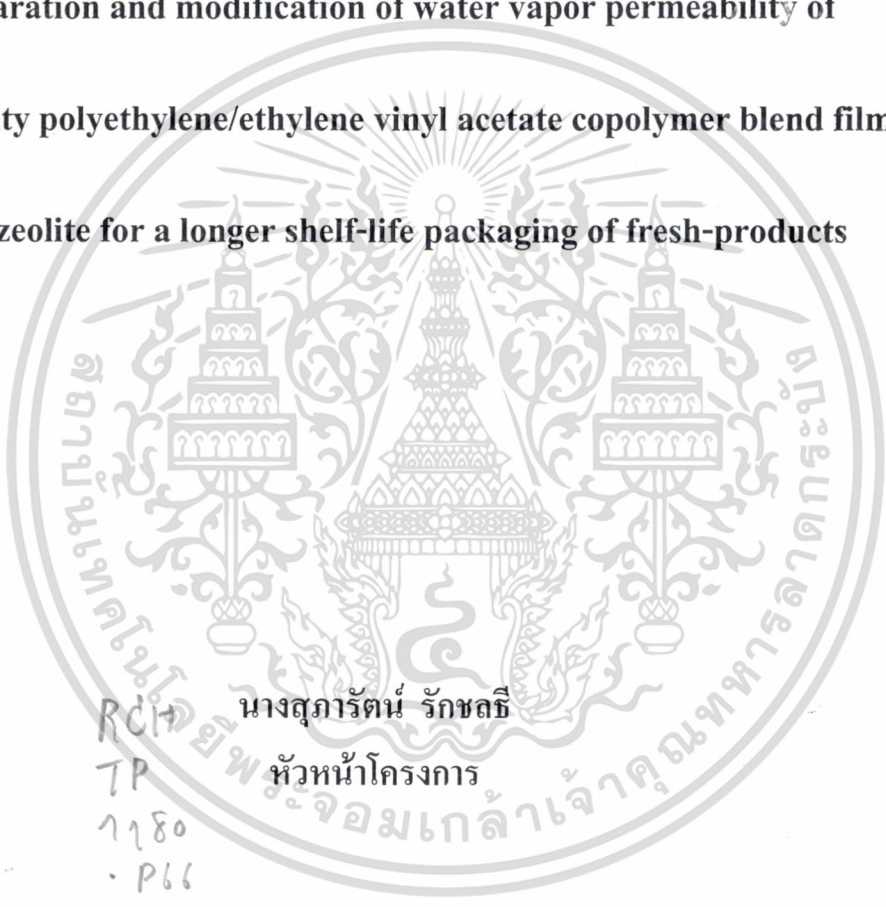


รายงานการวิจัย

การเตรียมและปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
(พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์)

ด้วยซีโอไลต์เพื่องานบรรจุภัณฑ์ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์สด

Preparation and modification of water vapor permeability of
low density polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer blend film
using zeolite for a longer shelf-life packaging of fresh-products



RC11 นางสุภารัตน์ รักขตธี
TP หัวหน้าโครงการ
1180
P66
ส 838 ก

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...120240
วัน, เดือน, ปี...10 ก.พ. 2555

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๒
คณะวิทยาศาสตร์

b.12036993
i.....

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การเตรียมและปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์) ด้วยซีโอไลต์เพื่องานบรรจุภัณฑ์ ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์สด (Preparation and modification of water vapor permeability of low density polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer blend film using zeolite for a longer shelf-life packaging of fresh-products) ดำเนินงานได้เป็นอย่างดี โดยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๒

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวนันทวรรณ ม่วงมี ผู้ช่วยนักวิจัยของโครงการ นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของสาขาวิชาเคมีทุกท่านในการอำนวยความสะดวกและช่วยให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

นางสุภารัตน์ รักชลธิ
หัวหน้าโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตต โคพอลิเมอร์) ด้วยซีโอไลต์เพื่องานบรรจุภัณฑ์ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาที่ LDPE นิยมใช้ทำเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ และซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีขั้วและมีรูพรุนสามารถดูดซับน้ำได้ดี เมื่อนำมาผสมกับ LDPE ซึ่งไม่มีขั้วทำให้เกิดปัญหาการกระจายตัวไม่ดี และใส่ซีโอไลต์เอได้ในปริมาณต่ำ งานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วยการนำ EVA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วจากหมู่อะซิเตตมาผสมเพื่อปรับปรุงการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์ม โดยใช้อัตราส่วน LDPE/EVA เป็น 100/0, 85/15, 80/20 และ 75/25 และใช้ซีโอไลต์เอ 0-25% โดยน้ำหนัก การผสมสูตรพอลิเมอร์ทำโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่และนำไปขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม นำฟิล์มที่ได้มาศึกษาสมบัติต่างๆ และเลือกสูตรฟิล์มมาทำเป็นถุงบรรจุภัณฑ์เก็บรักษามะเขือเทศ เพื่อดูความสามารถในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาพบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile Yield Strength) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (% Elongation at yield) และมอดุลัส (Modulus) ของฟิล์มที่ไม่มีหรือมีซีโอไลต์ 10% มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ EVA เพิ่มขึ้น เพราะ EVA นิ่มกว่า LDPE ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA การใช้ซีโอไลต์เพิ่มขึ้นเป็น 20% ทำให้ความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่ปริมาณมากขึ้น (25%) พบว่าสมบัติดังกล่าวลดลง เนื่องจากซีโอไลต์ที่มากเกินไปจะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนกลายเป็นจุดบกพร่องของฟิล์ม และจากผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) และความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (OP) พบว่าฟิล์มที่มี EVA และซีโอไลต์ในปริมาณสูง (อัตราส่วน LDPE/EVA เป็น 80/20 และมีซีโอไลต์เอ 20%) จะมี WVP และ OP สูงที่สุด เนื่องจากรูพรุนของซีโอไลต์เอมีขั้วจึงยอมให้ไอน้ำและออกซิเจนผ่านได้ดี เมื่อมี EVA ผสมทำให้มีการกระจายตัวที่ดี มีพื้นผิวสัมผัสสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองเก็บรักษามะเขือเทศพบว่า ฟิล์มสูตรดังกล่าวพบมวนไอน้ำกักเก็บในถุงบรรจุภัณฑ์ต่ำสุด เนื่องจากไอน้ำสามารถแพร่ผ่านถุงบรรจุภัณฑ์ได้ง่ายกว่าสูตรอื่น จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า การใช้ EVA ทำให้สมบัติการรับแรงดึงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่ช่วยปรับปรุงการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์มได้ดี ทำให้ผสมซีโอไลต์เอได้ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติการซึมผ่านไอน้ำได้ดีขึ้นและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้นานขึ้น

Abstract

This research studied preparation and modification of water vapor permeability of low density polyethylene (LDPE)/ethylene vinyl acetate (EVA) copolymer blend film using zeolite A for a longer shelf-life packaging of fresh-products. LDPE is popular for making packaging film and zeolite A is polar and porous material which can absorb water well. When zeolite A mixed with LDPE (non-polar material), its dispersion in LDPE film was not good and only low zeolite contents could be added into the LDPE film. This research aimed to improve water vapor permeability of the LDPE film by introducing EVA (which has acetate group representing polar part) to improve zeolite dispersion. The blend ratios of LDPE/EVA studied were 100/0, 85/15, 80/20 and 75/25 and the zeolite loadings were varied from 0-25% by weight. All compounds were prepared using a twin-screw extruder and shaped to product using a film blowing machine. All films were tested for some properties and then some formulated films were chosen to be packages to keep tomato for longer shelf-life testing. The results showed that tensile yield strength, %elongation at yield and modulus of the LDPE film with or without 10% zeolite content had a slightly decreasing trend when increasing EVA content. This was due to lower hardness and crystallinity of EVA. In the LDPE/EVA blend films, tensile yield strength, %elongation at yield were increased with increasing zeolite loading up to 20%. However, at higher zeolite loading, those properties were decreased and this was due to zeolite agglomeration inducing defects in the films. With water vapor permeability (WVP) and oxygen permeability (OP) tests, it was found that the film with high EVA and zeolite contents (LDPE/EVA at the 80/20 ratio and 20% zeolite) gave the highest WVP and OP. This was because the high porosity and polarity of zeolite A allowed good water vapor and oxygen permeations and incorporation of high EVA content enhanced good zeolite dispersion resulting in high surface area. This was agreed with the results from the shelf-life testing of tomato. The results revealed that the film of LDPE/EVA at the 80/20 ratio with 20% zeolite had the lowest stored water vapor mass in the tomato package due to its highest WVP. With this research, it can be concluded that an addition of EVA could only slightly altered tensile properties but well improved zeolite dispersion resulting in higher zeolite loading in film and so giving high WVP and longer shelf-life properties.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว	4
2.1.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของพืช	6
2.1.1.1 การหายใจ	6
2.1.1.2 การคายน้ำ	10
2.1.1.3 การสุก	10
2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้	10
2.2.1 การซึมผ่านของก๊าซ	11
2.2.2 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ	11
2.3 การออกแบบภาชนะบรรจุสำหรับผู้บริโภค	12
2.4 ฟิล์มที่ใช้สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์	13
2.4.1 การซึมผ่านของฟิล์ม	13
2.5 พอลิเอทิลีน	14
2.5.1. สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีน	14
2.5.1.1. ความหนาแน่น	14
2.5.1.2. ครรชนีการไหล	15
2.5.1.3. การกระจายของขนาดน้ำหนัก โมเลกุล	16
2.5.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	16

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2.1 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	17
2.5.2.2 การใช้งานของ LDPE	18
2.6 เอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์	18
2.6.1 ลักษณะทั่วไปของอีวีเอ	18
2.6.2 สมบัติของเอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์	19
2.6.3 การประยุกต์ใช้งาน	20
2.7 ซีโอไลต์เอ	20
2.7.1 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ	20
2.7.2 การสังเคราะห์	20
2.7.3 สมบัติของซีโอไลต์เอ	21
2.7.3.1. สารดูดน้ำ (Desiccants)	21
2.7.3.2. การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchangers)	22
2.7.3.3. สมบัติการคัดแยกโมเลกุล (Molecular sieves)	22
2.7.4 การนำซีโอไลต์เอไปใช้งาน	22
2.8 เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film machine)	22
2.8.1 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม	23
2.8.2 หลักการของฟิล์มเป่า	25
2.8.3 สมบัติของฟิล์มเป่า	26
2.9 ทฤษฎีการยึดเกาะ (Theories of Adhesion)	26
2.9.1 การดูดซับและการเปียก (Adsorption and Wetting)	26
2.9.2 การแพร่เข้าหากันหรืออินเตอร์ดิฟฟิวชัน (Interdiffusion)	28
2.9.3 แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Attraction)	28
2.9.4 พันธะทางเคมี (Chemical Bonding)	29
2.9.5 การยึดเกาะเชิงกล (Mechanical Adhesion หรือ Mechanical Interlocking)	29
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	35
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	35
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงาน	36
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์	37
3.3.1.1 การเตรียม Master batches	38
3.3.1.2 การเตรียมสูตรผสมพอลิเมอร์	38
3.3.2 การเตรียมแผ่นฟิล์มตัวอย่างด้วยเทคนิคการเป่า	38
3.3.3 การทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง	39
3.3.3.1 การวัดความกว้างและความหนาของแผ่นฟิล์ม	39
3.3.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณซีโอไลต์เอในแผ่นฟิล์มตัวอย่าง	39
3.3.3.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	39
3.3.3.3.1 Differential Scanning Calorimetry (DSC)	39
3.3.3.3.2 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์	40
3.3.3.4 สมบัติความแข็งแรงดึง	40
3.3.3.5 การทดสอบสมบัติการซึมผ่านไอน้ำ	41
3.3.3.6 การทดสอบสมบัติการซึมผ่านออกซิเจน	42
3.3.3.7 การทดสอบการเก็บรักษาผักและผลไม้	42
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	43
4.1 ผลการทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง	43
4.2 ผลการตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์เอในแผ่นฟิล์มตัวอย่าง	44
4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน	45
4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง	47
4.5 ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง	51
4.6 ผลการทดสอบการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง	52
4.7 ผลการทดสอบการเก็บรักษาผักและผลไม้	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	58
เอกสารอ้างอิง	60

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน	7
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจและอายุการเก็บรักษาเมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 60 °F	8
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างครรชนีการไหลกับความสามารถในการขึ้นรูป และสมบัติทางกายภาพ	15
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลกับเศษส่วนโดยมวล	16
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	17
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเอทิลีนไวนิลอะซีเตต โคพอลิเมอร์	19
รูปที่ 2.7 Frame work ของซีโอดีเอ	21
รูปที่ 2.8 โครงผลึกของซีโอดีเอ	21
รูปที่ 2.9 ภาพขยายของซีโอดีเอ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม	24
รูปที่ 2.11 การยืดเกาะระหว่างพื้นผิว มุมสัมผัสและแรงดึงผิวของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง	28
รูปที่ 2.12 กลไกการยืดเกาะชนิดต่างๆ	30
รูปที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	41
รูปที่ 4.1 สมบัติการรับแรงดึงของแผ่นฟิล์มตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม LDPE/ EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ	47
รูปที่ 4.2 สมบัติการรับแรงดึงของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่มีซีโอดีเอ 10 %	49
รูปที่ 4.3 สมบัติการรับแรงดึงของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่มีซีโอดีเอในปริมาณต่างๆ	50
รูปที่ 4.4 การซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ	52
รูปที่ 4.5 ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของแผ่นฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ	53
รูปที่ 4.6 มวลสารกักเก็บไอน้ำภายในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างสูตรต่างๆ	56

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม และระยะเวลาในการเก็บรักษาผัก	6
ตารางที่ 2.2 ชนิดของผลไม้จำแนกตามลักษณะการหายใจขณะผลแก่หรือสุก	9
ตารางที่ 2.3 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Non- Climacteric	9
ตารางที่ 2.4 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Climacteric	10
ตารางที่ 2.5 ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ	11
ตารางที่ 2.6 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ	12
ตารางที่ 2.8 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	17
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LDPE	35
ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ EVA	36
ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ Zeolite A	36
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมสูตร LDPE/EVA/ซีโอไลต์เอ	37
ตารางที่ 4.1 อักษรย่อแทนสูตรของ LDPE และซีโอไลต์เอที่ใช้ในการทดลอง	43
ตารางที่ 4.2 ความหนาเฉลี่ยของแผ่นฟิล์มที่ผลิตได้	44
ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์เอในแผ่นฟิล์มตัวอย่าง	45
ตารางที่ 4.4 แสดงค่า T_g ($^{\circ}\text{C}$) ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	45
ตารางที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ	46
ตารางที่ 4.6 มะเขือเทศในถุงบรรจุภัณฑ์จากฟิล์มสูตรต่างๆก่อน - หลังการเก็บรักษา	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ผักและผลไม้ถือเป็นสินค้าส่งออกสำคัญที่สร้างรายได้ให้กับประเทศไทย ซึ่งผลผลิตเหล่านี้จำเป็นต้องมีการใช้บรรจุภัณฑ์ช่วยป้องกันความเสียหายของผลิตภัณฑ์ระหว่างการขนส่ง โดยเฉพาะภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ยังคงมีการหายใจ มีการคายน้ำอยู่ซึ่งจะนำไปสู่การสูญเสียน้ำหนัก การสุก และการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องทำการลดความร้อนภายหลังการเก็บเกี่ยว ลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์และแมลงที่ติดมา ป้องกันการกระทบกระเทือนเนื่องจากการขนส่ง รวมทั้งมีการควบคุมการหายใจเพื่อชะลอการสุกและทำการเก็บรักษาอย่างถูกต้อง โดยการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับผักและผลไม้ ซึ่งบรรจุภัณฑ์ที่ดีต้องสามารถป้องกันการสูญเสียน้ำเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่สูญเสียน้ำหนัก ไปมาก มีการถ่ายเทไอน้ำและอากาศที่เพียงพอเพื่อคงความสดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในให้นานขึ้น อายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้สดจะได้รับการกระทบกระเทือนโดยตรงจากอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และสิ่งแวดล้อมในระหว่างการเก็บรักษา หรือระหว่างการขนส่ง การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่ถูกต้องจะช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นได้ ช่วยรักษาผลิตผลทางการเกษตรให้คงอยู่ในสภาพเดิมมากที่สุด และยังเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการที่จะช่วยขนส่งสินค้าได้โดยสะดวก [1]

การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์จะขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการจำหน่าย หากเป็นการจำหน่ายในปริมาณมากและระยะทางการขนส่งไกลอาจเลือกใช้ตะกร้าพลาสติกเพื่อเสริมความแข็งแรงและมีอายุการใช้งานนาน ผลผลิตที่ต้องการบรรจุเพื่อจำหน่ายปลีกอาจเลือกใช้ฟิล์มหัด (shrink wrap) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลาสติกในกลุ่มพอลิเอทิลีน (polyethylene; PE) ทำหน้าที่หลักคือชะลอการสูญเสียน้ำจากการหายใจและการคายน้ำ การใช้ฟิล์มพลาสติกหุ้มรอบถาดพลาสติก (over-wrap tray) ฟิล์มที่นิยมใช้ ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinylchloride; PVC) พอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์ (polyvinylidenechloride; PVDC) ถาดที่ใช้ทำด้วยพอลิสไตรีน (polystyrene; PS) หรือ พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (polyethyleneterephthalate; PET) [2]

การใช้ถุงพอลิเอทิลีนก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยม ส่วนใหญ่เลือกใช้ถุงพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) เนื่องจาก LDPE มีข้อดีคือ ขึ้นรูปได้ง่าย ราคาถูก ไม่เป็นพิษ แต่มีการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ จึงเจาะรูที่บรรจุภัณฑ์เพื่อช่วยระบายไอน้ำที่พืชหายใจออกมา แต่การเจาะรูนั้นทำให้บรรจุภัณฑ์ขาดความสวยงามและเกิดการฉีกขาดได้ง่าย นอกจากนี้อาจทำให้จุลินทรีย์ในอากาศสัมผัสกับผักและผลไม้ได้ ดังนั้นจึงมีการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่มีการซึมผ่านของไอน้ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยไม่ต้องมีการเจาะรู [3] และการควบคุมความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์ยังขึ้นอยู่กับอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มบรรจุภัณฑ์และอัตราการหายใจที่แตกต่างกันของผักและผลไม้แต่ละชนิด ดังนั้นเราควรเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่อัตราการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มให้เหมาะสมกับผักและผลไม้

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเตรียมแผ่นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี สำหรับผลิตผลทางการเกษตร โดยมีการเติมซีโอโลต์เอทีที่มีรูพรุน มีความเป็นขั้วสูง และมีสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดีมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เพื่อเพิ่มสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ แต่การจะนำซีโอโลต์เอทีซึ่งมีขั้วสูงมาผสมกับ LDPE ซึ่งมีขั้วต่ำนั้น จะทำให้เกิดปัญหาการกระจายตัวไม่ดี และใส่ซีโอโลต์เอทีได้ในปริมาณไม่มากนัก[1] เนื่องจากความแตกต่างระหว่างขั้วของฟิล์ม LDPE กับซีโอโลต์เอ จากงานวิจัย [4] ที่ผ่านมามีการทดลองเคลือบผิวซีโอโลต์เอด้วยกรดสเตียริกทำให้สามารถเข้าได้กับ LDPE แต่กรดสเตียริกที่ใช้เคลือบผิวของซีโอโลต์เอเป็นกรดไขมันมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้สมบัติการซึมผ่านไอน้ำที่ได้ยังไม่ดีนัก และจาก [5] การศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (PE/EVA) blends) พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PE สูง มีการกระจายตัวที่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ EVA สูง และพอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (melting temperatures, T_m) ของ PE มีอุณหภูมิลดลง เนื่องจากผลการละลายของ EVA หรือการเกิดผลึกร่วมของ PE กับบางส่วนของ EVA รวมทั้งจาก [6] การศึกษาการปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม EVA โดยการเติมสารเติมแต่งซีโอโลต์เอ เปรียบเทียบกับการปรับปรุงโดยการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, $CaCO_3$) พบว่าฟิล์มที่มีซีโอโลต์เอเป็นสารตัวเติมมีลักษณะการกระจายตัวที่ดี มีค่ามอดูลัส ค่าความแข็งแรงดึง และมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มที่มีการใช้ $CaCO_3$ เป็นสารตัวเติม งานวิจัยนี้จึงเลือกเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA) มาผสมเพื่อเพิ่มการกระจายตัวของซีโอโลต์เอในแผ่นฟิล์ม แทนการเคลือบซีโอโลต์เอด้วยกรดสเตียริก และในขั้นตอนการเป่าขึ้นรูป จะมีการต่อระบบปั๊มสุญญากาศดูดไอน้ำออกจากระบบเพื่อให้ระบบมีความชื้นอยู่ภายในน้อยที่สุด และจากนั้นเลือกใช้ฟิล์มสูตรที่เหมาะสมนำไปทดลองทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผักตัวอย่าง เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีการซึมผ่านไอน้ำได้ดีมาใช้งานได้จริง

1.2 วัตถุประสงค์

ผลิตแผ่นฟิล์มที่มีการซึมผ่านไอน้ำดีจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA) และซีโอโลต์เอทีปริมาณต่างๆจากกระบวนการเป่าฟิล์ม ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง และศึกษาการนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับมะเขือเทศ เพื่อศึกษายุการเก็บรักษา

1.2 ขอบเขตงานวิจัย

1. เตรียมฟิล์มจากกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยทำการผสม LDPE กับ EVA ในอัตราส่วน 100:0, 85:15, 80:20 โดยน้ำหนัก และมีซีโอไลต์เป็นองค์ประกอบเท่ากับ 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. ศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึงของฟิล์มที่ขึ้นรูปได้ด้วยเครื่อง Universal testing machine
3. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มที่ขึ้นรูปได้ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC), Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) และเครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA)
4. ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มที่ขึ้นรูปได้ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)
5. ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มที่ขึ้นรูปได้ด้วยเครื่อง Water vapor permeability analyzer
6. ศึกษาการยึดเกาะหยดของน้ำบนแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact Angle)
7. ศึกษาทดลองทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับเก็บรักษามะเขือเทศ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำฟิล์มที่มีการซึมผ่านไอน้ำได้ดี มาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับห่อผลิตผลสด เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดได้นานขึ้น และอาจนำความรู้ที่ได้ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่องานเกษตรกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว

การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อรักษาคุณภาพที่ดีของผักและผลไม้ไว้ ซึ่งหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้วผลิตผลนั้นจะถูกตัดขาดจากแหล่งน้ำที่เคยได้รับจากราก แต่การสูญเสียน้ำเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา เนื่องจากผลิตผลนั้นยังคงมีการหายใจและคายน้ำอยู่เหมือนกับขณะที่อยู่บนต้น การสูญเสียน้ำนอกจากจะทำให้น้ำหนักที่จะขายได้ขาดหายไปแล้ว ยังทำให้รูปร่างลักษณะของผลิตผลนั้นเปลี่ยนไปในทางที่เลวลง ทำให้รสชาติและคุณภาพของผลิตผลนั้นๆ เปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นการป้องกันการสูญเสียน้ำจึงเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่ง การสูญเสียน้ำออกจากพืชขึ้นกับความชื้นบรรยากาศภายนอก ความชื้นนี้จะผันแปรไปตามสภาพแวดล้อมจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งที่มาของน้ำและอุณหภูมิ ดังนั้นหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้วควรมีวิธีการเก็บรักษาที่ดี เพราะการเก็บรักษาเป็นวิธีการสำคัญในการช่วยยืดอายุของผลิตผลทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยวให้มีอายุการใช้ประโยชน์ได้นานขึ้น โดยที่มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ในผลไม้บางชนิด เช่น แอปเปิ้ล สามารถเก็บไว้เพื่อรอการจำหน่ายในท้องตลาดได้ตลอดทั้งปี นอกจากนี้การเก็บรักษายังมีประโยชน์ช่วยลดไม่ให้เกิดผลออกสู่ตลาดมากเกินไปทำให้ราคาผลิตผลไม่ตกต่ำ รวมทั้งสามารถเก็บรักษาไว้จำหน่ายในช่วงตลาดขาดแคลนก็ทำให้ขายได้ในราคาที่ดีอีกด้วย

ในการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรนั้นจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานเพียงใดนั้นเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้คือ [3]

- ความชื้นในบรรยากาศ ความชื้นหรือความดันไอน้ำในบรรยากาศโดยปกติจะมีอยู่ในระดับต่ำกว่าความชื้นอิ่มตัว นั่นคือความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 100% จึงมีโอกาสที่บรรยากาศจะรับน้ำได้อีกมาก ส่วนผักและผลไม้ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่า 70% และส่วนใหญ่มีน้ำอยู่ถึง 90% ความดันไอน้ำในผลไม้ก่อนข้างสูงเพราะผลไม้เปรียบเสมือนภาชนะปิด ไอน้ำรอบๆเซลล์จะอยู่ในสมดุลกับน้ำภายในเซลล์ ซึ่งเราอาจถือได้ว่าความดันไอน้ำภายในผลิตผลจะมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว เพราะฉะนั้นจะมีการสูญเสียน้ำออกจากผลิตผลตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับว่าบรรยากาศภายนอกมีความชื้นมากน้อยเพียงใด ในกรณีที่ความชื้นของบรรยากาศรอบๆอิ่มตัวด้วยน้ำหรือมีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100% น้ำก็ยังมีโอกาสสูญเสียดังกล่าวให้กับบรรยากาศได้ เนื่องจากผลิตผลเป็นสิ่งที่มีชีวิต มีการหายใจทำให้มีพลังงานความร้อนออกสู่บรรยากาศรอบๆ ทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นและทำให้อากาศรับน้ำได้มากขึ้นกว่าเดิม

- อุณหภูมิ มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับความชื้นและการสูญเสียน้ำ ทั้งนี้เพราะสารทุกอย่างมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะพวกของเหลวและก๊าซจะเห็นได้ชัด ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนไหวของโมเลกุลจะมีมาก โอกาสที่โมเลกุลของน้ำหลุดออกจากผักและผลไม้จึงมีค่าสูงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามความดันไอน้ำของอากาศที่อยู่รอบๆไม่ได้สูงตามไปด้วยเพราะมีปริมาณโมเลกุลของน้ำอยู่เท่าเดิมแต่ไม่ได้ถูกจำกัดปริมาณเหมือนในผลไม้ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำระหว่างภายในผลิตผลกับภายนอกจึงเพิ่มสูงมากขึ้น โอกาสที่ไอน้ำจะออกจากผลิตผลสู่ภายนอกจึงมีมากขึ้น อุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษานอกจากจะต้องควบคุมให้ต่ำแล้วยังต้องควบคุมให้สม่ำเสมออยู่ตลอดเวลาด้วย เพราะถ้าหากอุณหภูมิขึ้นลงอยู่เสมอผลิตผลจะสูญเสียน้ำออกไปเมื่ออุณหภูมิสูงจนกระทั่งอากาศรอบๆอึดตัวด้วยน้ำ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงไอน้ำจะควบแน่นเป็นหยดน้ำอยู่ตามภาชนะบรรจุหรือผนังห้องเก็บรักษา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีกอากาศจะรับไอน้ำจากผลิตผลได้อีกเรื่อยๆทำให้ผลิตผลสูญเสียน้ำไปมาก สภาพในที่เก็บรักษาจะขึ้นและทำให้ผลิตผลเน่าเสียได้ง่าย

- การถ่ายเทอากาศ ในระหว่างการเก็บรักษาจำเป็นต้องมีการระบายถ่ายอากาศเนื่องจากสภาพบรรยากาศปกติประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ซึ่งชนิดที่มีความสำคัญและมีความจำเป็นต่อการหายใจของผลิตผลคือ ก๊าซออกซิเจน ฉะนั้นสภาพของการเก็บรักษาที่ดีจะต้องมีการถ่ายเทของอากาศที่ดี



ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม และระยะเวลาในการเก็บรักษาผัก [7]

ชนิดของผลิตผล	อุณหภูมิ		ความชื้นสัมพัทธ์	ระยะเวลาที่เก็บรักษาได้
	°F	°C		
หน่อไม้ฝรั่ง	32	0	85-90	3-4 สัปดาห์
บรอกโคลี	32	0	90-95	7-10 วัน
กะหล่ำปม	32	0	90-95	3-4 สัปดาห์
กะหล่ำปลี				
พันธุ์เบา	32	0	90-95	3-6 สัปดาห์
พันธุ์หนัก	32	0	90-95	3-4 เดือน
ดอกกะหล่ำ	32	0	85-97	2-3 สัปดาห์
ข้าวโพดหวาน	31-32	0	85-95	4-8 วัน
แตงกวา	45-50	11	85-95	2-3 สัปดาห์
มะเขือ	45-50	11	85-90	10 วัน
ฮันนี่ดิว	45-50	11	85-90	2-3 สัปดาห์
เห็ด	32	0	85-90	3-5 สัปดาห์
กระเจี๊ยบฝัก	50	11	85-95	2 สัปดาห์
หอมหัวใหญ่	32	0	70-75	6-8 เดือน
มันเทศ	55-60	13-16	85-90	4-6 เดือน
มะเขือเทศ				
สุก	50	11	85-90	8-12 วัน
แก่-ดิบ	55-70	13-21	85-90	2-6 สัปดาห์

2.1.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของพืช

ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังมีชีวิตอยู่ กระบวนการต่างๆทั้งทางกายภาพและชีวเคมียังคงดำเนินอยู่เช่นเดียวกับที่ยังไม่ได้เก็บเกี่ยว ดังนั้นผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังคงหายใจต่อไป โดยดูด O_2 เข้าไปและคาย CO_2 และความร้อนออกมา มีการคายน้ำและสูญเสียน้ำหนัก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในพืชหลังการเก็บเกี่ยว คือ

2.1.1.1 การหายใจ

ผลิตผลสดทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวจะมีการหายใจอย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลาที่ยังมีชีวิตอยู่ เนื่องจากสิ่งมีชีวิตต้องการพลังงานในการดำเนินปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ พลังงานที่ได้มานั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

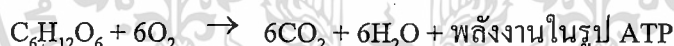
มาจากการหายใจ ซึ่งอัตราการหายใจนั้นจะแตกต่างกันไปตามระยะและสภาพแวดล้อม ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีแล้ว ก็จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพ อายุการเก็บรักษา จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงการปฏิบัติต่อผลิตผลภายหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ผลิตผลมีความสมดุลในการรักษาหรือลดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีให้น้อยที่สุดอันที่จะทำให้ผลิตผลมีคุณภาพการเก็บรักษาได้นานที่สุด ภายในผักและผลไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราการหายใจต่างกัน ซึ่งอัตราการหายใจนี้จะแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายใน โดยทั่วไปผักผลไม้มักถูกเก็บเกี่ยวในระยะที่มีคุณภาพใกล้เคียงที่จะเหมาะกับการบริโภค ดังนั้นผักผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูงหลังการเก็บเกี่ยวจะเสื่อมเสียเร็วกว่า จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงการปฏิบัติต่อผลิตผลภายหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ผลิตผลมีความสมดุลในการรักษาหรือลดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีให้น้อยที่สุดอันที่จะทำให้ผลิตผลมีคุณภาพในการเก็บรักษาได้นานที่สุด

ผลิตผลสดที่ยังมีชีวิตอยู่จะมีการหายใจตลอดเวลา ซึ่งการหายใจของผลิตผลสดนั้นมี 3 ขั้นตอนคือ

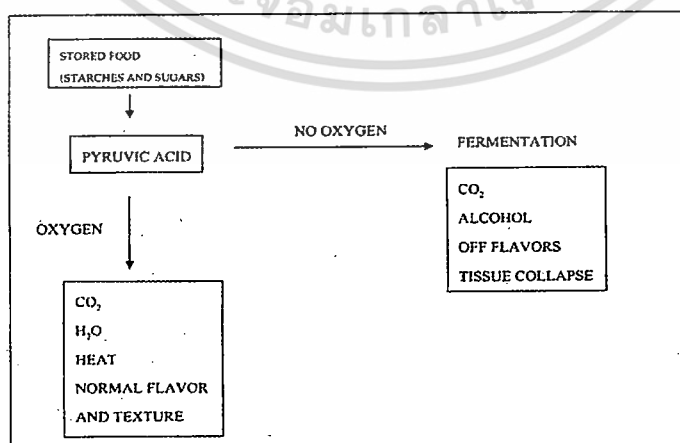
- การย่อยคาร์โบไฮเดรตพวกที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายๆ โมเลกุลให้กลายเป็นน้ำตาล โมเลกุลเดียว

- ขั้นตอนการเปลี่ยนน้ำตาล โมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นให้เป็นกรดไพรูวิก

- ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไพรูวิกและกรดอินทรีย์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ น้ำและพลังงานซึ่งเกิดในการหายใจของผลิตผลหรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ สรุปได้เป็นสมการอย่างง่ายคือ



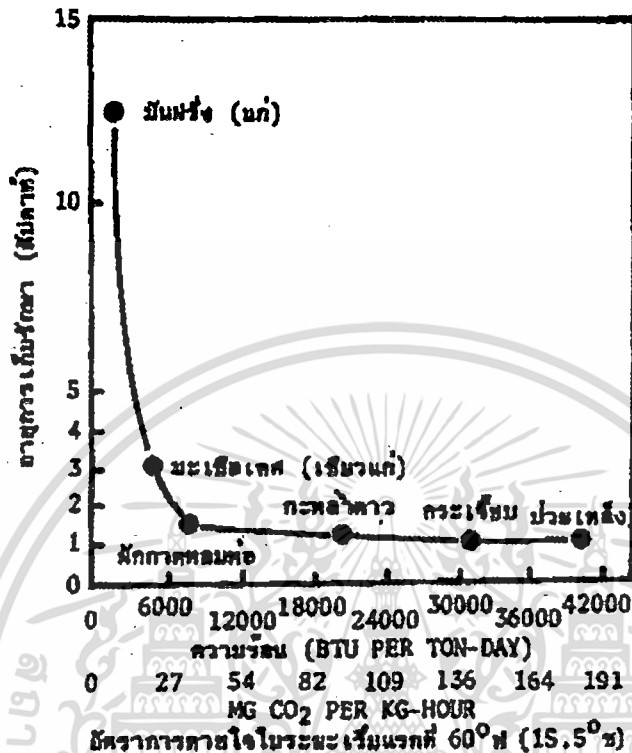
โดยที่การหายใจในสภาพที่มีออกซิเจนสมบูรณ์จะได้ปริมาณ ATP ต่อโมเลกุลน้ำตาลมากกว่าการหายใจในสภาพที่มีออกซิเจนน้อยหรือไม่มีออกซิเจน



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำโดยเด็ดขาด เว้นแต่เป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการหายใจของพืชหลังการเก็บเกี่ยวเป็นสิ่งที่แสดงถึงอายุหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปพืชที่มีอัตราการหายใจสูงจะมีอายุการเก็บรักษาสั้น พืชที่มีอัตราการหายใจต่ำจะมีอายุการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวได้นาน



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจและอายุการเก็บรักษาเมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 60 °F [9]

รูปแบบการหายใจของพืชแต่ละชนิดจะมีอัตราการหายใจที่ไม่เท่ากัน ซึ่งแบ่งตามชนิดของพืชดังต่อไปนี้

1. Climacteric Fruit คือ ผลไม้ที่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากผลแก่จัดจะมีอัตราการหายใจต่ำลงมาก เมื่อเริ่มเข้าสู่กระบวนการสุกอัตราการหายใจจะสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งการเพิ่มอัตราการหายใจนี้จะเพิ่มอย่างรวดเร็วและสูงมากด้วย เมื่อสุกเต็มที่แล้วอัตราการหายใจจะค่อยๆ ลดต่ำลงจนเข้าสู่ระยะเสื่อมสลาย ฉะนั้นผลไม้พวกนี้สามารถเก็บแล้วนำมาบ่มให้สุกได้ภายหลังการเก็บเกี่ยว เช่น มะเขือเทศ มังคุด ละมุด กัลยัญ พุริณ

2. Non-Climacteric Fruit คือ ผลไม้ที่ไม่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากผลแก่จัดจะมีอัตราการหายใจต่ำลงในระยะเก็บเกี่ยว หลังการเก็บเกี่ยวแล้วผลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากคือ อัตราการหายใจค่อนข้างคงที่ตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนถึงระยะเสื่อมสลาย รสชาติคงที่ อายุเก็บรักษาค่อนข้างยาว ฉะนั้นถ้าเก็บเกี่ยวผลที่ยังไม่แก่จัดเต็มที่ ก็จะได้ผลไม้ที่มีรสชาติเหมือนเดิมตลอดไป จึงต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลแก่จัด เช่น ส้ม สับปะรด มะนาว เงาะ ลำไย ลิ้นจี่ แตงกวา [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ชนิดของผลไม้จำแนกตามลักษณะการหายใจขณะผลแก่หรือสุก [11]

ประเภท Climacteric	ประเภท Non-Climacteric
แอปเปิ้ล	สตอเบอรี่
สาลี่	องุ่น
ห่อ	ส้มชนิดต่างๆ
กล้วย	มะพร้าว
กีวี	สับปะรด
อโวคาโด	เงาะ
น้อยหน่า	มังคุด
มะละกอ	ลิ้นจี่
มะม่วง	ลำไย
ทุเรียน	มะไฟ
แตงเทศ	ดองกอง
แตงโม	มะเฟือง
มะเขือเทศ	แตงกวา
ขนุน	มะเขือเทศพันธุ์ Rin และ Nor
ฝรั่ง	เชอร์รี่
ละมุด	มะกอกและกลางสาด

ตารางที่ 2.3 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Non- Climacteric [11]

ผลไม้	พันธุ์	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการหายใจ (ml/ CO ₂ /kg/hr) Non- Climacteric ตลอดเวลาการแก่และสุก
องุ่น	Vi 5061	20	15
มะนาว	Eureka	20	5
ส้ม	Valencia	21	13
สับปะรด	Caynne	15	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Climacteric [11]

ผลไม้	พันธุ์	อุณหภูมิ	อัตราการหายใจ (ml/CO ₂ /kg/hr)	
			ต่ำสุด	สูงสุด
แอปเปิ้ล	Barnley Seedling	23	10	16
อโวคาโด	Fuerte	20	35	155
กล้วย	Gros Michel	20	20	60
มะเดื่อ	Mission	20	22	40
มะม่วง	Kent	20	15	22
ท้อ	Alberta	20	25	35
สาลี่	Bartlett	20	8	23
มะเขือเทศ	Grand Rapids	18	8	20

2.1.1.2 การคายน้ำ

การคายน้ำเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของผักผลไม้ อัตราการคายน้ำหรือสูญเสียน้ำจะขึ้นกับพื้นที่ผิวและลักษณะ โครงสร้างผิว ผักที่มีใบมาจะมีอัตราการคายน้ำหรือสูญเสียน้ำรวดเร็วและมีค่าสูงเนื่องจากพื้นที่ผิวสูง และ โครงสร้างของใบมีช่องเปิดทำให้สูญเสียน้ำได้ง่าย ส่วนแอปเปิ้ลจะมีการสูญเสียน้ำน้อย เนื่องจากมีรูปร่างกลมซึ่งมีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ และยังมีใบเคลือบผิวช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำด้วย อัตราการสูญเสียน้ำจากเนื้อเยื่อจะขึ้นกับความดันไอที่แตกต่างระหว่างภายนอกและภายในเนื้อเยื่อ ถ้าความแตกต่างมีมากอัตราการสูญเสียน้ำจะเพิ่มขึ้น ปกติความดันไอน้ำภายในเนื้อเยื่อจะมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำภายนอก

2.1.1.3 การสุก

การสุกเป็นการพัฒนาขั้นสุดท้ายของผลไม้ก่อนเข้าสู่ระยะร่วงโรย การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับไม่ได้ และเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนหลายขั้นตอน [8] การเปลี่ยนแปลงของผลไม้สุกที่อาจพบได้คือ เมล็ดแก่เต็มที สีเปลี่ยนแปลง ผลหลุดจากขั้ว อัตราการหายใจเปลี่ยนแปลง เนื้อนิ่มลงและมีการสร้างสารให้กลิ่นรส

2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้ [12]

ปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยทำให้ก๊าซต่างๆที่ล้อมรอบผลิตภัณฑ์เป็นไปตามที่ต้องการตลอดเวลาที่เก็บรักษาผลิตภัณฑ์คือ ภาชนะบรรจุ สมบัติที่สำคัญของวัสดุบรรจุหรือภาชนะบรรจุที่ต้องพิจารณามีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การซึมผ่านของก๊าซ

การกำหนดค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซ (Gas Permeability) เพื่อเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ ชนิดของผลิตภัณฑ์ อายุการเก็บรักษาและสภาวะการเก็บรักษา โดยทั่วไปเมื่อต้องการใช้วัสดุที่ป้องกันก๊าซได้ดีมาก ควรเลือกวัสดุที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนไม่เกิน $2 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot 24 \text{ hr}$ ส่วนวัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซดีพอควร จะมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนประมาณ $20\text{-}30 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot 24 \text{ hr}$ สำหรับผักและผลไม้สดต้องใช้วัสดุที่ยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ดี โดยทั่วไปค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจะมีค่าตั้งแต่ $2000 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot 24 \text{ hr}$ ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [13]

ชนิดของพลาสติก	ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ($\text{cc}/25 \mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ที่ $23/25^\circ\text{C}, 50\%\text{RH}$)
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)	47-94
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	80-9000
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	2100-2900
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	7100-7800
พอลิพรอพิลีน (PP)	2400-3800

2.2.2 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

การเลือกวัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์จากค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate, WVTR) ต้องระมัดระวังปัญหาที่เกิดจากหยดน้ำภายในภาชนะบรรจุภัณฑ์ และปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันไอน้ำได้ดีจะช่วยลดปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่มักเกิดปัญหาหยดน้ำในภาชนะ และในทางกลับกันวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้ไอน้ำผ่านได้มากจะเกิดปัญหาผลิตภัณฑ์แห้งเพราะสูญเสียความชื้น การแก้ไขปัญหาอาจทำได้โดยการเติมสารป้องกันการเกิดหยดน้ำ (Antifogging Agent) ในฟิล์มพลาสติกหรือการเจาะรูเล็กๆ เพื่อช่วยระบายไอน้ำบางส่วนออกจากภาชนะ

ตารางที่ 2.6 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [13]

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

2.3 การออกแบบภาชนะบรรจุสำหรับผู้บริโภค [14]

การออกแบบภาชนะบรรจุหรือหีบห่อสำหรับผู้บริโภค อาศัยปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

- การระบายอากาศ การใช้แผ่นฟิล์มพลาสติกห่อผลิตภัณฑ์นั้น พลาสติกแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการยอมให้ก๊าซผ่านเข้าออกได้ต่างกัน ตามปกติฟิล์มจะยอมให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึมผ่านเข้าออกได้มากกว่าก๊าซออกซิเจน (O_2) ดังนั้นอัตราการสะสมของ CO_2 จากการหายใจจึงน้อยกว่าอัตราการหายไปของ O_2 และถ้า O_2 ถูกใช้ไปหมดจากบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุ จะทำให้มีการหายใจแบบไม่ใช้ O_2 เกิดการสะสมของแอลกอฮอล์ และ CO_2 อาจทำให้เซลล์ของพืชตาย ผักและผลไม้จะส่งกลิ่นที่ผิดปกติ รสชาติเปลี่ยน และเกิดการเน่าเสีย

แผ่นพลาสติกหรือถุงพลาสติกที่ใช้นั้นควรมีรูระบายอากาศ การบรรจุในถุงควรมีรูอย่างน้อย 2-4 รู ขนาด 1/4-1/8 นิ้ว เพื่อระบายอากาศผลิตผลจะไม่ขาด O_2 และไม่เกิดการสะสมของแอลกอฮอล์ และ CO_2 ขณะที่วางขายในสภาพที่อุณหภูมิสูง ในบางครั้งการเก็บรักษาในสภาพถุงที่ไม่มีรูอาจเกิดผลดีเพราะเกิดสภาพบรรยากาศที่มีอัตราส่วนของก๊าซชนิดต่างๆแตกต่างไปจากบรรยากาศปกติ (Modified Atmosphere) ขึ้นมาได้ แต่ควรระมัดระวังการเกิดกลิ่นที่ผิดปกติ หรือมีรสชาติแอลกอฮอล์เกิดขึ้น

