

การผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมด้วย
ซีโอไลต์เอโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม

PRODUCTION OF PACKAGING FILM FROM LOW DENSITY
POLYETHYLENE MIXED WITH ZEOLITE A BY
FILM BLOWING PROCESS

วราภรณ์ พุทธิสสะ
WARAPORN PUTTASSA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2578-7

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมด้วย
ซีโอไลท์เอโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม**

**PRODUCTION OF PACKAGING FILM FROM LOW DENSITY
POLYETHYLENE MIXED WITH ZEOLITE A BY
FILM BLOWING PROCESS**

วรารรณ์ พุทธิสสะ

WARAPORN PUTTASSA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2573-7

**PRODUCTION OF PACKAGING FILM FROM LOW DENSITY
POLYETHYLENE MIXED WITH ZEOLITE A BY
FILM BLOWING PROCESS**

WARAPORN PUTTASSA

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2573-7

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมด้วยซีโอไลต์เอโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม
นักศึกษา	น.ส.วราภรณ์ พุทธิสสะ
รหัสประจำตัว	44065615
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2549
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการผลิตฟิล์มจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับซีโอไลต์เอ (Zeolite A) ซึ่งเป็นสารที่มีรูพรุนสามารถดูดซับน้ำได้ดี เพื่อปรับปรุงสมบัติในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม โดยทำการผสม LDPE และ ซีโอไลต์เอ (0-8% โดยน้ำหนัก) โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ จากนั้นนำไปบดและแบ่งส่วนหนึ่งไปทดสอบสมบัติการไหลและนำส่วนที่เหลือไปขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม แล้วนำฟิล์มที่ได้มาศึกษาสมบัติต่างๆ และเลือกฟิล์มจากสูตรผสมที่มีสมบัติที่ดีมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างสำหรับผักตัวอย่าง (มะเขือเทศ) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณซีโอไลต์เอมากขึ้น (0-8%) มีผลให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น และจากการทดสอบฟิล์มพบว่า การใช้ซีโอไลต์ที่มากขึ้นทำให้ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ความแข็งแรงนิกษาค และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย จากการศึกษาสูตรที่ปริมาณซีโอไลต์เอ 4 และ 6% การปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์เอด้วยกรดสเตียริก (SA) 1% และพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) 3% พบว่าเมื่อใช้ SA และ PEG มีผลให้ความหนืดของระบบลดลงเล็กน้อย ส่วนสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง สมบัติในการซึมผ่านไอน้ำและออกซิเจนของฟิล์มขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มและปริมาณซีโอไลต์เอ โดยพบว่าสูตรที่มีซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มมีค่าลดลง ส่งผลให้สมบัติในการซึมผ่านไอน้ำและออกซิเจนเพิ่มขึ้น และจากการเลือกฟิล์มที่มีซีโอไลต์ 6% ทั้งที่มีและไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่มีซีโอไลต์มาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างสำหรับมะเขือเทศ โดยเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 11°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 15 วัน พบว่าในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีซีโอไลต์เอ 6% ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว มีปริมาณไอน้ำกักเก็บน้อยที่สุด เพราะเป็นฟิล์มที่บางที่สุดและมีค่าการซึมผ่านไอน้ำและออกซิเจนมากที่สุด และนอกจากนี้ซีโอไลต์เอยังช่วยลดการรวมตัวกลายเป็นหยดน้ำขนาดใหญ่ภายในบรรจุภัณฑ์อีกด้วย

Thesis Title PRODUCTION OF PACKAGING FILM FROM LOW DENSITY
POLYETHYLENE MIXED WITH ZEOLITE A BY FILM BLOWING
PROCESS

Student Ms.Waraporn Puttassa

Student ID 44065615

Degree Master of science

Programme Polymer Technology

Year 2006

Thesis Advisor Asst.Prof.Dr.Suparat Rukchonlatee

ABSTRACT

This research aimed to produce packaging film for fresh product from low density polyethylene (LDPE) and zeolite A (as a good water absorbing porous additive) for improving water vapor permeability of film. LDPE and zeolite A (0-8% by weight) were mixed using a twin-screw extruder and ground using a grinding machine. One part of the compound was performed for rheological characteristics and the rest was shaped to thin film using a film blowing process. Film products were investigated for various properties and then a film having good properties was shaped into a packaging bag to preserve samples of fresh product (tomato).The result revealed that an increase in zeolite A contents increased compound viscosity. With increasing zeolite loading, it was found that modulus of films raised but tensile yield strength, tear strength and %elongation at break slightly diminished. From surface modification of zeolite A (at the loadings of 4 and 6%) by stearic acid (SA) 1% and polyethylene glycol (PEG) 3%, it was found that the use of SA and PEG caused insignificantly reduction in viscosity. However, studied mechanical properties were not altered. Water vapor and oxygen permeability depend on the film thickness and zeolite A content. It was observed that when increasing zeolite A loading, film thickness decreased and then water vapor and oxygen permeability increased. For the shelf life testing with tomato preserving in the packaging bags produced from the films with both treated and untreated zeolite A at 6% loading and the LDPE film, all packages were kept at 11^oC and 50% of relative humidity for 15 days. Water vapor amount within packaging was the least in a packaging film having 6% untreated zeolite A because it was the thinness film and had the greatest water vapor and oxygen permeabilites. Moreover, zeolite A helps to reduce fogging within packaging films.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยความดูแลเอาใจใส่ คอยให้คำปรึกษา และแนวทางในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนให้กำลังใจด้วยดีมาตลอดการดำเนินการวิจัยของ ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ์ ซึ่งผู้ทำวิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วันฉัตร ชื่นชม ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ ผศ.ดร.อนุวัตร แจ่มชัด ที่กรุณาสละเวลามาเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และคอยให้คำปรึกษา ตลอดจนแก้ไข เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (DSC) และสัณฐานวิทยา (SEM)

ขอขอบคุณภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและธุรการภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงาน ตลอดจนกำลังใจที่มีให้เสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ปีโตรีเคมี และพอลิเมอร์ ที่คอยเป็นกำลังใจให้แก่กันและกันอยู่ตลอดเวลา

นอกจากนี้ขอขอบคุณบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือ ให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยให้การสนับสนุนและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนการให้ทุนการศึกษาตลอดระยะเวลาการศึกษา

วรารณ พุทธิสสะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
คำย่อ.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตทางการเกษตรหลังเก็บเกี่ยว.....	4
2.1.1 การเปลี่ยนแปลงการเก็บเกี่ยวของพืช.....	6
2.1.1.1 การหายใจ.....	6
2.1.1.2 การคายน้ำ.....	10
2.1.1.3 การสุก.....	11
2.1.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้.....	11
2.1.2.1 การซีมผ่านของก๊าซ.....	11
2.1.2.2 อัตราการซีมผ่านของไอน้ำ.....	12
2.1.3 การออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค.....	12
2.2 พลาสติกที่ใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์.....	13
2.2.1 การซีมผ่านของฟิล์ม.....	14
2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE).....	14
2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ LDPE.....	14
2.3.2 สมบัติโดยทั่วไป.....	14
2.3.3 การใช้งาน LDPE ในปัจจุบัน.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า.....	15
2.5 ซีโอดีเอ.....	17
2.5.1 โครงสร้างของซีโอดีเอ.....	17
2.5.2 การสังเคราะห์.....	18
2.5.3 การนำซีโอดีเอไปใช้งาน.....	19
2.6 กรดสเตียริก.....	20
2.6.1 สมบัติโดยทั่วไปของกรดสเตียริก.....	20
2.7 พอลิเอทิลีนไกลคอล.....	20
2.7.1 สมบัติโดยทั่วไป.....	20
2.8 มะเขือเทศ.....	21
2.8.1 การเก็บเกี่ยว.....	22
2.8.2 การเก็บรักษา.....	23
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการดำเนินงาน.....	28
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงาน.....	29
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	30
3.3.1.1 การผสมสูตร.....	30
3.3.1.2 การปรับปรุงสูตรผสมโดยการเคลือบผิวซีโอดีเอด้วยพอลิเอ -ทิลีนไกลคอล	31
3.3.1.3 การปรับปรุงสูตรผสมโดยการเคลือบผิวซีโอดีเอด้วยกรดสเตีย -ริก.....	32
3.3.1.4 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม.....	32
3.3.2 การตรวจสอบวัตถุดิบ.....	33
3.3.2.1 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของ LDPE.....	33
3.3.2.2 การตรวจสอบพื้นที่ผิว ขนาดอนุภาค และรูปร่างของซีโอดีเอ..	34
3.3.2.3 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของซีโอดีเอที่ถูกเคลือบผิว.....	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3 การทดสอบสมบัติการไหล.....	36
3.3.4 การตรวจสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม.....	37
3.3.4.1 การตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของซีโอดีเอในตัวอย่าง.....	37
3.3.4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ.....	37
3.3.4.2.1 ความหนาของฟิล์ม.....	37
3.3.4.2.2 ความกว้างของฟิล์ม.....	37
3.3.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	38
3.3.4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	38
3.3.4.4.1 สมบัติทางแรงดึง.....	38
3.3.4.4.2 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด.....	38
3.3.4.5 การศึกษาการกระจายตัวของซีโอดีเอในฟิล์มตัวอย่าง.....	39
3.3.4.6 การศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ.....	39
3.3.4.7 การศึกษาอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน.....	40
3.3.5 การทดสอบการเก็บรักษาผักและผลไม้.....	40
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	42
4.1 ผลการศึกษาพื้นที่ผิว ขนาดและรูปร่างของซีโอดีเอ.....	42
4.1.1 ผลจากเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว.....	42
4.1.2 ผลจากเครื่อง Mastersizer X.....	42
4.1.3 ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	43
4.2 ผลการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของซีโอดีเอที่ถูกเคลือบผิว.....	43
4.3 ปริมาณของซีโอดีเอจากสารตัวอย่างและแผ่นฟิล์มตัวอย่าง.....	46
4.4 สมบัติการไหล.....	47
4.5 ผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มในแต่ละสูตร.....	51
4.5.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของฟิล์มตัวอย่าง.....	51
4.5.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	52
4.5.3 ผลการศึกษาการกระจายตัวของซีโอดีเอในแผ่นฟิล์มตัวอย่าง.....	53
4.5.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง.....	57
4.5.5 การศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง.....	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.6 การศึกษาสมบัติการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มตัวอย่าง.....	64
4.5.7 การเก็บรักษามะเขือเทศตัวอย่าง.....	66
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	71
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	71
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72
เอกสารอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก.....	78
ประวัติผู้เขียน.....	104

