลแสดงความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	21
2.7 โครงสร้างของ EMA	24
3.1 บริเวณที่วัดความหนาของฟิล์ม	32
3.2 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงดึง	34
3.3 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาด	35
4.1 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม HDPE/EMA ด้วยเทคนิค FT-IR	39
4.2 ค่าดัชนีการบอณิตของฟิล์ม HDPE/EMA	40
4.3 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์ม HDPE/EMA ที่มีการสกัดวัฏภาคของ EMA ออก (a,b).....	41
4.3 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์ม HDPE/EMA ที่มีการสกัดวัฏภาคของ EMA ออก (c,d).....	42
4.3 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์ม HDPE/EMA ที่มีการสกัดวัฏภาคของ EMA ออก (e).....	43
4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HDPE/EMA (a,b)	45
4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HDPE/EMA (c,d)	46
4.5 ค่ามุมสัมผัสน้ำของพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA เมื่อมี EMA ในปริมาณต่างๆ	47
4.6 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE/EMA เมื่อมี EMA ปริมาณต่างๆ	48
4.7 ปริกขี้หนูสดที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ก่อนและหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C โดยมี ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40%	50
4.8 ปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์ในระยะเวลา 20 วัน	51
4.9 ปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์ ณ วันที่ 4, 10 และ 20	52
4.10 ปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์ และปริมาณไอน้ำกักเก็บภายใน บรรจุภัณฑ์เทียบกับปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้อ่อน้ำหนักพริก 1 กรัม.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ในท้องตลาดมีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน และความเหมาะสมของสินค้าที่ต้องการบรรจุ โดยทั่วไปบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการบรรจุสินค้าที่มีขนาดใหญ่ หรือมีปริมาณมาก อาจเลือกใช้เป็นตะกร้าพลาสติกเพื่อเสริมความแข็งแรง ความปลอดภัยกับสินค้า และสามารถนำมาใช้ได้อีกในภายหลัง สำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อใช้ในการบรรจุสินค้าที่มีขนาดเล็กหรือมีปริมาณน้อย อาจเลือกใช้เป็นถาดรองสินค้าและมีการห่อพลาสติกหุ้มด้านบนสินค้าหรือใช้เป็นฟิล์มห่อหุ้มรอบสินค้า นอกจากนี้การใช้ถุงพลาสติกสำหรับการบรรจุสินค้าโดยตรงยังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก

การเลือกชนิดของถุงพลาสติกที่นำมาใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของสินค้าที่นำมาบรรจุ เช่น อาหารแห้ง อาหารกึ่งสำเร็จรูปต้องการถุงพลาสติกที่ขึ้นรูปจากฟิล์มที่สามารถป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซ ไอน้ำ และแสงแดดได้ ในขณะที่อาหารสดประเภทเนื้อสัตว์ต้องการฟิล์มที่สามารถให้ออกซิเจนแพร่ผ่านเข้าออกได้ และผลไม้บางชนิดต้องการฟิล์มที่สามารถให้ก๊าซเอทิลีนแพร่ออกไปได้ในทำนองเดียวกันผักหลังจากการเก็บเกี่ยวจะมีการหายใจและการคายน้ำอยู่ ซึ่งน้ำที่มาจาก การคายน้ำของผักถูกสะสมอยู่ในบรรจุภัณฑ์ หากมีน้ำในปริมาณมากจะนำไปสู่การเน่าเสียของสินค้าเร็วขึ้น

พอลิเอทิลีน (Polyethylene) เป็นพลาสติกที่นิยมอย่างมากในการทำบรรจุภัณฑ์ทั้งในรูปของขวด ก่อง ถัง ถุง ฯลฯ เนื่องจากมีข้อดีคือ ขึ้นรูปได้ง่าย ราคาถูก ไม่เป็นพิษ จึงเหมาะต่อการนำมาทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร แต่โดยทั่วไปแล้วพอลิเอทิลีนมีการซึมผ่านไอน้ำได้ต่ำเนื่องจากมีความเป็นผลึกสูงและไม่มีข้อทำให้ไม่เหมาะในการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อบรรจุผักสด โดยส่วนใหญ่บรรจุภัณฑ์ที่นำมาบรรจุผักสดในปัจจุบันจึงมีการเจาะรูเพื่อช่วยในการระบายไอน้ำที่ผักคายน้ำออกมาแต่การเจาะรูนั้นทำให้บรรจุภัณฑ์ขาดความสวยงาม ความแข็งแรงลดลง และทำให้จุลินทรีย์ในอากาศสัมผัสกับผักได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะนำมาสู่การเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของบรรจุภัณฑ์โดยไม่ต้องทำการเจาะรูที่บรรจุภัณฑ์

งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาและพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อให้ได้ฟิล์มพอลิเอทิลีนที่มีการซึมผ่านไอน้ำได้ดี โดยนันทวรรณ ม่วงมี [1] ได้ศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มีการปรับปรุงด้วยเอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โคอพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) ผสมกับซีโอไลต์เอ พบว่า EVA สามารถกระจายตัวได้ดีใน LDPE

และเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA และซีโอไลต์เอ ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้นเนื่องจาก

เอกลศาสตร์ของซีโอไลต์เอที่มีรูพรุนขนาดเล็กสามารถดูดซับไอน้ำได้ดีกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนธรรมดา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความมีขี้ของซีโอไลต์เอและการที่วัฏภาคอสัณฐานที่มีขี้ของ EVA เพิ่มขึ้น จากงานวิจัยที่ศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันของ โคลพอลิเมอร์ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE โดยใช้เอทิลีน ไวนิล-แอลกอฮอล์ โคลพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl alcohol copolymer, EVOH) และ EVA [2] ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของ LDPE/EVOH เปรียบเทียบกับ LDPE/EVA โดยควบคุมจำนวนหมู่ฟังก์ชันให้ใกล้เคียงกัน พบว่า EVOH และ EVA มีการกระจายตัวในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ดี และฟิล์มทั้งสองชนิดมีการซึมผ่านไอน้ำที่ไม่แตกต่างกันเนื่องจากฟิล์ม LDPE/EVOH เกิดการแข่งขันกันระหว่างอสัณฐานวิทยาและความมีขี้ กล่าวคือ EVOH มีขี้สูงกว่า EVA เมื่อปริมาณ EVOH เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงจึงเพิ่มขึ้นเนื่องจาก EVOH มีพันธะไฮโดรเจนซึ่งสามารถเกิดผลึกได้ แต่ไม่ทำให้การซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากการซึมผ่านไอน้ำจะผ่านวัฏภาคอสัณฐานเป็นหลัก ดังนั้นพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับ LDPE ต้องเป็นพอลิเมอร์ที่มีขี้และมีความเป็นอสัณฐานสูง

จิตินันท์ ศิริจันทร์พันธ์ [3] ศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีผลต่อการซึมผ่านไอน้ำโดยมีการควบคุมให้ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้ให้ใกล้เคียงกัน โดยเลือกใช้เอทิลีนเมทิลอะคริเลต โคลพอลิเมอร์ (Ethylene methyl acrylate copolymer, EMA) เป็น โคลพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมกับ LDPE เนื่องจาก EMA มีอุณหภูมิในการขึ้นรูปและมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า EVA และได้ทำการเปรียบเทียบกับ EVA และ เอทิลีนเอทิลอะคริเลต โคลพอลิเมอร์ (Ethylene ethyl acrylate copolymer, EEA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขี้และมีหมู่ข้างเคียง (Side group) ที่มีความเกะกะมากกว่า EMA พบว่า โคลพอลิเมอร์ทุกตัว (EMA, EVA และ EEA) สามารถกระจายตัวได้ดีในวัฏภาค LDPE ส่งผลให้ฟิล์มเกิดการซึมผ่านไอน้ำได้ดี และมีการซึมผ่านไอน้ำดีขึ้นเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอ

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 เหมาะสำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการรับน้ำหนักที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม HDPE มีความเป็นผลึกสูงกว่า LDPE ซึ่งส่งผลให้การซึมผ่านไอน้ำลดลง

งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ EMA เพื่อปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสำหรับบรรจุภัณฑ์ผักสดโดยเตรียมฟิล์มจากเทคนิคการเป่าฟิล์ม เพื่อให้มีความต่อเนื่องและอัตราการผลิตสูงขึ้น

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. ขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ 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. ศึกษาสมบัติความมีขั้วด้วยการทดสอบมุมสัมผัสด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส
7. ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
8. ศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติการซึมผ่านไอน้ำ
9. ศึกษาทดลองการยืดอายุสำหรับเก็บรักษาพริกขี้หนูสด โดยทำเป็นบรรจุภัณฑ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตฟิล์มที่มีการซึมผ่านไอน้ำได้ดี มาใช้เป็นถุงบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสดเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้น และนำความรู้ที่ได้ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงฟิล์มพอลิเมอร์อื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว

หลังการเก็บเกี่ยวผลิตผลจะถูกตัดขาดจากแหล่งน้ำที่เคยได้รับจากราก แต่การสูญเสียน้ำเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา เนื่องจากผลิตผลนั้นยังคงมีการหายใจและคายน้ำอยู่เหมือนกับขณะที่อยู่บนต้น การสูญเสียน้ำนอกจากจะทำให้น้ำหนักลดลงไปแล้ว ยังทำให้รูปร่างลักษณะของผลิตผลนั้นเปลี่ยนไปในทางที่แย่ง ทำให้รสชาติและคุณภาพของผลิตผลนั้นๆ เปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นการป้องกันการสูญเสียน้ำเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่ง การสูญเสียน้ำออกจากพืชนั้นขึ้นกับความชื้นบรรยากาศภายนอก ความชื้นนี้จะแปรผันไปตามสภาพแวดล้อม จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มาของน้ำและอุณหภูมิ ดังนั้นหลังการเก็บเกี่ยวควรมีวิธีการเก็บรักษาที่ดี เพราะการเก็บรักษาเป็นวิธีการสำคัญในการยืดอายุผลิตผลทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยวให้มีอายุการใช้ประโยชน์ได้นานขึ้น โดยที่ยังมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ในผลไม้บางชนิด เช่น แอปเปิ้ล สามารถเก็บเกี่ยวไว้เพื่อรอการจำหน่ายในท้องตลาดได้ตลอดทั้งปี นอกจากนี้การเก็บรักษายังมีประโยชน์ในเรื่องของการชะลอไม่ให้ผลิตผลออกสู่ตลาดมากเกินไป ทำให้ราคาผลิตผลไม่ตกต่ำรวมทั้งสามารถเก็บรักษาไว้เพื่อจำหน่ายในช่วงตลาดขาดแคลน ทำให้ขายได้ราคาดีอีกด้วย

ในการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรนั้นจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานเพียงใดเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้ [5]

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

- อุณหภูมิ มีความสัมพันธ์ที่ใกล้ชิดกับความชื้นและการสูญเสียน้ำ ทั้งนี้เพราะสารทุกอย่างมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะของเหลวและก๊าซ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนไหวก็ไม่ช้าลงสักทีเดียว อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโมเลกุลจะมีมาก โอกาสของน้ำที่จะหลุดออกจากผักและผลไม้จึงมีค่าสูงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามความดันไอน้ำของอากาศที่อยู่รอบ ๆ ไม่ได้สูงตามไปด้วย เพราะมีปริมาณโมเลกุลของน้ำอยู่เท่าเดิม แต่ไม่ได้ถูกจำกัดปริมาณเหมือนในผลไม้ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำระหว่างภายในผลิตผลกับภายนอกผลิตผลจึงเพิ่มสูงขึ้น โอกาสที่ไอน้ำจะออกจากผลิตผลสู่ภายนอกจึงมีมากขึ้นจนกระทั่งอากาศรอบ ๆ อิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงไอน้ำจะควบแน่นเป็นหยดน้ำอยู่ตามภาชนะบรรจุหรือผนังห้องเก็บรักษา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีกอากาศจะรับไอน้ำจากผลิตผลได้อีกเรื่อย ๆ ทำให้ผลิตผลสูญเสียไอน้ำไปมาก สภาพในที่เก็บเกี่ยวรักษาจะขึ้นและทำให้ผลิตผลเน่าเสียได้ง่าย

- การถ่ายเทอากาศ ในระหว่างการเก็บรักษาจำเป็นต้องมีการระบายถ่ายเทอากาศเนื่องจากสภาพบรรยากาศปกติประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ซึ่งชนิดที่มีความสำคัญและมีความจำเป็นต่อการหายใจของผลิตผลคือ ก๊าซออกซิเจน (O_2) ฉะนั้นสภาพของการเก็บรักษาที่ดีจะต้องมีการถ่ายเทของอากาศที่ดี

2.1.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของพืช

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

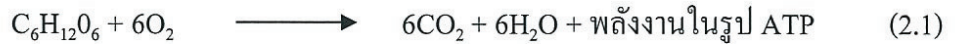
2.1.1.1 การหายใจ [6]

ผลิตผลทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวจะมีการหายใจอย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลาที่ยังมีชีวิตอยู่เนื่องจากสิ่งมีชีวิตต้องการพลังงานในการดำเนินปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลง ที่สำคัญพลังงานที่ได้มานั้นมาจากการหายใจ ซึ่งอัตราการหายใจของผักและผลไม้จะถูกเก็บเกี่ยวในระยะเวลาที่เหมาะสมกับความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งผักและผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูงหลังการเก็บเกี่ยวมักเสียเร็วกว่าผักและผลไม้ที่มีอัตราการหายใจต่ำ ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีแล้ว ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพและอายุการเก็บรักษา จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงการปฏิบัติต่อผลิตผลภายหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ผลิตผลมีความสมดุลในการรักษาสภาพหรือลดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีให้น้อยที่สุดที่ทำให้ผลิตผลมีคุณภาพการเก็บรักษาได้นานที่สุด ผลิตผลสดที่ยังมีชีวิตอยู่มีการหายใจตลอดเวลา ซึ่งการหายใจของผลิตผลสดนั้นมี 3 ขั้นตอน ดังนี้

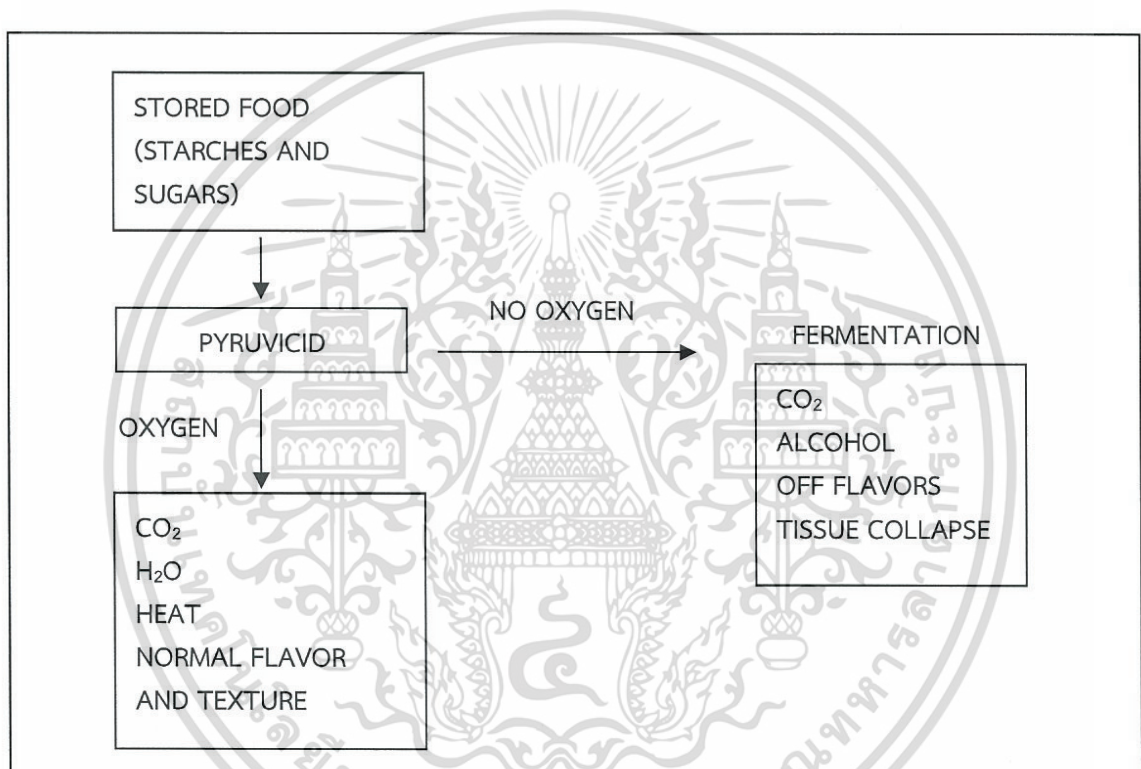
- การย่อยคาร์โบไฮเดรตพวกที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลาย ๆ โมเลกุลให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นให้เป็นกรดไฟรูวิกะโยชนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไพรูวิกและกรดอินทรีย์อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นให้กลายเป็นก๊าซ CO₂ น้ำ และพลังงาน ซึ่งเกิดในการหายใจของผลิตผลหรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ สรุปได้เป็นสมการอย่างง่ายคือ