- ความชื้น ผักและผลไม้ที่มีน้ำหรือมีความชื้นอยู่สูงถึง 75-95% และอยู่ในลักษณะสมดุลกับบรรยากาศได้เมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่สูงถึง 95% ขึ้นไป โดยปกติผักและผลไม้ที่เก็บเกี่ยวแล้วจะเหี่ยวอย่างรวดเร็ว เพราะในบรรยากาศทั่วไปมีความชื้นค่อนข้างต่ำ ทำให้เซลล์เกิดการเสีรูปทรงและการหดตัว การเก็บผักและผลไม้ไว้ในภาชนะที่เหมาะสมจะยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้นาน พลาสติกที่ใช้ห่อผักและผลไม้สดจะทำให้ความชื้นข้างในรอบๆผักและผลไม้สูงและอาจสูงถึง 100% ดังนั้นจึงต้องเจาะรูถุงพลาสติกเพื่อให้ไอน้ำภายในถุงพลาสติกได้ออกไปข้างนอก เป็นการช่วยปรับความชื้นภายในถุงพลาสติกให้เหมาะสม

2.4 फिल्मที่ใช้สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์ [14]

- फिल्मพอลิเอทิลีน เป็นฟิล์มที่ยอมให้ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านได้ง่าย ป้องกันการเกิดฝ้าไอน้ำ เนื่องจากแผ่นฟิล์มชนิดนี้ยอมให้ความชื้นที่เกิดขึ้นแพร่กระจายเข้าไปในเนื้อฟิล์มแทนที่จะเป็นหยดน้ำเกาะอยู่บนแผ่นฟิล์ม โดยทั่วไปความหนาของแผ่นฟิล์มจะอยู่ระหว่าง 25-65 ไมครอน การลดความหนาของแผ่นฟิล์มมักเลือกใช้ฟิล์มที่เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) แทน ซึ่งทำให้ขยายตัวตามความหนาและความยาวได้ สมบัติของ LDPE เป็นแผ่นฟิล์มที่สามารถยืดตัวได้

- फिल्मพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) แผ่นฟิล์มชนิดนี้สามารถยืดและหดได้ทุกทิศทาง ก๊าซและไอน้ำสามารถระเหยผ่านได้ มีคุณสมบัติดีกว่า LDPE แผ่นฟิล์มชนิดนี้ใช้กันมากในการปิดด้านบนของถาด โฟมที่ใส่ผลไม้สด แผ่นฟิล์มชนิดนี้ไม่เหมาะสำหรับทำถุง PVC บางชนิดสามารถแข็งให้ตั้งได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะดึงดูดความสนใจของผู้บริโภคเพราะมีผิวดูเป็นมัน แผ่น PVC บางชนิดจะหดตัวประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 2 นาที ทำให้แนบสนิทกับผลิตภัณฑ์

- พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) แผ่นฟิล์มนี้จะโปร่งใสกว่าพวก LDPE สามารถทำเป็นถุงได้ และใช้ทำถาดสามารถใช้ความร้อนผนึกได้

- เซลโลเฟน (Cellophane) แผ่นเซลโลเฟนที่ใช้มีกันหลายชนิด อาจใช้ปิดด้านบนของถาด โฟมหรือทำเป็นถุง หรือรองในตะกร้า มีลักษณะโปร่งใส และยอมให้ก๊าซชื้นผ่านได้ แต่ไม่ยอมให้ก๊าซแห้งผ่าน ดังนั้นจึงมักใช้เซลลูโลสมาหุ้มเพื่อกันการสูญเสียความชื้น พวกที่ป้องกันความชื้นได้ เช่น เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) และพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS)

- Rubber Hydrochlorine หรือ Piofilm เป็นแผ่นฟิล์มที่มีความแข็งแรงมาก ป้องกันการสูญเสียไอน้ำได้ดีและอาจใช้ในการทำถุงได้

2.4.1 การซึมผ่านของฟิล์ม

ฟิล์มเป็นวัสดุที่มีความหนาไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร [15] และยังมีสมบัติหลากหลายขึ้นกับพอลิเมอร์ที่นำมาผลิต พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่นิยมใช้จัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-Crystalline) ในส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) จะเป็นส่วนที่ไม่ยอมให้ก๊าซหรือไอน้ำซึมผ่าน ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) สายโซ่พอลิเมอร์จะอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว การเคลื่อนที่ของสายโซ่จะถูกจำกัด ปริมาตรอิสระ (Free Volume) จะถูกจำกัดเช่นกัน แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว สายโซ่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระมากขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรอิสระ การเปลี่ยนแปลงนี้จะมีผลสำคัญมากต่อความสามารถของโมเลกุลที่จะแพร่ผ่านวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของพอลิเมอร์ ขึ้นกับ

- ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการซึมผ่านของก๊าซ
- ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันของสายโซ่พอลิเมอร์
- อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ต่อการละลายได้ของก๊าซในส่วนที่เป็นอสัณฐานของ

สายโซ่พอลิเมอร์ ความสามารถในการซึมผ่านจะลดลง ถ้าส่วนของความเป็นผลึกไม่เกิดการเสียหาย ส่วนการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์โดยการยืด (Stretching) พืดม เป็นการเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกและลดความสามารถในการซึมผ่านลง

2.5 พอลิเอทิลีน [16]

พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) นับเป็นพลาสติกที่มีการใช้มากที่สุดและราคาถูก เนื่องจากพอลิเอทิลีนมีจุดหลอมเหลวต่ำเมื่อเทียบกับพลาสติกชนิดอื่นๆทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำ พอลิเอทิลีนผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของก๊าซเอทิลีน (Ethylene) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงโดยอยู่ในสภาวะปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ (Metal catalyst) การจับตัวของโมเลกุลในลักษณะสายโซ่สั้นและยาวจะส่งผลให้พอลิเอทิลีนที่ได้ออกมามีความหนาแน่นแตกต่างกัน พอลิเอทิลีนแบ่งเป็น 3 ประเภทตามค่าความหนาแน่น คือ

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene หรือ LDPE) ความหนาแน่น 0.910-0.925 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Polyethylene หรือ MDPE) ความหนาแน่น 0.926-0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene หรือ HDPE) ความหนาแน่น 0.941-0.965 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2.5.1. สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีน

สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีนที่จะพิจารณามีอยู่ 3 ประการ คือ ความหนาแน่น (Density) ดรรชนีการไหล (Melt Index) และการกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution) ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

2.5.1.1. ความหนาแน่น

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

พอลิเอทิลีนจะมีความหนาแน่นสูงหรือต่ำขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ กระบวนการผลิตและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ โครงสร้างของโมเลกุล และขนาดน้ำหนักโมเลกุล แต่ละปัจจัยจะมีผลต่อความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกแตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลมาก คือ โครงสร้างของโมเลกุล โครงสร้างของ

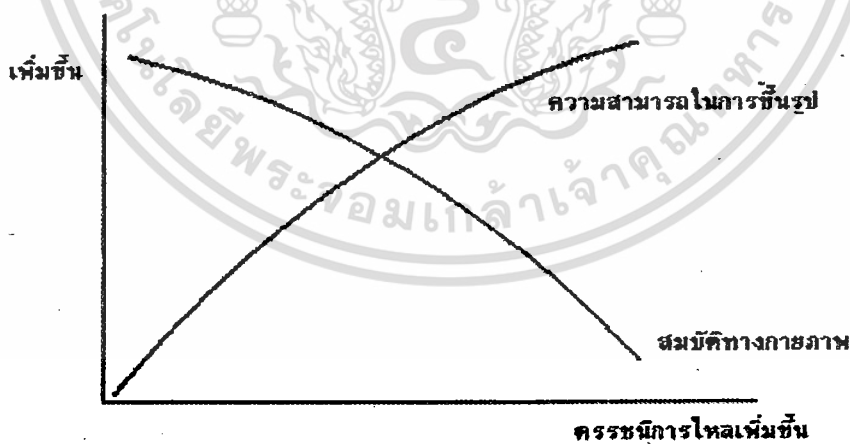
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลที่มีกิ่งยาวและจำนวนมากจะทำให้ความหนาแน่นต่ำเพราะการที่มีกิ่งจะทำให้ความเป็นระเบียบของโมเลกุลมีน้อย โมเลกุลอยู่แบบหลวมๆ แสงทะลุผ่านง่ายจึงมีความใสแต่ความแข็งแรงต่ำ ส่วนโครงสร้างที่มีกิ่งสั้นและจำนวนน้อยจะทำให้ความหนาแน่นสูงเพราะโมเลกุลอยู่อย่างมีระเบียบและใกล้กัน จะมีความแข็งแรงแต่ไม่ใสเพราะแสงทะลุผ่านยาก ซึ่งเรียกส่วนที่เป็นระเบียบนี้ว่า “ส่วนที่เป็นผลึก” (Crystalline) และส่วนที่อยู่กันอย่างหลวมๆ เรียกว่า “ส่วนที่เป็นอสัณฐาน” (Amorphous)

2.5.1.2. ครรชนีการไหล

สำหรับค่าครรชนีการไหลในบางครั้งอาจเรียกว่า “อัตราการไหลเมื่อหลอมเหลว” (Melt flow rate) ในที่นี้ขอใช้คำว่าครรชนีการไหลหรือเรียกย่อว่า “MI” คำว่า “ครรชนีการไหล” หมายถึง การวัดการไหลของพลาสติกขณะเหลว โดยกำหนดความยาวขนาดของช่องทางการไหลที่อุณหภูมิและแรงอัดมาตรฐาน หลักการนี้ใช้ควบคุมคุณภาพของเทอร์โมพลาสติก ค่าครรชนีการไหลของเม็ดพลาสติกควรมีค่าสม่ำเสมอ ถ้ามีค่าไม่สม่ำเสมอทางผู้ใช้จะมีปัญหาในการปรับเครื่อง เม็ดพลาสติกที่ใช้ในงานต่างๆกัน จะมีค่าครรชนีการไหลที่เหมาะสมแตกต่างกันด้วย ค่าครรชนีการไหลสามารถแสดงถึงสมบัติและขนาดของโมเลกุลได้ดังนี้ ถ้าขนาดโมเลกุลมีขนาดใหญ่จะทำให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ดีขึ้น การที่ค่าครรชนีการไหลสามารถแสดงถึงน้ำหนักขนาดน้ำหนักโมเลกุลได้ เพราะถ้าโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นการเคลื่อนไหลการไหลตัวจะต้องใช้พลังงานมากขึ้น ดังนั้นถ้าใช้พลังงานเท่ากันในการทดสอบการไหลตัว ขนาดโมเลกุลใหญ่จะไหลตัวได้น้อยกว่า

ในด้านความสัมพันธ์ของครรชนีการไหลกับสมบัติอื่นที่สำคัญ ได้แก่ เรื่องของความยากง่ายในการผลิตขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพทั่วไป ซึ่งแสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างครรชนีการไหลกับความสามารถในการขึ้นรูป และสมบัติทางกายภาพ

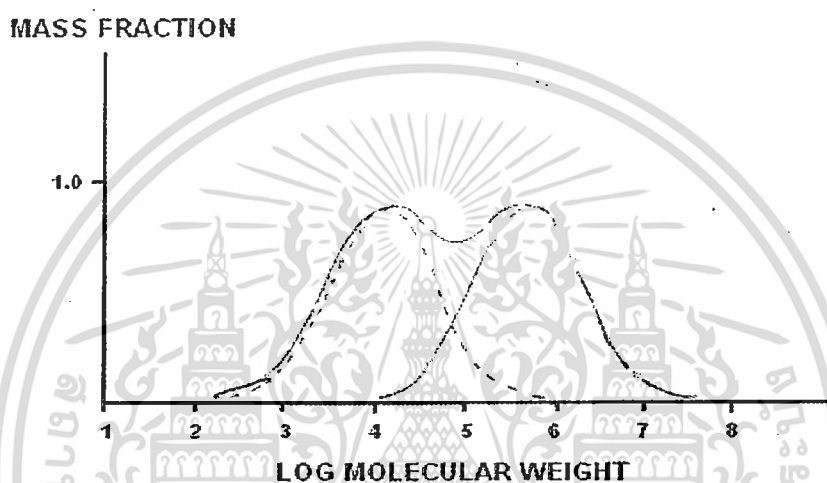
[17]

จากกราฟแสดงว่าเมื่อครรชนีการไหลเพิ่มขึ้น การผลิตขึ้นรูปจะง่ายขึ้น แต่สมบัติทางกายภาพส่วนใหญ่จะลดลงเพราะขนาดโมเลกุลเล็กลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.3. การกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุล

การกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุลเป็นสมบัติพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อสมบัติบางประการ ทั้งการผลิตขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพด้วย ในการผลิตพอลิเมอร์ซึ่งเกิดจากสารหน่วยเล็กๆที่เรียกว่า “มอนอเมอร์” เกิดพันธะเคมีต่อกันเป็นสายโซ่ยาว แต่จำนวนหน่วยมอนอเมอร์ในแต่ละสายโซ่โมเลกุล จะมีจำนวนไม่เท่ากันทุกๆโมเลกุล ดังนั้นขนาดโมเลกุลจึงไม่เท่ากันในทุกสายโซ่ ถ้าความแตกต่างของขนาดโมเลกุลในเนื้อพลาสติกมีมากจะเรียกว่า “การกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุลแคบ” ซึ่งพอจะอธิบายได้คร่าวๆจากกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลกับเศษส่วน โดยมวล [17]

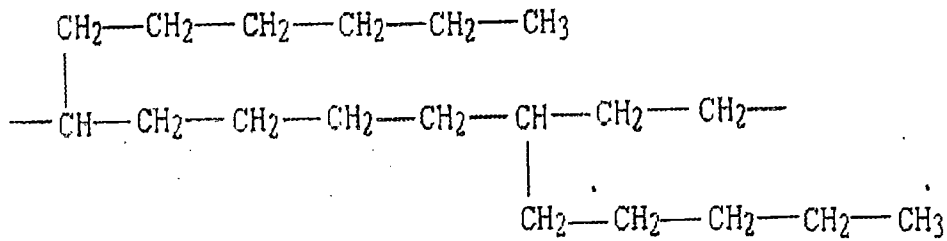
ผลกระทบที่เด่นๆในเรื่องการกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุล ได้แก่ ความยากง่ายในการไหลตัวของพลาสติกในเครื่องอัดรีด ถ้าการกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุลกว้างจะช่วยให้การไหลตัวง่ายขึ้นในค่าธรรมชาติการไหลที่เท่ากัน

2.5.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีความเป็นผลึกต่ำ โครงสร้างมีโซ่กิ่งสาขายาว มีความหนาแน่นต่ำ $0.926 - 0.940 \text{ g.cm}^{-3}$ พอลิเมอร์โซ่ผ่านกลไกอนุมูลอิสระมีออกซิเจนหรือเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่ม ทำให้เกิดโซ่กิ่งจำนวนมาก โซ่กิ่งโดยมากเป็นหมู่อัลคิลสายสั้นๆ เช่น เอทิลหรือบิวทิลซึ่งเกิดจากกลไก “intramolecular back-biting”

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,000-40,000 ในเชิงพาณิชย์นิยมระบุน้ำหนักโมเลกุลด้วยค่าดัชนีการหลอมเหลว (melt index)(ASTM 1238) ซึ่งหมายถึง น้ำหนักเป็นกรัมของพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากหลอดรูเล็กมาตรฐานที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ในเวลา 10 นาที สำหรับ LDPE มีค่า melt index อยู่ในช่วง 0.1-10.9 g/10 นาที (ตารางที่ 2.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [18]

ตารางที่ 2.8 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [29]

สมบัติ	หน่วย	ASTM	LDPE
ความถ่วงจำเพาะ	-	D792	0.91-0.93
ความเป็นผลึก	%	-	50.0-70.0
อุณหภูมิหลอมเหลว	°C	-	98.0-120.0
ความแข็งแรงดึง	MPa	D638	4.10-16.0
มอดุลัส	GPa	D638	0.10-0.26
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด	%	D638	90.0-800.0
ความแข็งแรงกระแทก	J.m ⁻¹	D256	No break
อุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน	°C	D648	38.0-49.0

2.5.2.1 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีดังต่อไปนี้

1. มีความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
2. มีความเป็นผลึกต่ำ ประมาณ 50 – 70%
3. มีการไหลตัวที่ดี มีค่า Melt Flow Index อยู่ในช่วง 0.1 – 10.9 g/10 นาที
4. มีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ดีพอสมควร
5. มีการซึมผ่านของไอน้ำที่ดี เหมาะสำหรับงานที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์
6. พลาสติกที่ได้จาก LDPE จะมีความเป็นเงามันดี (High Gloss) และมีความเป็นฝ้าต่ำ (Low Haze)
7. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ค่อนข้างดี (Good Dielectric property)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีการใช้อย่างกว้างขวาง เพราะวราคาราคาไม่แพง ยืดหยุ่นได้ ทนทานมากและทนต่อสารเคมีกรดและด่าง อีกทั้งยังแปรรูปได้ง่าย เป็นฉนวนได้ดีและไม่มีสารพิษที่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันตรายต่อร่างกายมนุษย์ มีความสามารถในการรับแรงกระแทก และมีความยืดหยุ่น LDPE ถูกนำมาขึ้นรูปเป็นขวด หีบห่ออาหาร และของเล่นต่างๆ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นพลาสติกที่ใช้มากในงานฟิล์มบรรจุภัณฑ์และมีชื่อสามัญเรียกว่า “ถุงเย็น” มักจะใช้ทำถุง ฟิล์มห่อ ฟิล์มยืด ขวดน้ำ และฝาขวด เป็นต้น เนื่องจากยืดตัวได้ดี ทนต่อการที่มดและแมลงกัดกิน รวมทั้งสามารถใช้ความร้อนเชื่อมติดปิดผนึกได้ดี โครงสร้างของพอลิเอทิลีนจะสามารถป้องกันความชื้นได้ดีพอสมควร นอกจากนี้ LDPE ยังทนต่อกรดและด่างต่างๆ ไปและปล่อยให้อากาศซึมผ่านได้ง่าย แต่ข้อเสียของ LDPE คือ สามารถปล่อยให้ไขมันซึมผ่านได้ง่าย

2.5.2.1 การใช้งานของ LDPE มีดังนี้ [29]

1. งานแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ถุงขนาดต่างๆ ตั้งแต่ขนาดเล็กที่ใช้บรรจุสินค้าทั่วไป ตลอดจนถึงขนาดใหญ่ที่ต้องการแบกรับน้ำหนักมาก ได้แก่

- ถุงบรรจุอาหาร เช่น ผัก ผลไม้สด ขนมหีบ ถุงกวาด อาหารแช่แข็ง อาหารแห้ง
- ถุงสำหรับบรรจุสินค้าหนัก เช่น ผลิตภัณฑ์เกษตร ข้าวสาร ปุ๋ย ชิ้นส่วนเครื่องจักร เป็นต้น
- ถุงชั้นในของถุงกระดาษหรือกระสอบพลาสติกซึ่งใช้บรรจุอาหารสัตว์ ปุ๋ย ฯลฯ
- ถุงบรรจุสินค้าอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น เสื้อผ้าสำเร็จรูป สิ่งทอ กระดาษชำระ ฯลฯ
- ฟิล์มหด (Shrink film) และฟิล์มยืด (Stretch film) ที่ต้องการความเหนียวสูง เช่น ใช้รัดสินค้าที่

วางเรียงบนแท่นรองรับสินค้า (Pallet) เพื่อการขนถ่ายเป็นหน่วยใหญ่

2. งานเป่าเข้าแบบ ได้แก่ การเป่าทำขวดต่างๆ เช่น ขวดน้ำเกลือ ขวดยาหยอดตา ขวดน้ำดื่ม และเป่าเพื่อทำกระป๋องและกล่อง

3. งานฉีดเข้าแบบ ได้แก่ ภาชนะ ของเล่นที่ต้องการลักษณะชิ้นงานที่นิ่มเล็กน้อย งานจัดของสวยงาม เช่น ดอกไม้พลาสติก ใบไม้พลาสติก รวมทั้งเครื่องใช้ในบ้านอื่นๆ เช่น ตะกร้า ถัง ขาม อ่าง

4. งานแผ่นเคลือบหรือแผ่นประกบ ได้แก่ งานเคลือบบนผิวฟิล์มบนผิวแผ่นออลูมิเนียมฟอยล์ เช่น ซองบรรจุอาหารแห้งประเภทบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป อาหารเสริมเด็กอ่อน ซึ่งต้องการสมบัติการป้องกันความชื้นและการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ

5. งานเคลือบผิวโลหะ ได้แก่ การเคลือบลวดเอนกประสงค์ เช่น ตะแกรงวางสินค้า ชั้นวางของ ตะกร้า รถจักรยาน ตลอดจนงานเคลือบพิเศษ เช่น สายเคเบิล สายโทรศัพท์ สายไฟฟ้า

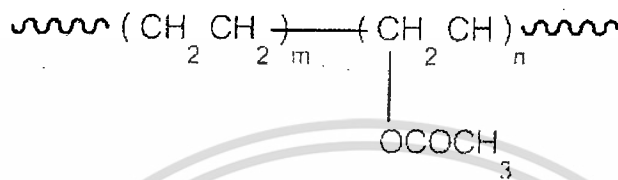
2.6 เอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ [19]

2.6.1 ลักษณะทั่วไปของอีวีเอ

เอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene Vinyl Acetate Copolymers, EVA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอฟีนส์ เนื่องจากเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับไวนิลอะซีเตต (Vinyl Acetate, VA) มีเอทิลีนเป็นเนื้อหลักประมาณ 75-90% และไวนิลอะซีเตตเป็นตัวเสริมแต่งทำให้เกิดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยืดหยุ่น โดยลดการเกิดผลึก (Crystallinity) พบว่า ถ้ามีปริมาณเอทิลีนมากกว่า 75% จะทำให้ได้โคพอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็ง

เอทิลีนไวนิลอะซีเตต โคพอลิเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายใต้ความดันสูงของเอทิลีนและไวนิลอะซีเตต โดยอุณหภูมิและความดันที่ใช้ต่ำกว่ากรณีปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนตัวเดียว สารก่ออนุมูลอิสระที่นิยมใช้คือ Azo-bis-isobutyronitrile, Organic Peroxides และ Persulphates โครงสร้างของอีวีเอแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเอทิลีนไวนิลอะซีเตต โคพอลิเมอร์ [19]