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม และระยะเวลาในการเก็บรักษาผัก.....	4
2.2 ชนิดของผลไม้จำแนกตามลักษณะการหายใจขณะผลแก่หรือสุก.....	9
2.3 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Non-Climateric.....	10
2.4 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Climateric.....	10
2.5 ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ.....	11
2.6 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ.....	12
2.7 แสดงระยะเวลาในการเก็บรักษาของมะเขือเทศที่สภาวะต่าง ๆ.....	23
3.1 สมบัติของ LDPE ที่ใช้ในงานวิจัย.....	28
3.2 สมบัติของซีโอ โลดเอนที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.3 สัดส่วนโดยน้ำหนักของ สูตรผสมแต่ละสูตร.....	31
4.1 ชื่อย่อที่ใช้แทนสูตรผสมในแต่ละสูตร.....	42
4.2 ปริมาณของซีโอ โลดเอนที่พบอยู่ในแผ่นฟิล์มตัวอย่าง.....	46
4.3 ค่า Power law index ของพอลิเมอร์ในสูตรผสมต่าง ๆ.....	50
4.4 ความหนาและความกว้างของฟิล์มที่ผลิตได้ในสูตรต่าง ๆ.....	51
4.5 สมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง.....	53

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน.....	7
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจและอายุการเก็บรักษาเมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 60 องศาฟาเรนไฮต์.....	8
2.3 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าขึ้นรูป.....	16
2.4 ภาคตัดขวางบริเวณหัวดาของเครื่องเป่าฟิล์ม.....	17
2.5 Framework ของซีโอไลต์เอ.....	18
2.6 โครงร่างผลึกของซีโอไลต์เอ.....	18
2.7 ภาพขยายของซีโอไลต์เอจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	19
2.8 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ SA.....	20
3.1 เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	31
3.2 เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบเป่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	32
3.3 เครื่องผสมความเร็วสูงที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	33
3.4 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	34
3.5 เครื่อง Mastersizer X ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	35
3.6 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	35
3.7 เครื่อง FTIR ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	36
3.8 เครื่อง Capillary Rheometer ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	37
3.9 เครื่อง TGA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	37
3.10 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	39
3.11 เครื่องทดสอบการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	40
4.1 รูปร่างและลักษณะของซีโอไลต์เอที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	43
4.2 การเปรียบเทียบผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันจากเครื่อง FTIR ระหว่างซีโอไลต์เอ ซีโอไลต์เอที่ถูกเคลือบด้วย SA และ SA.....	46
4.3 การเปรียบเทียบผลการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันจากเครื่อง FTIR ระหว่างซีโอไลต์เอ ซีโอไลต์เอที่ถูกเคลือบด้วย PEG และ PEG.....	45
4.4 ค่าความหนืดเฉือนของพอลิเมอร์ในสูตรผสมที่มีปริมาณซีโอไลต์เอต่างๆ.....	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ค่าความหนืดเฉือนของพอลิเมอร์ในสูตรผสมที่มีและไม่มีเคลือบผิวของซีโอไลต์เอด้วย SA และ PEG.....	48
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง log shear stress กับ log shear rate ของพอลิเมอร์ตัวอย่าง LDPE 100%.....	50
4.7 สัณฐานวิทยาของฟิล์มตัวอย่างในสูตรต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	53
4.8 สัณฐานวิทยาของฟิล์มตัวอย่างแสดงรอยแยกระหว่างภูมิภาคของซีโอไลต์เอกับ LDPE ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า.....	57
4.9 ค่าความแข็งแรงดึงที่จุดครากของฟิล์มตัวอย่างในสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น.....	58
4.10 ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มตัวอย่างในสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น....	58
4.11 ค่ามอดูลัสของแผ่นฟิล์มตัวอย่างในสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น.....	58
4.12 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มตัวอย่างในสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น.....	59
4.13 ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ซีโอไลต์เอได้รับการเคลือบผิว และไม่ได้รับการเคลือบผิว.....	60
4.14 ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ซีโอไลต์เอได้รับการเคลือบผิว และไม่ได้รับการเคลือบผิว.....	61
4.15 ค่ามอดูลัสของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ซีโอไลต์เอได้รับการเคลือบผิวและไม่ได้รับการเคลือบผิว.....	61
4.16 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ซีโอไลต์เอได้รับการเคลือบผิวและไม่ได้รับการเคลือบผิว.....	61
4.17 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ.....	62
4.18 ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ	63
4.19 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ.....	64
4.20 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ.....	65
4.21 มะเขือเทศในถุงบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมจากฟิล์มสูตร LD/Z0 ภายหลังจากเก็บรักษา 15 วัน ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 11 °C.....	66
4.22 มะเขือเทศในถุงบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมจากฟิล์มสูตร LD/Z6 ภายหลังจากเก็บรักษา 15 วัน ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 11 °C.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 มะเขือเทศในถุงบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมจากฟิล์มสูตร LD/Z6/S ภายหลังจากเก็บรักษา 15 วันในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 11 °C.....	67
4.24 มะเขือเทศในถุงบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมจากฟิล์มสูตร LD/Z6/P ภายหลังจากเก็บรักษา 15 วันในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 11 °C.....	68
4.25 %มวลสารกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ตัวอย่าง.....	69

คำย่อ

LDPE	- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene)
LLDPE	- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene)
CaCO ₃	- แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate)
PP	- พอลิพรอพิลีน (Polypropylene)
AMPTES	- 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyltriethoxysilane)
MTES	- เมทิลไตรเอทอกซีไซเลน (Methyltriethoxysilane)
MPTES	- 3-เมอแคปโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-Mercapropyltrimethoxysilane)
GLU	- กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde)
PE-g-MA	- พอลิเอทิลีนที่ต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic Anhydride Graft Polyethylene)
HDPE	- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene)
SA	- กรดสเตียริก (Stearic Acid)
PEG	- พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol)
MD	- ทิศทางขนานกับเครื่องจักร (Machine Direction)
TD	- ทิศทางขวางกับเครื่องจักร (Transverse Direction)
T _m	- อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature)
TGA	- เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis)
DSC	- เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Microscope)
FTIR	- เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
SEM	- กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
WVTR	- อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate)
WVP	- ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Permeability Performance)
OTR	- อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Transmission Rate)
OP	- ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability)
O ₂	- ก๊าซออกซิเจน
CO ₂	- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
H ₂ O	- น้ำ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในอุตสาหกรรมอาหารและผลิตผลทางการเกษตรจำเป็นต้องมีการใช้บรรจุภัณฑ์ เพื่อใช้ในการป้องกันความเสียหายของผลิตภัณฑ์ระหว่างที่มีการขนส่ง การวางจำหน่ายสินค้าในร้านค้าจนกระทั่งถึงการเก็บรักษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตผลทางการเกษตรจำพวกผักและผลไม้สด ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวยังเป็นสิ่งมีชีวิต มีกระบวนการหายใจ การคายความร้อน การคายน้ำ และการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาต่างๆ [1] ดังนั้นควรมีการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับผักและผลไม้สด ซึ่งบรรจุภัณฑ์ที่ดีต้องสามารถป้องกันการสูญเสียจากผักและผลไม้สด เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ไม่สูญเสียน้ำหนักไปมาก มีการถ่ายเทไอน้ำและอากาศที่เพียงพอเพื่อคงความสด และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในให้นานขึ้น อายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้สดจะได้รับการกระทบกระเทือนโดยตรงจากอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และสิ่งแวดล้อมในระหว่างการเก็บรักษา โดยทั่วไปอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดจะเพิ่มขึ้นเท่าตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง 8°C [2] สภาพแวดล้อมรอบๆ ผลิตภัณฑ์ภายในบรรจุภัณฑ์ (Micro Climate) ส่งผลโดยตรงต่ออายุการเก็บผลิตผลสด ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอากาศภายในบรรจุภัณฑ์จะดูดซับน้ำได้ในปริมาณสูงซึ่งมีผลต่อผลิตภัณฑ์คือ อากาศจะดูดซับน้ำจากผลิตภัณฑ์ เป็นผลให้ผลิตผลสดเกิดการคายน้ำมากขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียน้ำไปอย่างมาก และเมื่อถึงระดับอิ่มตัวสูงสุด ไอน้ำจะถูกควบแน่นออกมาเป็นหยดน้ำ ซึ่งมักเกิดขึ้นกับอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงมากถูกลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิต่ำกว่าไอน้ำในอากาศมากกว่าระดับที่สูงสุดที่อากาศจะรองรับได้ที่อุณหภูมินั้น สภาพที่เกิดขึ้นเช่นนี้มีความสำคัญมากในบรรจุภัณฑ์ที่ขาดการถ่ายเทอากาศ หรือมีการถ่ายเทอากาศไม่เพียงพอ จะก่อให้เกิดความชื้นและเป็นผลเสียต่อผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์เน่าเสียอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์เพื่อการวางจำหน่ายในร้านค้าหรือซูเปอร์มาร์เก็ต รวมถึงการเก็บรักษานิยมใช้ฟิล์มพลาสติกใส ในการบรรจุ เนื่องจากสามารถดึงดูดใจผู้บริโภคได้มาก เพราะผู้บริโภคสามารถมองเห็นสินค้าที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ได้รอบด้าน การเลือกใช้ฟิล์มพลาสติกต้องเป็นชนิดที่มีความใสและยอมให้ไอน้ำผ่านได้พอควร ไม่ทำให้เกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำภายใน เพราะทำให้มองเห็นผลิตภัณฑ์ไม่ชัดและอาจก่อให้เกิดการเน่าเสียจากความชื้นและที่เกิดขึ้นได้ ฟิล์มพลาสติกที่นิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ เช่น ฟิล์มพอลิเอทิลีน มีค่าการซึมผ่านของไอน้ำค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับฟิล์มชนิดอื่น ๆ [3] แต่ยังมีการควบแน่นของไอน้ำเกิดขึ้นได้เนื่องจากอัตราการคายน้ำของผักและผลไม้มีค่ามากกว่าค่าการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม โดยเราสามารถลดปัญหาที่เกิดขึ้นได้โดยวิธีการเจาะรูระบายอากาศ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมและมักใช้กับ