โดยที่การหายใจในสภาพที่มีก๊าซ O₂ สมบูรณ์ได้ปริมาณ ATP (Adenosine triphosphate) ต่อโมเลกุลน้ำตาลมากกว่าการหายใจในสภาพที่มีก๊าซ O₂ น้อยหรือไม่มีก๊าซ O₂



ภาพที่ 2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้ก๊าซ O₂ และไม่ใช้ก๊าซ O₂ [6]

รูปแบบการหายใจ (Respiratory pattern) [7] แม้ว่าผลไม้ชนิดต่าง ๆ จะมีวิธีและกระบวนการหายใจที่เหมือนกันก็ตาม แต่อัตราและรูปแบบของการหายใจของผลไม้หลังเก็บเกี่ยวมีความแตกต่างกัน ผลไม้บางชนิดอาจถูกเก็บเกี่ยวมาตั้งแต่ยังไม่สุก และเมื่อเก็บเกี่ยวมาแล้วสามารถทำให้ผลไม้ที่สุกหรือมีพัฒนาการขั้นต่อไปที่ปกติได้ เช่น มะม่วง กัลย หุเรียน เป็นต้น แต่ผลไม้บางอย่าง เช่น ส้ม ลิ้นจี่ ลำไย จำเป็นต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลไม้เหล่านั้นมีการสุกตั้งแต่อยู่บนต้น หากเก็บเกี่ยวมาก่อน ผลไม้เหล่านั้นอาจมีพัฒนาการที่ผิดปกติไปจากลักษณะการสุกของผลไม้ซึ่งมีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยวพันอย่างใกล้ชิดกับการหายใจ ทำให้สามารถแบ่งผลไม้ตามรูปแบบของการหายใจ ออกได้เป็น 2 กลุ่ม

1. ผลไม้ที่มีรูปแบบการหายใจแบบ Climacteric

ผลไม้พวก Climacteric เช่น กล้วย, มะละกอ, ฝรั่ง, มะเขือเทศ, ละมุด, แดงโม, มะม่วง, แอปเปิ้ล และบลูเบอร์รี่ (Blueberry) เป็นต้น ซึ่งมักเป็นผลไม้ที่มีการเก็บสะสมอาหารในรูปของแป้งหรือไขมัน และผลไม้เหล่านี้สามารถเก็บเกี่ยวมาแล้วนำมาทิ้งไว้ให้สุกได้เนื่องจากในระหว่างการสุก ผลของการหายใจจะเกิดการสร้างก๊าซเอทิลีน (Ethylene gas) ขึ้นภายในเนื้อเยื่อ ก๊าซเอทิลีนในเนื้อเยื่อที่ถูกสร้างขึ้นจะไปกระตุ้นให้ผลไม้มีการสุก ผลไม้เหล่านี้สามารถบ่มให้สุกได้โดยการใส่ก๊าซเอทิลีนจากภายนอก 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
สตอรี่	Bartlett	20	8	23
มะเขือเทศ	Grand rapids	18	8	20

2. ผลไม้ที่มีรูปแบบการหายใจแบบ Non climacteric

ผลไม้พวกที่มีรูปแบบการหายใจแบบ Non climacteric เช่น ส้ม, พริก, ทับทิม, สับปะรด, แดงกวา, องุ่น, มะนาว, เกรฟฟรุต, ราสเบอร์รี่ (Raspberry) และแบลคเบอร์รี่ (Blackberry) เป็นต้น ซึ่งเมื่อถูกเก็บเกี่ยวมาแล้วจะมีอัตราการหายใจค่อนข้างต่ำและคงที่ตั้งแต่เริ่มเข้าสู่ระยะการสุกไปจนกระทั่งผลไม้ที่นั้นชราและตายไป ผลไม้เหล่านี้ อาจมีการสะสมอาหารในรูปของน้ำตาลหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะที่ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยเหตุค่า
กรวดอันตราย ผลไม้พวกนี้ไม่สามารถนำมาทิ้งไว้ให้สุกได้เหมือนกับผลไม้พวก Climacteric ดังนั้น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 การคายน้ำจะผ่านทางปากใบเป็นส่วนใหญ่ ระหว่างการเก็บรักษาผักและผลไม้สดจะมีการคายน้ำตลอดเวลาทำให้น้ำหนักลดลง เสียเวลา ความกรอบลดลง คุณภาพของเนื้อสัมผัส กลิ่นและรสชาติลดลง การสูญเสียน้ำหนักจากการคายน้ำนี้มีเมื่อกำประมาณร้อยละ 3-10 ของน้ำหนักจะทำให้คุณภาพของผักและผลไม้สดไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยปัจจัยที่มีผลต่อการคายน้ำของผักและผลไม้สดมีดังนี้

- ปริมาณของออกซิเจนในอากาศ ปกติจะมีอยู่ร้อยละ 20-21 ซึ่งมากเกินไปสำหรับการหายใจ การเพิ่มปริมาณออกซิเจนจะมีผลต่อการหายใจน้อยมาก ในทางกลับกันการลดปริมาณออกซิเจนลงจะมีผลในการลดอัตราการหายใจด้วย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัย การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รอยชำรุด ซึ่งเกิดจากแรงกระทำต่างๆ เช่น แรงกด แรงกระแทก หรือเกิดจากการตัดหรือการหั่น จะเร่งอัตราการคายน้ำของพืช

- สัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของผักและผลไม้สด อัตราการคายน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น ดังนั้นผักใบทั่วไปจึงเหี่ยวเฉาได้ง่ายกว่าผลไม้และพืช

- สารเคลือบผิว ผักและผลไม้สดหลายชนิดมีไขเป็นสารเคลือบผิวตามธรรมชาติ ช่วยลดการคายน้ำทำให้เก็บรักษาได้นานขึ้น เช่น มะนาว องุ่น แอปเปิ้ล และส้ม เป็นต้น อย่างไรก็ตามไขธรรมชาติเหล่านี้มักถูกทำลายไปบ้างระหว่างเก็บเกี่ยวและเก็บรักษา พืชบางชนิดมีไขน้อยมากทำให้อัตราการคายน้ำของพืชยังสูงอยู่ จึงมีการใช้สารเคลือบหรือการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกหรือฟิล์มธรรมชาติกับพืชที่ต้องเก็บไว้นาน ๆ

- ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) ของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการสูญเสียน้ำของพืช อัตราการคายน้ำของพืชจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันไอน้ำในอากาศมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำสมดุลของพืช โดยปกติผักและผลไม้มีปริมาณน้ำในเซลล์ร้อยละ 80-95 หากความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์มากกว่าการคายน้ำจะลดลง โดยทั่วไปควรเก็บผักและผลไม้สดในที่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูง ๆ และที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามต้องระวังการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ง่าย ผักและผลไม้เน่าเสียเร็วขึ้น

2.1.1.3 การสุก [8]

การสุกเป็นการพัฒนาขั้นสุดท้ายของผลไม้ก่อนเข้าสู่ระยะร่วงโรย การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับไม่ได้ และเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนหลายขั้นตอน การเปลี่ยนแปลงของผลไม้สุกที่อาจพบได้คือ เมล็ดแก่เต็มที่ สีเปลี่ยนแปลง ผลหลุดออกจากขั้ว อัตราการหายใจเปลี่ยนแปลง เนื้อนิ่มลง มีการสร้างสารให้กลิ่นรส

2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้

ปัจจัยหนึ่งซึ่งช่วยทำให้ก๊าซต่าง ๆ ที่ล้อมรอบผลิตภัณฑ์เป็นไปตามที่ต้องการตลอดเวลาที่เก็บรักษาผลิตภัณฑ์คือ ภาชนะบรรจุ สมบัติที่สำคัญของวัสดุบรรจุหรือภาชนะบรรจุที่ต้องพิจารณามีดังนี้

2.2.1 การซึมผ่านของก๊าซ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซ (Gas permeability) เพื่อเลือกชนิดของวัสดุที่นำมาใช้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ ชนิดของผลิตภัณฑ์ อายุการเก็บรักษา และสภาวะการเก็บรักษา โดยทั่วไปเมื่อต้องการใช้วัสดุที่ป้องกันก๊าซได้ดีมาก ควรเลือกวัสดุที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่เกิน $2 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ ส่วนวัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซดีพอควรมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนประมาณ $20\text{-}30 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ 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 ($\text{cc}/25\mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ที่ 23°C , $50\%\text{RH}$)
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 ที่ภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านของฟิล์มพลาสติก [9]

ก. โครงสร้างทางเคมีของพลาสติก

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

ข. สัณฐานวิทยาของพลาสติก (Morphology of plastic)

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

1. สมมาตรและสภาพมีขั้วของมอนอเมอร์ มีผลโดยตรงต่อการเกิดโครงสร้างผลึก พลาสติกที่มีสมมาตรจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าพลาสติกที่ไม่มีสมมาตรหรือมีสมมาตรน้อยกว่า นั่นคืออัตราการซึมผ่านของก๊าซจะต่ำกว่าด้วย ตัวอย่าง PE มีโครงสร้างสมมาตรมากกว่ายาง ค่าอัตราการซึมผ่านของ PE จึงต่ำกว่ายาง

2. การจัดระเบียบสายโซ่โมเลกุล ทำให้เกิดโครงสร้างแบบผลึกมากขึ้น พลาสติกที่มีร้อยละความเป็นผลึก (Crystallinity) เพิ่มขึ้น มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายลดลง นั่นคือค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซลดลงด้วย เนื่องจาก โครงสร้างผลึกขัดขวางเส้นทางการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลที่แพร่เข้ามา ทำให้โมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่เป็นเส้นทางวกวน (Tortuous path) เป็นผลให้การแพร่ออกมาได้ยากและใช้เวลามากขึ้น

ตารางที่ 2.4 ผลของโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน [9]

Structure	X	Relative Pm (O ₂)
	-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

หมายเหตุ: Pm (O₂) เมื่อ X หมายถึง -OH มีค่าเท่ากับ 0.038 cc.mm/m².atm.day ที่ 23°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 0%
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตัวอย่าง फिल्म 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 โดยเฉพาะขณะทำให้เย็นและกระบวนการจัดระเบียบโมเลกุล อัตราการซึมผ่านของก๊าซลดลงเมื่อค่าความหนาแน่นของพลาสติกเพิ่มขึ้น และค่าความหนาแน่นของพลาสติกจะแปรผันตรงกับร้อยละความ เป็นผลึก ดังแสดงในภาพที่ 2.5 และตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลของร้อยละความเป็นผลึกต่อค่า Pm (O₂) ของพลาสติก [9]

Polymer	% Crystallinity	Pm (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

ก. วัตถุเติมแต่งในพลาสติก (Plastic additive)

1. พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) มอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่เติมลงไปในพลาสติก

โดยทั่วไปจะทำให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซของพลาสติกนั้นสูงขึ้น แต่อาจมีข้อยกเว้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพลาสติก-ไฮเซอรับบางประเภท เช่น การเติมยางใน PVC อาจทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า หรือการเติมพลาสติกไฮเซอรับใน PVC อาจทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้นถึง 20 เท่า กรณีฟิล์มพลาสติกที่ไวต่อความชื้นนิยมเรียก Hydrophilic plastic เช่น nylon และ Ethylene vinyl alcohol (EVOH) เมื่ออยู่ในที่มีความชื้นสูง จะดูดซับน้ำเข้าไปในพลาสติกได้ น้ำส่วนนี้ทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไฮเซอรับ ทำให้โมเลกุลของพลาสติกเคลื่อนที่ได้มากขึ้น

2. สารตัวเติม (Filler) โดยเฉพาะสารอนินทรีย์ที่ใช้เติมในพลาสติกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความเสถียรต่อรูปร่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไทเทเนียมไดออกไซด์ และทัลคัม มีผลทำให้อัตราการซึมผ่านของพลาสติกนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นกับปริมาณที่เติม ขนาด และรูปร่างของสาร แต่สารตัวเติมส่วนใหญ่ทำให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Gas	$D \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{S}$	$S \times 10^2$ ml (STP)/ml.atm	$Pm \times 10^{10}$ 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 และการละลายจะขึ้นตรงกับอุณหภูมิแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius' equation) ดังที่แสดง

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

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

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

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 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Glassy state) การเคลื่อนไหวของโมเลกุลพลาสติกเกิดได้ยากขึ้น และมีค่า E_p และ E_D สูง ทำให้มีค่า P_m ลดลง

ฉ. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

พลาสติกบางชนิดสามารถดูดซับความชื้นได้ง่าย เช่น EVOH และ Nylon ความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้โมเลกุลของพลาสติกมีความยืดหยุ่นและเคลื่อนไหวได้มากขึ้น การซึมผ่านของก๊าซจึงสูงขึ้น ซึ่งน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไฮเซออร์ ทำให้ E_p ลดลง ค่า P_m จึงสูงขึ้น พลาสติกพวกนี้เมื่ออยู่ในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูง การซึมผ่านของก๊าซจะสูงขึ้น สำหรับพลาสติกที่ไม่ดูดน้ำหรือความชื้น เรียกว่า Hydrophobic plastic เช่น LDPE, PP และพอลิไวนิลิดีนคลอไรด์ (PVDC) พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศไม่มีผลต่อการซึมผ่านของก๊าซ

2.2.4 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

การเลือกวัสดุที่นำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์จากค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ต้องระมัดระวังปัญหาที่เกิดจากหยดน้ำภายในภาชนะบรรจุภัณฑ์ และปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันไอน้ำได้ดีจะช่วยลดปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่มักเกิดปัญหาหยดน้ำในภาชนะ และในทางกลับกันวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้ไอน้ำผ่าน ได้มักเกิดปัญหาผลิตภัณฑ์แห้งเพราะสูญเสียความชื้น การแก้ไขปัญหาอาจทำได้โดยการเติมสารป้องกันการเกิดหยดน้ำ (Antifogging agent) ในฟิล์มพลาสติกหรือการเจาะรูเล็กๆ เพื่อช่วยระบายไอน้ำบางส่วนออกจากภาชนะ

2.2.4.1 การตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ [9]

การตรวจวัดการซึมผ่าน (Permeation measurement) การแพร่ และการละลาย ของสารสำหรับพลาสติก อาศัยหลักการตรวจวัดการถ่ายเทมวลของสารนั้นผ่านพลาสติก ซึ่งอาจใช้การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารอื่นที่ทำปฏิกิริยากับสารที่ถ่ายเทผ่านพลาสติกมา

การแสดงค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeation) มีดังนี้

- Water vapor transmission rate หรือ WVTR

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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 $\text{g.mm/m}^2.\text{day.cm.Hg}$

- Permeance หรือ WVP/l

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

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

Q หมายถึง น้ำหนักของไอน้ำ

A หมายถึง พื้นที่ของฟิล์มที่มีการซึมผ่าน

l หมายถึง ความหนาของฟิล์มพลาสติก

Δp หมายถึง ผลต่างของความดันก๊าซทดสอบกับความดันอีกด้านหนึ่งของแผ่นพลาสติก

ตารางที่ 2.9 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [11]

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

2.2.5 การใช้ฟิล์มพลาสติกในการเก็บรักษา

พลาสติกเป็นวัสดุหนึ่งที่มีการใช้ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หลายชนิด สามารถทำให้เกิดสภาวะบรรยากาศดัดแปลง (Modified atmosphere) คือมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นและมีความเข้มข้นของออกซิเจนลดลง โดยธรรมชาติ [12] เพราะสามารถควบคุมการถ่ายเทก๊าซได้ไม่จำกัดทุกสัณฐาน อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อากาศรอบๆ ผลผลิตกับอากาศภายนอก และยังคงความแข็งแรง [13-14] การเลือกใช้ฟิล์มพลาสติกที่ยอมให้อากาศแพร่ผ่านได้จะช่วยให้สามารถควบคุมการสูญเสียน้ำ รักษาลักษณะ และลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของรสชาติของผลผลิต [15-16]

ฟิล์มพลาสติกที่ใช้ในการบรรจุผักและผลไม้มีหลายชนิด แต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน อัตราการสูญเสียของผลผลิตจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ Permeability ของฟิล์มนั้นๆ [14] การเลือกใช้ควรคำนึงถึงการยอมให้อากาศและไอน้ำผ่าน ความใส ความหนาของฟิล์ม [13] รวมทั้งความชื้น ระยะเวลาที่เก็บรักษา ชนิด และน้ำหนักของผลผลิตด้วย [6] เพราะชนิดของฟิล์มมีผลต่ออาการผิปกติของผลผลิต และอาจทำให้เกิดความเสียหายในการเก็บรักษาได้ [16-17] โดยปกติฟิล์มยอมให้คาร์บอนไดออกไซด์ผ่านเข้าออกได้ดีกว่าออกซิเจน และทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในสูงขึ้นเกือบถึง 100% [6]

ชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้สำหรับเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ขึ้นกับการนำไปใช้งานที่ต่างกักันที่นิยมใช้ [18] เช่น

- พอลิเอทิลีน (PE) เป็นพลาสติกฟิล์มที่ยอมให้ก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านได้ ป้องกันการผ่านของไอน้ำได้
- พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ฟิล์มประเภทนี้สามารถให้ไอน้ำ และก๊าซผ่านไปได้ นิยมใช้กันมากในการปิดด้านบนถาดโฟมที่ใส่ผลผลิต แต่ฟิล์มชนิดนี้ไม่เหมาะในการทำถุง
- พอลิพรอพิลีน (PP) มีลักษณะ โปร่งใสกว่าพวก LDPE สามารถทำเป็นถุง และใช้ทำถาดที่สามารถใช้ความร้อนปิดผนึกได้
- เซลโลเฟน (Cellophane) มีใช้กันอยู่หลายชนิด อาจใช้ปิดด้านบนของถาดโฟม ทำเป็นถุง มีลักษณะ โปร่งแสง ไม่สามารถทำให้ติดกันด้วยความร้อน ยอมให้ความชื้นผ่านได้
- Rubber hydrochloride หรือ Pliofilm เป็นฟิล์มที่มีความแข็งแรงมาก สามารถป้องกันการผ่านของไอน้ำได้ดี ใช้เป็นถุงบรรจุผักและผลไม้ที่มีน้ำหนักมากๆ อากาศและความชื้นผ่านไปได้ยากมาก ในการนำมาใช้ต้องมีการเจาะรูเพื่อระบายอากาศและความชื้น

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

ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการซึมผ่านของก๊าซ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การสงวนลิขสิทธิ์นี้เพื่อเป็นการคุ้มครองสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาของผู้แต่งเอกสารฉบับนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาเอกสารนี้ให้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันของสายโซ่พอลิเมอร์
- อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ต่อการละลายของก๊าซในส่วนที่เป็นออสัญฐานของสายโซ่พอลิเมอร์

ความสามารถในการซึมผ่านจะลดลงถ้าส่วนของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น และการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ โดยการยืด (Stretching) फिल्मเป็นการเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกและลดความสามารถในการซึมผ่านลง

2.3 พอลิเอทิลีน [19]

พอลิเอทิลีน (PE) นับเป็นพลาสติกที่มีการใช้มากที่สุดและราคาถูก เนื่องจากพอลิเอทิลีนมีจุดหลอมเหลวต่ำเมื่อเทียบกับพลาสติกชนิดอื่นๆ ทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำ พอลิเอทิลีนผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของก๊าซเอทิลีนภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง โดยอยู่ในสภาวะปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ (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

2.3.1. สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีน [20]

สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีนที่พิจารณามีอยู่ 3 ประการ คือ

1. ความหนาแน่น (Density)

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

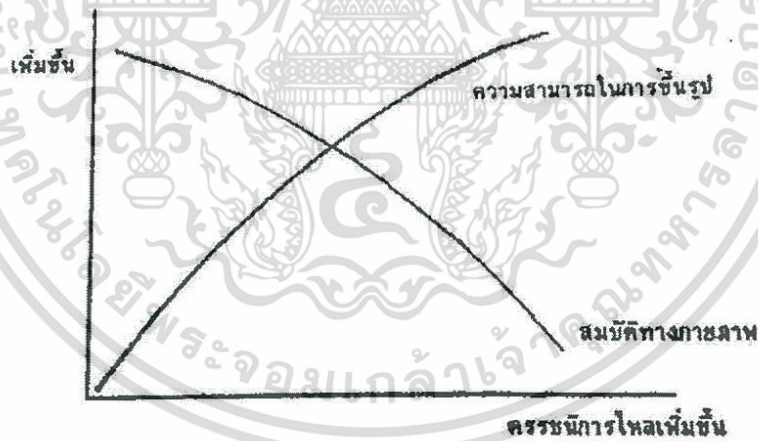
พอลิเอทิลีนมีความหนาแน่นสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ กระบวนการผลิตและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ โครงสร้างของโมเลกุล และขนาดน้ำหนักรวมของโมเลกุล แต่ละปัจจัยมีผลต่อความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกที่แตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลมากที่สุด คือ โครงสร้างของโมเลกุล โครงสร้างของโมเลกุลที่มีกิ่งยาวและจำนวนมากทำให้ได้ความหนาแน่นต่ำเพราะการที่มีกิ่งมากจะทำให้ความเป็นระเบียบของโมเลกุลมีน้อยแสงทะลุผ่านง่าย จึงมีความใสแต่มีความแข็งแรงต่ำ ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างที่มีกิ่งสั้นจำนวนน้อยจะทำให้ความหนาแน่นสูงเพราะ โมเลกุลอยู่อย่างเป็นระเบียบและใกล้กัน มีความแข็งแรงแต่ไม่ใสเพราะแสงทะลุผ่านได้ยาก จึงเรียกส่วนที่เป็นระเบียบนี้ว่า “ส่วนที่เป็นผลึก” (Crystalline) และส่วนที่อยู่ไม่เป็นระเบียบ เรียกว่า “ส่วนที่เป็นอสัณฐาน” (Amorphous)

2. ดรรชนีการไหล (Melt index)

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

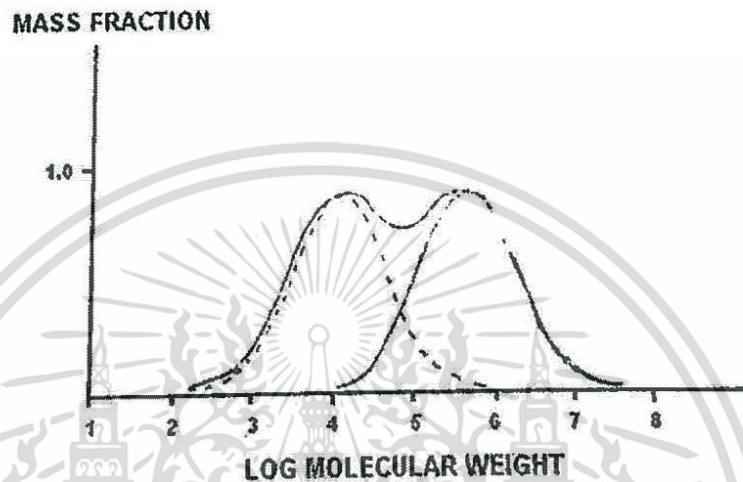


ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างดรรชนีการไหลกับความสามารถในการขึ้นรูป และสมบัติทางกายภาพ[20]

จากกราฟแสดงว่าเมื่อดรรชนีการไหลเพิ่มขึ้น การผลิตขึ้นรูปจะง่ายขึ้น แต่สมบัติทางกายภาพส่วนใหญ่ลดลงเพราะขนาดโมเลกุลเล็กลง

3. การกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution) การกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุลเป็นสมบัติพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อสมบัติบางประการทั้งการผลิตขึ้นรูปและเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งมอบเวลาหรือการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อนำเอาแต่หน้าไปใช้ประโยชน์ในด้านนี้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติทางกายภาพด้วย ในการผลิตพอลิเมอร์ซึ่งเกิดจากสารหน่วยเล็กที่เรียกว่า “มอนอเมอร์” เกิดพันธะเคมีต่อกันเป็นสายโซ่ยาว แต่จำนวนหน่วยมอนอเมอร์ในแต่ละสายโซ่โมเลกุลมีจำนวนไม่เท่ากัน ดังนั้นขนาดโมเลกุลจึงไม่เท่ากันในทุกสายโซ่ ถ้าความแตกต่างของขนาดโมเลกุลในเนื้อพลาสติกมีมากเรียกว่า “การกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุลกว้าง” ซึ่งพออธิบายได้คร่าวๆ จากกราฟต่อไปนี้

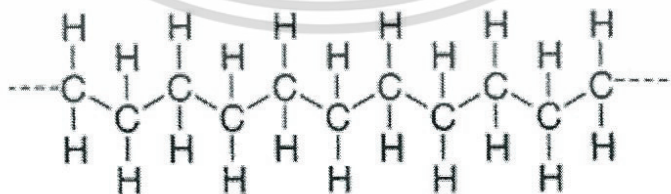


ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมวล โมเลกุลกับเศษส่วน โดยมวล [23]

ผลกระทบที่เด่นๆ ในเรื่องการกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุล ได้แก่ ความยากง่ายในการไหลตัวของพลาสติกในเครื่องอัดรีด ถ้าการกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุลกว้างจะช่วยให้การไหลตัวง่ายขึ้นในค่าดรรชนีการไหลที่เท่ากัน

2.3.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

2.3.2.1 ลักษณะทั่วไปของ HDPE [21-22]

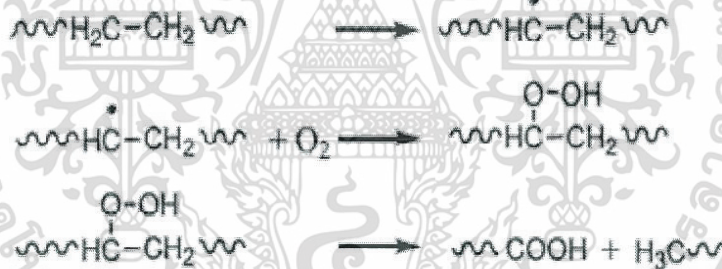


ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของ HDPE [23]

สำหรับ HDPE เป็น PE ชนิดหนึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น $(\text{CH}_2)_n$ และส่วนที่เป็นกิ่งก้านน้อยมาก ผลิตผ่านกระบวนการซีเกอร์ คำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Ziegler process) และกระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process) มีการนำไปใช้งานในปริมาณมากและหลากหลาย ทั้งในอุตสาหกรรมเกษตร ประมง บรรจุก๊าซ ฯลฯ เนื่องจากมีสมบัติเหมาะสม เช่น มีสมบัติเด่นด้านความสามารถในการขึ้นรูปง่าย มีความแข็งแรง มีความคงทนสูง มีความเหนียวและทนทานต่อแรงดึงปานกลาง เหมาะสำหรับงานเป่าฟิล์ม งานเป่าแบบงานท่อ และงานฉีดแบบ เป็นต้น

ในขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูง พอลิเอทิลีนอาจสลายตัวหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) เกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้นบนสายโซ่ จากนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศกลายเป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์และเกิดการสลายตัวต่อไป โดยแบ่งสายโซ่ออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกได้เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเช่นเดิม ส่วนที่สองได้เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ปลายข้างหนึ่งกลายเป็นหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการสลายตัวต่อไป แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังภาพที่ 2.5 ทำให้ความยาวของสายโซ่โมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลลดลง แสดงโมเดลความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังภาพที่ 2.6 ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพลาสติกลดลง เช่น สมบัติการทนต่อแรงดึงและสมบัติการทนต่อแรงกระแทก



ภาพที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ PE [22]



ก่อนเกิดปฏิกิริยา

หลังเกิดปฏิกิริยา

ภาพที่ 2.6 โมเดลแสดงความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน[22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.3.2.3 การประยุกต์ใช้งาน [21-22]

เนื่องจาก HDPE มีสมบัติเด่นหลายด้าน ทำให้สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์มากมายหลายชนิด แสดงตัวอย่างในตารางที่ 2.10 จึงเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางทั้งตลาดในประเทศและต่างประเทศ

ตารางที่ 2.10 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดต่าง ๆ [21]

เกรดของ HDPE	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์
Injection molding grade	ถังแก๊สอลูมิเนียมพลาสติก ถังขยะ ถาดใส่ขนมปัง ถังใส่ขวดของเล่น และพวกชิ้นงานที่มีโครงสร้างซับซ้อน
Blow molding grade	ขวดต่างๆ เช่น ขวดนม ขวดน้ำ ขวดแชมพู และแก๊สอลูมิเนียม
Film extrusion grade	ถุงซิปปี้งต่างๆ
Extrusion sheet grade	แท และเชือก
Pipe extrusion grade	ท่อน้ำ ท่อร้อยสายไฟ และสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ HDPE นิยมนำกลับมาขึ้นรูปใช้ใหม่ หรือนำกลับไปผสมกับพลาสติกบริสุทธิ์แล้วทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ผลิตภัณฑ์ HDPE ที่นิยมนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดแชมพู ถังแกลลอนพลาสติก ถังขยะ ถาดใส่ขนมปัง ลัง 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
- เครื่องวัดละเอียด 0.25 mm

3. การเตรียมชิ้นทดสอบ

- ตัดตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 5 mm ถึง 25.4 mm และยาวมากกว่าระยะระหว่างปากจับตามตารางที่ 2.11 อย่างน้อย 50 mm เป็นชิ้นทดสอบจำนวน 10 ชิ้น ใช้ทดสอบแนวละ 5 ชิ้น

4. วิธีทดสอบ

- หาพื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานทดสอบ (กว้าง x หนา) โดยวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ วัดความกว้างด้วยเครื่องวัด
- ยึดชิ้นงานทดสอบด้วยปากจับของเครื่องทดสอบแรงดึงตามแนวเครื่องดึงขึ้นทดสอบด้วยอัตราการเคลื่อนที่ของปากจับ ตามที่กำหนดในตารางที่ 2.11
- ดึงจนกระทั่งชิ้นงานทดสอบขาด บันทึกเป็นแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบขาด (F) มีหน่วยเป็นนิวตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง เอทิลีนกับเมทิลอะคริเลต (Methyl acrylate, MA) โดยทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันภายใต้ความดันสูง โดยมีการฉีดมอนอเมอร์เมทิลอะคริเลต เข้าไปยังถังปฏิกิริยาที่มีก๊าซเอทิลีนเพื่อผลิตโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของ EMA [27]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน [26]

EMA เป็นหนึ่งในอัลฟาโอเลฟิน โคลพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพ ซึ่งมีการประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้าน เช่น

- Tie layer เพื่อเพิ่มการยึดติดกับพอลิโอเลฟิน (Polyolefin), ไอโอโนเมอร์ (Ionomer), โพลีเอสเตอร์ (Polyester), พอลิคาร์บอเนต (PC), EVA, พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์ (PVDC), เอทิลีนอะคริลิกแอซิด โคลพอลิเมอร์ (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

- นิยมใช้ในงาน Extrusion coating เนื่องจาก EMA มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J.S. Borah และ T.K. Chaki [29] ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลเชิงพลวัต (Dynamic rheology) สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE/EMA ในอัตราส่วน 60:40 โดยมีการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นต่อกิ่งด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ (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 นอกจากนี้ยังยับยั้งการเกิดการกลับมารวมตัวกันของวัฏภาคการกระจาย (Coalescence) ทำให้ได้สันฐานวิทยาที่เสถียร

นันทวรรณ ม่วงมี [1] ได้ทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVA และซีโอไลต์เอ โดยใช้อัตราส่วน LDPE:EVA เป็น 100:0, 90:10, 80:20, และ 75:25 และมีการใช้ซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติม 0-25 % โดยน้ำหนัก ผสมสูตรพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่และขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่า โดยใช้อุณหภูมิที่หัวคาย 170°C จากการศึกษาผลของ