2.6.2 สมบัติของเอทิลีนไวนิลอะซีเตต โคพอลิเมอร์

- เป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดใสจนถึงขุ่น
- มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ประมาณ 0.926-0.95
- สามารถละลายได้ในสารอะโรมาติก (Aromatic) และคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated Hydrocarbon) ที่อุณหภูมิสูง
- จุดเปราะ (Brittle Point) อยู่ ณ อุณหภูมิต่ำกว่า -70°C จุดอ่อนตัว (Softening Point) อยู่ระหว่าง $60-80^{\circ}\text{C}$
- มีค่า T_g ตั้งแต่ 20°C (ของโฮโมพอลิเมอร์) จนถึง -20°C และมี Second Transition บริเวณ -125°C
- มีค่า Dielectric Strength เท่ากับ 21 kV/mm
- มีค่า Dielectric Constant ณ 1 MHz เท่ากับ 2.8

สมบัติทางฟิสิกส์ มีค่าดังนี้

- ค่าความแข็งกด (Hardness) Shore D เท่ากับ 90-95
- ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) เท่ากับ 1.3-2.0 kgf/mm²
- ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (Extension at Break) เท่ากับ 500-700%
- มีความโค้งงอดีที่อุณหภูมิสูง
- มีความสามารถในการสปริงตัวได้ดี โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์
- ทนต่อสภาพการใช้งาน การชักล้าง และมีอายุการใช้งานสูง
- สามารถให้สีได้ง่ายและสวยงาม
- ขึ้นรูปได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีความยืดหยุ่น และโค้งงอได้ดีโดยไม่ต้องใช้พลาสติกไซเซอร์

2.6.3 การประยุกต์ใช้งาน

- เอทิลีน ไวนิลอะซีเตต โคลพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและจุดอ่อนตัว (Softening Point) ต่ำ มักใช้เป็น Wax Additive ในงานเคลือบกระดาษ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารยึดติด และพลาสติกไซเซอร์

- เอทิลีน ไวนิลอะซีเตต โคลพอลิเมอร์ที่มีสมบัติคล้ายยาง มักใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ประเภทอาหาร และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์

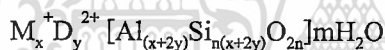
- เอทิลีน ไวนิลอะซีเตต โคลพอลิเมอร์ ใช้ในงานการผลิตรองเท้า และเบาะรองนั่ง

- ปริมาณ ไวนิลอะซีเตต น้อยกว่า 7% จะได้ฟิล์มที่มีความเหนียว ใส และมีความมันวาว

2.7 ซีโอไลต์เอ [20-24]

โครงสร้างและลักษณะของซีโอไลต์เอ

ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตมีโครงสร้างเป็นรูพรุนสามมิติและมีลักษณะเป็น เตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ที่มีออกซิเจน 4 ตัวล้อมรอบ การแทนที่ Si ด้วย Al ทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุ จึงต้องมีประจุบวกเพื่อทำให้เกิดความสมดุลของประจุ สูตรเคมีของซีโอไลต์ เป็นดังนี้



โดยที่ $M_x^+ D_y^{2+}$ คือ ประจุบวกสมดุล (Charge Balance Cation)

ซีโอไลต์เป็นสารที่มีรูพรุนจึงมีพื้นที่ผิวมากคือ ประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม ในโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์จะมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งมีไอออนประจุบวกและโมเลกุลของน้ำอยู่ในโพรงช่องว่างนี้ ธรรมชาติของช่องว่างและโพรงที่เชื่อมต่อกันของซีโอไลต์จะเป็นตัวการสำคัญในการกำหนดสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของซีโอไลต์ในการแลกเปลี่ยนไอออนและดูดซับสาร

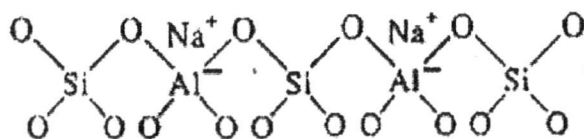
2.7.1 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ

ซีโอไลต์เอ มีสูตรทางเคมีคือ $Na_{12} [(AlO_2)_{12}(SiO_2)] \cdot 27H_2O$ โดยมีอัตราส่วนระหว่างช่องว่างต่อปริมาตรเท่ากับ 0.47 อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเนี่ยมเท่ากับ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 4.2 อังสตรอม

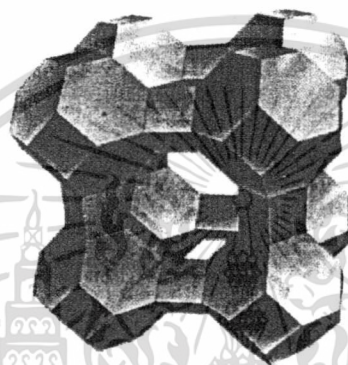
2.7.2 การสังเคราะห์

ซีโอไลต์เอ มีวิธีการสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการทำให้เป็นเจลคล้ายกับซีโอไลต์อื่นๆทั่วไป โดยใช้อะลูมินา (นิยมใช้โซเดียมอะลูมิเนต) และซิลิกา (นิยมใช้โซเดียมซิลิเกต) ผสมกันในสารละลายที่ทำให้เป็นเจลซึ่งสารละลายเหล่านั้น ได้แก่ สารละลายของอัลคาไล เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายเกลือแอมโมเนียม (NH_4^+) เอมีน หรือสารละลายอินทรีย์ที่มีขั้ว เมื่อผ่านการคั่วไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการที่ทำให้เป็นเจลแล้ว จะนำเจลที่ได้มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 70-300 °C จะได้ผลึกของซีโอไลต์ที่อยู่ในรูปแบบของโซเดียมไอออน (Na^+)



รูปที่ 2.7 Frame work ของซีโอไลต์เอ [11]



รูปที่ 2.8 โครงผลึกของซีโอไลต์เอ [12]



รูปที่ 2.9 ภาพขยายของซีโอไลต์เอ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด [13]

2.7.3 สมบัติของซีโอไลต์เอ [10]

2.7.3.1. สารดูดน้ำ (Desiccants)

เนื่องจากซีโอไลต์เอ มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 1 ซึ่งเป็นซีโอไลต์เอมีความเป็นเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วสูง จึงสามารถดูดซับสารที่มีขั้วได้ดี เช่น น้ำ และเมื่อดูดซับน้ำแล้วจะเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้เป็นอย่างดี

2.7.3.2. การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchangers)

เนื่องจากซีโอไลต์เอมีขั้วจึงทำให้ดูดซับน้ำได้ น้ำที่อยู่ในซีโอไลต์จึงเปรียบเสมือนไอออนบวกที่ถูกละลายในโครงสร้างซีโอไลต์เอ โดยน้ำที่อยู่ในซีโอไลต์นั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ตลอดเวลาดังสมการ



ไฮดรอนเนียมไอออนนี้จะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกชนิดอื่นๆที่ต้องการแลกเปลี่ยน ซึ่งปฏิกิริยาลักษณะนี้จะเกิดเฉพาะกับซีโอไลต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบสูงซึ่งดูดซับน้ำได้ดี เช่น ซีโอไลต์เอ

2.7.3.3. สมบัติการคัดแยกโมเลกุล (Molecular sieves)

เมื่อทำให้ซีโอไลต์แห้งโดยการไล่น้ำออกแล้ว ซีโอไลต์ดังกล่าวจะมีความสามารถในการดูดซับสารชนิดต่างๆ ได้ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมระหว่างความเป็นขั้วของซีโอไลต์ และสารหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เช่น ซีโอไลต์เอที่มีขั้วสูง (มีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ) สามารถดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วสูงเท่านั้น ส่วนซีโอไลต์ที่มีขั้วต่ำจะดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วต่ำ ด้วยเหตุนี้ซีโอไลต์จึงมีสมบัติในการคัดแยกโมเลกุล

2.7.4 การนำซีโอไลต์เอไปใช้งาน

ซีโอไลต์เอ เป็นซีโอไลต์ที่น่าสนใจ เนื่องจากมีโครงสร้างแบบซูเปอร์เคจ (Supercage) เหมาะกับการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Specio-Specific Catalysis) พื้นที่ภายในของโครงสร้างที่เป็นรูพรุนนั้นมีมากในการที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสาร ขนาดของรูพรุนที่มีขนาดเล็กจะมีความเฉพาะเจาะจง (Selectivity) ในการจำกัดขนาดของโครงสร้างที่จะเข้าออกของซีโอไลต์ นอกจากนี้ยังใช้งานอย่างกว้างขวางในการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสารและแลกเปลี่ยนไอออนได้อีกด้วย และเนื่องจากการที่ซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีความเป็นขั้วสูงและมีขนาดของรูพรุนมากกว่าโมเลกุล

2.8 เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film machine) [26]

ในการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า (Blown film extrusion) มีหลักการคือ เม็ดพลาสติกจะถูกรีดผ่านเกลียวขับ (Extruder) พร้อมทั้งให้ความร้อนไปด้วยเพื่อให้พลาสติกหลอมเหลว พลาสติกที่หลอมเหลวจะถูกขับผ่านหัวตาย (Diehead) รูปวงแหวนให้ไหลผ่านด้านข้าง โดยที่พอลิเมอร์นี้จะถูกบังคับให้อยู่ในขอบแกนหมุนที่อยู่ในตายและไหลออกผ่านตายเปิดรูปวงกลม ในลักษณะที่มีผนังค่อนข้างหนาเป็นลักษณะท่อที่อยู่ในสถานะหลอมเหลวจะเกิดการขยายตัวและพองออก ซึ่งหัวตายหรือหัวเป่าเป็นส่วนที่อยู่ปลายสุดของเกลียวขับนี้ ทำหน้าที่ควบคุมพลาสติกเหลวให้เป่าได้ขนาดตามที่ต้องการ โดยทั่วไปนิยมใช้แบบครอสเฮด (Cross head) คือ อยู่ในแนวตั้งลงข้างล่าง พลาสติกเหลวที่

ไม่ผ่านการขึ้นรูปแล้วจะไหลลงสู่ถังเก็บน้ำเพื่อทำการล้าง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากหัวเป่าจะถูกเป่าให้เป็นทอกลงโดยเครื่องเป่าลม (Blower) ซึ่งมีการเป่าลมเย็นเพื่อไม่ให้ฟิล์มติดกันและลดแรงดึงกันภายในเนื้อฟิล์ม อีกทั้งยังควบคุมความใสและขนาดของฟิล์มด้วย การเป่าลมเย็นที่ผิวทำได้ 2 ลักษณะ คือ เป่าลมเย็นที่ผิวด้านนอกและผิวด้านใน ทำให้พลาสติกเย็นตัวลงแล้วจากนั้นใช้ลูกกลิ้งรีดกับทอพลาสติกให้แบนแล้วม้วนเก็บ เพื่อนำไปตัดเป็นแผ่นฟิล์มหรือใช้ผลิตถุงต่อไป

ความดันของอากาศจัดเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม ตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ ผลผลิตที่ได้จากเครื่องอัดรีด ความเร็วในการดึง (Take-off speed) อุณหภูมิตลอดกระบวนการใส่สกรูและคาย รวมทั้งปริมาณและทิศทางของอากาศที่ใช้ในการหล่อเย็นจะต้องมีการควบคุมไว้อย่างดี ความกว้างของรูเปิดคาย ซึ่งเป็นตำแหน่งของแกนหมุนที่อยู่ภายในคายจะต้องมีการปรับให้ดีขึ้นเพื่อให้ความหนาของฟิล์มสม่ำเสมอ นอกจากนี้อัตราการหล่อเย็นตรงที่พองถูกทำให้เย็นก็จัดว่ามีความสำคัญในการได้ฟิล์มที่มีคุณภาพสูงสุด และช่วยป้องกันการขวางกัน (Blocking) ในลูกกลิ้งด้านบนสุด (Nip rolls) และลูกกลิ้งม้วน (Wind-up roll) โดยทั่วไปต้องการอากาศปริมาณมากที่มีความดันต่ำมากกว่าอากาศที่มีความดันสูง นอกจากนี้ปริมาณการควบคุมและทิศทางของอากาศก็จัดว่ามีความสำคัญเพราะทั้งสองตัวแปรมีความเกี่ยวข้องกับการควบคุมความหนา

2.8.1 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม

1. เครื่องอัดรีด (Extruder) มีหน้าที่หลักในการหลอมเหลวพลาสติกหัวคาย (Die) โดยปกติมี 2 ชนิด ได้แก่
 - วงแหวนป้อนเข้าด้านล่าง (Annular bottom feed die)
 - วงแหวนแบบป้อนเข้าด้านล่าง (Annular side feed die)
2. ระบบการหล่อเย็น แบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่
 - แบบบังคับด้วยอากาศ (Forced air)
 - ทำให้เย็นโดยอาศัยแหล่งความเย็นจากภายในหรือภายนอก (Internal or external refrigeration)
 - การหล่อเย็นด้วยน้ำ (Water cooling bath)
3. หอคอยช่วยดึงขึ้น ได้แก่
 - ลูกกลิ้งดึง (Pull rolls) แบ่งเป็นแบบหลัก (Primary type) และแบบรอง (Secondary type)
 - ระบบการพับฟิล์ม (Folding system)
 - ระบบม้วนฟิล์ม (Wind - up system) แบ่งเป็นระบบขับโดยตรง (Direct drive) และระบบขับพื้นผิว (Surface drive)

4. อุปกรณ์อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

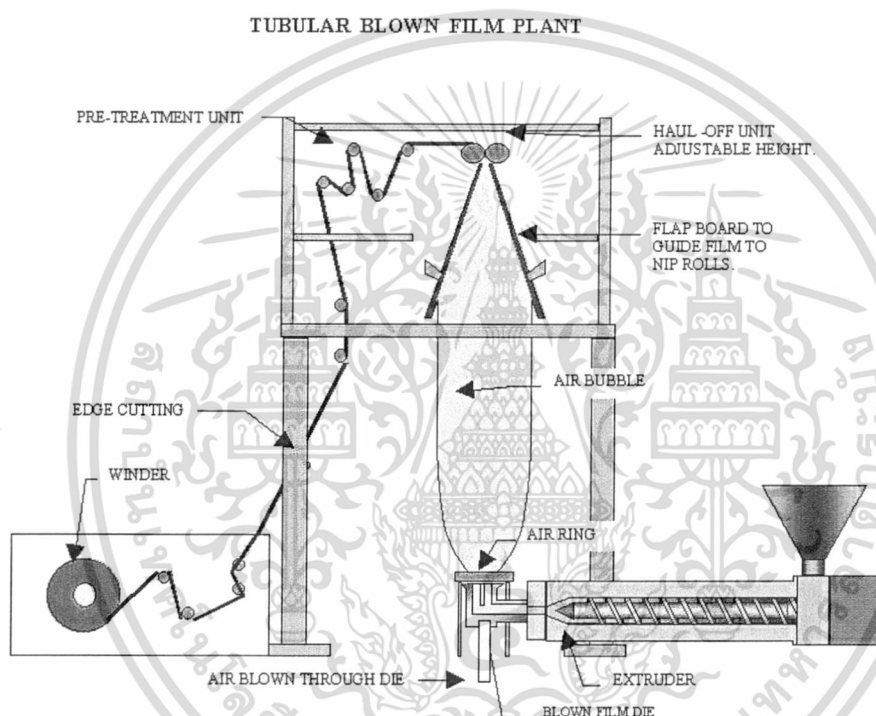
อุปกรณ์ทั่วไป

- เครื่องวัดความหนาแน่นของแผ่นฟิล์ม (Film thickness gauges)
- เครื่องวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter)
- ระบบควบคุมวงจรรปิด (Closed loop system)

อุปกรณ์ปรับพื้นผิว

- โครนาดีสชาร์จ (Corona discharge)
- เปลวไฟก๊าซ (gas flame)

อุปกรณ์ช่วยเสริม เช่น เครื่องจักรสำหรับทำถุง (Bag making machine)



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม [26]

ปัจจัยที่สำคัญต่อการเป่าฟิล์ม เช่น ความเร็วของสกรู อัตราการดึง และขนาดของลูกโป่งที่เหมาะสมกับส่วนพุงฟิล์ม การปิดอากาศที่ใช้เป่าเข้าภายในลูกโป่ง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีค่าสำคัญที่ใช้สำหรับอธิบายกระบวนการแปรรูปพลาสติกโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม ได้แก่

1. อัตราส่วนการเป่า (Blow – up ratio, BUR) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่ง (D_p) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย (D_0) โดยทั่วไปอัตราส่วนการเป่า (Blow – up ratio) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 2:1 ถึง 6:1 ซึ่งหมายความว่า สายตัวหนึ่งสามารถผลิตถุงได้หลายขนาดขึ้นอยู่กับค่า Blow – up ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อัตราการดึงลง (Draw – down ratio, D_R) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความเร็วของฟิล์มที่ดึง โดยลูกกลิ้ง (V) กับความเร็วของอัตราการรีด (V_0) ซึ่งความเร็วของการอัดรีดสามารถคำนวณได้จาก น้ำหนักของพลาสติกที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลาแปรให้เป็นปริมาตรแล้วค่อนำปริมาตรที่ได้มาหารด้วย พื้นที่หน้าตัดของสาย

3. อัตราส่วนการลดความหนา (Thickness reduction ratio) คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาที่อัดรีดออกมา (H_0) กับความหนาของฟิล์มตอนสุดท้าย (H)

สำหรับวัสดุที่ไม่ขึ้นกับความหนา (Incompressible materials) อัตราส่วนทั้งสามจะเกี่ยวข้องกัน ตามสมคูลมวลาสาร ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4

$$D_R = \frac{V}{V_0} \quad (2.3)$$

$$BUR \frac{V}{V_0} = \frac{H_0}{H} = BUR \times D_R \quad (2.4)$$

2.8.2 หลักการของฟิล์มเป่า [27,28]

ฟิล์มเป่ามีความหนาน้อยกว่า 0.020 นิ้ว (0.05 cm.) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ทำฟิล์มเป่าประกอบด้วย เครื่องอัดรีดต่ออยู่กับคายนวแหวน (annular die) ซึ่งปกติจะมีทิศอยู่ในแนวตั้ง การผลิตฟิล์มเป่าแบบท่อ (Tubular blown film) จะใช้อากาศและการดึงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอากาศที่อยู่ภายในจะช่วยทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ และมีส่วนของลูกกลิ้งช่วยรวบฟิล์ม (Collapsing guides and nip) อยู่ทางด้านบน โดยฟิล์มจะขยายตัวออกประมาณ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมตามแนวขนาน และในขณะเดียวกัน จะถูกดึงในทิศทางตั้งฉาก ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง (Biaxial orientation) เกิดการตกผลึก (Crystallization) และการแข็งตัว (Freeze) อยู่ในทิศทางการจัดเรียงตัวนั้น

ฟิล์มที่เกิดการขยายตัวเนื่องจากการเป่ามีกระบวนการเป็นแบบแรงดึง (Tensile force) มากกว่าที่จะเป็นแบบแรงเฉือน (Shear force) เพราะความเค้นเฉือนมีลักษณะการตอบสนองเป็นแบบวิสโคอิลาสติก ทำให้แรงหนืดเนื่องจากแรงดึงมีค่าสูง ถ้าความหนืดเนื่องจากแรงดึงไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด เรียกว่า เทราโตเนียน (Troutonian) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมความเค้นใน นิวโตเนียน แต่ถ้าความหนืดเนื่องจากแรงดึงขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด จะมีพฤติกรรมเป็นแบบ นันเทราโตเนียน (Non – Troutonian) (พอลิเมอร์หลอมเหลวส่วนใหญ่จะเป็นแบบเทราโตเนียน) ซึ่งแบ่งออกเป็นกรทำให้แข็งเนื่องจากการดึง (Tension stiffening) และการทำให้บางเนื่องจากการดึง (Tension thinning)

เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลว (Extrudate) ออกจากคายนว จะค่อยๆ บางลง ความเค้นจะมากขึ้น และวัสดุที่ยังไม่แข็งพอจะเกิดความเครียดต่อไปเรื่อยๆ จนในที่สุดเกิดการแตกออกของฟิล์ม แต่อย่างไรก็ตาม การทำให้แข็งเนื่องจากการดึง จะส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นหรือมีการตอบสนองแบบ อิลาสติก มากพอที่จะชดเชยการเพิ่มของความเค้น ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น นอกจากนี้ อัตราการตกผลึก (Crystallization rate) ก็เป็นอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อเสถียรภาพ คือ การผลิตฟิล์มด้วยวิธีนี้จะมีลักษณะ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เรียกว่า แนวเส้นแข็งตัว (Freeze line or frost line) เกิดขึ้นตามทางที่เกิดลูกโป่ง ซึ่งเป็นบริเวณที่พอลิเมอร์เกิดการตกผลึก ทำให้ความโปร่งแสงลดน้อยลง อิทธิพลของแนวเส้นแข็งตัวนี้จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดการดึงและทำให้เกิดการแข็งตัวขึ้น ด้วยเหตุนี้อัตราการตกผลึกจึงไม่ควรสูงเกินไปจนทำให้ไม่เกิดการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง

2.8.3 สมบัติของฟิล์มเป่า [28]

สมบัติของฟิล์มเป่า ได้แก่ ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและทิศทางตามแนวขวาง) โดยใช้วิธีการทดสอบของเอลเมนดอร์ฟ (Elmendorf) ความทนทานต่อแรงกระแทก ความใส (ความขุ่น) ความเงาของผิว ความแข็งแรงดึง (ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและทิศทางตามแนวขวาง) การจัดเรียงตัว เปอร์เซ็นต์การยืดออก ความหนา และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก เป็นต้น ซึ่งตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ อุณหภูมิของการหลอมเหลว ความหนาของฟิล์ม ความสม่ำเสมอของความหนาของแผ่นฟิล์ม (วัดโดยใช้เครื่องวัดความหนา) อัตราส่วนการดึงลง (Draw - down ratio) อัตราส่วนการเป่า (Blow - up ratio) ความสูงของแนวเส้นแข็งตัว (Frost line height) และความสม่ำเสมอของความดัน ซึ่งช่วยลดหรือกำจัดการเกิดเป็นคลื่น (Surging)