ผลิตภัณฑ์หลายประเภทเพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว แต่วิธีการเจาะรูบรรจุภัณฑ์นั้นทำให้เกิดข้อเสียคือ อาจเกิดการเกี่ยวพันกับกึ่งหรือก้านของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการขนส่ง ทำให้เกิดความเสียหายของบรรจุภัณฑ์ และในขณะที่แช่เย็นอาจทำให้เกิดการดูดซับกลิ่นจากภายนอกบรรจุภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่สามารถคงรสชาติและ กลิ่นไว้ได้ ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบผลิตภัณฑ์ฟิล์มพลาสติกที่ใช้ห่อผลิตภัณฑ์โดยไม่ต้องเจาะรูบรรจุภัณฑ์ เช่น การเก็บรักษาโดยควบคุมสภาพบรรยากาศ (Controlled Atmosphere Storage: CA Storage) [4] เป็นวิธีในการเก็บรักษาผลผลิตให้มีคุณภาพดีได้นาน โดยการควบคุมปริมาณก๊าซให้ต่างจากปกติ ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการลดปริมาณออกซิเจนหรือเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับควบคุม ซึ่งจะมีผลยับยั้งกระบวนการต่างๆ ของพืชหลังการเก็บเกี่ยวให้ช้าลง และนอกจากนั้นยังได้มีการปรับปรุงสมบัติการดูดซับน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยนำซีโอไลต์เอซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนมีสมบัติการดูดซับน้ำที่ดี เพื่อใช้ในการควบคุมปรับความสมดุลของปริมาณน้ำในบรรจุภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์คงความสดอยู่ได้นานขึ้น [5]

โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตแผ่นฟิล์มจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำซึ่งเป็นพลาสติกที่นิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ฟิล์ม โดยเลือกใช้ซีโอไลต์เอมาเป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของฟิล์ม โดยกระบวนการเป่าฟิล์มซึ่งเป็นกระบวนการที่ให้อัตราการผลิตที่สูง และใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ฟิล์ม และทำการศึกษสมบัติต่างๆ ของฟิล์มที่ผลิตได้ เช่น สมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซ จากนั้นเลือกฟิล์มสูตรที่เหมาะสมนำไปทดลองทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผักตัวอย่าง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ผลิตแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมซีโอไลต์เอที่ปริมาณต่างๆ และทำการปรับปรุงพื้นผิวซีโอไลต์เอด้วยกรดสเตียริก และพอลิเอทิลีน ไกลคอล จากกระบวนการเป่าฟิล์ม ศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลังจากทำการผสมสูตร สมบัติเชิงกล สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซของฟิล์มตัวอย่าง และศึกษาการนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับมะเขือเทศ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะเขือเทศ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับซีโอไลต์เอด้วยอัตราส่วน 100:0 98:2 96:4 94:6 และ 92:8
2. ทำการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์เอด้วยกรดสเตียริก 1% และ พอลิเอทิลีน ไกลคอล 3% และผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วน 96:4 และ 94:6
3. ทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสมซีโอไลต์เอ

4. ขึ้นรูปสูตรผสมต่างๆ เป็นแผ่นฟิล์ม โดยกระบวนการเป่าฟิล์มโดยใช้ความเร็วรอบของสกรู 50 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่หัวคาย 195 °C
5. ทดสอบสมบัติเชิงกลโดยทำการทดสอบความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก เเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด โมดูลัส และความแข็งแรงตึกขาด โดยทดสอบทั้งในทิศทางขนานและขวางเครื่องจักร จากนั้นทดสอบสมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซของแผ่นฟิล์มในแต่ละสูตร
6. เลือกสูตรผสมที่มีอัตราการซึมผ่านที่ดีมาทำการทดสอบการยึดอายุการเก็บรักษามะเขือเทศ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตแผ่นฟิล์มเพื่อไปใช้ในงานบรรจุภัณฑ์สำหรับห่อผลิตผลสด เพื่อรักษาสมดุลไอน้ำในบรรจุภัณฑ์ ทำให้ผลิตผลสดคงความสดได้นานขึ้น และอาจนำความรู้ที่ได้ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ เพื่องานเกษตรกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว

การเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อรักษาคุณภาพที่ดีของผักและผลไม้ไว้ ซึ่งหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้วผลิตผลนั้นจะถูกตัดขาดจากแหล่งน้ำที่เคยได้รับจากราก แต่การสูญเสียน้ำเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา เนื่องจากผลิตผลนั้นยังคงมีการหายใจและคายน้ำอยู่เหมือนกับขณะที่อยู่บนต้น การสูญเสียน้ำนอกจากจะทำให้น้ำหนักที่จะขายได้ขาดหายไปแล้ว ยังทำให้รูปร่างลักษณะของผลิตผลนั้นเปลี่ยนไปในทางที่เลวลง ทำให้รสชาติและคุณภาพของผลิตผลนั้นๆ เปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นการป้องกันการสูญเสียน้ำจึงเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่ง การสูญเสียน้ำออกจากพืชขึ้นกับความชื้นบรรยากาศภายนอก ความชื้นนี้จะผันแปรไปตามสภาพแวดล้อมจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งที่มาของน้ำและอุณหภูมิ ดังนั้นหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้วควรมีวิธีการเก็บรักษาที่ดี เพราะการเก็บรักษาเป็นวิธีการสำคัญในการช่วยยืดอายุของผลิตผลทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยวให้มีอายุการใช้ประโยชน์ได้นานขึ้น โดยที่มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ในผลไม้บางชนิด เช่น แอปเปิ้ล สามารถเก็บไว้เพื่อรอการจำหน่ายในท้องตลาดได้ตลอดทั้งปี นอกจากนี้การเก็บรักษายังมีประโยชน์ช่วยชะลอไม่ให้ผลิตผลออกสู่ตลาดมากเกินไป ทำให้ราคาผลิตผลไม่ตกต่ำ รวมทั้งสามารถเก็บรักษาไว้จำหน่ายในช่วงตลาดขาดแคลนก็ทำให้ขายได้ในราคาดีอีกด้วย

ในการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรนั้นจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานเพียงใดนั้น เกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ [4]

- ความชื้นในบรรยากาศ ความชื้นหรือความดันไอน้ำในบรรยากาศโดยปกติจะมีอยู่ในระดับต่ำกว่าความชื้นอิ่มตัว นั่นคือความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 100% จึงมีโอกาที่บรรยากาศจะรับน้ำได้อีกมาก ส่วนผักและผลไม้มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่า 70% และส่วนใหญ่มีน้ำอยู่ถึง 90% ความดันไอน้ำในผลไม้ก่อนข้างสูงเพราะผลไม้เปรียบเสมือนภาชนะปิด ไอน้ำรอบๆ เซลล์จะอยู่ในสมดุลกับน้ำภายในเซลล์ ซึ่งเราอาจถือได้ว่าความดันไอน้ำภายในผลิตผลจะมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว เพราะฉะนั้นจะมีการสูญเสียน้ำออกจากผลิตผลตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับว่าบรรยากาศภายนอกมีความชื้นมากน้อยเพียงใด ในกรณีที่ความชื้นของบรรยากาศรอบๆ อิ่มตัวด้วยน้ำหรือมีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 % น้ำก็ยังมีโอกาสสูญเสียดังกล่าวให้กับบรรยากาศได้ เนื่องจากผลิตผลเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจทำให้มีพลังงานความร้อนออกสู่บรรยากาศรอบๆ ทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นและทำให้อากาศรับน้ำได้มากขึ้นกว่าเดิม

- อุณหภูมิ มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับความชื้นและการสูญเสียน้ำ ทั้งนี้เพราะสารทุกอย่างมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะพวกของเหลวและก๊าซจะเห็นได้ชัด ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนไหวของโมเลกุลจะมีมาก โอกาสที่โมเลกุลของน้ำหลุดออกจากผักและผลไม้จึงมีค่าสูงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามความดันไอน้ำของอากาศรอบๆ ไม่ได้สูงตามไปด้วย เพราะมีปริมาณโมเลกุลของน้ำอยู่เท่าเดิมแต่ไม่ได้ถูกจำกัดปริมาณเหมือนในผลไม้ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำระหว่างภายในผลิตภัณฑ์กับภายนอกจึงเพิ่มสูงมากขึ้น โอกาสที่ไอน้ำจะออกจากผลิตภัณฑ์สู่บรรยากาศภายนอกจึงมีมากขึ้น อุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษานอกจากจะต้องควบคุมให้ต่ำแล้วยังต้องควบคุมให้สม่ำเสมออยู่ตลอดเวลาด้วย เพราะถ้าหากอุณหภูมิขึ้นลง อยู่เสมอผลิตภัณฑ์จะสูญเสียน้ำออกไปเมื่ออุณหภูมิสูงจนกระทั่งอากาศรอบๆ อิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ไอน้ำจะควบแน่นเป็นหยดน้ำอยู่ตามภาชนะบรรจุหรือผนังห้องเก็บรักษา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีก อากาศจะรับไอน้ำจากผลิตภัณฑ์ได้อีกเรื่อยๆ ทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียน้ำไปมาก สภาพในที่เก็บรักษาจะชื้นแฉะทำให้ผลิตภัณฑ์เน่าเสียได้ง่าย

- การถ่ายเทอากาศ ในระหว่างการเก็บรักษาจำเป็นต้องมีการระบายถ่ายอากาศเนื่องจากสภาพในบรรยากาศปกติประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ซึ่งชนิดที่มีความสำคัญและมีความจำเป็นต่อการหายใจของผลิตภัณฑ์คือก๊าซออกซิเจน ฉะนั้นสภาพของการเก็บรักษาที่ดีจะต้องมีการถ่ายเทอากาศที่ดี

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม และระยะเวลาในการเก็บรักษาผัก [5]

ชนิดของผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ		ความชื้นสัมพัทธ์	ระยะเวลาที่เก็บรักษาได้
	°F	°C		
หน่อไม้ฝรั่ง	32	0	85-90	3-4 สัปดาห์
บรอกโคลี	32	0	90-95	7-10 วัน
กระหล่ำปม	32	0	90-95	3-4 สัปดาห์
กระหล่ำปลี				
พันธุ์เบา	32	0	90-95	3-6 สัปดาห์
พันธุ์หนัก	32	0	90-95	3-4 เดือน
ดอกกระหล่ำ	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

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ชนิดของผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ		ความชื้นสัมพัทธ์	ระยะเวลาที่เก็บรักษาได้
	°F	°C		
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 กระบวนการต่างๆ ทั้งทางสรีระและชีวเคมียังคงดำเนินอยู่เช่นเดียวกับที่ยังไม่ได้เก็บเกี่ยว ดังนั้นผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังคงหายใจต่อไป โดยดูด O_2 เข้าไปและคาย CO_2 และความร้อนออกมา มีการคายน้ำและสูญเสียน้ำหนัก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในพืชหลังการเก็บเกี่ยวคือ

2.1.1.1 การหายใจ

ผลิตภัณฑ์สดทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวจะมีการหายใจอย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลาที่ยังมีชีวิตอยู่ เนื่องจากสิ่งมีชีวิตต้องการพลังงานในการดำเนินปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ พลังงานที่ได้มานั้นมาจากการหายใจ ซึ่งอัตราการหายใจนั้นแตกต่างกันไป ตามระยะและสภาพแวดล้อม ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีแล้ว ก็จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพ อายุการเก็บรักษา จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงการปฏิบัติต่อผลิตภายหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความสมดุลในการรักษาสภาพ หรือลดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีให้น้อยที่สุดอันที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพในการเก็บรักษาได้นานที่สุด ภายในผักและผลไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราการหายใจต่างกันซึ่งอัตราการหายใจนี้จะแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายใน โดยทั่วไป ผักผลไม้มักถูกเก็บเกี่ยวในระยะที่มีคุณภาพใกล้เคียงที่จะเหมาะกับการบริโภค ดังนั้นผักผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูงหลังการเก็บเกี่ยวจะเสื่อมเสียเร็วกว่า จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงการปฏิบัติต่อผลิต

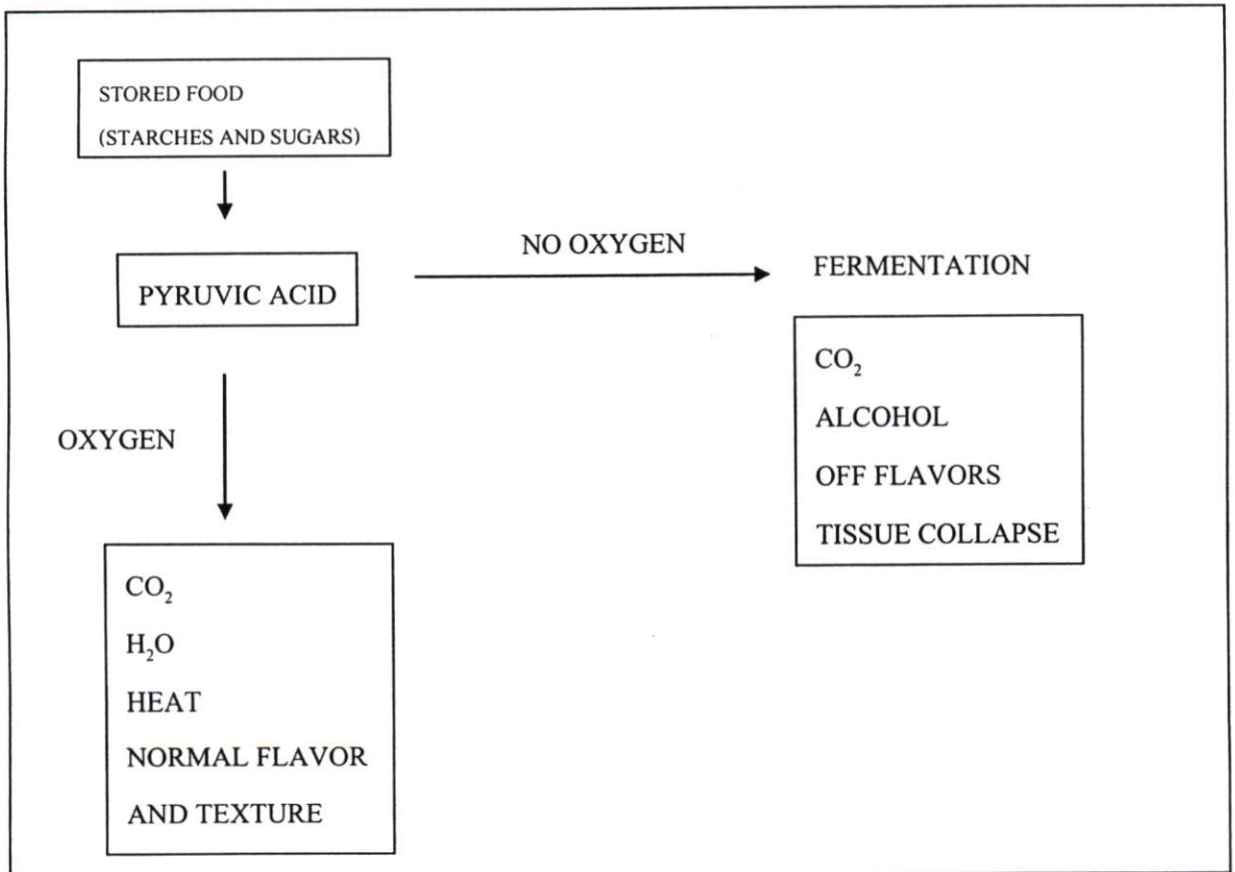
ภายหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ผลิตผลมีความสมดุลในการรักษาสภาพ หรือลดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีให้น้อยที่สุดอันที่จะทำให้ผลิตผลมีคุณภาพในการเก็บรักษาได้นานที่สุด [4]

ผลิตผลสดที่ยังมีชีวิตอยู่จะมีหายใจตลอดเวลา ซึ่งการหายใจของผลิตผลสดนั้นมี 3 ขั้นตอนคือ

- การย่อยคาร์โบไฮเดรตพวกที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายๆ โมเลกุลให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว
- ขั้นตอนการเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นให้เป็นกรดไพรูวิก
- ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไพรูวิก และกรดอินทรีย์อื่นๆที่เกิดขึ้นให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและพลังงานซึ่งเกิดในการหายใจของผลิตผลหรือสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ สามารถสรุปได้เป็นสมการอย่างง่ายคือ

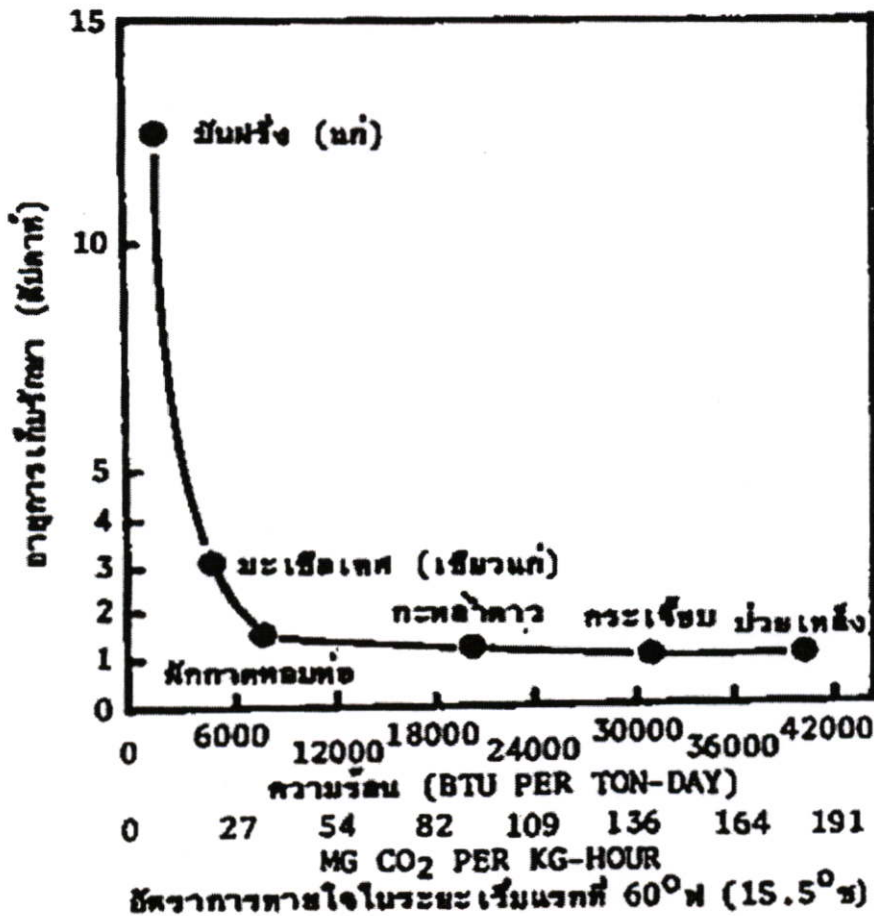


โดยที่การหายใจในสภาพที่มีออกซิเจนสมบูรณ์จะได้ปริมาณ ATP ต่อโมเลกุลน้ำตาลมากกว่าการหายใจในสภาพที่มีออกซิเจนน้อยหรือไม่มีออกซิเจน [8]



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน [8]

อัตราการหายใจของพืชหลังการเก็บเกี่ยวเป็นสิ่งที่แสดงถึงอายุหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปพืชที่มีอัตราการหายใจสูงจะมีอายุการเก็บรักษาสั้น พืชที่มีอัตราการหายใจต่ำจะมีอายุการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวได้นาน [4]



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจและอายุการเก็บรักษาเมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 60 องศาฟาเรนไฮต์ [9]

รูปแบบการหายใจของพืชแต่ละชนิดจะมีอัตราการหายใจที่ไม่เท่ากัน ซึ่งแบ่งตามชนิดของพืชดังต่อไปนี้