เอกสารฉบับนี้เป็นการผสมสูตรฟิล์มที่เตรียมจากสูตรเข้มข้นของ EVA กับซีโอไลต์เอ พบว่าอนุภาคของซีโอไลต์เอมีขนาดเล็กกว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลีเอมีนมีการกระจายตัวอยู่ในภูมิภาคของ EVA และมีการกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ได้ดีกว่าฟิล์มที่เตรียมจากการผสม LDPE, EVA และซีโอโลสต์เอพร้อมกัน และจากการศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE:EVA ที่มีต่อฟิล์ม LDPE/EVA พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด มอดุลัสมีแนวโน้มนลดลง เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยางทำให้เกิดความยืดหยุ่นมากขึ้น ทั้งนี้ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มนลดลงเมื่อมีปริมาณซีโอโลสต์เอมากขึ้น เนื่องจากการเติมซี-โอโลสต์เอเป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งให้แก่ชิ้นงาน และแรงกระทำระหว่างซีโอโลสต์เอกับภูมิภาค EVA เป็นแรงกระทำระหว่างขั้วที่เกิดที่พื้นผิวเท่านั้น ทำให้การยึดเกาะไม่ดี เมื่อมีการให้แรงกระทำแก่ชิ้นงานจึงเกิดช่องว่างระหว่างซีโอโลสต์เอกับพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้มีการรับแรงดึงลดลงและขาดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อมีการเติมซีโอโลสต์เอ และ EVA ในปริมาณสูงทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) สูงด้วย เนื่องจากความมีขั้วของซีโอโลสต์เอที่ทำให้สามารถเหนี่ยวนำโมเลกุลของไอน้ำได้ดีและไอน้ำสามารถผ่านส่วนอสัณฐานของ EVA ได้ดีกว่าส่วนอสัณฐานของ LDPE และ WVP มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมซีโอโลสต์เอมากขึ้น โดยในฟิล์มที่มีอัตราส่วน LDPE:EVA เป็น 80:20 โดยน้ำหนัก (LE(80/20)) มีค่า WVP มากกว่าฟิล์ม LDPE 29% และเมื่อเติมซีโอโลสต์เอ 25% โดยน้ำหนักในสูตรฟิล์ม 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 ที่มีไวนิลอะซิเตต (VA) เท่ากับ 18.0% และ 27.5% โดยน้ำหนัก ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ได้ EVOH ที่มีไวนิลแอลกอฮอล์ (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 มีแนวโน้มนเพิ่มขึ้น เนื่องจาก EVOH มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้นและทำให้ฟิล์มเสียรูปร่างได้ยากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการดึงยืด ณ จุดคราก และการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง การเพิ่มปริมาณ EVOH เป็นการเพิ่มความมีขั้วให้แก่ฟิล์ม LDPE/EVOH ซึ่งสอดคล้องกับค่ามอดุลัสไอน้ำที่ลดลง แต่ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVOH ทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันที่มีการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA แม้ว่าค่า

มีขั้วต่ำกว่า แต่ EVA ไม่สามารถเกิดผลึกได้ จึงให้ความเป็นอสัณฐานที่มากกว่า นอกจากนี้จากการศึกษาผลของการใช้ซีโอไลต์เอ (20% โดยน้ำหนัก) พบว่าซีโอไลต์เอส่วนมากจะอยู่ในวัฏภาคของ EVOH และมีแนวโน้มที่จะเกาะกลุ่มเป็นก้อนมากกว่าที่จะอยู่เป็นอนุภาคเดี่ยว การมีซีโอไลต์เอไม่ได้ทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มเปลี่ยนแปลงไป แต่ทำให้ค่าความสามารถในการดึงยึดลดลงและมีค่าขโมลคูลัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เอ มีอันตรกิริยาที่ตึกกับ EVOH ทำให้ฟิล์มมีความแข็งขึ้นและเสีรูปร่างได้ยากขึ้น และจากการเติมซีโอไลต์เอลงในฟิล์ม LDPE/EVOH ทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVOH มีค่าเพิ่มขึ้น

ฐิตินันท์ ศิริจันท์นันทน์ [3] ทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วยเอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (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 ค่าขโมลคูลัสมีค่าน้อยกว่าฟิล์ม LDPE และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ EMA ส่วนค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ EMA ให้ผลสอดคล้องกับค่ามอดุลัสที่ลดลง การศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันซึ่งโคพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ในการเปรียบเทียบคือ EMA, เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) และเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) พบว่าเมื่อควบคุมปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วใกล้เคียงกัน ความสามารถในการกระจายตัวในวัฏภาค LDPE และสมบัติเชิงกลของฟิล์มแต่ละสูตรมีค่าไม่แตกต่างกัน ฟิล์มสูตร L70E30 มีค่า WVP สูงกว่าฟิล์มชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีปริมาณของโคพอลิเมอร์ที่เป็นอสัณฐานที่มีขั้วมากกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ การศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอ (20% โดยน้ำหนัก) พบว่าซีโอไลต์เอกระจายตัวได้ดีในวัฏภาคของโคพอลิเมอร์ที่มีขั้ว แต่ไม่มีอันตรกิริยาที่ตึกกับพอลิเมอร์ผสม จึงไม่รบกวนการเกิดผลึกของ LDPE โดยฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ นั้น มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากไม่แตกต่างกัน ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 มีค่า WVP มากกว่าฟิล์ม LDPE 180% และมีค่ามากกว่าฟิล์มสูตร L80M20 83% จากผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกขี้หนูสดที่ 5°C เป็นเวลา 20 วัน พบว่าบรรจุภัณฑ์จากฟิล์ม L80M20Z20 ซึ่งมีทั้ง EMA ที่มีความเป็น ออสัณฐานที่มีขั้วสูงและมีซีโอไลต์เอที่มีความชอบน้ำสูงสามารถระบายไอน้ำที่เกิดจากการหายใจของพริกออกมาได้มาก ทำให้มีไอน้ำกักเก็บที่คงเหลืออยู่ในบรรจุภัณฑ์น้อยกว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่นๆ โดยฟิล์ม L80M20Z20 มีสมบัติความแข็งแรงดึงต่ำกว่าฟิล์ม LDPE แต่มีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในงานบรรจุภัณฑ์ งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของ LDPE สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มวัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมซีโอไลต์เอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

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

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE [30]

สมบัติ	HD7000F*	หน่วย
ครรชนีการไหล (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
ครรชนีการไหล (190°C /2.16 kg)	2.0	g/10 min
ความหนาแน่น	0.944	g/cm ³
จุดหลอมเหลว	91	°C

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (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. เครื่องบีบอัด 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. กระบอกใส่ไนโตรเจน
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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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 จากนั้นนำไปบดให้มีขนาดเล็ก เพื่อนำไปผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Screw speed 80-90 rpm

- สภาวะเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม

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

3.3.3 ความหนาของฟิล์ม

วัดความหนาของฟิล์มทุกสูตรที่ผลิตขึ้นมา โดยใช้ไมโครมิเตอร์วัด 19 จุด ดังภาพที่ 3.1 แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



ภาพที่ 3.1 บริเวณที่วัดความหนาของฟิล์ม

3.3.4 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหา Heat of fusion (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสามารถหาได้จากสมการดังนี้

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

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

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} เพื่อหาค่าคาร์บอนิลคาร์บอนิล (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 ที่มีไซลีนเป็นตัวทำละลายเพื่อสกัด EMA ออกจากชิ้นงานในอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่าที่อุณหภูมิ $42\text{-}45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงครึ่ง จากนั้นนำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานพื้นที่ภาคตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของ EMA ด้วย SEM

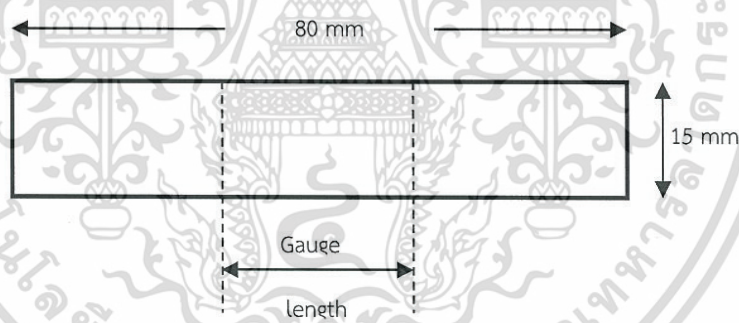
3.3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.3.7.1 สมบัติความแข็งแรงดึง

การทดสอบสมบัติเชิงกลในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบแรงดึง ซึ่งสมบัติที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break) ค่าคอर्डมอดุลัส (Chord modulus) และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D882 [33] โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ซึ่งจะทำการตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างตามแนวเครื่องจักร (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



ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงดึง

ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด, คอर्डมอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	F	=	แรงดึงยึดชิ้นงาน ณ จุดขาด
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)
	l	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงชิ้นงาน ตัวอย่าง ณ จุดขาด
	l_0	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 25 mm

3.3.7.2 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด

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



ภาพที่ 3.3 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาด [35]

3.3.8 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

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

3.3.9 การทดสอบมุมล้มผิวน้ำ

การทดสอบหยดน้ำที่พื้นผิวโดยนำพอลิเมอร์ผสมมาทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดเป็นชิ้นงานหนา 6 mm และทดสอบหยดน้ำลงบนผิวของพื้นที่ตัดขวางของชิ้นงาน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.3.10 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

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

2. คัดเลือกพริกขี้หนูสดให้มีขนาดใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นล้างพริกให้สะอาด และผึ่งให้แห้ง จำนวนถุงละ 5 กรัม โดยประมาณ และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน บันทึกเป็นค่าน้ำหนักพริกเริ่มต้น

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

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

5. เมื่อเก็บรักษาถุงบรรจุภัณฑ์จนครบ 20 วัน นำถุงบรรจุภัณฑ์นั้นมาชั่งน้ำหนัก เพื่อบันทึกเป็นค่าน้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์หลังการเก็บรักษา

6. จากนั้นตัดถุงบรรจุภัณฑ์และทำการซับ ใอน้ำภายในถุงบรรจุภัณฑ์และพื้นผิวของพริก ออกเพื่อชั่งน้ำหนักของพริกและบรรจุภัณฑ์ แล้วบันทึกค่าน้ำหนักพริกหลังการเก็บรักษาและน้ำหนักบรรจุภัณฑ์หลังการเก็บรักษา ตามลำดับ

7. นำค่าน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านบรรจุภัณฑ์ออกไปได้และปริมาณไอน้ำกักเก็บที่เหลือในถุงบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักของพริก 1 กรัม ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปริมาณไอน้ำทั้งหมดที่พริกหายใจได้ทั้งหมดต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (%) = A + B (3.6)
เมื่อ A คือ ปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากถุงบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (ในแต่ละวัน) (%)

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

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA

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

ตารางที่ 4.1 สูตรพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA และความหนาฟิล์ม

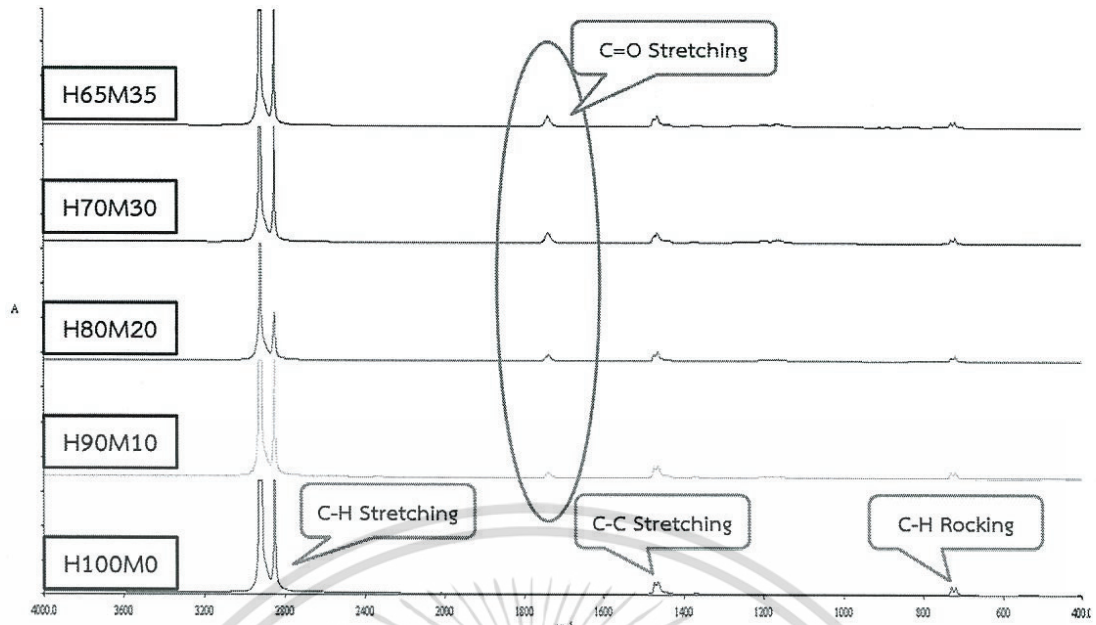
ตัวอย่าง	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมโดยน้ำหนัก		ความหนาเฉลี่ย (μm)
	HDPE	EMA	
H100M0	100	0	26 \pm 2
H90M10	90	10	25 \pm 2
H80M20	80	20	31 \pm 2
H70M30	70	30	35 \pm 1
H65M35	65	35	29 \pm 1

4.1.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม HDPE/EMA

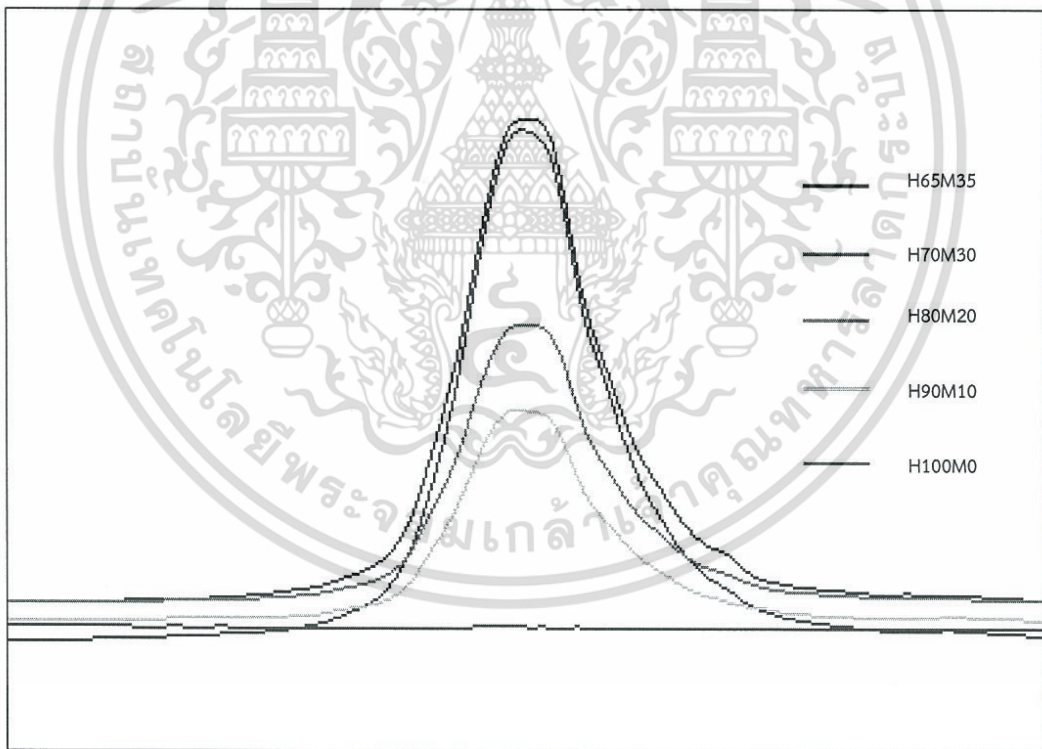
การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยศึกษาจากเทคนิค FT-IR เพื่อแสดงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่ม EMA ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยคำนวณเชิงปริมาณได้จากค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index, CI) จากค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C=O Stretching ที่ 1738 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีชื่อของหมู่เอสเทอร์ใน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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

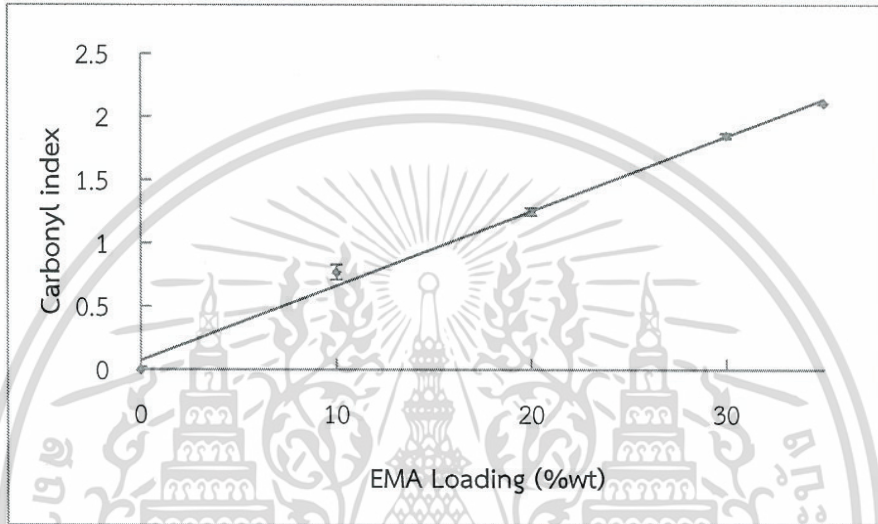


(b) ตำแหน่งของพีคของ C=O Stretching ที่ 1738 cm^{-1}

ภาพที่ 4.1 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม HDPE/EMA ด้วยเทคนิค FT-IR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากภาพที่ 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 มีค่าสูงขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.1 (b) โดยสามารถคำนวณหาค่าดัชนีคาร์บอนิลได้จากสมการที่ 4.1 และแสดงค่าดังภาพที่ 4.2