ความหนาของฟิล์มที่ได้ขึ้นอยู่กับช่องว่างของสาย อุณหภูมิของการหลอมเหลว อัตราส่วนการเป่า และอัตราส่วนการดึงลง ส่วนความสูงของแนวเส้นแข็งตัว คือ ระยะทางเหนือสายที่เกิดความขุ่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการตกผลึกในขณะที่ของหลอมเหลวเย็นตัวลง ซึ่งจัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อความหนาของฟิล์ม โดยพบว่า ถ้าเพิ่มความสูงของแนวเส้นแข็งตัว เปอร์เซ็นต์ของความขุ่นจะเพิ่มขึ้น ความเงาของผิวจะเพิ่มขึ้น แต่ความใสจะลดลง ความไม่สมบูรณ์ของผิวจะลดลง และความแข็งแรงต่อแรงกระแทกจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า ความสูงของแนวเส้นแข็งตัวยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการหลอมเหลว และอัตราการอัดรีดด้วย โดยเมื่อตัวแปรทั้งสองเพิ่มขึ้น ความสูงของแนวเส้นแข็งตัวก็จะเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับอัตราส่วนการเป่าจะมีผลต่อความแข็งแรงต่อการดึง โดยจะเพิ่มขึ้นในทิศทางตามขวาง และลดลงในทิศทางตามแนวเครื่อง แต่จะมีผลตรงข้ามกับความแข็งแรงต่อการฉีกขาด นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วนการเป่าที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนการดึงลงที่เพิ่มขึ้นจะมีผลตรงกันข้าม

2.9 ทฤษฎีการยึดเกาะ (Theories of Adhesion)[30]

กลไกการยึดเกาะของ Adhesion มีทั้งหมดมีกลไก 5 แบบ ได้แก่

2.9.1 การดูดซับและการเปียก (Adsorption and Wetting)

เมื่อพื้นผิวสองพื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากพอ จะเกิด “แรงดึงดูดเชิงกล” (Physical attraction) เช่นการเปียก (Wetting) ของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง ในกรณีของของแข็ง 2 ชนิดอยู่ใกล้กันมากถึงระดับจุลภาค (ไมครอน) หรือระดับอะตอม ความขรุขระ (Roughness) ของพื้นผิวจะไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสิ่งขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะหรือสัมผัส จะมีเพียงบางตำแหน่งเท่านั้นที่สามารถเกิดการสัมผัสกันได้ในกรณีของเหลวบนของแข็งสามารถเกิดการเปียกได้ง่าย การเปียกจะเกิดมากหรือน้อยแสดงได้ด้วย “มุมสัมผัส” (Contact angle, θ) ดังแสดงในรูปที่ 48 ถ้าของเหลวมีความสามารถในการเปียก (Wettability) บนพื้นผิวของแข็งดี ของเหลวชอบที่สัมผัสกับพื้นผิวของแข็งเกิดการแผ่กระจายบนผิวของแข็ง ทำให้มีค่ามุมสัมผัส θ น้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าวัสดุมีความสามารถในการเปียกต่ำ ของเหลวไม่ชอบสัมผัสกับของแข็งเป็นผลให้มีค่ามุมสัมผัส θ มากสมบัติการเปียกของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง สามารถแสดงในรูปสมการง่ายๆ ของ (Dupreequation) แสดง งานของการยึดเกาะ (Work of adhesion, WA) ของของเหลวบนของแข็งดังนี้

$$WA = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_{12} \quad (1)$$

เมื่อ γ_1 และ γ_2 คือค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ (Surface free energy) ของของเหลวและของแข็งตามลำดับ γ_{12} คือค่าพลังงานพื้นผิวอิสระของอินเตอร์เฟสระหว่างของเหลวและของแข็งสมการนี้สามารถโยงให้สัมพันธ์กับกรณีของเหลวบนพื้นผิวอิสระของอินเตอร์เฟสระหว่างของเหลวและของแข็งดังรูปที่ 49 โดยใช้สมการของยัง (Young equation) ทำสมดุลของแรงกระทำที่จุด “A” ตามแนวระนาบ สามารถเขียนสมการในรูป

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (2)$$

เมื่อ γ_{SV} , γ_{SL} และ γ_{LV} คือ ค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ (Surface free energy) หรือแรงตึงผิว (Surface tension) ของอินเตอร์เฟสระหว่างของแข็ง-ก๊าซ ของแข็ง-ของเหลว และของแข็ง-ก๊าซตามลำดับ และ θ คือค่ามุมสัมผัส (Contact angle) พื้นของแข็งจะทำการวัดค่าแรงตึงผิวได้ยากในขณะที่เราสามารถทำการทดลองวัดค่าแรงตึงผิวของเหลวได้ง่าย การหาค่าแรงตึงพื้นผิวของของแข็งสามารถทำได้โดยการใช้ของเหลวที่ทราบค่าแรงตึงผิวเปียกบนผิวของแข็ง โดยมีการนิยามค่า “แรงตึงผิววิกฤต” (Critical surface tension, γ_C) กล่าวคือของเหลวที่มีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่าแรงตึงผิววิกฤตของของแข็ง ($\gamma_{LV} < \gamma_C$) เท่านั้นที่สามารถเกิดการเปียกทันทีทันใด

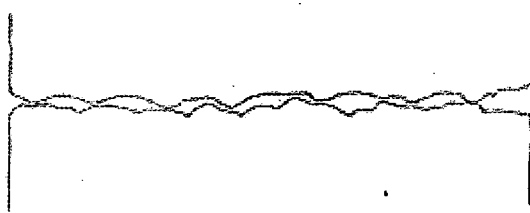
เราสามารถรวมสมการ (1) และ (2) โดยให้ $\gamma_1 = \gamma_{SV}$, $\gamma_2 = \gamma_{LV}$ และ $\gamma_{12} = \gamma_{SL}$ ทำให้ได้สมการ

$$WA = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (3)$$

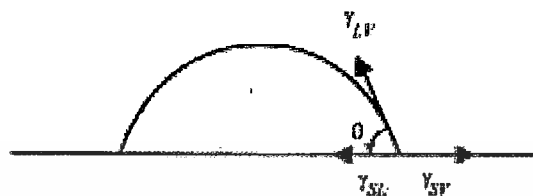
$$WA = \gamma_{LV} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (4)$$

ค่างานของการยึดเกาะ (WA) แสดงถึงแรงหรือพันธะทางกายภาพที่เกิดเนื่องจากแรงกระจายตัวระหว่าง โมเลกุล (Intermolecular dispersion force) ที่สัมผัสและเกิดการเปียกหรือการยึดเกาะกัน

a.



b.



รูปที่ 2.11 (a) การยึดเกาะระหว่างพื้นผิวขรุขระของของแข็งสองชนิด สังกะจุดสัมผัสเพียงเล็กน้อยทำให้เกิดการยึดเกาะที่ไม่แข็งแรง (b) มุมสัมผัส (Contact angle, θ) และแรงตึงผิว (Surface tension, γ) ของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง สัญลักษณ์ SV, SL และ LV แทนของแข็ง-ก๊าซ, ของแข็ง-ของเหลว และของเหลว-ก๊าซ ตามลำดับ [30]

2.9.2 การแพร่เข้าหากันหรืออินเทอร์ดิฟฟิวชัน (Interdiffusion)

การยึดเกาะของพื้นผิวพอลิเมอร์สองชนิดสามารถเกิดได้ ถ้าโมเลกุลพอลิเมอร์บริเวณพื้นผิวสัมผัสทั้งสองชนิดมีการแพร่ (Diffusion) เข้าหากันและกันดังรูปที่ 49 ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณการเกี่ยวพันกับของสายโซ่โมเลกุล (Molecular entanglement) ว่ามีมากหรือน้อย อีกทั้งขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนสายโซ่โมเลกุล เนื่องจากความสามารถในการแพร่และการพันกันของสายโซ่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล (Molecular motion) ดังนั้นการยึดเกาะแบบอินเทอร์ดิฟฟิวชันสามารถเพิ่มได้โดยใช้ตัวทำละลาย (Solvents) ทาที่พื้นผิว หรือการใช้สารเติมแต่งจำพวกพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) ทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย กลไกการยึดเกาะแบบนี้สามารถเกิดกับพื้นผิวที่มีการเคลือบพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงผิวก่อนแล้วจึงทำการเคลือบกาวลงไป

2.9.3 แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Attraction)

แรงดึงดูดจะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวทั้งสองชนิดที่มีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน นั่นคือถ้าพื้นผิวหนึ่งมีประจุบวก (Net positive charge) และอีกพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นลบ (Net negative charge) ตัวอย่างเช่น อันตรกิริยาระหว่างกรด-เบส (Acid-base interaction) และพันธะไอออนิก (Ionic bonding) แสดงในรูป (b) และ (c) ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับความหนาแน่นประจุ (Charge density) แรงดึงดูดระหว่างประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ไม่ใช่แรงยึดเกาะหลักระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิว แต่แรงดึงดูดชนิดนี้มีส่วนร่วมกับกลไกการยึดเกาะชนิดอื่น ช่วยให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่างสองพื้นผิวได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

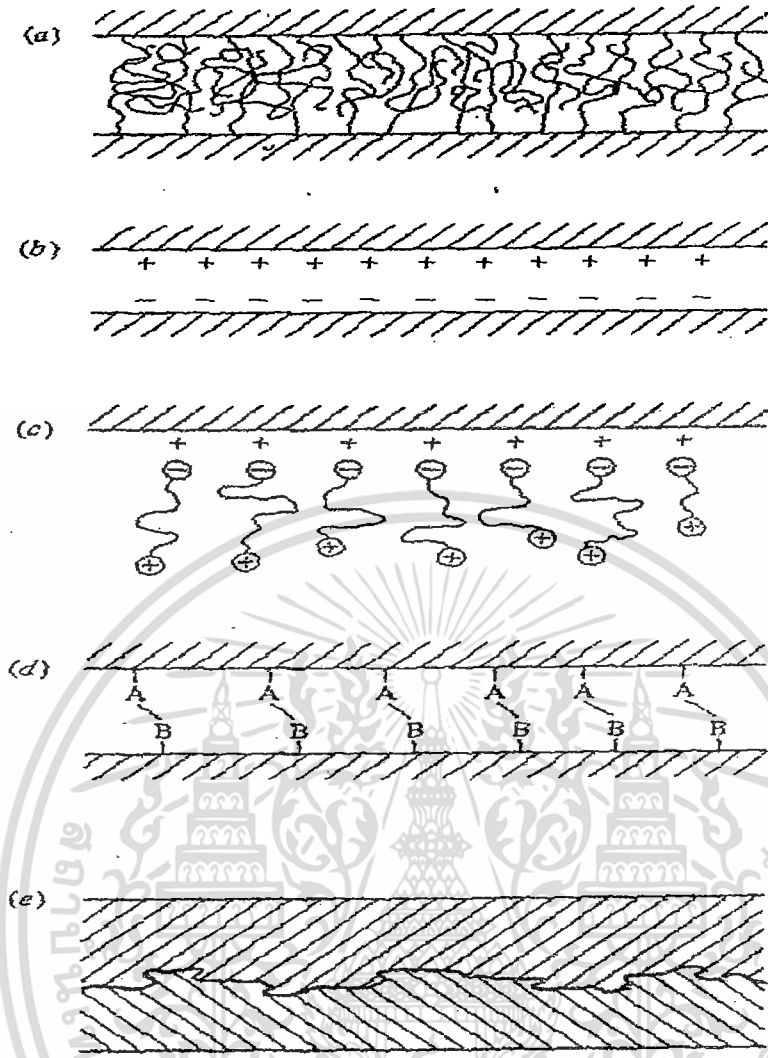
ดีขึ้น เช่นการยึดเกาะของสารคู่ควบประเภทไซเลน (Silane coupling agent) ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุบวก (Cationic function groups) เป็นต้น

2.9.4 พันธะทางเคมี (Chemical Bonding)

เป็นกลไกการยึดเกาะที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่ง แสดงในรูป (d) เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวหนึ่งมีหมู่ฟังก์ชันทางเคมี (Function groups) บนพื้นผิวและอีกพื้นผิวหนึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดเป็นพันธะทางเคมีได้แก่ พันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิว ซึ่งเป็นการยึดเกาะที่แข็งแรง ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น การเสถียรภาพของพื้นผิวระหว่างอินเตอร์เฟซจะเกี่ยวข้องกับการแตกหักของพันธะเคมีนี้ ตัวอย่างการยึดเกาะด้วยพันธะทางเคมีได้แก่ การเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสารคู่ควบ (Coupling agent) กับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นทั้งสอง

2.9.5 การยึดเกาะเชิงกล (Mechanical Adhesion หรือ Mechanical Interlocking)

การยึดเกาะเชิงกลเกิดเมื่อกาวเปียกไปบนพื้นผิวที่เป็น backing ขณะเป็นของไหลสามารถแทรกตัวไปบนพื้นผิวที่ขรุขระของ backing รวมทั้งซอกร่องรูและ ช่องว่างอื่นๆ บนพื้นผิวเมื่อสารละลายระเหย ทำให้เกิดการแข็งตัว เป็นเหตุเกิดการล็อกติดอยู่กับพื้นผิวของ backing แสดงดังรูปที่ (e) ความแข็งแรงของการยึดเกาะนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระ (Roughness) ของพื้นผิวที่จะเกิดการสัมผัส ทำให้เกิดการแทรกตัวของกาว รวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถของกาว ในการเปียกและแทรกตัวในพื้นผิวที่จะยึดติด เช่น ความหนืดของกาวพื้นผิวที่มีความเรียบเกินไปจะเกิดการยึดเกาะเชิงกลน้อยหรือไม่มีเลย



รูปที่ 2.12 กลไกการยึดเกาะชนิดต่างๆ (a) อินเตอร์ดิฟฟิวชัน (Interdiffusion) (b) แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ (c) แรงดึงดูดระหว่างประจุของโมเลกุลที่มีประจุบนพื้นผิวที่มีประจุบวก (d) พันธะทางเคมีเกิดระหว่างหมู่ A บนพื้นผิวหนึ่งกับหมู่ B บนพื้นผิวหนึ่ง และ (e) การยึดเกาะเชิงกล (mechanical interlocking) [30]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยต่างๆที่ใช้สารเติมแต่งลงในพอลิเมอร์ พบว่ามีผลทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เหล่านั้นเปลี่ยนแปลงไปตามสมบัติของสารเติมแต่งที่ใช้เติม เช่น Asira และคณะ [31] ทำการศึกษาสารเติมแต่งซีโอไลต์ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Zeolite, ZSM-5) ที่กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับ สไตรีน-เอทิลีน-บิวทิลีน-สไตรีน (SEBS 13% styrene) พบว่าสมบัติทางสัณฐานวิทยาของ LDPE/EVA ที่อัตราส่วน 70/30 และมี ZSM-5(Si/Al = 107) มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกต่ำสุด ส่งผลให้มีการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเอทิลีนได้มากขึ้น แต่มีการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้น้อย และเมื่อนำฟิล์มเอกสารถนเป็นเอกสารถนสองชั้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นแบบที่ได้มาทดลองห่อผลไม้เป็นเวลา 100 ชั่วโมงพบว่าฟิล์มต้นแบบมีอัตราการลดลงของแก๊สเอทิลีนมากกว่าฟิล์มชนิด LDPE และ S.Marais และคณะ [32] ทำการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์มพอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตตผสมกับซิลิกาที่อัตราส่วนร้อยละ 6 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าที่อัตราส่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน การเติมซิลิกาทำให้ส่วนที่เป็นผลึกของฟิล์มลดลง และมีส่วนของอสัณฐานเพิ่มขึ้น ทำให้การซึมผ่านของแก๊สเพิ่มขึ้น และพรพรณ มัน ประสิทธิ์ และภาสินี แต่ตี [33] ทำการศึกษาการเตรียมและทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) ที่ปรับปรุงด้วยสารเติมแต่งที่เป็นซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ (Zeolite NaA) และมีการศึกษาเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่ 10% โดยน้ำหนัก โดยการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการเป่าและวิธีการหล่อ จากการศึกษาสมบัติต่างๆของแผ่นฟิล์มพบว่าสารตัวเติมที่ใช้ไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก เมื่อปริมาณของสารตัวเติมมากขึ้นพื้นผิวของแผ่นฟิล์มจะมีความขรุขระเพิ่มขึ้น และพบอนุภาคของสารตัวเติมมากขึ้นด้วย ซึ่งอยู่ในลักษณะที่มีการกระจายตัวดี จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อมีการผสมสารตัวเติม ค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของแผ่น ฟิล์มลดลงเล็กน้อย โดยฟิล์มที่มีซีโอไลต์เป็นสารตัวเติมมีค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าฟิล์มที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติม และแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการเป่ามีความแข็งแรงดึงสูงกว่า ส่วนค่ามอดูลัสนั้นมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มที่ไม่มีการปรับปรุง ด้านสมบัติความแข็งแรงฉีกขาด พบว่าการผสมสารตัวเติมไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงฉีกขาด และฟิล์มที่ได้จากวิธีการเป่ามีความแข็งแรงฉีกขาดมากกว่าฟิล์มที่ได้จากวิธีการหล่อ ส่วนความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่สารตัวเติม และฟิล์มที่มีการใช้ซีโอไลต์เป็นสารตัวเติมจะมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มที่มีการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติม

เนื่องจากการวิจัยนี้ต้องการเพิ่มสมบัติการซึมผ่านโมเลกุลน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และจากการวิจัยที่กล่าวมาเบื้องต้น [31,32,33] จึงสารเติมแต่งซีโอไลต์เอ มาเพื่อเพิ่มสมบัติการซึมผ่านโมเลกุลน้ำ แต่เนื่องจากการจะนำซีโอไลต์เอซึ่งมีขั้วสูงมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ซึ่งมีขั้วต่ำนั้น จะทำให้เกิดปัญหาการกระจายตัวไม่ดี เนื่องจากความแตกต่างระหว่างขั้วของฟิล์ม LDPE กับซีโอไลต์เอ ซึ่งมีงานวิจัยที่มีศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์เอด้วยวิธีต่างๆ เช่น Kim Hyun และคณะ [34] ได้ศึกษาถึงผลของการเคลือบซีโอไลต์ด้วยกรดสเตียริกที่กระจายตัวใน LDPE, LLDPE และ HDPE พบว่า การเคลือบซีโอไลต์ด้วยกรดสเตียริกที่กระจายตัวในพอลิเมอร์ทั้งสามชนิดมีผลทำให้สมบัติเชิงกลมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยค่ามอดูลัส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ความเค้น ณ จุดครากจะลดลง และค่าการดึงยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และผลของสมบัติทางความร้อนพบว่า การเคลือบซีโอไลต์ด้วยกรดสเตียริกทำให้อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และความเป็นผลึกของระบบลดลง เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy (SEM)) พบว่าการเคลือบซีโอไลต์ด้วยกรดสเตียริกที่กระจายตัวในพอลิเมอร์ทั้งสามชนิดมีการกระจายตัวดีกว่าในระบบที่ไม่มีการเคลือบซีโอไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยสเตียริก และกัญญาวีร์ สวรรณชัย [35] ได้ศึกษาการปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE สำหรับงานบรรจุภัณฑ์ โดยการผสม LDPE กับซีโอไลต์เอ (0-20%) และมีการปรับปรุงซีโอไลต์เอด้วยกรดสเตียริก โดยขึ้นรูปด้วยเทคนิคการหล่อฟิล์มในสถานะหลอมเหลว (Melt Casting) พบว่าเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ความหนืด ความเป็นผลึก ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก มอดูลัส และการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดและค่าความแข็งแรงฉีกขาดลดลง การปรับปรุงซีโอไลต์เอด้วยกรดสเตียริกทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น ผลจากการเก็บรักษามะเขือเทศ พบว่าภายในถุงบรรจุภัณฑ์ที่มีซีโอไลต์เออยู่มาก (10-20%) มีไอน้ำเกิดขึ้นน้อยกว่าในสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์น้อย และวารากรณ์ พุทธิสสะ [36] ทำการผลิตฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับซีโอไลต์เอ (Zeolite A) ซึ่งเป็นสารที่มีรูพรุนสามารถดูดซับน้ำได้ดี เพื่อปรับปรุงสมบัติในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม โดยทำการผสม LDPE และซีโอไลต์เอ (0-8% โดยน้ำหนัก) โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ และขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม พบว่าเมื่อปริมาณซีโอไลต์เอมากขึ้น (0-8%) มีผลให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น และจากการทดสอบฟิล์มพบว่าการใช้ซีโอไลต์ที่มากขึ้นทำให้ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ความแข็งแรงฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย จากการศึกษาสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์เอ 4 และ 6% การปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์ด้วยกรดสเตียริก (SA) 1% และพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) 3% พบว่าเมื่อใช้ SA และ PEG มีผลให้ความหนืดของระบบลดลงเล็กน้อย ส่วนสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง สมบัติในการซึมผ่านไอน้ำและออกซิเจนของฟิล์มขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มและปริมาณซีโอไลต์เอ โดยพบว่าสูตรที่มีซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มมีค่าลดลง ส่งผลให้สมบัติในการซึมผ่านไอน้ำและออกซิเจนเพิ่มขึ้น และจากการเลือกฟิล์มที่มีซีโอไลต์ 6% ทั้งที่มีและไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่มีซีโอไลต์มาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างสำหรับมะเขือเทศ โดยเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิสูง 11 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 15 วัน พบว่าในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีซีโอไลต์เอ 6% ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวมีปริมาณไอน้ำกักเก็บน้อยที่สุด เพราะเป็นฟิล์มที่บางที่สุดและมีค่าการซึมผ่านไอน้ำและออกซิเจนมากที่สุด และนอกจากนี้ซีโอไลต์เอยังช่วยในการลดการรวมตัวกลายเป็นหยดน้ำขนาดใหญ่ภายในบรรจุภัณฑ์อีกด้วย

จากการศึกษางานวิจัยที่มีการนำพอลิเมอร์มาผสมกัน พบว่ามีผลทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เหล่านั้นจะมีแนวโน้มไปตามพอลิเมอร์ผสมที่นำมาผสมด้วย เช่น Faker M. และคณะ[5] ได้ทำการศึกษาศสมบัติการไหล สัมฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (PE/EVA) blends) กับพฤติกรรมทางความร้อน จากการศึกษาการไหลของ PE และ EVA ที่มีอันตรกิริยาบริเวณผิวสัมผัส พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PE สูงจะมีอันตรกิริยาสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ EVA สูง ซึ่งนำไปสู่การกระจายตัวที่ดีในโครงสร้างพอลิเมอร์ผสม มีความหนืดและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น โดยในการทดลองใช้เครื่องรีโอเมทริกแมคานิคอลสเปกโตรมิเตอร์ (rheometric mechanical spectrometer (RMS)) วัดสมบัติการไหลของ