1. Climacteric Fruit คือผลไม้ที่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากทีผลแก่จัดจะมีอัตราการหายใจต่ำลงมาก เมื่อเริ่มเข้าสู่กระบวนการสุกอัตราการหายใจจะสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งการเพิ่มอัตราการหายใจนี้จะเพิ่มอย่างรวดเร็วและสูงมากด้วย เมื่อสุกเต็มที่แล้วอัตราการหายใจจะค่อยๆ ลดต่ำลงจนเข้าสู่ระยะเสื่อมสลาย ฉะนั้นผลไม้พวกนี้สามารถเก็บแล้วนำมาบ่มให้สุกได้ภายหลังเก็บเกี่ยว เช่น มะเขือเทศ มังกุด ละมุด กัลฉ่าย ทูเรียน

2. Non-Climacteric Fruit คือผลไม้ที่ไม่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากผลแก่จัดอัตราการหายใจลดต่ำลงในระยะเก็บเกี่ยว หลังการเก็บเกี่ยวแล้วผลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากคือ อัตราการหายใจค่อนข้างจะคงที่ตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนถึงระยะเสื่อมสลาย รสชาติคงที่ อายุเก็บรักษาค่อนข้างยาว ฉะนั้นถ้าเก็บเกี่ยวผลที่ยังไม่แก่จัดเต็มที่ ก็จะได้ผลไม้ที่มีรสชาติเหมือนเดิมตลอดไป จึงต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลแก่จัด เช่น ส้ม สับปะรด มะนาว เงาะ ลำไย ลิ้นจี่ แดงกวา [1]

ตารางที่ 2.2 ชนิดของผลไม้จำแนกตามลักษณะการหายใจขณะผลแก่หรือสุก [10]

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

ตารางที่ 2.3 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Non-Climacteric [10]

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

ตารางที่ 2.4 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Climacteric [10]

ผลไม้	พันธุ์	อุณหภูมิ (°C)	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

เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของผักผลไม้ อัตราการคายน้ำหรือสูญเสียน้ำจะขึ้นกับพื้นที่ผิวและลักษณะโครงสร้างผิว ผักที่มีใบมากจะมีอัตราการคายน้ำหรือสูญเสียน้ำรวดเร็วและมีค่าสูงเนื่องจากพื้นที่ผิวสูง และโครงสร้างของใบมีช่องเปิดทำให้สูญเสียน้ำได้ง่าย ส่วนแอปเปิ้ลจะมีการสูญเสียน้ำน้อย เนื่องจากมีรูปร่างกลมซึ่งมีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ และยังมีไขเคลือบผิวช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำด้วย อัตราการสูญเสียน้ำจากเนื้อเยื่อจะขึ้นกับความดันไอที่แตกต่างระหว่างภายนอกและภายในเนื้อเยื่อ ถ้าความแตกต่างมีมากอัตราการสูญเสียน้ำจะเพิ่มขึ้นปกติความดันไอน้ำภายในเนื้อเยื่อจะมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำภายนอก

2.1.1.3 การสุก

เป็นการพัฒนาขั้นสุดท้ายของผลไม้ก่อนเข้าสู่ระยะร่วงโรย การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับไม่ได้ และเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนหลายขั้นตอน [8] การเปลี่ยนแปลงของผลไม้สุกที่อาจพบได้คือ เมล็ดแก่เต็มที่ สีเปลี่ยนแปลง ผลหลุดจากขั้ว อัตราการหายใจเปลี่ยนแปลง เนื้อนุ่มลงและมีการสร้างสารให้กลิ่นรส

2.1.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้ [7]

ปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยทำให้ก๊าซต่างๆ ที่ล้อมรอบผลิตภัณฑ์เป็นไปตามที่ต้องการตลอดเวลาที่เก็บรักษาผลิตภัณฑ์คือภาชนะบรรจุ สมบัติที่สำคัญของวัสดุบรรจุหรือภาชนะบรรจุที่ต้องพิจารณามีดังนี้

2.1.2.1 การซึมผ่านของก๊าซ

การกำหนดค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability) เพื่อเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ ชนิดของผลิตภัณฑ์ อายุการเก็บรักษาและสภาวะการเก็บรักษา โดยทั่วไปเมื่อต้องการใช้วัสดุที่ป้องกันก๊าซได้ดีมาก ควรเลือกวัสดุที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่เกิน $2 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot 24 \text{ hr}$ ส่วนวัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซดีพอควร จะมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนประมาณ $20\text{-}30 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot 24 \text{ hr}$ สำหรับผักและผลไม้สดต้องใช้วัสดุที่ยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ดีโดยทั่วไปค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจะมีค่าตั้งแต่ $2,000 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot 24 \text{ hr}$ ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [3]

ชนิดของพลาสติก	ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ($\text{cc}/25\mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ที่ $23/25 \text{ }^\circ\text{C}$, 50 %RH)
พอลิเอทิลีนเทอพลาทาเลต (Polyethyleneterphalate, PET)	47-94
พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride), PVC)	80-9,000
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)	2,100-2,900
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)	7,100-7,800
พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP)	2,400-3,800

2.1.2.2 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

การเลือกวัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์จากค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate, WVTR) ต้องระมัดระวังปัญหาที่เกิดจากหยดน้ำภายในภาชนะบรรจุภัณฑ์ และปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันไอน้ำได้ดีจะช่วยลดปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่มักเกิดปัญหาหยดน้ำในภาชนะและในทางกลับกันวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้ไอน้ำผ่านได้มักจะทำให้เกิดปัญหาผลิตภัณฑ์แห้งเพราะสูญเสียความชื้น การแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยการเติมสารป้องกันการเกิดหยดน้ำ (Antifogging Agent) ในฟิล์มพลาสติกหรือการเจาะรูเล็กๆ เพื่อช่วยระบายไอน้ำบางส่วนออกจากภาชนะ

ตารางที่ 2.6 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ [3]

ชนิดของพลาสติก	ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (g/25 μ m/m ² ·day ที่ 38°C, 90 %RH)
พอลิเอทิลีนเทอพลาทาเลต (PET)	16-20
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	80-500
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	4.7
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	16-24
พอลิพรอพิลีน (PP)	11

2.1.3 การออกแบบภาชนะบรรจุสำหรับผู้บริโภค [11]

การออกแบบภาชนะบรรจุหรือหีบห่อสำหรับผู้บริโภคอาศัยปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

- การระบายอากาศ การใช้แผ่นฟิล์มพลาสติกห่อผลิตภัณฑ์นั้น พลาสติกแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการยอมให้ก๊าซผ่านเข้าออกได้ต่างกัน ตามปกติฟิล์มมักจะยอมให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึมผ่านเข้าออกได้มากกว่าก๊าซออกซิเจน (O₂) ดังนั้นอัตราการสะสมของ CO₂ จากการหายใจจึงน้อยกว่าอัตราการหายไปของ O₂ และถ้า O₂ ถูกใช้ไปหมดจากบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุ จะทำให้มีการหายใจแบบไม่ใช้ O₂ เกิดการสะสมของแอลกอฮอล์ และ CO₂ อาจทำให้เซลล์ของพืชตาย ผักและผลไม้จะส่งกลิ่นที่ผิดปกติ รสชาติเปลี่ยน และเกิดการเน่าเสีย

แผ่นพลาสติกหรือถุงพลาสติกที่ใช้นั้นควรมีรูระบายอากาศ การบรรจุในถุงควรมีรูอย่างน้อย 2-4 รู ขนาด 1/4-1/8 นิ้ว เพื่อระบายอากาศผลผลิตจะไม่ขาด O₂ และไม่เกิดการสะสมของแอลกอฮอล์ และ CO₂ ขณะวางขายในสภาพที่อุณหภูมิสูง ในบางครั้งการเก็บรักษาในสภาพถุงที่ไม่มีรูอาจเกิดผลดี เพราะเกิดสภาพบรรยากาศที่มีอัตราส่วนของก๊าซชนิดต่างๆ แตกต่างไปจาก

บรรยากาศปกติ (Modified Atmosphere) ขึ้นมาได้ แต่ควรระมัดระวังการเกิดกลิ่นที่ผิดปกติ หรือมีรสชาติแอลกอฮอล์เกิดขึ้น

- ความชื้น ผักและผลไม้ที่มีน้ำหรือมีความชื้นอยู่สูงถึง 75-95% และอยู่ในลักษณะสมดุลกับบรรยากาศได้เมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่สูงถึง 95% ขึ้นไป โดยปกติผักและผลไม้ที่เก็บเกี่ยวแล้วจะเหี่ยวอย่างรวดเร็วเพราะในบรรยากาศทั่วไปมีความชื้นค่อนข้างต่ำ ทำให้เซลล์เกิดการเสียน้ำและการหดตัว การเก็บผักและผลไม้ไว้ในภาชนะที่เหมาะสมจะยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้นาน พลาสติกที่ใช้ห่อผักและผลไม้สดจะทำให้ความชื้นข้างในรอบๆ ผักและผลไม้สูงและ อาจสูงถึง 100% ดังนั้นจึงต้องเจาะรูถุงพลาสติกเพื่อให้ไอน้ำภายในถุงพลาสติกได้ออกไปข้างนอก เป็นการช่วยปรับความชื้นภายในถุงพลาสติกให้เหมาะสม

2.2 พลาสติกใช้สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์ [11]

- พลาสติกโพลิเอทิลีน เป็นพลาสติกที่ยอมให้ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านได้ง่าย ป้องกันการเกิดฝ้าไอน้ำ เนื่องจากแผ่นฟิล์มชนิดนี้ยอมให้ความชื้นที่เกิดขึ้นแพร่กระจายเข้าไปในเนื้อฟิล์มแทนที่จะเป็นหยดน้ำเกาะอยู่บนแผ่นฟิล์ม โดยทั่วไปความหนาของแผ่นฟิล์มจะอยู่ระหว่าง 25 – 65 ไมครอน การลดความหนาของแผ่นฟิล์มมักเลือกใช้ฟิล์มที่เป็นโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) แทน ซึ่งทำให้ขยายตัวตามความหนาและความยาวได้ คุณสมบัติของ LDPE เป็นแผ่นฟิล์มที่สามารถยืดตัวได้

- พลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) แผ่นฟิล์มชนิดนี้สามารถยืดและหดได้ทุกทิศทาง ก๊าซและไอน้ำสามารถระเหยผ่านได้ มีคุณสมบัติดีกว่า LDPE แผ่นฟิล์มชนิดนี้ใช้กันมากในการปิดด้านบนของถาดโฟมที่ใส่ผลิตภัณฑ์สด แผ่นฟิล์มชนิดนี้ไม่เหมาะสำหรับทำถุง PVC บางชนิดสามารถขึงให้ตึงได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะดีดึงดูดความสนใจของผู้บริโภคเพราะมีผิวดูเป็นมัน แผ่น PVC บางชนิดจะหดตัวประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 2 นาที ทำให้แนบสนิทกับผลิตภัณฑ์ได้ดี

- พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) แผ่นฟิล์มนี้จะโปร่งใสกว่าพวก LDPE สามารถทำเป็นถุงได้ และใช้ทำถาดสามารถใช้ความร้อยผืนก็ได้

- เซลลูโลส (Cellophane) แผ่นเซลลูโลสที่ใช้กันมีหลายชนิด อาจใช้ปิดด้านบนของถาดโฟมหรือทำเป็นถุง หรือรองในตะกร้า มีลักษณะโปร่งใส และยอมให้ก๊าซชื้นผ่านได้ แต่ไม่ยอมให้ก๊าซแห้งผ่าน ดังนั้นจึงมักใช้เซลลูโลสมาหุ้มเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น พวกที่ป้องกันความชื้นได้เช่น เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) และ พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS)

- Rubber Hydrochlorine หรือ Pilofilm เป็นแผ่นฟิล์มที่มีความแข็งแรงมาก ป้องกันการสูญเสียไอน้ำได้ดีและอาจใช้ในการทำถุงได้

2.2.1 การซึมผ่านของฟิล์ม (Film Permeability)

ฟิล์มเป็นวัสดุที่มีความหนาไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร [12] และยังมีสมบัติหลากหลายขึ้นกับพอลิเมอร์ที่นำมาผลิต พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่นิยมใช้จัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-Crystalline) ในส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) จะเป็นส่วนที่ไม่ยอมให้ก๊าซหรือไอน้ำซึมผ่าน ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) สายโซ่พอลิเมอร์จะอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว การเคลื่อนที่ของสายโซ่จะถูกจำกัด ปริมาตรอิสระ (Free Volume) ก็จะถูกจำกัดเช่นกัน แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว สายโซ่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระมากขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรอิสระ การเปลี่ยนแปลงนี้มีความสำคัญมากต่อความสามารถของโมเลกุลที่จะแพร่ผ่านวัสดุ

ความแตกต่างของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของพอลิเมอร์ขึ้นกับ

- ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการซึมผ่านของก๊าซ
- ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันของสายโซ่พอลิเมอร์
- อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ต่อการละลายได้ของก๊าซในส่วนที่เป็นอสัณฐาน

การซึมผ่านของก๊าซสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเชื่อมโยง ซึ่งเป็นการจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ความสามารถในการซึมผ่านจะลดลง ถ้าส่วนของความเป็นผลึกไม่เกิดการเสียหาย ส่วนการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์โดยการยืด (Stretching) ฟิล์ม เป็นการเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกและลดความสามารถในการซึมผ่านลง [13]

2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [14]

2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ LDPE

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) เป็นเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดแรกๆ ที่นำมาใช้ในการค้า เริ่มผลิตครั้งแรกในประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ.1930 โดยบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) กระบวนการผลิตและลักษณะโดยทั่วไปของ LDPE มีดังนี้คือ

- ความดันที่ใช้ในกระบวนการผลิตสูงมาก 1,000–3,000 บรรยากาศ (15,000-45,000 psi)
- อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) 200-400°C
- พอลิเอทิลีนที่ได้มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.019-0.925 g/cm³ การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างและมีกิ่งก้านสาขาภายในโมเลกุลมาก

2.3.2 สมบัติโดยทั่วไป

- มีการไหลตัวที่ดี
- มีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) ดีพอสมควร

- มีการซึมผ่านไอน้ำที่ดี เหมาะสำหรับงานที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์
- พิล์มที่แปรรูปจาก LDPE จะมีความเป็นเงามันดี (High Gloss) และมีความเป็นฝ้าต่ำ (Low Haze)
- เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ค่อนข้างดี (Good Dielectric Property)

2.3.3 การใช้งาน LDPE ในปัจจุบัน

LDPE สามารถนำไปใช้แปรสภาพเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น

- ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ฟิล์มและงานเคลือบ (Lamination) หลายๆ ชั้น เช่น ฟิล์มหดหุ้ม (Shrink Wrap) หรือถุงที่ต้องการความใสมากๆ
- งานฉีดแบบ (Injection Moulding)
- อื่นๆ เช่น ฟิล์มอัดรีดร่วม (Coextrusion) งานรีดท่อ (Pipe Extrusion) งานเคลือบสายไฟและสายเคเบิล (Wire and Cable Coating)

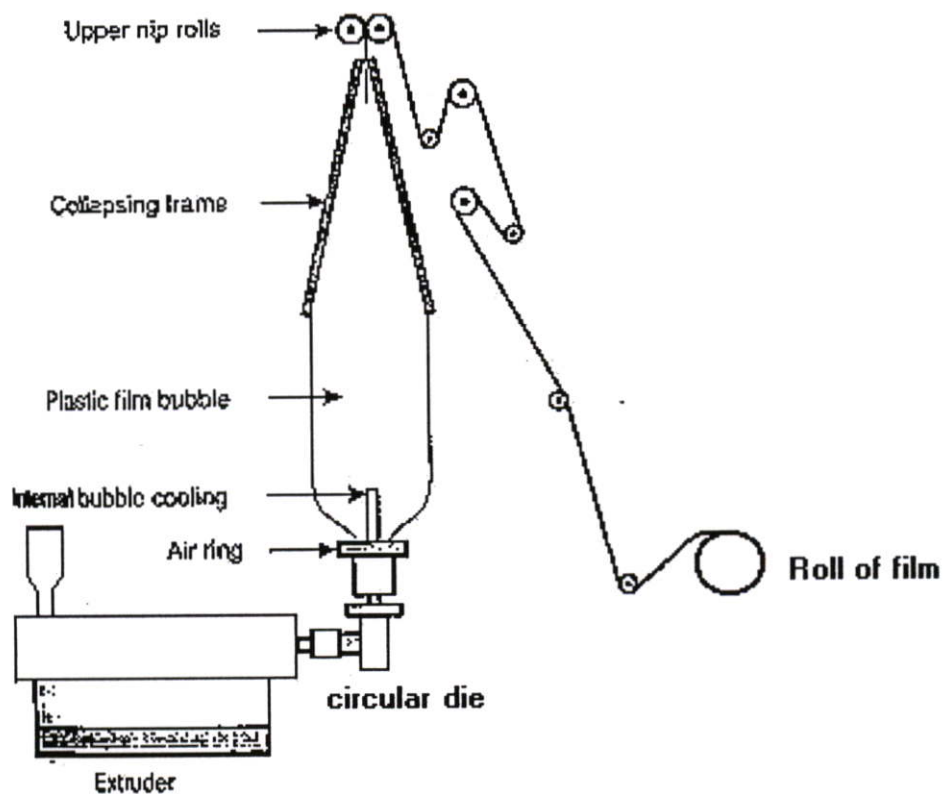
2.4 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกแบบเป่า

ในการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า (Blown Film Extrusion) มีหลักการคือ เม็ดพลาสติกจะถูกรีดผ่านเกลียวขับ (Extruder) พร้อมทั้งให้ความร้อนไปด้วยเพื่อทำให้พลาสติกหลอมเหลว พลาสติกที่หลอมเหลวจะถูกขับผ่านหัวคาย (Die Head) รูปร่างแหวนไหลผ่านด้านข้าง โดยที่พอลิเมอร์หลอมเหลวนี้จะถูกบังคับให้อยู่ในขอบแกนหมุนที่อยู่ภายในคายและไหลออกผ่านคายเปิดรูปร่างกลม ในลักษณะที่มีผนังค่อนข้างหนาเป็นลักษณะท่อที่ยังอยู่ในสถานะหลอมเหลวจะเกิดการขยายตัวและพองออก ซึ่งหัวคายหรือหัวเป่าเป็นส่วนที่อยู่ปลายสุดของเกลียวขับนี้ ทำหน้าที่ควบคุมพลาสติกเหลวให้เป่าได้ขนาดตามที่ต้องการ โดยทั่วไปนิยมใช้แบบครอสเฮด (Cross Head) คือ อยู่ในแนวตั้งลงข้างล่าง พลาสติกเหลวที่ออกจากหัวเป่าจะถูกเป่าให้เป็นท่อกว้างโดยเครื่องเป่าลม (Blower) ซึ่งมีการเป่าลมเย็นเพื่อมิให้ผิวฟิล์มติดกันและลดแรงดึงกันภายในเนื้อฟิล์ม อีกทั้งยังควบคุมความใสและขนาดของฟิล์มด้วย การเป่าลมเย็นที่ผิวทำได้ 2 ลักษณะ คือ เป่าลมเย็นที่ผิวด้านนอกและผิวด้านใน ทำให้พลาสติกเย็นตัวลงแล้ว จากนั้นใช้ลูกกลิ้งรีดกับท่อพลาสติกให้แบนแล้วม้วนเก็บ เพื่อนำไปตัดเป็นแผ่นฟิล์มหรือใช้ผลิตถุงต่อไป [15]