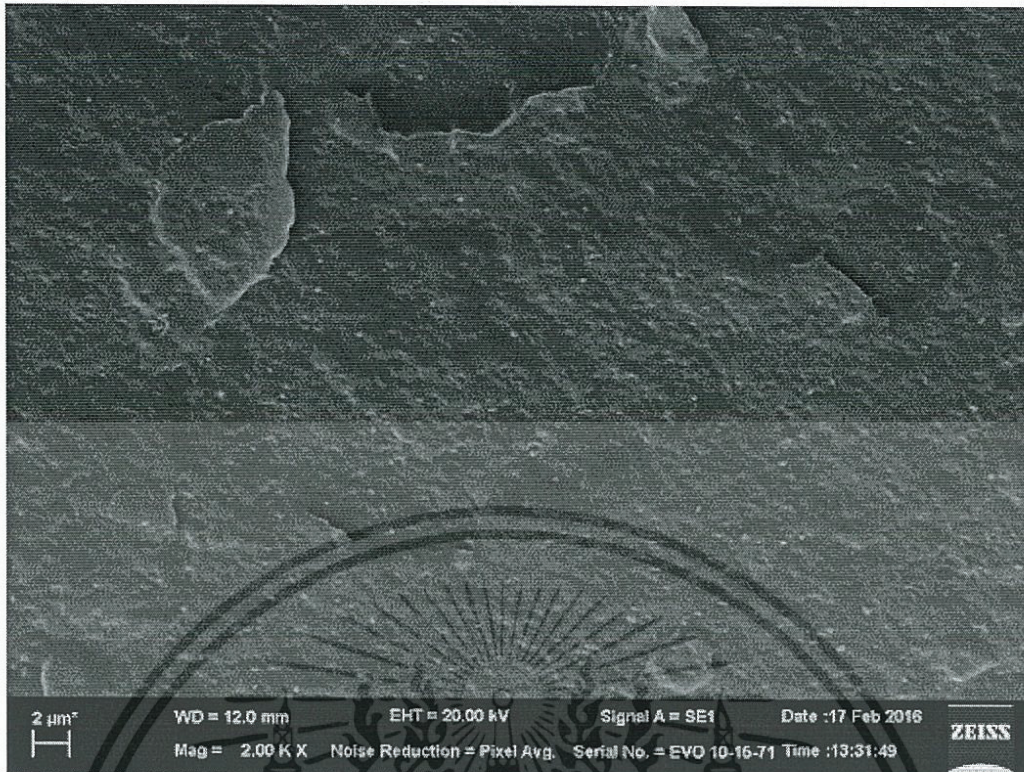
ภาพที่ 4.2 ค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE/EMA

จากภาพที่ 4.2 แสดงค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อปริมาณ EMA มากขึ้น ค่าดัชนีคาร์บอนิลมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน โดยตรงกัน แสดงว่าฟิล์มแต่ละสูตรได้อัตราส่วนของพอลิเมอร์ตามต้องการ และความมีขี้ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณ EMA ที่เพิ่มขึ้น

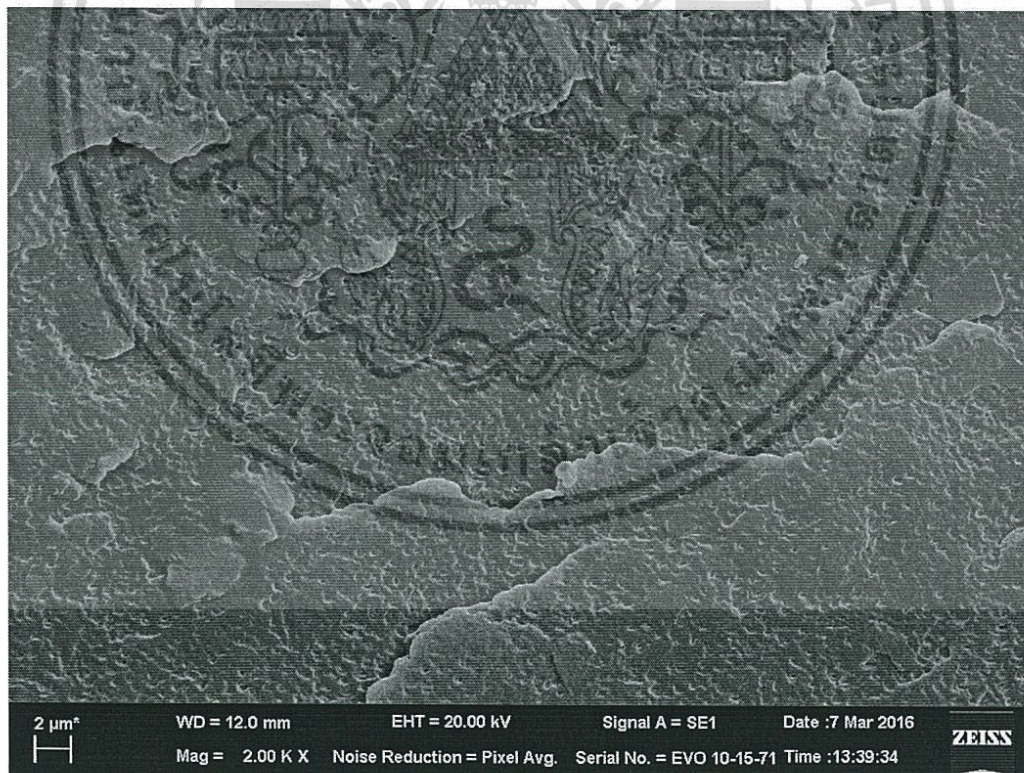
4.1.2 การศึกษาผลของการกระจายตัวของ EMA ในฟิล์ม HDPE/EMA

การศึกษากการกระจายตัวของ EMA ในฟิล์ม HDPE/EMA ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยวิเคราะห์ด้วย SEM ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [1-2] เมื่อนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ทำการสกัดโคพอลิเมอร์ออกมาวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าพื้นที่ตัดขวางของชิ้นงานมีความเรียบดี ไม่มีช่องว่าง ไม่พบรอยต่อระหว่างภูมิภาคกระจายและภูมิภาคต่อเนื่อง ดังนั้นในการศึกษากการกระจายตัวของ EMA จึงต้องทำการสกัด EMA ออกจากฟิล์ม HDPE/EMA ก่อนนำมาตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

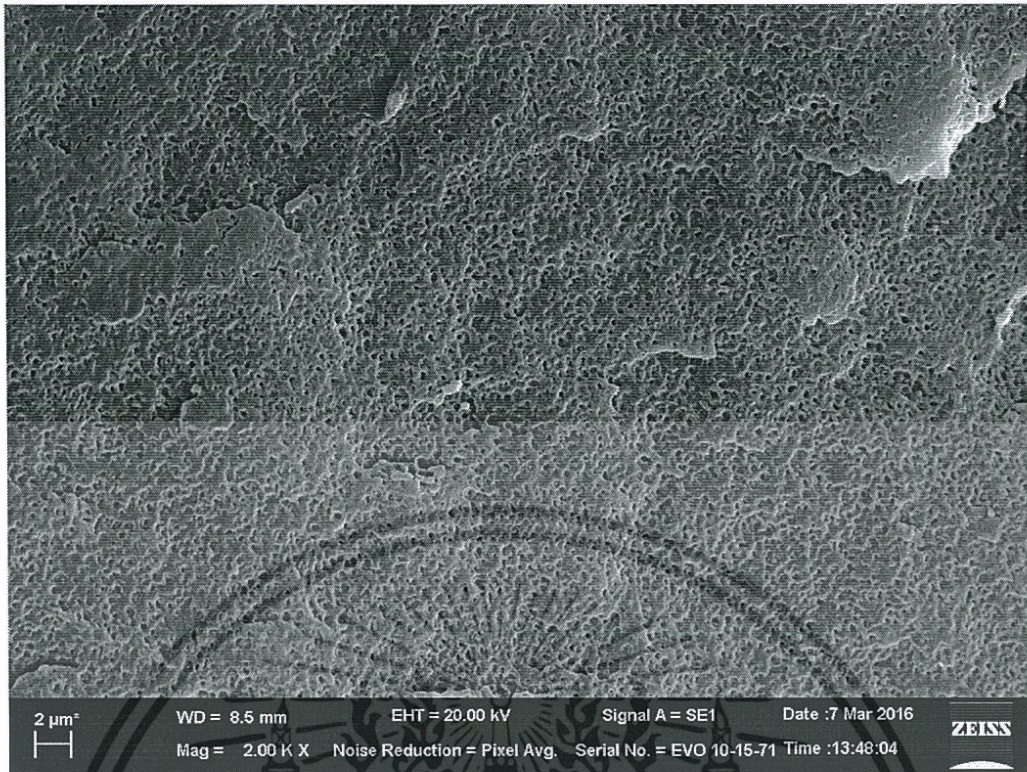


(a) H100M0



(b) H90M10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

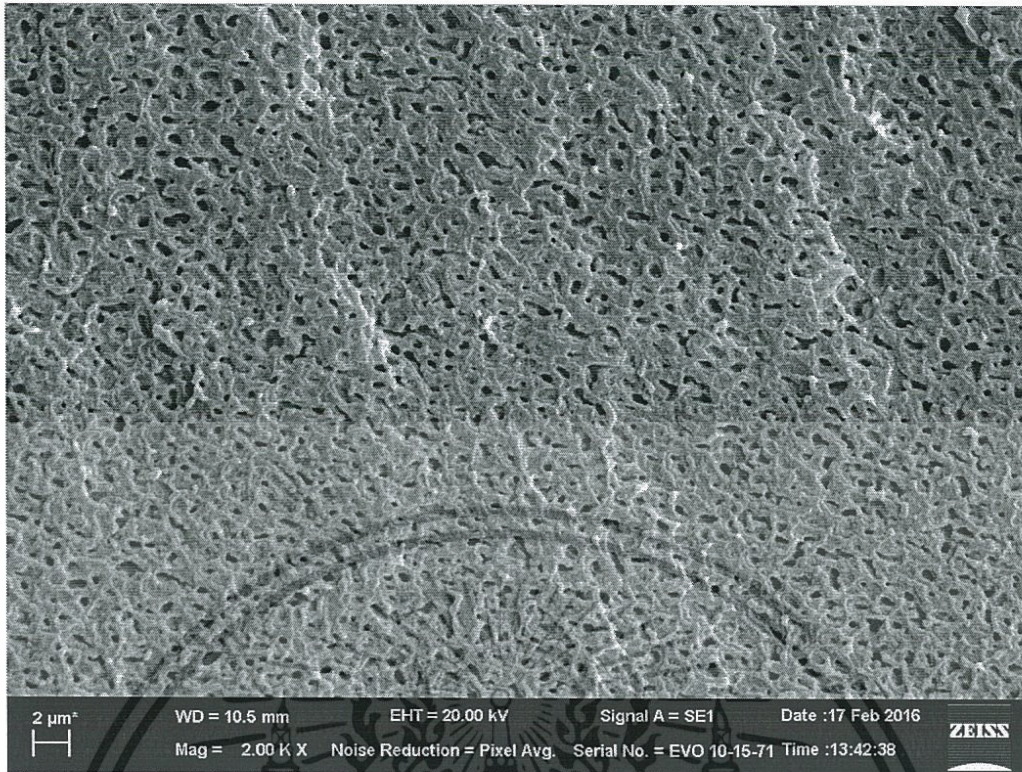


(c) H80M20



(d) H70M30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) H65M35

ภาพที่ 4.3 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์ม HDPE/EMA ที่มีการสกัดวัฏภาค EMA ออก (กำลังขยาย 2000 เท่า) (— 2 μm)

จากภาพที่ 4.3 (a) H100M0 มีลักษณะเป็นฟิล์มเนื้อแน่น เรียบ แสดงว่าตัวทำละลายอินทรีย์ และสภาวะที่ใช้สกัดไม่สามารถสกัดวัฏภาค HDPE ได้ ส่วนภาพที่ 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 $(\text{cal}/\text{cm}^3)^{1/2}$ และ 9.72 $(\text{cal}/\text{cm}^3)^{1/2}$ ตามลำดับ [39-40] ซึ่งค่อนข้างแตกต่างกันทำให้ HDPE และ EMA ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (จัดเป็น Immiscible blend) การเลือกเกรดของพอลิเมอร์ที่มีค่าครชนิการไหล (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 ได้ดีเมื่อใช้สภาวะการผสมที่ดี และเมื่อปริมาณ EMA เพิ่มขึ้นปริมาณช่องว่างในฟิล์มตามภาพที่ 4.3 (b), (c), (d) และ (e) มีมากขึ้นและมีโอกาสกระจายมาชิดติดกันมากขึ้น ทำให้ขนาดวัฏภาค EMA ที่กระจาย

ตัวใน HDPE มีขนาดใหญ่ขึ้นเห็นได้จากช่องว่างในฟิล์มที่ใหญ่ขึ้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น 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

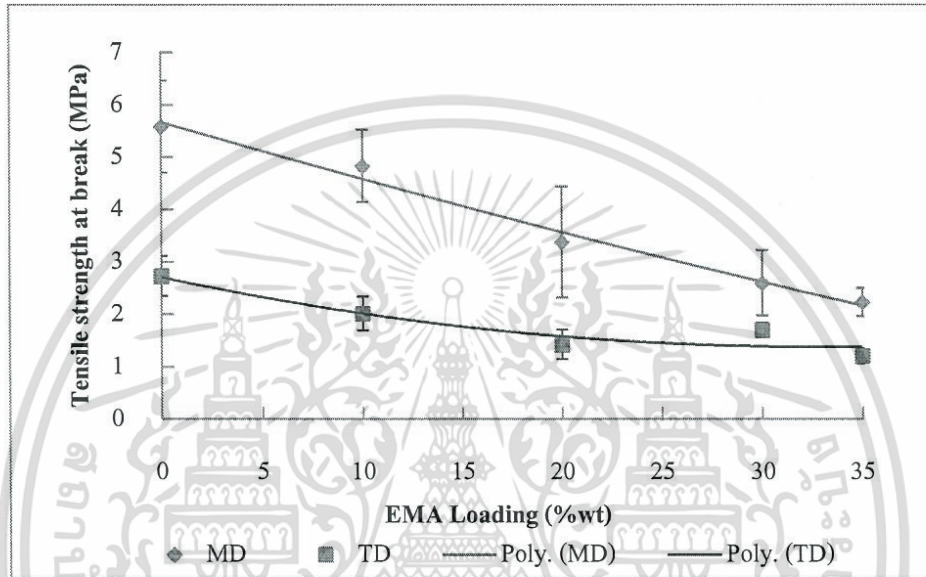
เมื่อนำ HDPE และ EMA มาผสมขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม จะพบเฉพาะพีค T_m และ T_c ของ HDPE โดยปริมาณที่มีอยู่มากของ HDPE ทำให้เกิดเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ส่วน EMA เป็นวัฏภาคกระจายมีโอกาสดเกิดผลึกได้น้อย ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่า EMA ไม่สามารถเกิดผลึกในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้

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

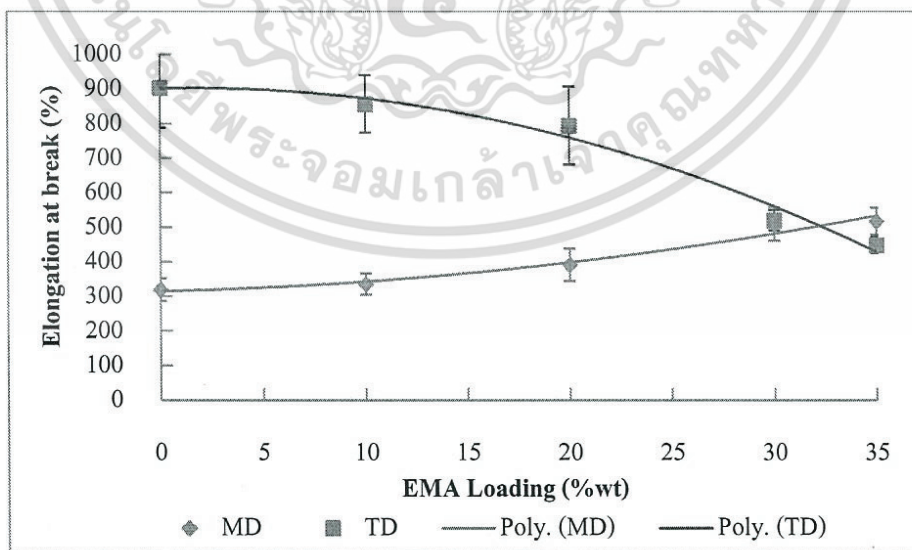
4.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