พอลิเมอร์ผสม PE/EVA ในอัตราส่วนต่างๆเมื่อศึกษาพื้นฐานวิทยาศาสตร์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy (SEM)) พบว่าพอลิเมอร์ผสมของ PE/EVA เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วน EVA ขึ้นจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของบริเวณ EVA เพิ่มขึ้นด้วย การกระจายของเมทริกซ์ในสัณฐานวิทยาสังเกตได้จากพอลิเมอร์ผสมที่มี EVA จะมีปริมาณการกระจายของขนาดอนุภาคมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PE สูง ดังนั้นการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์จะมีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PE สูง และเมื่อทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนพอลิเมอร์ผสมจะมีการลดลงของอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (melting temperatures, T_m) ของ PE จะมีอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากผลการละลายของ EVA หรือการเกิดผลึกร่วมของ PE กับบางส่วนของ EVA การเกิดผลึกร่วมสูงขึ้นในพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน 90/10 ทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นและการยืดออก ณ จุดขาดลดลง ส่วนการศึกษาสมบัติเชิงกลเป็นผลจากการเกิดผลึกร่วม ทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างเฟสเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่จะลดลง โดยเฉพาะตรงบริเวณผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นการดึงยืด ณ จุดขาดของการทดสอบแรงดึงลดลง และ Bing Na และคณะ [37] ได้ศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (HDPE/EVA) blends) และขึ้นรูปด้วยเทคนิคการฉีด โดยศึกษาถึงปัจจัยในการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนและเปอร์เซ็นต์ของหมู่ไวนิลอะซิเตตในเอทิลีนไวนิลอะซิเตต พบว่าพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA ที่อัตราส่วน 80/20 มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันจึงศึกษาผลของเปอร์เซ็นต์ของหมู่ไวนิลอะซิเตตในเอทิลีนไวนิลอะซิเตต พบว่าตัวอย่างที่มีลักษณะคงที่ (Static sample) จะมีขนาดอนุภาคของ EVA ที่กระจายตัวอยู่ใน HDPE แตกต่างกันสองส่วนคือส่วนของพื้นผิวด้านนอก (Skin) จะมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของ EVA ที่กระจายตัวในส่วนแกนกลาง (Core) เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาในการเย็นตัวลงที่แตกต่างกัน และขนาดของอนุภาค EVA จะเพิ่มขึ้นทั้งสองส่วนเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของหมู่ไวนิลอะซิเตตในเอทิลีนไวนิลอะซิเตต ซึ่งเป็นผลมาจากมีส่วนที่มีขั้วเพิ่มมากขึ้น และจากตัวอย่างที่มีการให้เคลื่อนที่ตลอดเวลา (Dynamic sample) พบว่าจะมีขนาดอนุภาคของ EVA ที่กระจายตัวอยู่ใน HDPE แตกต่างกันสามส่วนคือส่วนของแกนกลาง (Core) จะมีขนาดใหญ่ที่สุด รองลงมาคือส่วนของชั้นกลาง (Oriented Layer) และชั้นพื้นผิวด้านนอก (Skin) จะมีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิและเวลาในการเย็นตัวลงเช่นกัน และทั้งสามส่วนจะมีขนาดของอนุภาค EVA จะเพิ่มขึ้นทั้งสองส่วนเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของหมู่ไวนิลอะซิเตตในเอทิลีนไวนิลอะซิเตต ซึ่งเป็นผลมาจากมีส่วนที่มีขั้วเพิ่มมากขึ้น และ

Devallencourt และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาการซึมผ่านโมเลกุลของน้ำผ่านแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA) ซึ่งใช้ไวนิลอะซิเตต (Vinyl Acetate, VA) ในปริมาณที่ต่างกัน โดยเตรียมฟิล์มในสถานะสารละลาย แล้วทำการศึกษาโครงสร้างของแผ่นฟิล์มโดยใช้เทคนิค DSC และทำการวัดค่ามุมสัมผัสพบว่าเมื่อปริมาณไวนิลอะซิเตตเพิ่มขึ้น แผ่นฟิล์มจะมีส่วนของอสัณฐานเพิ่มขึ้น เนื่องจากไวนิลอะซิเตตจะไปลดความสามารถในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ และพบว่าค่ามุมสัมผัสจะเพิ่มขึ้นด้วย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังทดสอบใจการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Permeation) และการแพร่ผ่านของน้ำ (Water Diffusion) พบว่าเมื่อปริมาณไวนิลอะซีเตตเพิ่มขึ้น ค่าทั้งสองจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนหมู่ที่มีขี้ว้ (Carbonyl Group) ในโคพอลิเมอร์ ซึ่งการส่งผ่านน้ำในระบบเกิดขึ้นจากการที่มีหมู่มีขี้ว้มากขึ้น โดยจะเห็นได้ชัดเจนกว่าการเพิ่มขึ้นของส่วนอสัณฐาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์จาก LDPE ที่ผสมด้วยซีโอไลต์เอและเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของ LDPE กับซีโอไลต์เอโดยการผสม EVA เข้าไป และขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม ซึ่งในขั้นตอนการเป่าขึ้นรูป จะมีการต่อระบบปั๊มสุญญากาศดูดไอน้ำออกจากระบบเพื่อให้ระบบมีความชื้นอยู่ในน้อยที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรดเป่าฟิล์ม LD1905FA จากบริษัทไทยพอลิเอทิลีน จำกัด
2. เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene Vinyl-Acetate Copolymer, EVA) เกรด UL00728CC จากบริษัท Exxon Mobile Chemical
3. ซีโอไลต์ชนิดเอ (Zeolite A) เกรดการค้า จากบริษัทพีคิวเคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด
4. Unsaturated Polyester Resin (เรซินพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว)
5. Methyl Ethyl Ketone Peroxide (ตัวเร่งปฏิกิริยา)
6. Cobalt Naphthenate (สารกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา)
7. ไนโตรเจนเหลว (Liquid, N₂)

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LDPE

สมบัติ	LD1905FA	หน่วย
ดรชนีการไหล (Melt Flow Rate)	5	g/10min
ความหนาแน่น (Density)	0.919	g/cm ³
ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) MD/TD	MD:210*,TD:170*	kg/cm ³
ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (Extension at Break) MD/TD	MD:320*,TD:680*	%
จุดหลอมเหลว (Melting Point)	108	°C

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ EVA

สมบัติ	UL00728CC	หน่วย
ร้อยละของไวนิลอะซิเตต (% Vinyl Acetate)	27.5	wt%
ครรชนีการไหล (Melt Flow Rate)	7	g/10min
ความหนาแน่น (Density)	0.952	g/cm ³
ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (Extension at Break)	100	%
จุดหลอมเหลว (Melting Point)	70	°C

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ Zeolite A

สมบัติ	Zeolite A	หน่วย
ลักษณะ	ผงละเอียด	-
สี	ขาว	-
%ความเป็นผลึก	99%	-
ค่า pH ที่ 1% การกระจายตัว	11.28	-
ความหนาแน่น	366	g/cm ³
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	4.0	µm
ความแข็ง	4-5	Mohs

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงาน

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหอนคู่ (Twin-Screw Extruder, รุ่น PL-200; Intro Engineering)
2. เครื่องเป่าฟิล์มพลาสติก (Film Blowing Tower, รุ่น LF-400; Labtech Engineering) ที่ต่อเข้ากับเครื่องอัดรีดเกลียวหอนเดี่ยว (รุ่น Polydrive with Rheomex R252)
3. เครื่องบดพลาสติก (Plastic Grinder): Bosco Engineering รุ่น Bosco A600
4. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, LLOYD รุ่น LR 5K; LLOYD Instrument)
5. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC 7; Perkin Elmer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (Perkin รุ่น Pyris 1 TGA; Perkin Elmer Co.,Ltd.)
7. เครื่องวัดการซึมผ่านไอน้ำ (Water Vapor Permeation Tester ; Lyssy L80-4000j)
8. เครื่องวิเคราะห์การรับแรงสั่นสะเทือน (Dynamic Mechanical Thermal Analysis, DMTA)
9. ตู้อบความร้อน
10. เครื่องปั๊มลม : Hitachi Co.,Ltd. รุ่น BEBICON 400
11. เครื่องชั่งละเอียด
12. ไมโครมิเตอร์

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมสูตร LDPE/EVA/ซีโอไลต์เอ

อัตราส่วนพอลิเมอร์/ ซีโอไลต์เอ	อัตราส่วน LDPE/EVA	LDPE (%wt)	EVA (%wt)	ซีโอไลต์เอ (%wt)
100/0	100/0	100.00	0.00	0.00
100/0	85/15	85.00	15.00	0.00
100/0	80/20	80.00	20.00	0.00
100/0	75/25	75.00	25.00	0.00
90/10	85/15	76.50	13.50	10.00
90/10	80/20	72.00	18.00	10.00
85/15	85/15	72.25	12.75	15.00
85/15	80/20	68.00	17.00	15.00
80/20	85/15	68.00	12.00	20.00
80/20	80/20	64.00	16.00	20.00
75/25	85/15	63.75	21.25	25.00
75/25	80/20	60.00	15.00	25.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.1 การเตรียม Master batches

อัตราส่วนซีโอโลไต์เอ/EVA	EVA (%wt)	ซีโอโลไต์เอ (%wt)
50/50	50.00	50.00
60/40	60.00	40.00

เตรียมสูตรผสม Master batches สูตรละ 1 กิโลกรัม โดยก่อนผสมนำซีโอโลไต์เอไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชม. ก่อนทำการผสม เขย่าเพื่อให้ผสมกัน จากนั้นนำมาเทลงใน Hopper ของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยตั้งสภาวะของเครื่อง ดังนี้

- Feed zone 105°C
- Metering zone 115°C
- Die zone 125°C
- Screw speed 15 rpm

3.3.1.2 การเตรียมสูตรผสมพอลิเมอร์

คำนวณชั่งส่วนผสม LDPE กับ Master batches ให้ได้สัดส่วนตามตารางที่ 3.4 ลงในภาชนะปิดฝา เขย่าเพื่อให้ผสมกัน ในกรณีสูตรผสมที่ใช้ซีโอโลไต์เอเพิ่ม ให้ทำการผสมซีโอโลไต์เอที่ผ่านการอบแล้ว และเขย่าเพื่อให้ผสมกัน จากนั้นนำมาเทลงใน Hopper ของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยตั้งสภาวะของเครื่อง ดังนี้

- Feed zone 140°C
- Metering zone 160°C
- Die zone 170°C
- Screw speed 15 rpm

นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่อีกครั้ง โดยใช้สภาวะเดิม และทำการตัดพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการอัดรีดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำบดให้เป็นเม็ดละเอียด เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมสำหรับการเป่าฟิล์มต่อไป

3.3.2 การเตรียมแผ่นฟิล์มตัวอย่างด้วยเทคนิคการเป่า

นำพอลิเมอร์ผสมสูตรที่บดแล้วไปอบเพื่อไล่ความชื้นไปที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 48 ชม. จากนั้นขึ้นรูปด้วยเทคนิคแบบเป่า (Blow Film Extrusion) โดยตั้งสภาวะของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (รุ่น Polydrive with Rheomex R252 : ขึ้นรูปที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง) ที่ต่อกับเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ที่ใช้ตายประเภทวงแหวน (Annular Die) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว เพื่อควบคุมความหนา 50-60 ไมครอน

- อุณหภูมิ

Feed zone	170°C
Compression zone	170°C
Metering zone	160°C
- Screw speed 100 rpm

สภาวะเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม

- Blowing zone 170°C
- ขนาดปั๊มลมที่ใช้ 5 bar
- ความเร็วลูกกลิ้งที่ 1 1.5 rpm
- ความเร็วลูกกลิ้งที่ 2 1.5 rpm

3.3.3 การทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

3.3.3.1 การวัดความกว้างและความหนาของแผ่นฟิล์ม

วัดความกว้างของแผ่นฟิล์มโดยใช้ไม้บรรทัด และทำการวัดในแนวตลอดหน้ากว้างประมาณ 10 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

วัดความหนาของแผ่นฟิล์มโดยใช้ไมโครมิเตอร์ ประมาณ 50 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.3.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณซีโอไลต์เอนในแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

ทำการหาปริมาณซีโอไลต์ที่มีอยู่ในแผ่นฟิล์มตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง TGA ซึ่งกำหนดสภาวะที่ทดสอบ ดังนี้

- ภายใต้สภาวะบรรยากาศ
- อุณหภูมิ 30-550°C
- อัตราการให้ความร้อน 20°C/min

3.3.3.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

3.3.3.3.1 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

นำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC ซึ่งใช้น้ำหนักฟิล์มประมาณ 5-10 มิลลิกรัม นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 30°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุด คือ 140°C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 10°C/min จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกตามมาตรฐาน ASTM E794 [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหา Heat of fusion (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสามารถหาได้จากสมการดังนี้

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

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{\text{(ปริมาณ LDPE ที่มีอยู่จริง)}}$$

เมื่อ ΔH_f คือ พื้นที่ใต้กราฟของ T_m

ΔH_f^0 คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก ของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่า

293 J/g [39]

3.3.3.3.2 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Mechanical Thermal Analysis, DMTA)

นำฟิล์มมาขึ้นรูปหล่อให้ได้ขนาด 10x24x1 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้น วัดความหนาและความกว้างที่ตำแหน่งต่างกัน อย่างน้อย 3 ตำแหน่งและคำนวณหาค่าเฉลี่ย นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น -100°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 2°C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุด คือ 50°C และเปอร์เซ็นต์การยืด 0.1 % ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ 1 Hz รายงานผลเป็นอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g)

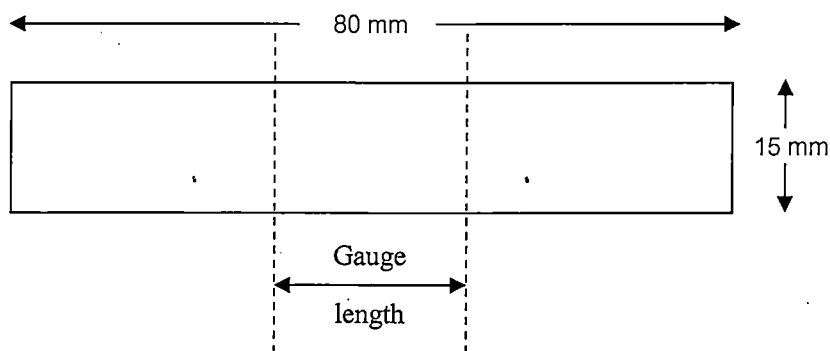
3.3.3.4 สมบัติความแข็งแรงดึง

การทดสอบสมบัติเชิงกลในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบแรงดึง ซึ่งสมบัติที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at Break) ตามมาตรฐาน ASTM D 882 [28] โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ซึ่งจะทำให้การตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างตามแนวเครื่องจักร (Machine Direction, MD) และแนวตามขวางเครื่องจักร (Transverse Direction, TD) ให้มีขนาด 15x80 mm²

โดยใช้สภาวะที่ทดสอบ ดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load Cell)	100	N
- ความเร็วในการดึง (Test Speed)	100	mm/min
- ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge Length)	25	mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง (Tensile Yield Strength)} = \frac{F}{A}$$

$$\text{มอดุลัส (Modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}}$$

$$\text{ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก} = \left(\frac{I - I_0}{I_0} \right) \times 100$$

(% Elongation at yield)

เมื่อ	F	=	แรงดึงยืดชิ้นงาน ณ จุดคราก
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm ²)
	I	=	ระยะระหว่างจุดทั้งสองหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง
	I ₀	=	ระยะระหว่างจุดสองจุดก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge Length) เท่ากับ 25 mm

หมายเหตุ ค่ามอดุลัสคำนวณจากค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 2 และ 4% การดึงยืด)

3.3.3.5 การทดสอบสมบัติการซึมผ่านไอน้ำ

ส่งตัวอย่างทดสอบที่ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย ทำการหาปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มพลาสติก ในระยะเวลาที่กำหนด และภายใต้สภาวะที่คงที่มีหน่วยเป็น g/m².day ที่อุณหภูมิ 38°C ความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ 90% โดยวิธี Transfer Time Method โดยใช้เครื่อง Lyssy Water Permeability ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 11X11 cm² เป็นไปตามมาตรฐาน.ISO 15106-1 : 2003 (E) Plastics-Film and Sheeting-Determination of Water Vapor

Transmission Rate-Part 1 : Humidity Detection Sensor Method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.6 การทดสอบสมบัติการซึมผ่านออกซิเจน

ศึกษาการซึมผ่านของออกซิเจน โดยวางฟิล์มรูปแปดเหลี่ยมที่ตัดด้วย Cutting Template ตรงกลางระหว่างเซลล์ ปล่อยก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนเข้าไป โดยก๊าซไนโตรเจนจะเป็นตัวนำก๊าซออกซิเจนที่สามารถผ่านแผ่นฟิล์มไปยังด้านที่มีออกซิเจนต่ำกว่าไปยังเครื่องบันทึกค่า ค่าที่อ่านได้จะเป็นปริมาตรของก๊าซที่วัดได้จากการซึมผ่านที่คงที่ ณ อุณหภูมิและพื้นที่ผิวที่กำหนด มีหน่วยเป็น cc/m²day สูตรละ 2 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM D3985

3.3.3.7 การทดสอบการเก็บรักษาผักและผลไม้

นำฟิล์มตัวอย่างขนาด 80 mm X 100 mm มาผลิตเป็นถุงบรรจุภัณฑ์โดยวิธีปิดผนึกร้อน บรรจุมะเขือเทศพันธุ์สีดาตัวอย่างที่ล้างสะอาดและผึ่งให้แห้งแล้วลงถุงบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตได้ จำนวนถุงละ 3-5 ผล มะเขือเทศที่ใช้ในการทดลองต้องมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละลูกประมาณ 25-30 mm และอยู่ในช่วงที่มีสีเหลืองปนชมพู เมื่อปิดผนึกถุงแล้วเก็บรักษาในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิการเก็บ 5°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% เป็นเวลา 21 วัน ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและน้ำหนักของมะเขือเทศตัวอย่างในถุงบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากฟิล์มสูตรที่มีซีโอไลต์เอ เปรียบเทียบกับมะเขือเทศในถุงบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากฟิล์มสูตรต่างๆ

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

ในการทดลองการเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ EVA และมีการเติมซีโอไลต์เอในปริมาณต่างๆหลายสูตร จึงนำเสนอ โดยใช้อักษรย่อเพื่อแสดงแทนสูตรต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อแทนสูตรของ LDPE และซีโอไลต์เอที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	สูตรที่ใช้ในการทดสอบ	อักษรย่อที่ใช้แทน
1	LDPE 100%	L100
2	LDPE 85%/EVA 15 %	L85E15
3	LDPE 80%/EVA 20 %	L80E20
4	LDPE 75%/EVA 25 %	L75E25
5	LDPE 90% + Zeolite A 10 %	L90Z10
6	LDPE 85%/EVA 15% + Zeolite A 10 %	L85E15Z10
7	LDPE 85%/EVA 15% + Zeolite A 15 %	L85E15Z15
8	LDPE 85%/EVA 15% + Zeolite A 20 %	L85E15Z20
9	LDPE 80%/EVA 20% + Zeolite A 10 %	L80E20Z10
10	LDPE 80%/EVA 20% + Zeolite A 15 %	L80E20Z15
11	LDPE 80%/EVA 20% + Zeolite A 20 %	L80E20Z20
12	LDPE 80%/EVA 20% + Zeolite A 25 %	L80E20Z25

4.1 ผลการทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

จากการวัดความหนาของฟิล์มที่ผลิตได้ พบว่ามีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 26-39 ไมครอน โดยสูตรที่มีซีโอไลต์เอจะมีความหนามากกว่าฟิล์มผสม LDPE/EVA และมีสีขาวขุ่นมากกว่าฟิล์มที่ไม่มีซีโอไลต์เอ เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นอนุภาคที่มีสีขาว

ตารางที่ 4.2 ความหนาเฉลี่ยของแผ่นฟิล์มที่ผลิตได้

สูตร	ความหนาเฉลี่ย (μm)
L100	39 ± 5
L85E15	29 ± 5
L80E20	27 ± 5
L75E25	26 ± 5
L90Z10	33 ± 5
L85E15Z10	39 ± 5
L85E15Z15	39 ± 5
L85E15Z20	39 ± 5
L80E20Z10	30 ± 5
L80E20Z15	37 ± 5
L80E20Z20	32 ± 5
L80E20Z25	37 ± 5

4.2 ผลการตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์เอนในแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

ปริมาณที่แท้จริงของซีโอไลต์เอนในฟิล์มตัวอย่างแสดงดังในตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณที่แท้จริงของซีโอไลต์เอนในแผ่นฟิล์มตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง ± 3 เนื่องจากในขั้นตอนการผสมมีการเติมซีโอไลต์เอลงไปมากกว่าปริมาณของสูตรจริง 5% แต่เมื่อเทพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอลงใน Hopper ของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ พอลิเมอร์ผสมและซีโอไลต์เอนมีความหนาแน่นแตกต่างกันทำให้การเคลื่อนที่ตามแรงขับของสกรูต่างกัน และอาจมีอนุภาคของซีโอไลต์เอนบางส่วนตกลงมาที่ส่วนล่างของ Hopper ทำให้ในขั้นตอนการผสมจะเหลือซีโอไลต์เอนบางส่วนติดค้างอยู่ในร่องสกรู

ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจสอบปริมาณของซีโอไลท์เอในแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

สูตรผสม	ปริมาณซีโอไลท์เอที่ต้องการ (% wt)	ปริมาณซีโอไลท์เอที่พบ (% wt)
L100	0	0
L85E15	0	0
L80E20	0	0
L75E25	0	0
L90Z10	10	11.36
L80E20Z10	10	8.47
L80E20Z15	15	17.04
L80E20Z20	20	18.56
L80E20Z25	25	20.83
L85E15Z10	10	9.17
L85E15Z15	15	12.23
L85E15Z20	20	18.15

4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (DMTA) เพื่อหา T_g ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ พบว่า (ตารางที่ 4.4) T_g ของพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA มีค่าไม่แตกต่างจาก T_g LDPE และเมื่อมีการเติมซีโอไลท์ T_g ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัด ทั้งนี้เนื่องจากซีโอไลท์เป็นอนุภาคที่มีขั้วและอาจมีเพียงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างขั้วที่กระทำกับ EVA

ตารางที่ 4.4 ค่า T_g ($^{\circ}\text{C}$) ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