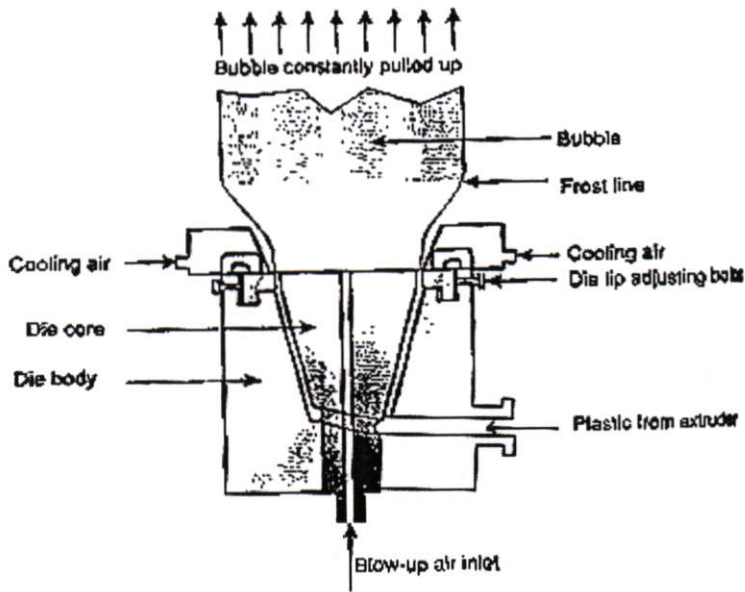
ความดันของอากาศจัดเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม ตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ ผลผลิตที่ได้จากเครื่องอัดรีด ความเร็วในการดึง (Take-off Speed) อุณหภูมิตลอดกระบอกใส่สกรูและคาย รวมทั้งปริมาณและทิศทางของอากาศที่ใช้ในการหล่อเย็นจะต้องมีการควบคุมไว้อย่างดี ความกว้างของรูเปิดคาย ซึ่งเป็นตำแหน่งของแกนหมุนที่อยู่ภายในคายจะต้องมีการปรับให้ดีด้วย เพื่อให้ความหนาของฟิล์มสม่ำเสมอ นอกจากนี้อัตราการหล่อเย็นตรงที่พองถูกทำให้เย็นก็จัดว่ามีความสำคัญในการได้ฟิล์มที่มีคุณภาพสูงสุด และช่วยป้องกันการขวางกัน (Blocking) ในลูกกลิ้งด้าน

บนสุด (Nip Rolls) และถูกกลิ้งม้วน (Wind-up Roll) โดยทั่วไปต้องการอากาศปริมาณมากที่มีความดันต่ำกว่าอากาศที่มีความดันสูง นอกจากนี้ปริมาณการควบคุมและทิศทางของอากาศก็จัดว่ามีความสำคัญเพราะทั้งสองตัวแปรมีความเกี่ยวข้องกับการควบคุมความหนา

การขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่าใช้ในการขึ้นรูปเหมาะสำหรับการนำไปผลิตเป็นถุง เพราะไม่มีตะเข็บข้าง และให้สมบัติทางกลและความแข็งแรงที่สม่ำเสมอในทิศทางตามแนวนอนและตามขวางของเครื่อง อีกทั้งยังให้ผลผลิตที่สูงกว่าการขึ้นรูปแบบหล่อ (Cast Extrusion) แต่มีข้อเสียคือการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่าให้ความหนาของฟิล์มไม่สม่ำเสมอ และความใสไม่เท่าการขึ้นรูปแบบหล่อ โดยจะมีความคลาดเคลื่อนของความหนาประมาณร้อยละ 10 [16]



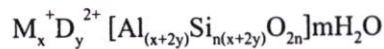
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม [16]



รูปที่ 2.4 ภาคตัดขวางบริเวณหัวค้ายของเครื่องเป่าฟิล์ม [16]

2.5 ซีโอไลต์เอ [17-21]

ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต มีโครงสร้างเป็นรูพรุนสามมิติและมีลักษณะเป็นเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ที่มีออกซิเจน 4 ตัวล้อมรอบ การแทนที่ Si ด้วย Al ทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุ จึงต้องมีประจุบวกเพื่อทำให้เกิดความสมดุลของประจุ สูตรเคมีของซีโอไลต์ เป็นดังนี้



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

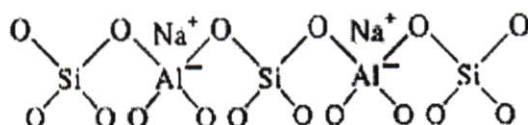
ซีโอไลต์เป็นสารที่มีรูพรุนจึงมีพื้นที่ผิวมากคือประมาณ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม ในโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ จะมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งมีไอออนประจุบวกและโมเลกุลของน้ำจะอยู่ในโพรงช่องว่างนี้ ธรรมชาติของช่องว่างและโพรงที่เชื่อมต่อกันของซีโอไลต์จะเป็นตัวการสำคัญในการกำหนดสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของซีโอไลต์ในการแลกเปลี่ยนไอออนและดูดซับสาร

2.5.1 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ

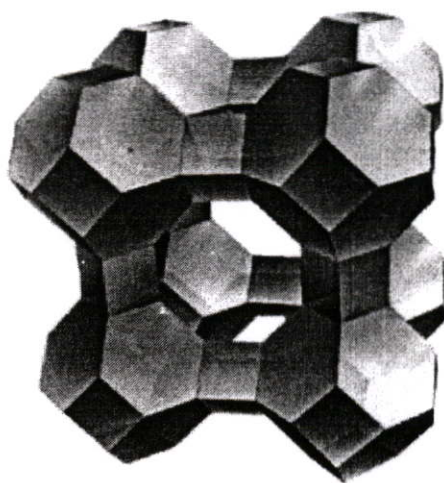
ซีโอไลต์เอ มีสูตรทางเคมีคือ $Na_{12} [(AlO_2)_{12}(SiO_2)] \cdot 27H_2O$ โดยมีอัตราส่วนระหว่างช่องว่างต่อปริมาตรเท่ากับ 0.47 อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 4.2 Å

2.5.2 การสังเคราะห์

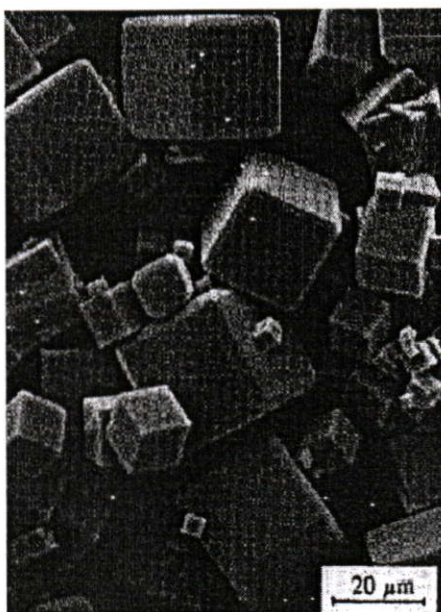
ซีโอไลต์เอ มีวิธีการสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการทำให้เป็นเจลคล้ายกับซีโอไลต์อื่นๆ ทั่วไปโดยใช้อะลูมินา (นิยมใช้โซเดียมอะลูมิเนต) และซิลิกา (นิยมใช้โซเดียมซิลิเกต) ผสมกันในสารละลายที่ทำให้เป็นเจลซึ่งสารละลายเหล่านั้น ได้แก่ สารละลายของอัลคาไล เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายเกลือแอมโมเนียม (NH_4^+) เอมีน หรือสารละลายอินทรีย์ที่มีขั้ว เมื่อผ่านกระบวนการทำให้เป็นเจลแล้วจะนำเจลที่ได้มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ $70\text{-}300^\circ\text{C}$ จะได้ผลึกของซีโอไลต์ที่อยู่ในรูปแบบของโซเดียมไอออน (Na^+)



รูปที่ 2.5 Frame work ของซีโอไลต์เอ [18]



รูปที่ 2.6 โครงผลึกของซีโอไลต์เอ [19]



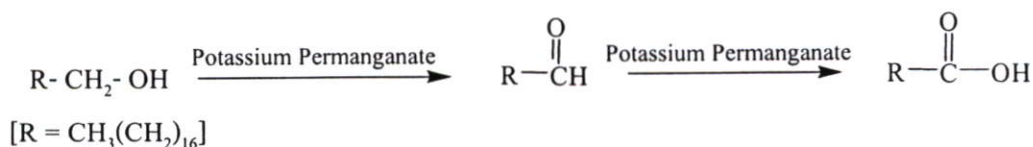
รูปที่ 2.7 ภาพขยายของซีโอไลต์เอ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [20]

2.5.3 การนำซีโอไลต์เอไปใช้งาน

ซีโอไลต์เอ เป็นซีโอไลต์ที่น่าสนใจเนื่องจากมีโครงสร้างแบบซูเปอร์เคจ (Supercage) เหมาะกับการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Spacio-Specific Catalysis) พื้นที่ภายในของโครงสร้างที่เป็นรูพรุนนั้นมีมากในการที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสาร ขนาดของรูพรุนที่มีขนาดเล็กจะมีความเฉพาะเจาะจง (Selectivity) ในการจำกัดขนาดของโครงสร้างที่จะเข้าออกจากซีโอไลต์ นอกจากนี้ยังถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสารและแลกเปลี่ยนไอออนอีกด้วย และเนื่องจากการที่ซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีความเป็นขั้วสูงและมีขนาดของรูพรุนมากกว่าโมเลกุลของน้ำจึงทำให้ซีโอไลต์เอนี้สามารถดูดซับน้ำซึ่งเป็นสารที่มีขั้วได้ดี ซึ่งอาจเป็นข้อดีในการนำไปใช้เพื่อปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของบรรจุภัณฑ์ [21]

2.6 กรดสเตียริก (Stearic acid, SA)

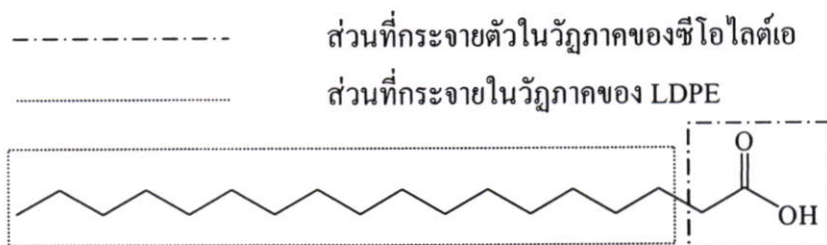
กรดสเตียริก (IUPAC Name=Octadecanoic, $C_{18}H_{36}O_2$) น้ำหนักโมเลกุล 284.48 กรดสเตียริกสามารถสังเคราะห์ได้จากการออกซิเดชันแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ และอัลดีไฮด์ (Oxidation Primary Alcohol and Aldehyde) ดังสมการ [22]



2.6.1 สมบัติโดยทั่วไปของกรดสเตียริก

- จุดหลอมเหลว 69.3 °C
- จุดเดือด 361 °C
- ความถ่วงจำเพาะ 0.847
- ความสามารถในการละลายน้ำ 0.1 – 1 กรัม/100 มิลลิลิตร ที่ 23 °C