จากภาพที่ 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 และได้ค่าการเอกซอร์นี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิ่งยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ดังภาพที่ 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) แรงยึดติดระหว่างวัฏภาค HDPE และ EMA ทำให้ฟิล์ม HDPE/EMA เกิดการเสียรูปร่างได้ง่ายกว่าฟิล์ม HDPE

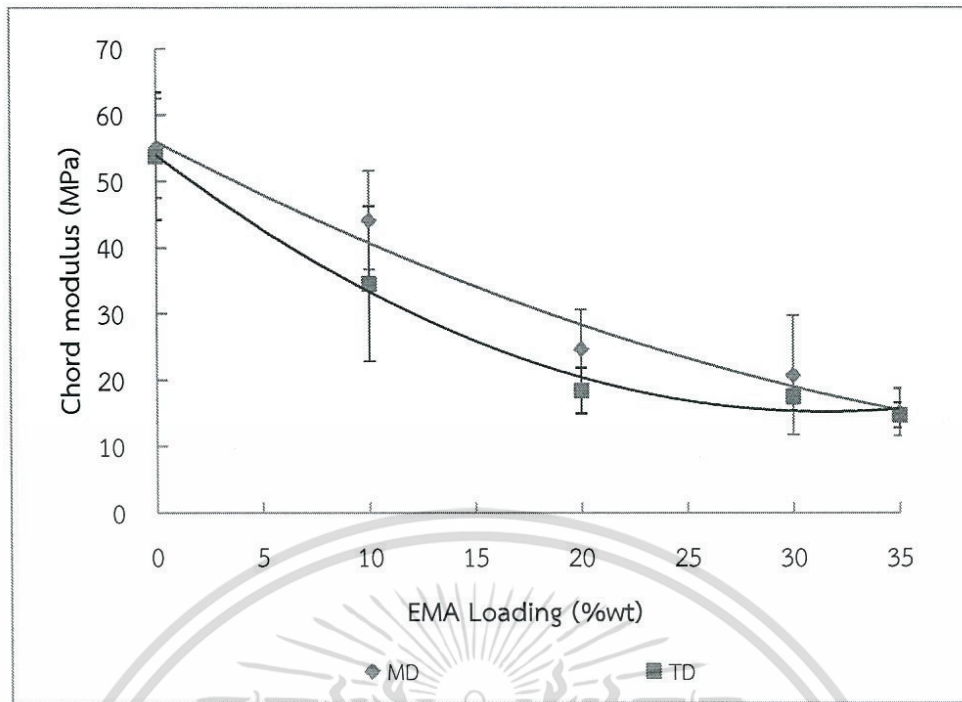


(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดของฟิล์ม HDPE/EMA

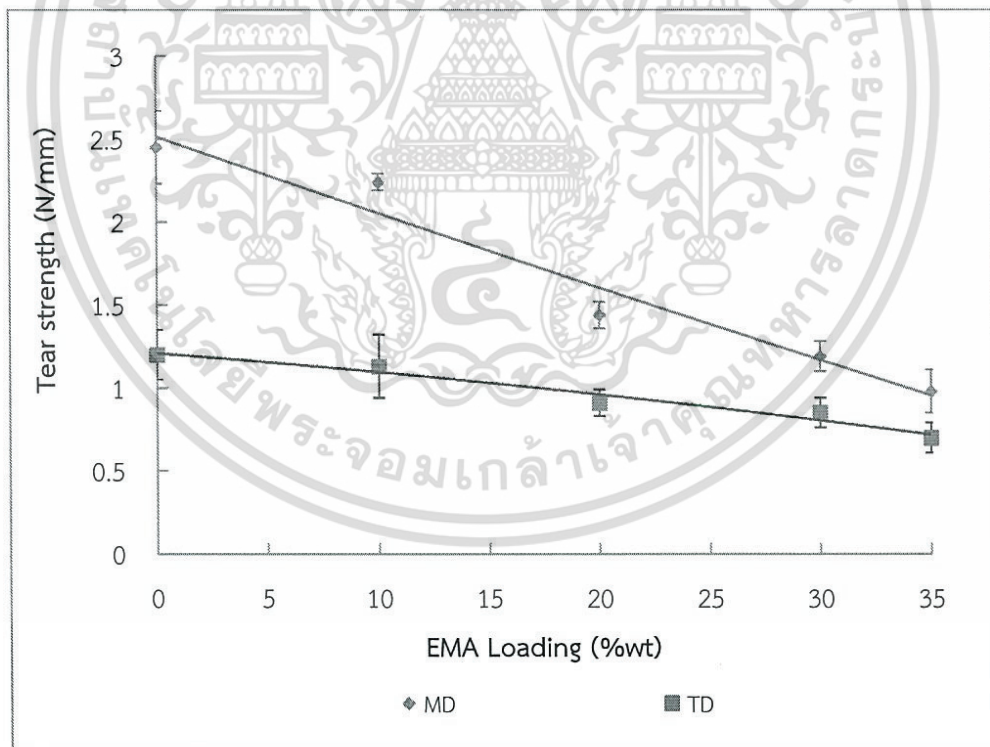


(b) การดิ่งยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม HDPE/EMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) คอर्डมอดูลัสของฟิล์ม HDPE/EMA



(d) การรับแรงฉีกขาดของฟิล์ม HDPE/EMA

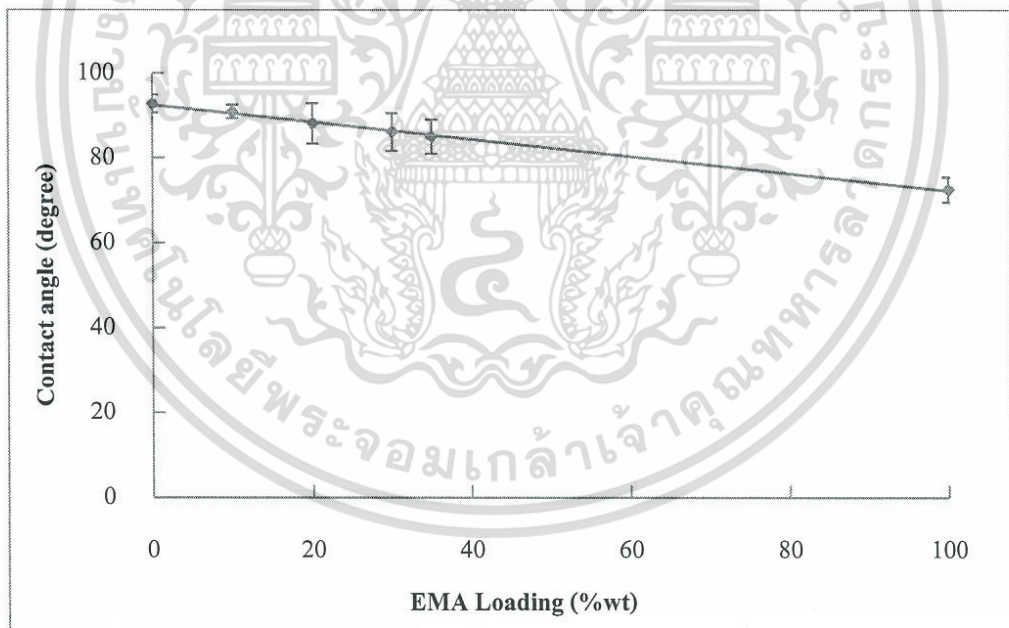
ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HDPE/EMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

4.1.5 การทดสอบมุมสัมผัสน้ำ

การวัดมุมสัมผัสที่พื้นผิวของฟิล์มกับน้ำใช้ในการประเมินสภาพผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ทางอ้อม เมื่อทำการวัดค่ามุมสัมผัสน้ำของพอลิเมอร์ จากภาพที่ 4.5 พบว่าเมื่อปริมาณ EMA ในฟิล์มพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ค่ามุมสัมผัสน้ำมีค่าลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ EMA และมุมสัมผัสน้ำเป็นไปในเชิงเส้นตรง ทั้งนี้เนื่องจาก EMA เป็น โคพอลิเมอร์ที่มีขี้้ว เมื่อนำไปผสมลงในพอลิเมอร์ทำให้วัสดุภาค อัดแน่นที่มีขี้้วของฟิล์มพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเพราะ EMA มีความเป็นอัดแน่นและความมีขี้้วสูง ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์มีความมีขี้้วและความชอบน้ำมากขึ้น ค่ามุมสัมผัสน้ำจึงมีค่าลดลง



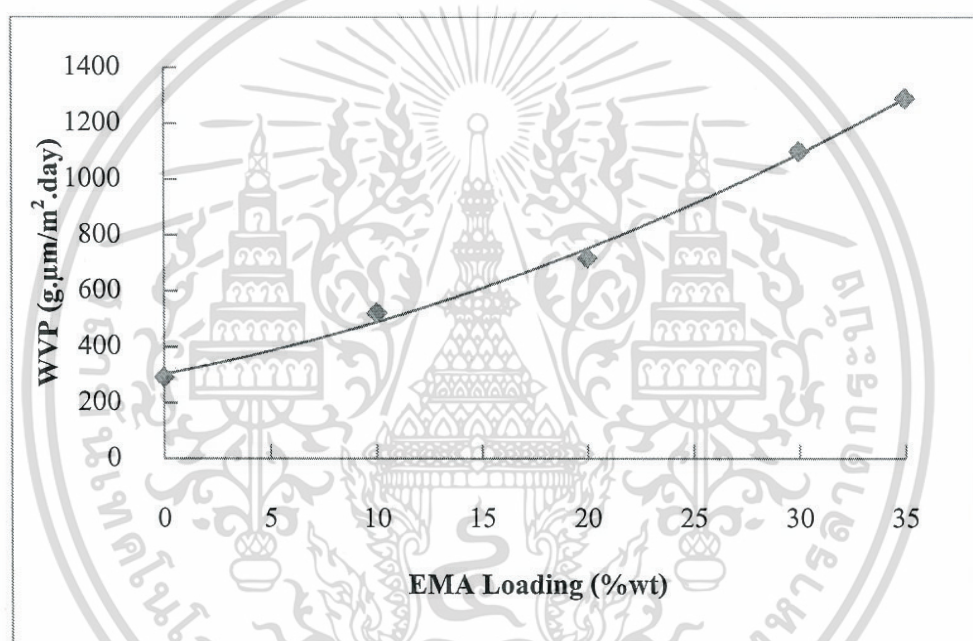
ภาพที่ 4.5 ค่ามุมสัมผัสน้ำของพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA เมื่อมี EMA ในปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแสดงดังภาพที่ 4.6 โดยทั่วไป การวัดค่าการซึมผ่านไอน้ำด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติการซึมผ่านไอน้ำ นิยมรายงานค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) แต่ในงานวิจัยนี้ฟิล์มที่ใช้ทดสอบนั้นมีความหนาที่แตกต่างกัน เพื่อกำจัดปัจจัยในเรื่องความหนา เนื่องจากฟิล์มที่มีความหนาสูงขึ้นจะมีปริมาตรของเนื้อฟิล์มมากทำให้ไอน้ำเคลื่อนที่ผ่านได้ยาก ดังนั้นจึงแสดงผลการทดลองในรูปของค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability, WVP) โดยคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

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



ภาพที่ 4.6 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE/EMA เมื่อมี EMA ปริมาณต่างๆ

จากภาพที่ 4.5 เมื่อปริมาณ EMA เพิ่มขึ้น ค่ามุมสัมผัสน้ำมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการเปียก (Wettability) ของพื้นผิวดีหรือมีความชอบน้ำมาก ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ โดยจากภาพที่ 4.6 แสดงความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE/EMA ที่มีปริมาณ EMA ต่าง ๆ พบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ EMA เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ EMA เป็นการเพิ่มสภาพขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยสภาพขั้วที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์เกิดอันตรกิริยาได้ดีกับ ไอน้ำจึงสามารถเหนี่ยวนำไอน้ำให้ซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้มากขึ้น และผลจาก

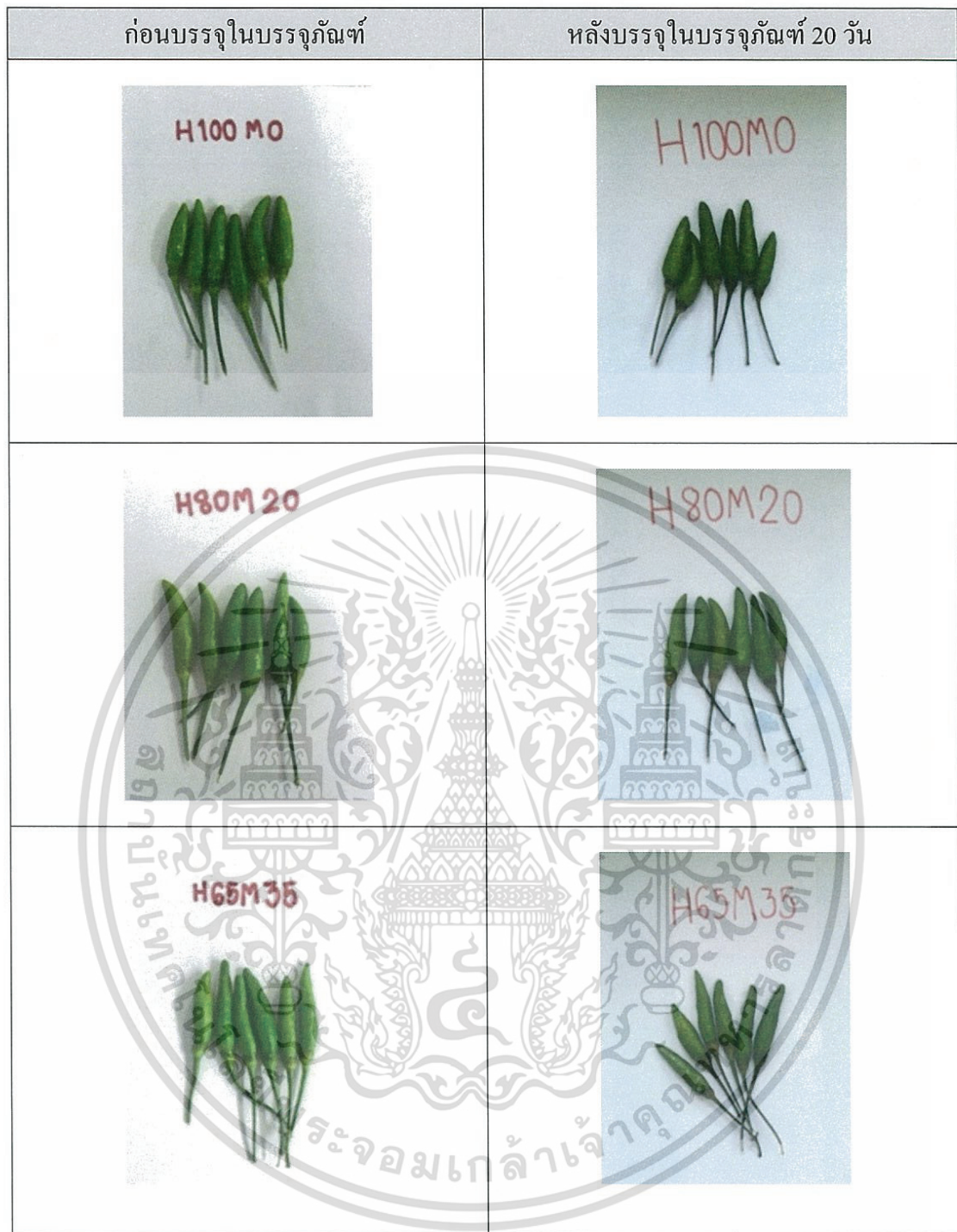
SEM ในภาพที่ 4.3 เมื่อปริมาณ EMA เพิ่มมากขึ้น ขนาดวัฏภาคกระจายซึ่งเป็นบริเวณที่มีขั้วมีขนาด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้ณาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่ขึ้นทำให้เกิดอันตรายกับไอน้ำได้มากขึ้น 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