สูตรผสม	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
L100	0 - 10
EVA	-50 ถึง -55
L85E15	-45 ถึง -40 และ 15 ถึง 20
L85E15Z20	-45 ถึง -40 และ 10 ถึง 15
L80E20	-55 ถึง -50 และ 10 ถึง 15
L80E20Z15	-55 ถึง -50 และ 10 ถึง 15
L80E20Z20	-55 ถึง -47 และ 8 ถึง 15

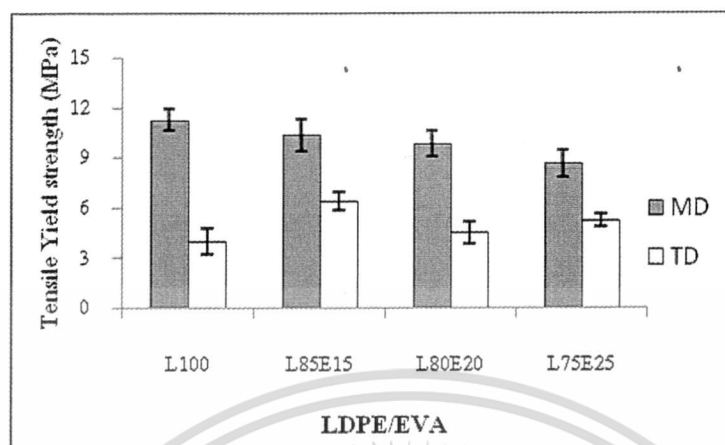
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ทางความร้อนของแผ่นฟิล์มตัวอย่างโดยใช้เครื่อง DSC สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ดังตารางที่ 4.5 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าซีโอไลต์เอทีเติมลงไปในพอลิเมอร์ผสมไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและความสมบูรณ์ของผลึก

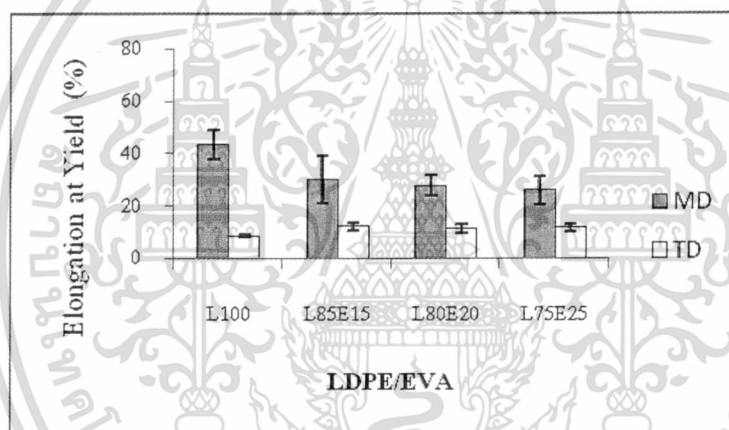
ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ

สูตรผสม	%Crystallinity
L100	20
L85E15	18
L80E20	17
L75E25	18
L90Z10	13
L85E15Z10	19
L85E15Z15	17
L85E15Z20	13
L80E20Z10	19
L80E20Z15	13
L80E20Z20	14
L80E20Z25	15

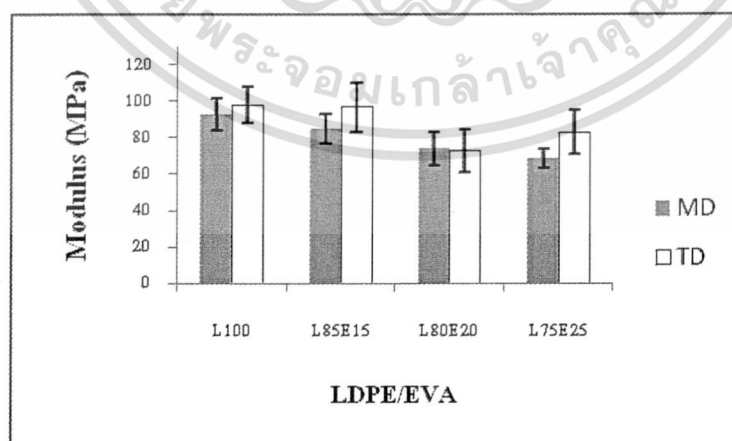
4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง



(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก



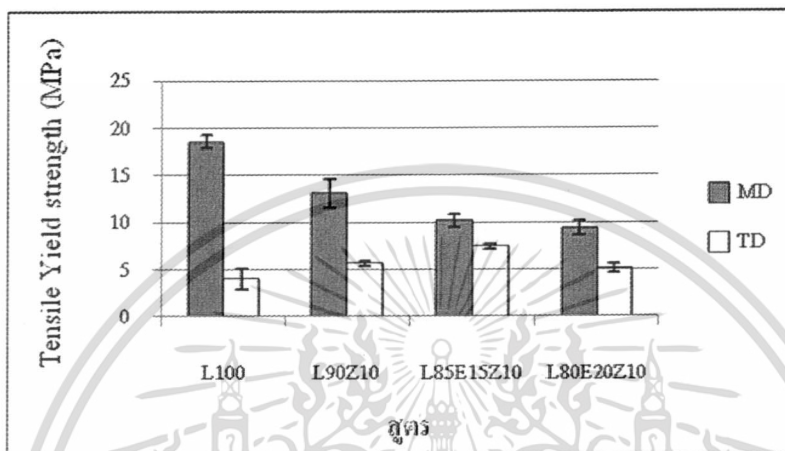
b) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก



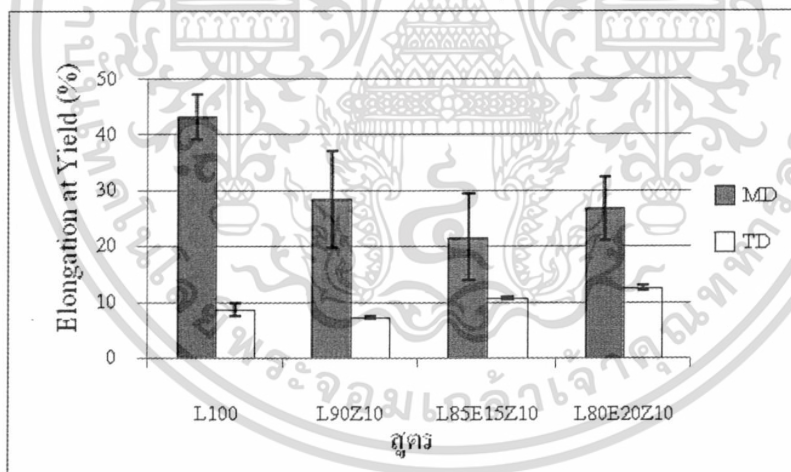
(c) มอดุลัส

รูปที่ 4.1 สมบัติการรับแรงดึงของแผ่นฟิล์มตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile Yield Strength) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (% Elongation at yield) และมอดุลัส (Modulus) ของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/ EVA มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ L100 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยาง ทำให้เกิดความยืดหยุ่น ในงานวิจัยนี้ได้ออกเฉพาะสูตรพอลิเมอร์ผสม L85E15 กับ L80E20 เพื่อศึกษาผลของการมีซีโอไลต์เอ

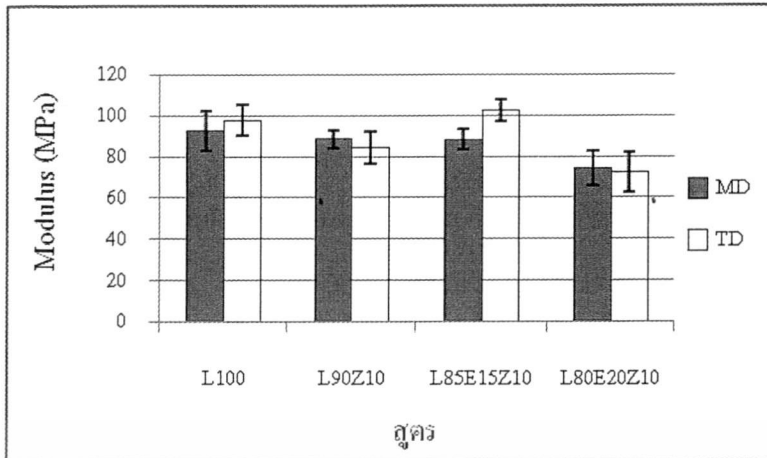


(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก



(b) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) มอดุลัส

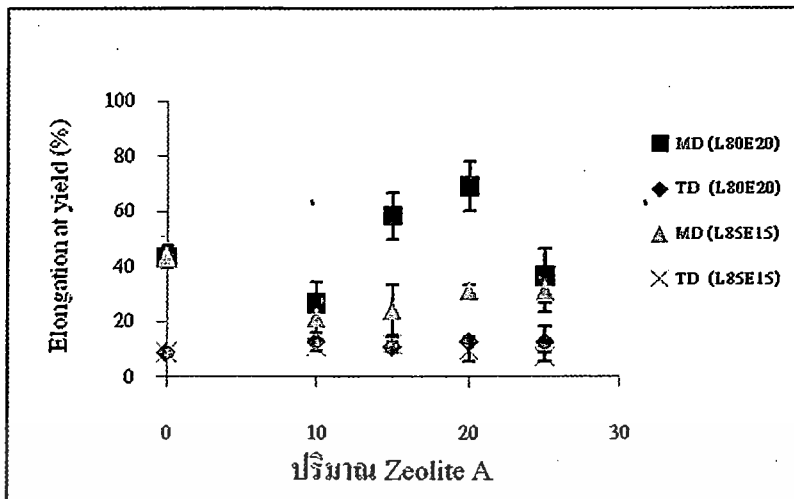
รูปที่ 4.2 สมบัติการรับแรงดึงของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เอ 10 %

การศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก ของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ 10 % ลดลง (รูปที่ 4.2) เนื่องจากซีโอไลต์เอที่เติมลงไปเป็นเพียงสารตัวเติมเพื่อเพิ่มเนื้อจึงไม่เสริมความแข็งแรงดึง แต่มีค่ามอดุลัสใกล้เคียงกัน เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นอนุภาคของแข็งที่มีความแข็งแรงสูงกว่าพอลิเมอร์ (LDPE และ EVA) จึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์มได้

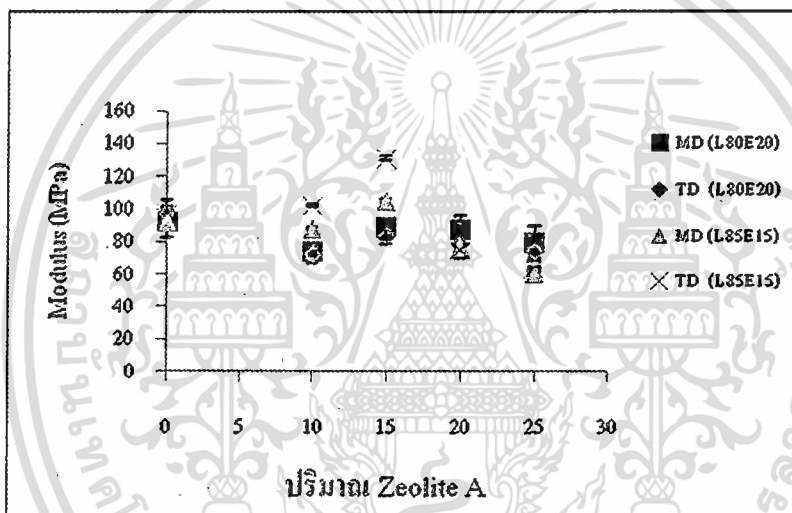


(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก



(c) มอดุลัส

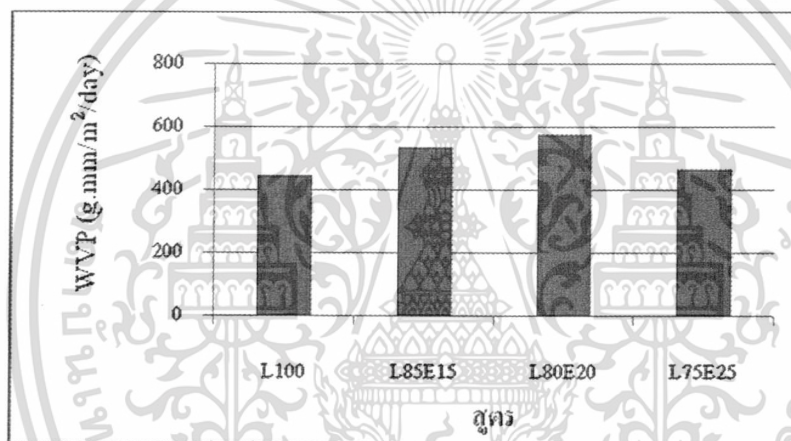
รูปที่ 4.3 สมบัติการรับแรงดึงของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เอในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณซีโอไลต์เอมากขึ้น เนื่องจากการผสม EVA ทำให้มีความแตกต่างระหว่างขั้วลดลง พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างซีโอไลต์เอกับพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น ซีโอไลต์เอจึงสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้มีการรับแรงดึงที่ดีขึ้น แต่ที่ปริมาณการเติมซีโอไลต์เอมากๆ (25%) พบว่าความแข็งแรงดึงค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากและมอดุลัสมีค่าลดลง เนื่องจากซีโอไลต์เอที่มากเกินไปมีแนวโน้มที่จะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง LDPE, EVA และซีโอไลต์เอลดลงและอาจเกิดมีช่องว่างระหว่างอนุภาคของซีโอไลต์เอในกลุ่มก้อนของซีโอไลต์เอด้วยกัน ซึ่งกลายเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงานทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มตัวอย่างลดลง

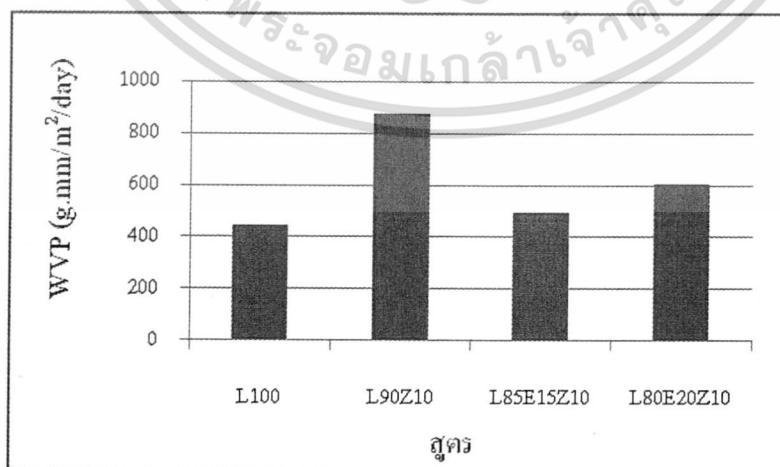
จากการพิจารณาแนวการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์พบว่าแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวแนวเครื่องจักร (Machine direction, MD) มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก มากกว่าแผ่นฟิล์มตัวอย่างในแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction, TD) แสดงว่าการผลิตฟิล์มด้วยเทคนิคการขึ้นรูปฟิล์มแบบอัดรีดในสภาวะหลอมเหลว (Extrusion melt casting) มีการดึงฟิล์มในขั้นตอนการม้วนเก็บ ทำให้เกิดการจัดเรียงสายโซ่มากกว่าการจัดเรียงสายโซ่ที่เกิดขึ้นจากการเป่าขยายตามแนวขวางเครื่องจักร

4.5 ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability performance, WVP) ของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ตัวอย่างสามารถแสดงดังรูปที่ 4.4

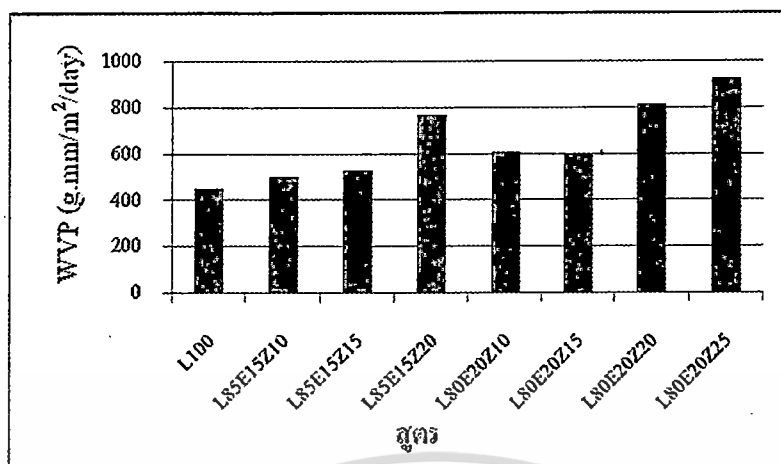


(a) ฟิล์มตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ



(b) ตัวอย่างที่มีซีโอไลต์ 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



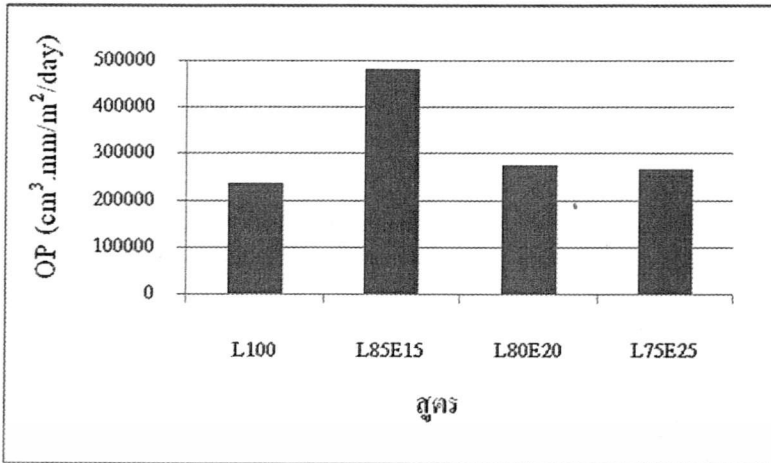
(c) फिल्मตัวอย่างที่มีซีโอโลดเอนในปริมาณต่างๆ

รูปที่ 4.4 การซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ

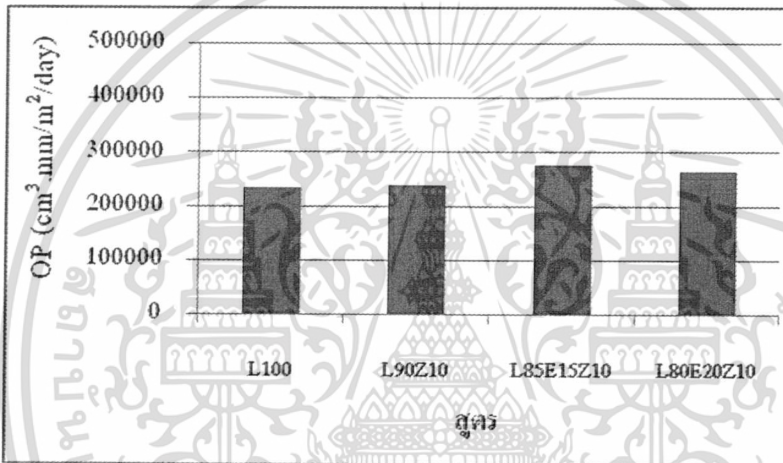
จากรูปที่ 4.4 (a) การเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของ L100 กับพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA ดังรูปที่ 4.4 พบว่ามีค่าการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อ EVA เพิ่มขึ้น (ยกเว้นสูตร L75E25) เพราะไอน้ำสามารถผ่านส่วนที่เป็นออสถฐานจาก EVA ได้ดี และเมื่อมีการเติมซีโอโลดเอนลงใน LDPE และพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA พบว่าแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ได้มี WVP มากขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์ม L100 ตัวอย่าง เนื่องจากซีโอโลดเอนเป็นสารที่รูพรุนมีสมบัติดูดน้ำได้ดี จึงยอมให้ไอน้ำผ่านได้มากขึ้นเมื่อซีโอโลดเอนมากขึ้น (รูปที่ 4.4 (b)) อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีปริมาณซีโอโลดเอนต่ำๆ (10%) (รูปที่ 4.4 (b)) ฟิล์มสูตร L90Z10 ซึ่งไม่มี EVA อยู่ให้ค่า WVP สูงกว่าสูตรอื่นที่มีซีโอโลดเอนเท่ากัน คาดว่าเกิดขึ้นจากการที่ฟิล์มสูตร L90Z10 เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ LDPE กับซีโอโลดเอนทำให้การผ่านของไอน้ำมีค่าสูง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

4.6 ผลการทดสอบการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

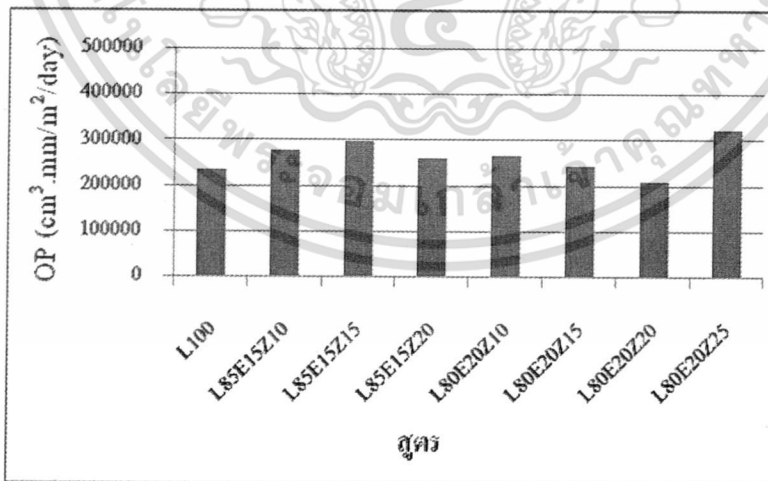
ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability, OP) ของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ตัวอย่างสามารถแสดงดังรูปที่ 4.5



(a) ตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ



(b) फिल्मตัวอย่างที่มีซีโอโลดเอน 10 %



(a) फिल्मตัวอย่างที่มีซีโอโลดเอนปริมาณต่างๆ

รูปที่ 4.5 ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของแผ่นฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์ 10-20% มีค่าไม่แตกต่างกันชัดเจนนัก แต่ในสูตรที่มีซีโอไลต์เอามาก (25%) จะมีความสามารถในการซึมผ่านออกซิเจนค่อนข้างสูง เนื่องจากปริมาณรูพรุนของซีโอไลต์เอสูงทำให้ออกซิเจนผ่านได้ดี นอกจากนี้ฟิล์มสูตรที่มีซีโอไลต์สูงๆ สามารถเกิดรอยต่อระหว่างภูมิภาคของพอลิเมอร์กับซีโอไลต์เอมากด้วย เพราะซีโอไลต์กระจายตัวได้ยากขึ้น