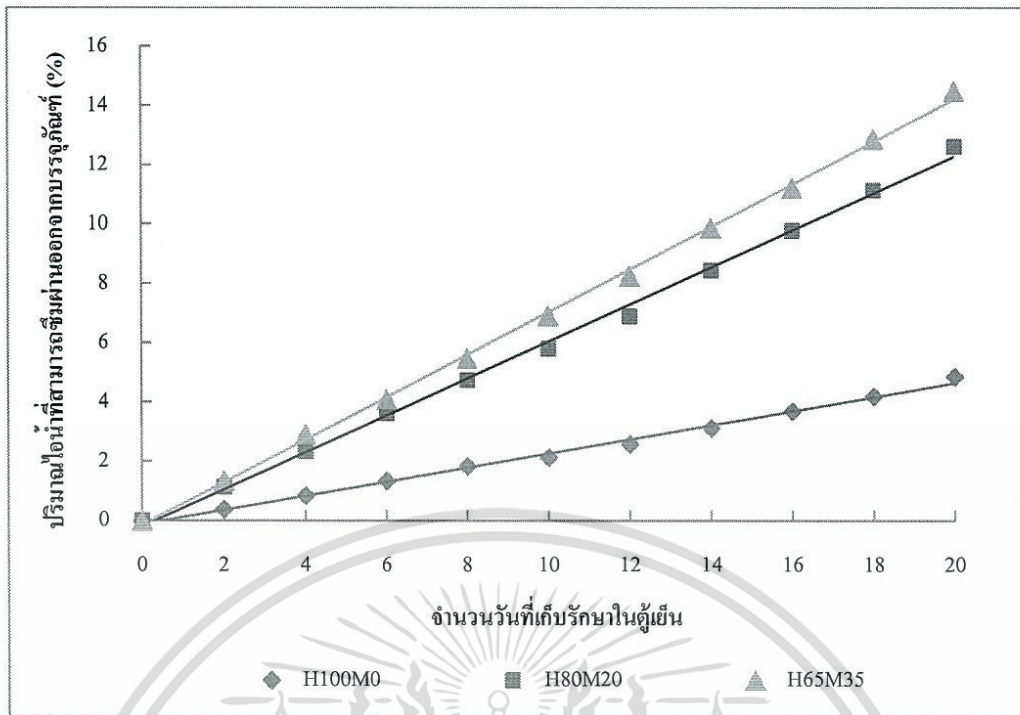
การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ได้เลือกพริกขี้หนูสดมาทำการทดสอบเนื่องจากพริกจัดเป็นผลิตผลสดประเภท Non climacteric ซึ่งไม่มีการสุกตัวหลังการเก็บเกี่ยว อีกทั้งมีการหายใจที่คงที่ และการหายใจให้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ซึ่งหากมีการเก็บสะสมไว้จะทำให้ผลิตผลเกิดการเน่าเสียได้โดยการทดสอบนี้ควบคุมอายุ ปริมาณ และน้ำหนักพริกขี้หนูสดเริ่มต้นให้ใกล้เคียงกันและนำมาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 20 วัน ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40% จากภาพที่ 4.7 แสดงพริกขี้หนูสดที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ก่อนและหลังการเก็บรักษา พบว่าหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 20 วัน พริกขี้หนูสดยังคงมีสีเขียวเหมือนเดิมเพราะไม่มีการสุกหลังจากเก็บเกี่ยว แต่จะเกิดอาการค้ำที่บริเวณขั้ว การเหี่ยวที่บริเวณก้าน และมีความแน่นเนื้อลดลง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการเกิดอาการสะท้านหนาว (Chilling injury) ได้แก่ การมีสีคล้ำลงของผลิตผลสด (Darkening) และการเหี่ยว (Wilting) [37]

ขณะที่เก็บพริกขี้หนูสดในบรรจุภัณฑ์ พริกขี้หนูสดยังมีการหายใจและการคายน้ำ ซึ่งไอน้ำที่เกิดจากการหายใจส่วนหนึ่งจะสามารถระบายออกจากบรรจุภัณฑ์ได้ และไอน้ำที่เหลือจะถูกกักเก็บอยู่ในบรรจุภัณฑ์ดังในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง.1) ซึ่งปริมาณไอน้ำที่ถ่ายเทขึ้นกับอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของถุงบรรจุภัณฑ์ หากซึมผ่านออกไปได้ดี จะมีปริมาณไอน้ำที่ถ่ายเทมาก ในทางกลับกันปริมาณไอน้ำกักเก็บจึงเหลือน้อยลง แต่หากถุงบรรจุภัณฑ์ถ่ายเทไอน้ำออกไปไม่ดี ทำให้มีปริมาณไอน้ำกักเก็บเหลืออยู่มาก ขณะที่ปริมาณไอน้ำถ่ายเทออกไปน้อย โดยไอน้ำกักเก็บที่เหลืออยู่ในบรรจุภัณฑ์ควมแน่นเป็นหยดน้ำ หากมีหยดน้ำเหล่านี้เกิดขึ้นในบรรจุภัณฑ์มากส่งผลให้ผลิตผลเกิดการเน่าเสียได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาหาปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกบรรจุภัณฑ์ และปริมาณไอน้ำกักเก็บใน บรรจุภัณฑ์ เพื่อหาประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณโคพอลิเมอร์แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.7 พริกขี้หนูสดที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ก่อนและหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C โดยมีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

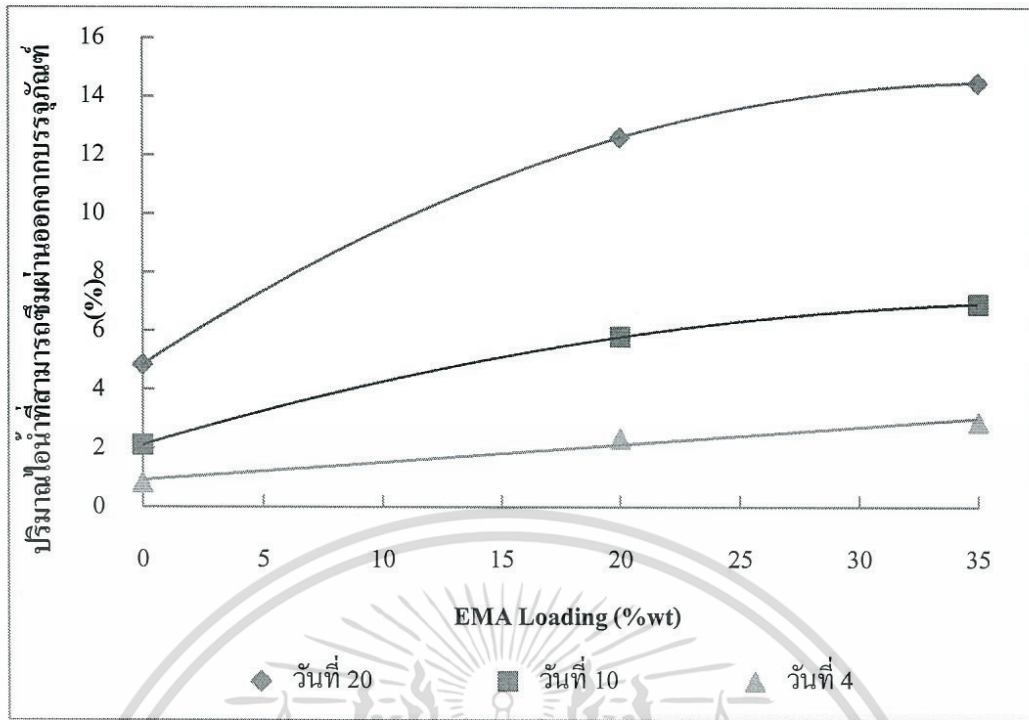


ภาพที่ 4.8 ปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์ในระยะเวลา 20 วัน

ระหว่างเก็บรักษาบรรจุภัณฑ์ทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปในบรรจุภัณฑ์ทุก ๆ 2 วัน จนครบ 20 วัน น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของบรรจุภัณฑ์แสดงให้เห็นถึงการหายใจของพริกซึ่งมีผลิตภัณฑ์หลักคือไอน้ำ และไอน้ำส่วนหนึ่งสามารถซึมผ่านออกนอกถุงบรรจุภัณฑ์ได้ ทำให้น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์และพริกลดลงไปจากวันแรก จากภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์และจำนวนวันในการเก็บรักษา โดยเมื่อจำนวนวันมากขึ้น พบว่าไอน้ำที่ซึมผ่านออกไปมีปริมาณมากขึ้น โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงไม่ว่าจะเป็นฟิล์มสูตรใด ฟิล์มพอลิเมอร์สูตรที่มี EMA มากที่สุด (H65M35) มีปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านออกไปมากที่สุดเนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีขี้ผึ้งมาก ทำให้ฟิล์มมีความชอบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ไอน้ำสามารถซึมผ่านออกมาได้มาก

เมื่อศึกษาการระบายไอน้ำในแต่ละช่วงของการเก็บรักษา จากภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์กับปริมาณ EMA ณ วันที่ 4, 10 และ 20 ของการเก็บรักษาพริกขี้หนูสด พบว่าการระบายของไอน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณ EMA ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับที่เห็นในภาพที่ 4.8 โดยพบว่า ณ วันที่ 4 ของการเก็บรักษา กราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ในขณะที่วันที่ 10 และ 20 กราฟเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อ EMA สูงขึ้น เนื่องจากพริกขี้หนูสดผ่านการหายใจมาเป็นเวลานาน ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์เหลือน้อยลง ไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการหายใจจึงลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 ปริมาณ ใอน้ำที่ซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ ณ วันที่ 4, 10 และ 20

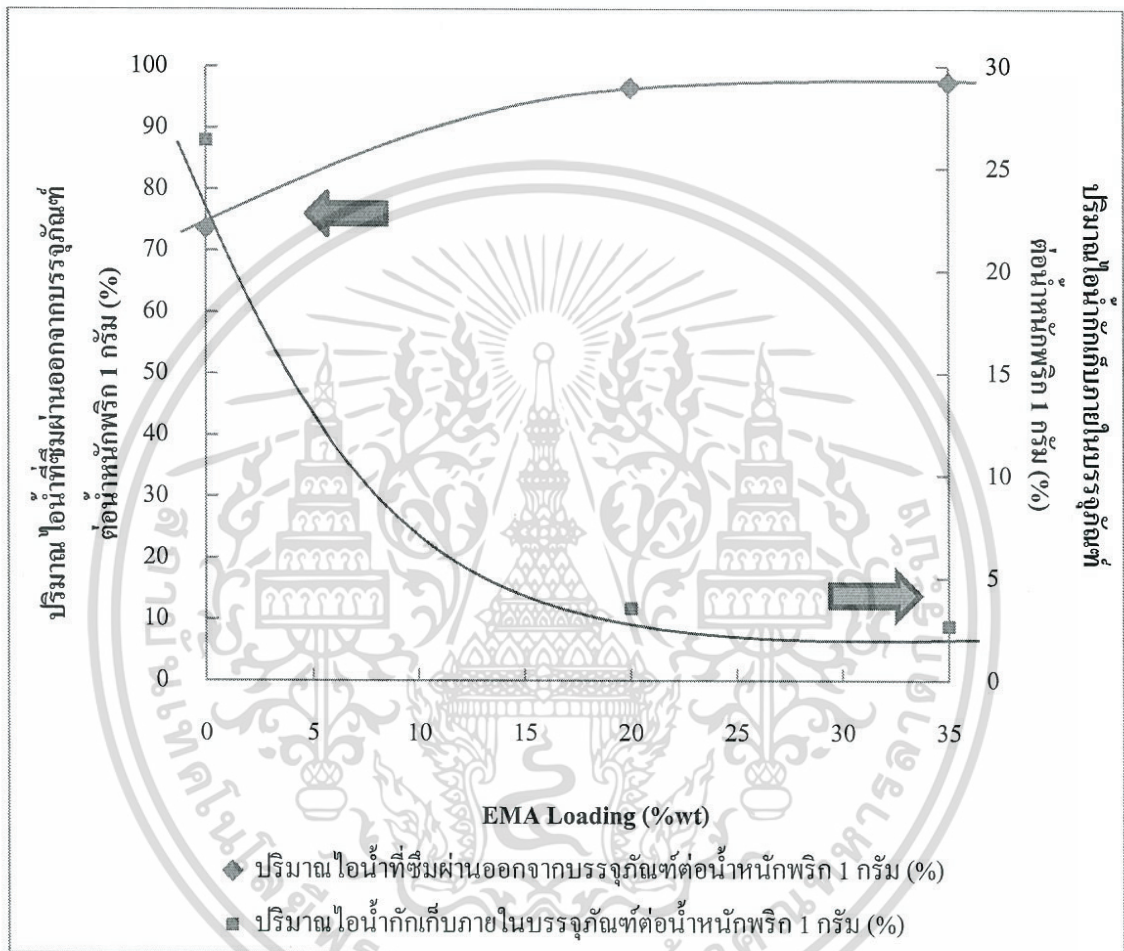
ผลจากการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ในวันที่ 20 สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้จากปริมาณ ใอน้ำที่ซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ร่วมกับปริมาณ ใอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง และแสดงค่าที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณ ใอน้ำรวมที่พืชหายใจได้ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม หลังการเก็บรักษา 20 วัน

ตัวอย่าง	ปริมาณ ใอน้ำที่ซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ต่อ น้ำหนักพริก 1 กรัม (%)	ปริมาณ ใอน้ำที่กักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ต่อ น้ำหนักพริก 1 กรัม (%)	ปริมาณ ใอน้ำรวมที่พืชหายใจได้ต่อน้ำหนักพริก 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 สามารถหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณ ใอน้ำที่ซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ และปริมาณ ใอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ต่อ น้ำหนักพริก 1 กรัม ภายหลังจากเก็บรักษาพริกเป็นเวลา 20 วัน โดยแสดงดังภาพที่ 4.10 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีปริมาณ EMA มากที่สุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(H65M35) สามารถระบายไอน้ำออกจากบรรจุภัณฑ์ได้มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการเติม EMA ที่มีวัฏภาคอสัณฐานที่มีขี้้วทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์มีความชอบน้ำมากขึ้น จึงเหินย่นำให้ไอน้ำสามารถซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ได้มากที่สุด ในขณะที่ขี้้วกันฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรดังกล่าวมีปริมาณไอน้ำกักเก็บเหลืออยู่น้อยที่สุด ดังนั้นฟิล์มพอลิเมอร์สูตรดังกล่าวจึงน่าจะพัฒนาใช้ในการยืดอายุในการเก็บรักษาผักและผลไม้ได้ดีกว่าสูตรอื่น เนื่องจากมีโอกาสเกิดการควบแน่นของไอน้ำน้อยที่สุด



ภาพที่ 4.10 ปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ และปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ เทียบกับปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำเอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (EMA) ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีขั้ว และมีวิฤภาคเป็นอันดับสูงมาพัฒนาความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (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 ที่เติมลงไปช่วยทำให้ฟิล์มมีสภาพขั้วสูงขึ้น

3. จากการศึกษาค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม พบว่าเมื่อมีการเติม EMA ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำได้สูงขึ้นด้วย เนื่องจาก EMA ในปริมาณสูงทำให้ฟิล์มมีวิฤภาคอันดับสูงและความมีขั้วสูงขึ้น โดยจากผลของฟิล์ม H80M20, H70M30 และ H65M35 มีค่า WVP สูงขึ้นตามลำดับ และมีค่าสูงกว่าฟิล์มทั่วไปในท้องตลาด เมื่อนำฟิล์มที่ขึ้นรูปได้มาทำเป็นถุงสำหรับบรรจุพริกขี้หนูสด พบว่ามีมวลไอน้ำกักเก็บสะสมอยู่น้อย ทำให้มีโอกาสในการเก็บรักษาพริกขี้หนูสดโดยปราศจากการเน่าเสียอันเนื่องมาจากไอน้ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. อาจเปลี่ยนแปลงชนิดของโคพอลิเมอร์ที่มีสภาพขั้วสูงกว่า เพื่อให้ฟิล์มมีสภาพขั้วสูงขึ้นและสามารถซึมผ่านไอน้ำได้ดีขึ้น เพื่อที่จะใช้โคพอลิเมอร์ในปริมาณที่ลดลง สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะได้ไม่ต่ำกว่าฟิล์ม HDPE มากนัก

2. อาจมีการใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ในการผลิตฟิล์ม เพื่อให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงโมเลกุลมากขึ้น ซึ่งทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ยังคงสมบัติเชิงกลที่ดีแม้ว่ามีโคพอลิเมอร์ผสมอยู่ แต่การจัดเรียงตัวของโมเลกุลอาจทำให้ปริมาณผลึกของฟิล์มเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดลง จึงต้องหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้สมบัติเชิงกลและค่า

ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำดี งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] นันทวรรณ ม่วงมี. 2554. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลดีพีอีด้วยอีวีเอ และ ซีโอไลต์เอ.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] จิตรา สักคาพิสุทธิ์, เมธาวิ อุตตสุรดี และรันตี บุญตา. 2555. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVOH และซีโอไลต์เอ.” โครงการพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] จูตินันท์ ศิริจันทนันท์. 2557. “สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม แอลดีพีอี/อีเอ็มเอ/ซีโอไลต์เอ เพื่อใช้งานบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] วรณัฐ เริงโกสุม. 2550. การศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีน/เคลย์ นาโนคอมโพสิต. [Online]. Available : http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/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 Publising Company Inc.
- [7] สังคม เตชะวงศ์เสถียร. 2552. เอกสารประกอบการเรียนวิชาสรีรวิทยาของพืชสวนบทที่4 สรีรวิทยาการสุกของผล. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [8] ดนัย บุญเกียรติ และ นิษฐา รัตนานนท์. 2535. การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- [9] งามทิพย์ ภู่วโรคม. 2550. การบรรจุอาหาร. กรุงเทพฯ : เอส. พี. เอ็ม. การพิมพ์จำกัด.
- [10] สุธิณี เกิดเทพ. 2552. “ผลของการเคลือบสารลดแรงตึงผิวต่อสมบัติการป้องกันการเกิดฝ้าของฟิล์ม.” ปัญหาพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[11] Paine, F.A. and Paine, H.Y. 1992. **A Handbook of food Packaging.** New York : เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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 สิริพานิช. 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 วิสสุธอการ. 2540. **เอกสารประกอบการสอนการประเมินอายุการเก็บรักษาของอาหาร**. ภาควิชาพัฒนาการผลิต คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [19] Billmeyer, F.W. 1984. **Textbook of Polymer Science**. New York : John Wiley & Sons.
- [20] ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยร่วมกับ บริษัท ไทยโพลีเอทิลีน จำกัด. 2532. **การสัมมนาเรื่อง HDPE...บรรจุภัณฑ์ทันสมัย**. กรุงเทพฯ : ศูนย์บรรจุหีบห่อไทย.
- [21] Fried, J.R. 1995. **Polymer Science and Technology**. New Jersey : Prentice Hall PTR : 290-294.
- [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 :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ <http://www.4spc.org/content/norelated.aspx?ItemNumber=22532> นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Access on 10 January 2016.

- [24] วิกีพีเดีย 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_TECH.pdf Access on 10 January 2016.
- [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 โยชนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Tear Propagation Resistance (trouser tear) of Plastic Film and Thin Sheeting by a single 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. “ผลของการบรรจุที่มีต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาพริกชี้หนูสด.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [38] ณัฐริกา ใจสมบูรณ์. 2556. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลแอลดีพีอีด้วยอีวีเอและซีโอไลต์เอ.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต 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.** [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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ

งวดที่ 1 42,500 บาท 85 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน 1 ตุลาคม 2559.....
งวดที่ 2 7,500 บาท 15 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน 27 มิถุนายน 2560.....

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่าย

หมวดค่าใช้จ่าย	ค่าใช้จ่าย (บาท)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว	-
งบดำเนินงาน	
ค่าตอบแทน	-
ค่าใช้สอย	42,085.80
ค่าวัสดุ	7,914.20
ค่าสาธารณูปโภค	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	-
รวมงบประมาณที่จ่ายไปแล้ว	50,000.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

นางสุภารัตน์ รักชลธี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วทบ. (เกียรตินิยม)	เคมีอุตสาหกรรม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	พ.ศ. 2535
MSc	Polymer Science and Technology	Loughborough University	พ.ศ. 2537
PhD	Polymer Rheology	Loughborough University	พ.ศ. 2541

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

- Polymer Processing and Compounding

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
พ.ศ. 2536- 2541	ทุนเรียนปริญญาโท-เอก ณ สหราชอาณาจักร	กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
พ.ศ. 2543	ทุนวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมขนาดเล็ก	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
พ.ศ. 2547	ทุนวิจัยบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548	ทุนวิจัยบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550	ทุนวิจัยความร่วมมือกับเอกชน	บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2552	ทุนงบประมาณแผ่นดิน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553	ทุนวิจัยความร่วมมือกับเอกชน	บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2555- 2559	ทุนวิจัยบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Haworth, B. and Jumpa, S., Understanding Elongational Flow Properties of Filled Polymer Melts for Plastics Blow Molding, *Food, Cosmetics and Drug Packaging*, 21(11), 213, 1998.
2. Haworth, B. and Jumpa, S., Extensional Flow Characterization and Extrusion Blow Molding of High Density Polyethylene Modified by Calcium Carbonate, *Plastics Rubber and Composites*, 28(8), 363, 1999.
3. Haworth, B. and Jumpa, S., Melt-State Elongational Rheometry of Mineral-Filled Polyethylene, *Polymer Testing*, 19(4), 459, 2000.
4. สุภารัตน์ รักชลธี ชนเรศ ประเสริฐวงศ์ และธราศรัย แสงภักดี, “ผลของชนิดของสารช่วยผสมต่อสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต”, *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, 9(4), 253, 2545.
5. สุภารัตน์ รักชลธี กังสาด บัวบุตรา ณิชฉินชาร์ ศิริเจียรนัย และกัญญาวีร์ สุวรรณชัย, “สมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ผสมสารเติมแต่งซีโอไลต์”, *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, 30(4), 262, 2545.
6. สุภารัตน์ รักชลธี ประมินทร์ ช้างเพชร และประกฤษฏี แสงทองอินทัย, ”สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม”, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 12(1), 27, 2546.
7. สุภารัตน์ รักชลธี พงษ์ธร แซ่ฮุย ธีระชาติ ก่อตระกูล และปานหทัย ชื่นพุดิ, ผลของแก้วกลบในสารตัวเติมผสมต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 12(2), 13, 2546.
8. สุภารัตน์ รักชลธี ธีระชาติ ก่อตระกูล ปานหทัย ชื่นพุดิ และพงษ์ธร แซ่ฮุย, อิทธิพลของแก้วกลบในสารตัวเติมผสมต่อความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*. 12(3), 50, 2547.
9. Rukchonlatee, S., Amornsakchai, T. and Limpong, P., Properties of Calcium Carbonate- Filled Polyethylene Bottles Produced from Extrusion Blow Molding Process, *KMITL Science Journal*, 6(2b), 582, 2006.
10. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Fuongfuchart, A. and Sirikittikul, D., Selective ethylene permeable zeolite composite double-layered film for novel modified atmosphere packaging, *Polymer Engineering and Science.*, 51(7), 1264, 2011. (Impact factor 2009: 1.248)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสนอผลงานวิชาการ

1. Haworth, B. and Jumpa, S., Elongational Rheometry of Filled Polyethylene Melts, Loughborough Fillers Symposium II, 17th –18th September 1996, Loughborough, UK.
2. Haworth, B. and Jumpa, S., Processing Behavior of Filled HDPE for Blow Molding, Advances in Blow Molding: New Materials and Processes, 30th June – 1st July 1998, Loughborough, UK
3. Haworth, B., Jumpa, S., and Miller, N.A., Proceeding International Conference “PPS-15”, S’Hertogenbosch, The Netherlands, 1999, Polymer Processing Society, Paper 132.
4. Jumpa, S and Haworth, B., Extrusion Blow Moulding of CaCO₃-Filled HDPE Compounds, PPS Symposium, Thailand, P-50, 1999.
5. Jangchud, I. and Rukchonlatee, S., Porous Water Pipe made from Ground Rubber Tire (GRT) and High Density Polyethylene (HDPE): Rheology and Water Irrigation, *The 8th Pacific Polymer Conference Proceedings*, November 24-27, Bangkok, Thailand, 120, 2003.
6. Rukchonlatee, S., Water Vapor Permeability, Rheological and Mechanical Properties of Zeolite NaA –filled Linear Low Density Polyethylene, *The 8th Pacific Polymer Conference Proceedings*, November 24-27, Bangkok, Thailand, 134, 2003.
7. Ochaikul, D., Rukchonlatee, S., Soisant, P., Aramruang, S., and Fapratanchai, T., Paper Production and Properties from Bacterial Cellulose *Acetobacter xylinum* TISTR 967, *The 1st KMITL International Conference Proceedings*, August 25-26, Bangkok, Thailand, Vol.1, 153, 2004.
8. ระพี เจริมสูงเนิน ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธิ์, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิ(สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน) กับมอนตม์อริลโลไนต์ด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICHE 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
9. อภิขญา เจียนประเสริฐ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน สุภารัตน์ รักชลธิ์ และชลลดา ฤตวิรุฬห์, ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติของวัสดุประกอบนาโน LDPE/MMT, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICHE 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
10. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Fuongfuchart, A., Study on Ethylene Gas Permeability of Double-layer Composite Film, *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON)*, January 14-16, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, 82, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ดวงใจ โอชัยกุล สุภารัตน์ รักชลธี นवलพรรณ ณ ระนอง และพิชพันธ์ พงษ์สกุล, ผลของไคโตซานต่อการผลิตกระดาษจากเซลลูโลสแบคทีเรียและสมบัติที่ได้, การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48, เล่มที่ 6 สาขาวิทยาศาสตร์, กรุงเทพฯ, 313-320, 2552.
12. Moungrmee, N., Rukchonlatee, S. and Sooknoi, T, Improvement on Tensile Properties of Water-Permeable LDPE Film with EVA as Co-Matrix and Non-Reinforcing Zeolite Filler, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 121, 2009.
13. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Fuongfuchart, A., Tensile Properties of the Zeolite Composite Double-Layered Film, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 156, 2009.
14. Laowakul, S., Sooknoi, T., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S. and Fuongfuchart, A., Study on Tensile Properties of SEBS/LDPE and SEBS/OPP double-layer films for Packaging Application, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 163, 2009.
15. Laowakul, S., Ritvirulh, C., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Fuongfuchart, A. and Sirikittikul, D., Ethylene Transmission Rate through Zeolite Modified Double-Layered Films for Packaging of Fresh Produces, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 45, 2010.
16. Moungrmee, N., Sooknoi, T. and Rukchonlatee, S., Improved Water Vapor Permeability of Fresh Produces Packaging Film: Zeolite A-Filled LDPE/EVA, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 49, 2010.
17. Rukchonlatee, S., Amornsakchai, T. and Payaksiri, N., Investigation on Extrusion Blow Molding Process and Properties of Modified CaCO₃-Filled HDPE Bottles, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 147, 2010.
18. สมยศ รัตนไพบูลย์กิจ, ตะวัน สุขน้อย, ชลลดา ฤตวิรุพห์ และสุภารัตน์ รักชลธี, फिल्मพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง, การประชุมวิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย” ครั้งที่ 4, ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 12-13 มีนาคม, พิษณุโลก, 2554.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19. Jaisomboon, N., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Enhancement of Water Vapor Permeation of LLDPE Film with EVA as Dispersed Phase, *The 38th Congress on Science and Technology of Thailand (STT38)*, October 17-19, Chiang Mai, Thailand, E_E0007, 2012.
20. Wiwattanankul, R., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S. and Ritvirulh, C., Improved the ethylene transmission rate of LLDPE/SEBS blend film, *The Proceedings Pure and Applied Chemistry International Conference 2013 (PACCON 2013)*, January 23-25, Bangsaen, Thailand, 1033, 2013.
21. Chitraruwatkul, J., Ochaikul, D., Rukchonlatee, S. and Janvikul, W., Studied on Preparation and Antibacterial Activity of Zinc Oxide/Cellulose Composite Films, *International Conference on Engineering, Applied Science and Technology 2013 (ICEAST 2013)*, August 21-24, The Sukosol, Bangkok, Thailand, 2013.
22. Rukchonlatee, S., Napradit, S., Manusongtanakul, P., Juntima, S and Sooknoi, T., Effect of LLDPE/LDPE Ratio on Processability and Properties of LLDPE/LDPE/EVA Films, *2013 International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2013)*, November 20-21, IVE/VTC, Tsing Yi, Hong Kong, China, ID100, pp.114-115, 2013.
23. Pinsakul, S., Rukchonlatee, S., Monvisade, P. and Chaiyanit, V., Modified Plastisol Inks Based on Ethylene Vinyl Acetate and Ethylene Methyl Acrylate Copolymers, *2013 International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2013)*, November 20-21, IVE/VTC, Tsing Yi, Hong Kong, China, ID71, pp.73-74, 2013.
24. Sirichantan, T., Sooknoi, T., Yamaguchi, M. and Rukchonlatee, S., Enhancement of Water Vapor Permeation of LDPE Film with EMA as Dispersed Phase, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 169-172, 2014.
25. Pinsakul, S., Monvisade, P., Rukchonlatee, S. and Chaiyanit, V., Potential Use of Modified Plastisol Inks Based on EVA/EVOH, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 174-177, 2014.
26. Uttasuradee, M., Sooknoi, T. and Rukchonlatee, S., Improved Water Vapor Permeability of LDPE Films using EVOH or EVA Blends, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp.215-217, 2014.

27. Uttasuradee, M. and Rukchonlatee, S., Property Improvement of Linear Low Density Polyethylene/ Barium Sulfate Composites for Sea Fishery Application, *The Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON 2015)*, January 21-23, Bangkok, Thailand, pp. 416-419, 2015.
28. Sahassanon, T. Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Ritvirulh, C., Improvement of Ethylene Permeation in LLDPE/SEBS Film with Zeolite Y, *The Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON 2015)*, January 21-23, Bangkok, Thailand, pp. 432-435, 2015.
29. Makphon, K., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T., Yamaguchi, M. and Ritvirulh, C., Study on LLDPE/SEBS/modified zeolite ZSM-5 blends for ethylene permeation improvement of packaging film, *The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)*, June 30- July 1, Patumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 353-358, 2016.
30. Kunjit, P., Sooknoi, T., Maluangnont, T., Rukchonlatee, S. and Ritvirulh, C., Photodegradable film prepared from LDPE/TiO₂ nanotube, *The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)*, June 30- July 1, Patumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 452-456, 2016.
31. Arnutnanon, P., Monvisade, P., Rukchonlatee, S. and Chaianit, V., Modified plastisol ink based on EVA/NR and EVA/ENR, *The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)*, June 30- July 1, Patumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 267-272, 2016.
32. Rukchonlatee, S., Ochaikul, D., Suankaew, C. and Janvikul, W., Mangosteen shell extract/bacterial cellulose mat as potential antibacterial wound dressings, *The 14th International Symposium on Biocontrol and Biotechnology*, Saint-Petersburg, Pushkin, Russian Federation, Russia, 6 – 9 November, 2016.
33. Ritvirulh, C., Hongthong, K., Makphon, K., Rungroang C., Rukchonlatee, S. and Sooknoi, T., Selective Ethylene Permeability of LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5 Films, *The 11th SPSJ International Polymer Conference (IPC2016)*, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, 13 – 16 December, 2016.
34. Rukchonlatee, S., Sonpoo, T., Deesamer, S. and Sooknoi, T., Improvement of Mechanical and Water Vapor Permeability Properties of LDPE/EVA/EVOH Films with Zeolite A, *The 11th SPSJ International Polymer Conference (IPC2016)*, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, 13 – 16 December, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

35. Mahawanjarn, P., Piamsuwansiri, S., Pongtanapaisan, O., Ruckchonlatee, S., Sooknoi, T. and Ritvirulh, C., Photodegradable Film Prepared From LDPE/TiO₂ and LDPE/Hydrophobic TiO, The 11th SPSJ International Polymer Conference (IPC2016), Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, 13 – 16 December, 2016.
36. Ruckchonlatee, S., Jaisomboon, N. and Sooknoi, T., Improvement of Water Vapor Permeability of LLDPE/EVA Film with Zeolite A as Filler, Key Engineering Materials, 730, 31-36, 2017.
37. Sonpoo, T. and Ruckchonlatee, S. Effect of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer on Mechanical Properties of Bottles produced from High Density Polyethylene Mixed with Calcium Carbonate, The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-7), June 1-2, Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 170-174, 2017.
38. Makphon, K., Na Lampoon, C., Phanthong, P., Tumsa, R., Ritvirulh, C., Sooknoi, T. and Ruckchonlatee, S., Effect of Poly (Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene) Type on Ethylene Gas Permeation Property of Linear Low Density Polyethylene Film, The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-7), June 1-2, Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 175-179, 2017.

บทความวิชาการที่เผยแพร่

1. สุภารัตน์ จำปา, “เครื่อง Uniaxial Elongational Rheometer สำหรับศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว”, วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง, 10(1), 8, 2543.

งานแปลหนังสือ

1. สุภารัตน์ จำปา อะลูมิเนียม นานมีบุ๊คส์ กรุงเทพฯ 2542.
2. จินดา อุดชาชน ตะวัน สุขน้อย อิทธิพล แจ่มชัด สุภารัตน์ จำปา และชลลดา ฤตวิรุฬห์ เฌมีย์ หลักสูตร แห่งชาติระดับมัธยมศึกษา (GCSE) ของประเทศอังกฤษ นานมีบุ๊คส์ กรุงเทพฯ 2542.

งานเขียนและเรียบเรียงหนังสือ

1. สุภารัตน์ รักชลธิ์ (กองบรรณาธิการ) สารระ...อะโรเมติกส์เฉลิมพระเกียรติ บริษัทอะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด 2549.
2. อิทธิพล แจ่มชัด ชลลดา ฤตวิรุฬห์ จุฬารัตน์ ปรัชญาวรากร สุภารัตน์ รักชลธิ์ และสมศักดิ์ วรมงคลชัย ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. จำนวน 77 หน้า 2553.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



T149351



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้