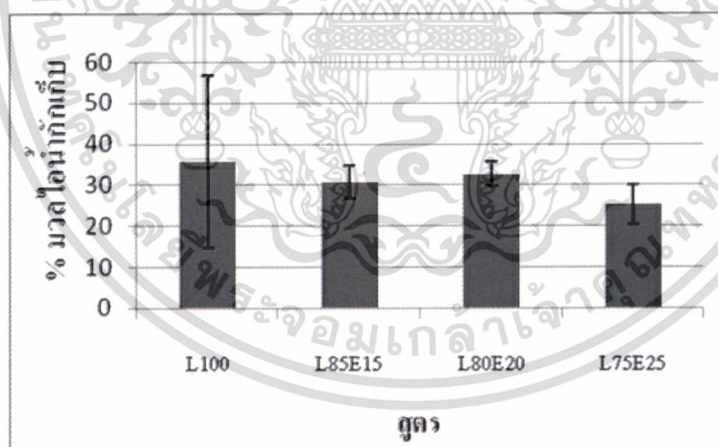
4.7 ผลการทดสอบการเก็บรักษาผักและผลไม้

ในขั้นตอนการทดสอบ ได้เลือกมะเขือเทศพันธุ์สีดา มาทำการทดสอบการเก็บรักษาผักผลไม้ เนื่องจากมะเขือเทศสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เช่น สี ความหนาแน่นของผลมะเขือเทศ น้ำหนักที่ลดลง และปริมาณไอน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากการคายน้ำของมะเขือเทศ ซึ่งแสดงรูปถ่ายของมะเขือเทศที่ทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 30 วัน ดังตารางที่ 4.6

จากการทดสอบเก็บรักษามะเขือเทศที่อุณหภูมิ 5 °C เป็นเวลา 30 วัน พบว่ามะเขือเทศมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยมีน้ำหนักลดลง เนื่องจากมะเขือเทศยังคงมีการหายใจและคายน้ำออกมา มะเขือเทศในถุงบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมจากฟิล์มสูตรที่ไม่มีซีโอไลต์เอ (สูตร LDPE, L85E15, L80E20) จะมีการเปลี่ยนสีจากสีเขียวอมส้มมาเป็นสีแดงส้มแสดงถึงภาวะการสุกมากขึ้น ผลมะเขือเทศจะนิ่มและเน่าเสียมีเชื้อราเกิดขึ้นบริเวณผิวมะเขือเทศซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไม่พบในมะเขือเทศที่เก็บรักษาในถุงบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมจากสูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอ และมะเขือเทศจะมีการเปลี่ยนสีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ผลมะเขือเทศจะมีลักษณะแข็งไม่สุก ไม่มีการเน่าเสียหรือมีเชื้อราเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ามียอดน้ำเกิดขึ้นภายในถุงบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากกระบวนการหายใจของพืชนั้นสิ่งที่ได้คือน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกถ่ายเทออกนอกถุงบรรจุภัณฑ์ ซึ่งการถ่ายเทออกจะมากหรือน้อยขึ้นกับ WVP และอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละถุงบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นหยดน้ำที่พบในถุงบรรจุภัณฑ์จะเป็นไอน้ำส่วนที่เหลือเรียกว่ามวลสารกักเก็บคือมวลสารที่ยังถ่ายเทออกไปไม่หมด แสดงผลดังตารางที่ 4.6

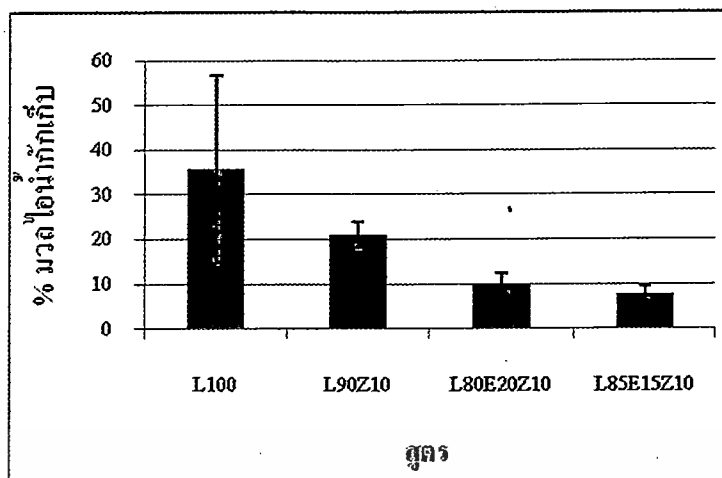
ตารางที่ 4.6 มะเขือเทศในถุงบรรจุภัณฑ์จากฟิล์มสูตรต่างๆก่อน-หลังการเก็บรักษา 30 วัน ในตู้เย็นที่ 5 °C

สูตร	ก่อนเก็บรักษา	หลังเก็บรักษา	การเปลี่ยนแปลง
L100			มะเขือเทศมีสีแดงเข้มขึ้น มีลักษณะนิ่มและมีเชื้อราเกิดขึ้นบริเวณผิว สังกะยมิหยค่น้ำเกิดขึ้นภายในถุงบรรจุภัณฑ์
L80E20			มะเขือเทศมีสีแดงอมส้มเข้มขึ้น และมีหยค่น้ำเกิดขึ้นภายในถุงบรรจุภัณฑ์
L80E20Z20			มะเขือเทศมีสีแดงอมส้มเข้มขึ้นเล็กน้อยและมีฝ้าของไอน้ำเกิดขึ้น

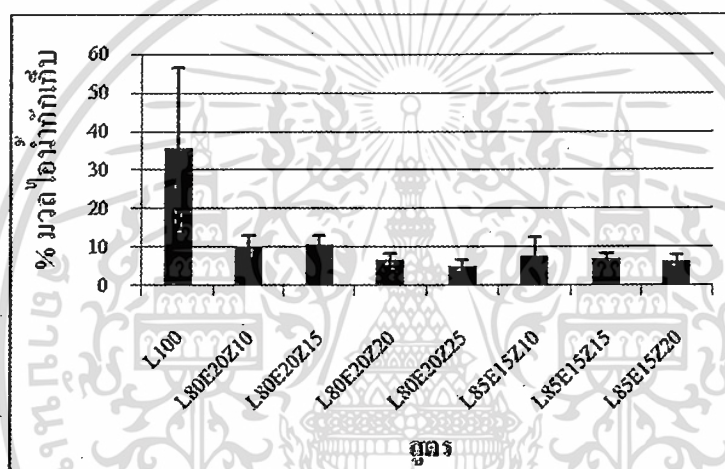


(a) ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) फिल्मบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างที่มีซีโโอลิต์เอ 10 %



(c) फिल्मบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างที่มีซีโโอลิต์เอในปริมาณต่างๆ

รูปที่ 4.6 มวลสารกักเก็บไอน้ำภายในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างสูตรต่างๆ

จากการทดสอบมวลสารกักเก็บไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างโดยเปรียบเทียบฟิล์ม LDPE กับฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ (รูปที่ 4.6) พบว่าฟิล์ม LDPE จะมีปริมาณมวลสารกักเก็บที่พบมากกว่าถุงบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อมีอัตราส่วนของ EVA สูงขึ้น เนื่องจาก EVA มีส่วนของอสัณฐาน ดังนั้นการเพิ่มอัตราส่วนของ EVA จึงเป็นการเพิ่มส่วนอสัณฐานให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้ไอน้ำสามารถซึมผ่านวัฏภาคอสัณฐานของ EVA ได้ จึงมีมวลกักเก็บไอน้ำในถุงบรรจุภัณฑ์น้อยกว่า LDPE

และเมื่อเปรียบเทียบถุงฟิล์ม LDPE กับถุงฟิล์มตัวอย่างที่มีซีโโอลิต์เอ 10 % เท่ากัน แต่ผสม EVA (สูตร L85E15Z10, L80E20Z10) และไม่ผสม EVA (สูตร L90Z10) พบว่าถุงฟิล์มตัวอย่าง L100 จะมีปริมาณมวลสารกักเก็บมากกว่าถุงบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมจากฟิล์มที่มีการเติมซีโโอลิต์เอ 10 % (สูตร L85E15Z10, L80E20Z10, L90Z10) และจากหัวข้อ 4.5 ผลของความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำพบว่าไม่ว่การณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถุงฟิล์มตัวอย่างที่ไม่มี EVA มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าดังนั้นจึงน่าจะมีปริมาณมวลสารกักเก็บไอน้ำไอน้ำสะสมอยู่น้อยกว่า แต่ในความเป็นจริงถุงฟิล์มตัวอย่างที่ไม่มี EVA จะมีปริมาณมวลสารกักเก็บไอน้ำมากกว่าถุงฟิล์มที่มี EVA แสดงว่าไอน้ำมีความสามารถในการซึมผ่านรูพรุนได้ดีกว่าช่องว่างระหว่างเม็ดพลาสติกของ LDPE กับอนุภาคของซีโอไลต์เอ จึงทำให้มีมวลสารกักเก็บไอน้ำในถุงบรรจุภัณฑ์มากกว่า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการผสม EVA นอกจากจะช่วยลดช่องว่างระหว่างเฟสของ LDPE กับอนุภาคของซีโอไลต์เอแล้ว ยังช่วยให้สามารถเติมซีโอไลต์เอได้มากขึ้น ทำให้การซึมผ่านไอน้ำดีขึ้นและมีมวลสารกักเก็บไอน้ำสะสมอยู่ในถุงบรรจุภัณฑ์น้อยลง

และจากตารางที่ 4.6 พบว่าถุงบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมจากสูตรที่ไม่มีเติมซีโอไลต์เอจะมีปริมาณมวลสารกักเก็บไอน้ำมากกว่าถุงบรรจุภัณฑ์ที่มีซีโอไลต์เอ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีอัตราส่วนของ EVA ในอัตราสูงขึ้นและมีปริมาณซีโอไลต์เอมาก (สูตร L80E20Z20, L80E20Z25) ทั้งนี้เนื่องจากการผสม EVA ช่วยเพิ่มความสามารถเข้ากันได้ระหว่างเม็ดพลาสติกของ LDPE ที่ไม่มีขั้วกับซีโอไลต์เอที่มีขั้วสูง และการผสม EVA ยังทำให้สามารถเติมซีโอไลต์เอในปริมาณมากๆ ได้ ดังนั้นถุงฟิล์มสูตรที่ไม่มีซีโอไลต์เอและมีซีโอไลต์เอในปริมาณน้อยๆจะมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำน้อยกว่าฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอมากๆ (จากหัวข้อ 4.5 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ) จึงทำให้มีหยดน้ำเกาะที่พื้นผิวของถุงบรรจุภัณฑ์ ส่งผลให้มีปริมาณมวลสารกักเก็บสารมากกว่าที่มีปริมาณซีโอไลต์เอมากๆและเห็นการเปลี่ยนแปลงของมะเขือเทศได้อย่างชัดเจน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำซีโอไลต์เอ (Zeolite A) ซึ่งเป็นสารที่มีรูพรุนสามารถดูดซับน้ำได้ดีมาพัฒนาความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยมีการผสมเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA) ลงไปเพื่อเพิ่มการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในแผ่นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ เนื่องจาก EVA สามารถเข้ากันได้ดีกับ LDPE และมีส่วนที่มีขั้ว (ไวนิลอะซิเตต, VA) ซึ่งช่วยให้สามารถผสมกับซีโอไลต์ได้ดีขึ้น และศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับห่อผัก จากการทดสอบสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาถึงปัจจัยปริมาณ EVA ที่แตกต่างกัน (L100, L85E15, L80E20, L75E25) พบว่าเมื่อผสม EVA จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และมอดูลัสลดลง และมีค่าต่ำสุดเมื่อผสม EVA 25% โดยน้ำหนัก (L75E25) เนื่องจากปริมาณ EVA ที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีความนิ่มมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาถึงปัจจัยของซีโอไลต์เอ ในพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA ที่ 2 อัตราส่วน คือ L85E15 และ L80E20

2. จากการศึกษาผลของการผสม EVA และไม่ผสม EVA ที่มีปริมาณซีโอไลต์เอ 10% เท่ากัน พบว่า สูตรที่มีการผสม EVA จะส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและมอดูลัสน้อยกว่า สูตรที่ไม่ผสม EVA เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยางทำให้เกิดความยืดหยุ่น และสูตรที่ผสม EVA จะมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำและออกซิเจนน้อยกว่า สูตรที่ไม่มีการผสม EVA เนื่องจากไอน้ำสามารถซึมผ่านช่องว่างระหว่างภูมิภาคของ LDPE และอนุภาคของซีโอไลต์เอได้ แต่เมื่อนำฟิล์มตัวอย่างที่ได้มาทดลองเก็บรักษาผัก พบว่าสูตรที่มีการผสม EVA จะมีมวลสารกักเก็บไอน้ำสะสมน้อยกว่า เนื่องจากไอน้ำที่เกิดขึ้นภายในถุงบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่จะซึมผ่านไอน้ำและออกซิเจนผ่านทางรูพรุนของซีโอไลต์เอได้ดีกว่าช่องว่างระหว่างภูมิภาคของ LDPE กับอนุภาคของซีโอไลต์เอ จึงทำให้มีมวลสารกักเก็บไอน้ำในถุงบรรจุภัณฑ์น้อยและมีการเปลี่ยนแปลงของมะเขือเทศน้อยกว่าสูตรที่ไม่มี EVA

3. จากการศึกษาปริมาณซีโอไลต์เอ พบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณซีโอไลต์เอมากขึ้น (15-20%) เนื่องจากซีโอไลต์เอสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์ผสม ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างซีโอไลต์เอและพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น เมื่อให้แรงดึงแก่แผ่นฟิล์มตัวอย่าง สายโซ่พอลิเมอร์จะรับแรงและถ่ายโอนแรงไปยังซีโอไลต์เอทำให้แผ่นฟิล์มตัวอย่างสามารถต้านทานแรงดึง ณ จุดครากได้มากขึ้น แต่ที่ปริมาณการเติมซีโอไลต์เอมากขึ้น (25%) จะมีความแข็งแรงดึง ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากและมอดูลัสมีค่าลดลง เนื่องจากซีโอไลต์เอที่มากเกินไปมีแนวโน้มที่จะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มตัวอย่างลดลง เมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอในปริมาณสูงขึ้น จะส่งผลให้มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำและออกซิเจนลดลง อย่างไรก็ตามการวิจัยครั้งนี้ยังไม่สามารถสรุปผลได้อย่างชัดเจนเกี่ยวกับผลกระทบของซีโอไลต์เอที่มีต่อคุณสมบัติของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ อย่างไรก็ตามการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์เอสามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการวิจัยครั้งนี้ยังไม่สามารถสรุปผลได้อย่างชัดเจนเกี่ยวกับผลกระทบของซีโอไลต์เอที่มีต่อคุณสมบัติของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์เอสามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี

ผ่านไอน้ำและออกซิเจนสูงขึ้น เมื่อนำฟิล์มตัวอย่างที่ได้มาทดลองห่อมะเขือเทศ จะพบหยดน้ำเล็กๆเกาะที่ผิวของฟิล์มและมีมวลสารกักเก็บไอน้ำสะสมอยู่น้อย จึงสามารถเก็บรักษามะเขือเทศได้นานขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. บรรจุกัณฑ์เอกทีฟลิ่งประดิษฐ์ของไทย. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
2. Shewfelt R.L., Bruckner B., Editors. **Fruit and Vegetable Quality**. Pennsylvania: Technomic Publishing Company, Inc. 2000.
3. สมชาย กล้าหาญ. 2543. วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวพืชสวน. ภาควิชาพืชสวน คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
4. กัญญาวิทย์ สุวรรณชัย “การใช้ซีโอไลต์เอเพื่อปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มอครีคพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในงานบรรจุภัณฑ์ผักสด” ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัยสถาบัน สาขา วิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
5. M. Faker M.K., Razavi Aghjeh, M. Ghaffari and S.A. Seyyedi. **Rheology, morphology and mechanical properties of polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (PE/EVA) blends**. Polymer Journal 44 (2008) 1834–1842.
6. พรพรรณ มั่นประสิทธิ์ และภาสินี แต่ดี. 2548. การเตรียมและทดสอบสมบัติของเอทิลีนไว นิลอะซิเตดโคพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงด้วยซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ. โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
7. S. Dirim, A. Esin and A.Bayindirli 2004. **A New Protective Polyethylene Based Film Containing Zeolite for the Packaging of Fruits and Vegetables : Film Preparation**. Journal of Food Engineering. Vol. 63. page 9-13
8. E.B. Pantastico 1975. **Postharvest Psysiology Handling and Utilization of Tropical and Subtropical Fruits and Vegetables**. Westport CT : The AVI Publishing Company Inc.
9. A.L. Ryall and W.J. Lipton 1972. **Handling, transportation and storage of fruits and Vegetables Vol. 1**. Westport CT : The AVI Publishing Company Inc.
10. จิรา ณ หนองคาย. 2534. เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและดอกไม้. สำนักพิมพ์แมสพลับดิซ ชิง. กรุงเทพฯ.
11. J.B. Biale and R.B. Young 1981. **In Recent Advances in the Biochemistry of Fruits and Vegetables**. New York : Academic Press.
12. คณัย บุญยเกียรติ และนิริยา รัตนานพนธ์. 2535. การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. สำนักพิมพ์โอเคียนสโตร์.
13. F.A. Paine and H.Y. Paine **A Handbook of Food Packaging**. 1992. USA. : Chapman& Hall.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. R.L. Shewfelt and B. Bruckner 2000. **Fruit and Vegetable Quality**. Pennsylvania : Technomic Publishing Company, Inc.
15. M. Howe-Grant and K.J. Mackenzie 1993. **Enncyclopedia of Chemical Technology Vol.10**. 4th ed. New York : John Willey& Sons Inc.
16. F.W. Billmeyer **Textbook of Polymer Science**. New York: John Wiley & Sons. 1984
17. ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ร่วมกับ บริษัทไทยโพลีเอทิลีน จำกัด. 2532. การสัมมนาเรื่อง **HDPE...บรรจุภัณฑ์ทันสมัย**. กรุงเทพฯ
18. วันชาติ ปรีชาติวงศ์. 2552. **พอลิเมอร์ (Polymer)**. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์. [online]. Available : <http://www.gocities.com/thaimafia/orchem/polymer.ppt>
19. สิริลักษณ์ คัด โนภาส และเสาวนีย์ จรัสเรืองชัย. 2538. การศึกษาถึงผลของปริมาณพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำใน อีวีเอ พีวีซี และยางธรรมชาติ. โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
20. ตะวัน สุขน้อย. เอกสารประกอบการเรียนวิชาซีโอไลต์และสารประกอบที่มีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง. 2550. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
21. C.B. Gates **Catalytic Chemistry**. 1992. Toronto : Wiley& Sons.
22. P. Woodward 2004. **Solid State Chemistry**. [online]. Available : [http:// www.Chemistry.ohio-state.ed/woodward/chem_754.htm](http://www.Chemistry.ohio-state.ed/woodward/chem_754.htm).
23. Nasaexplores. 2004. **Zeolite the Secret Ingredient**. [online]. Available : http:// www.media.nasa.-explores.com/show_58_teacher_st.Php?id=030822110809.
24. S. Tanyapanyachon 2001. **The Preparation of Zeolite A Composite membrane for Ethanol/ethylene/water separation**. M.D. Thesis of Science in Petrochemicals and Hydrocarbon Chemistry, School of Graduate studies, King Mongkut' s Institute of Technology Ladkrabang.
25. จริงแท้ ศิริพานิช. **สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้**. กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541.
26. Extrudertechnologies. 2009. **"ET - TWIN SCREW EXTRUDER."** [Online]. Available : http://www_extrudertechnologies_com/diagram2_gif ของ Google.mht
27. เจริญ นาคะสรรค์. 2544. **กระบวนการแปรรูปพลาสติก**. กรุงเทพฯ :ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. โพรเซซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28. สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2548. **เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1**. กรุงเทพฯ : บุ๊คเน็ต.
29. ปรีชา พหลเทพ. 2540. **พอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ.มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
30. อธิพิศ แจ่มชัด, **พอลิเมอร์คอมโพสิต**, (กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544), 75-80.
31. A. Fuougfuchat and T. Sooknoi. **Highly ethylene permeable film: development and application in packaging**. Oral Presentation, Bangkok, June 8-12, 2008
32. S.Marais, E.Bureau, S.Gouanve, E. Ben Salem, Y.Hirata, A.Andrio, C.Cabot and H.Atmani (2004). **Transport of water and gases through EVA/PVC blend films-permeation and DSC investigations**. J.Polymer Testing, 21 : 253-262.
33. พรพรรณ มั่นประสิทธิ์ และภาสินี แต่ดี. 2548. **การเตรียมและทดสอบสมบัติของฟิล์มเอทิลีนไวนิลอะซิเตดโคพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงด้วยซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ**. โครงการงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
34. H. Kim, J. Biswas and S. Choe. **Effect of stearic acid coating on zeolite in LDPE, LLDPE, and HDPE composites**. Polymer 47 (2006) 3981-3992.
35. กัญญาวีร์ สุวรรณชัย “การใช้ซีโอไลต์เอเพื่อปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มอคริลิคพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในงานบรรจุภัณฑ์ผักสด” วิทยุวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548
36. วราภรณ์ พุทธิสตะ. 2549. **การผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมด้วยซีโอไลต์เอโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม**. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
37. B. Na, Q. Zhang, G. Zhang, K. Shen. **Super polyolefin blends achieved via dynamic packing injection molding: the morphology and mechanical properties of HDPE/EVA blends**. Polymer 43 (2002) 7367-7376
38. C.Devallencourt, S.Marais, J.M.Saiter, M.Labbe and M.Metayer “Study of Transport of small molecules through ethylene-co-vinyl acetate copolymers films. Part A : Water molecules”. J.Polymer Testing, 21: (2002). 253-262.
39. R.L. Shewfelt and B. Bruckner 2000. **Fruit and Vegetable Quality**. Pennsylvania : Technomic Publishing Company, Inc.