กรดสเตียริกเป็นกรดไขมันชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม และหมู่ฟังก์ชันของกรดซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของสารตัวเติมได้ SA มีใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจาก SA มีราคาถูก มีสมบัติช่วยในการกระจายตัวของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในพอลิเมอร์ ลดการดูดซึมของน้ำ พบว่าสามารถตัวเติมที่ทำการเคลือบผิวด้วย SA มีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากกว่าสารตัวเติมที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว อย่างไรก็ตาม SA เกิดการดูดซับพื้นผิวระหว่างสารตัวเติม กับพอลิเมอร์ต่ำ และบางครั้งอาจเกิดการไม่ดูดซับ (Desorb) ในขณะหลอมระหว่างการผสม ทั้งนี้เนื่องจาก SA มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สั้นเกินไปที่จะเกิดการเกี่ยวพันกัน (Entangle) กับสายโซ่พอลิเมอร์ได้ กล่าวคือไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น [23]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ SA

2.7 พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) [24]

สูตรโครงสร้าง $H-[OCH_2CH_2]_n-OH$

2.7.1 สมบัติโดยทั่วไป

- | | |
|----------------------------|---------------|
| - น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย | 3000 – 3700 |
| - ค่า pH ในภาวะสารละลาย 5% | 4 – 7 |
| - จุดหลอมเหลว | 54 – 58 °C |
| - ความหนืดที่ 100 °C | 76 – 110 CST. |
| - สมบัติการละลายน้ำ | ละลายน้ำได้ |

PEG เกิดจากปฏิกิริยาการควบแน่นของเอทิลีนออกไซด์กับน้ำ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ เป็นสารช่วยปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรมยาง และใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์ สารคู่ควบ ตัวทำละลาย และเป็นสารหล่อลื่นในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับยาและเครื่องสำอาง นอกจากนี้ยังสามารถช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวลดการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของซีโอดีได้ดีด้วย โดย PEG สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างส่วนที่มีขั้วของซีโอดีเข้ากับ PEG ซึ่งอาจเป็นผลให้ซีโอดีที่ เกาะกลุ่มขนาดใหญ่แตกตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กลงหรือเป็นอนุภาคเดี่ยว

2.8 มะเขือเทศ [25]

มะเขือเทศมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Lycopersicon Esculentum* Mill ซึ่ง *Lycopersicon* มาจากภาษากรีกหมายถึง Wolf Peach เชื่อว่ามีถิ่นกำเนิดอยู่แถบชายฝั่งทะเลตะวันตกของทวีปอเมริกาใต้ แถบเปรู ชิลี และอีเควเตอร์อยู่ในตระกูล Solanaceae หรือ Nightshade และอยู่ในกลุ่ม Solanaceous Vegetable มีโครโมโซม $2n=24$ ตระกูล *Lycopersicon* ซึ่งเป็นตระกูลที่เล็กมาก มีเพียง 6 species และ 2 subgenera หรือ section

ผลเป็นแบบ Berry สร้างเมล็ดใน Fleshy Mesocarp โดยเมล็ดจะเกิดขึ้นบน Aplacenta อยู่ในโพรง (Pocket or Locule) ผลประกอบด้วยโพรงจำนวน 2-15 Locules ผลมีลักษณะอวบ สด มีรูปร่าง ขนาด และสี แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ผิวของมะเขือเทศจะไม่มีสีผิว ส่วนผลสีชมพู หรือเหลือง เกิดจากสีของเนื้อ เช่น ผิวสีแดงเกิดจากเนื้อสีเหลือง เป็นต้น ลักษณะรูปร่างแตกต่างกัน เช่น กลม (Globe) กลมแป้น (Oblate) กลมยาว (Pear Shape) หรือเป็น เหลี่ยม (Square or Blocky Shape)

การจำแนกสายพันธุ์ตามลักษณะของผล และการใช้ประโยชน์

- มะเขือเทศรับประทานสด (Table Tomato) ผลขนาดใหญ่ มีโพรงในผลมาก รสชาติดี แต่จะมีปัญหาหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากเมื่อแป็งเปลี่ยนเป็นน้ำตาล ผลจะนิ่มเร็ว (3-4 วัน) ปัจจุบันมีการปรับปรุงพันธุ์ให้สามารถเก็บรักษาได้นาน

- มะเขือเทศแปรรูป (Processing Tomato) ช่องในผลจะน้อย ผลแข็ง กระบวนการแป็งเปลี่ยนเป็นน้ำตาลจะช้า มี Total Soluble Solid Content สูง ใช้สำหรับโรงงานแปรรูป เช่น เนื้อมะเขือเทศเข้มข้น น้ำมะเขือเทศ ซอสมะเขือเทศ มะเขือเทศคองทั้งผล เป็นต้น

- มะเขือเทศผลเล็ก (Cherry Tomato) มะเขือเทศผลเล็ก ช่อดอกยาว มีจำนวนผล 15-20 ผลต่อช่อ

2.8.1 การเก็บเกี่ยว

กระบวนการพัฒนาของผลมะเขือเทศ จะสามารถเก็บเกี่ยวได้หลังจากดอกบาน 40-80 วัน การเจริญของผลแบ่งออกเป็นสองระยะคือ

- ระยะที่หนึ่ง เป็นระยะแรกของการเจริญ เป็นระยะแบ่งเซลล์และขยายตัวของเซลล์ ระยะนี้น้ำตาลที่ส่งมาจากส่วนของพืชที่อยู่ใกล้เคียงและที่เป็นอาหารสำรองในผลจะเปลี่ยนรูปเป็นแป้ง ผลประกอบด้วยเม็ดสีเขียวมาก (Chlorophyll) ทำให้มีสีเขียว

- ระยะที่สอง เมื่อผลเจริญเต็มที่ เซลล์จะหยุดการแบ่งตัวและการขยายตัว เป็นระยะเริ่มต้นของกระบวนการสุก ผลจะเริ่มเปลี่ยนสี ปริมาณเม็ดสีเขียวจะลดลง เปลี่ยนเป็นสีเขียวอ่อนหรือขาว หลังจากระยะนี้ 1 สัปดาห์ จะเป็นระยะการพัฒนาของเม็ดสีแดง (Lycopene) และ เม็ดสีเหลือง (Beta Carotene) กระบวนการสุกของผลจะเริ่มจากระยะที่มีปริมาณก๊าซเอทิลีน และอัตราการหายใจเพิ่มขึ้น จนกระทั่งผลสุกแดงซึ่งจะมีปริมาณก๊าซเอทิลีน และอัตราการหายใจสูงที่สุด ปริมาณกรด (Acidity) จะสูงในระยะเริ่มกระบวนการสุก และจะลดลงเมื่อผลสุกแดง

ระยะที่ผลเริ่มเปลี่ยนสี พืชจะสร้างเอนไซม์ Polygalactronase ซึ่งเป็นน้ำย่อยที่จะเปลี่ยนอาหารสำรองในผลซึ่งอยู่ในรูปของเพคตินให้เป็นน้ำตาลและน้ำมันหอมระเหย ทำให้เกิดกลิ่นเป็นผลให้ผลนิ่ม

ผลที่สุกแดงคาตันจะมีปริมาณวิตามินซี (Ascorbic Acid) และน้ำตาลสูง ระยะการเก็บเกี่ยวขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และการขนส่ง มะเขือเทศมีการเก็บเกี่ยวได้ 3 ระยะคือ

1. ระยะสุกเขียว (Mature Green) ระยะนี้ส่วนของไหลจะมีสีเขียวเข้ม ส่วนด้านล่างจะเปลี่ยนเป็นสีขาว ส่วนเมล็ดจะมีเมือกหุ้ม การเก็บเกี่ยวระยะนี้สำหรับตลาดที่ต้องการระยะเวลาการขนส่งนาน

2. ระยะสุกสีชมพู (Pink or Breaker Stage) ระยะนี้ 1/3 – 3/4 ของผลจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู ระยะนี้เหมาะสำหรับตลาดใกล้เคียง

3. ระยะสุกแดง (Red Ripe Stage) ระยะสุกแดงทั้งผล สำหรับตลาดในท้องถิ่นหรือส่งโรงงานแปรรูป

อุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนสีของมะเขือเทศ โดยอุณหภูมิ 20.0-21.1 °C ผลจะเปลี่ยนจากระยะสุกเขียวเป็นสุกแดงภายในเวลา 5-20 วัน ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ในอุณหภูมิ 26.7-29.4 °C พืชจะสร้างเม็ดสีเหลืองในปริมาณที่สูงกว่าเม็ดสีแดง ในอุณหภูมิกกลางวัน 26.0 °C กลางคืน 18.0 °C ผลจะเปลี่ยนเป็นสีแดงในระยะเวลา 9 วัน ส่วนในอุณหภูมิต่ำกลางวัน 16.0 °C กลางคืน 7.0 °C ผลจะเปลี่ยนเป็นสีแดงช้าหรือใช้ระยะเวลา 12-15 วัน

2.8.2 การเก็บรักษา

การเก็บรักษามะเขือเทศนิยมกำจัดความร้อนแบบเฉียบพลัน โดยวิธี Room Cooling หรือ Forced Air Cooling อุณหภูมิที่เหมาะสม อยู่ระหว่าง 7.8 -10.0 °C มีจุดเยือกแข็งที่ -0.6 °C ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม อยู่ระหว่าง 90-95% เก็บรักษาได้ 1 สัปดาห์ มะเขือเทศเป็นพืชที่นำเสียบง่ายหลังการเก็บเกี่ยว ควรเก็บรักษาในสภาพอุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 2.7 แสดงระยะเวลาในการเก็บรักษาของมะเขือเทศที่สภาวะต่าง ๆ [25]

ระยะของการพัฒนา	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์(%)	ระยะเวลาในการเก็บรักษา
สุกแดง	8.0-13.0	85-90	9-10 วัน
สุกเขียว	13.0-16.0	85-90	3-4 สัปดาห์
สุกสีชมพู	1.1-2.2	ต่ำ	3 สัปดาห์

การเก็บรักษามะเขือเทศในอุณหภูมิ 0 °C จะสามารถเก็บรักษาได้ 9-14 วัน แต่เมื่อนำออกมาเก็บรักษาในอุณหภูมิ 18.0 °C จะเกิดแผลช้ำ (Cold Injury)

ในด้านคุณภาพของผล ปริมาณ Insoluble Solid Alcohol ในผลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในสภาพอุณหภูมิสูง เมื่อเก็บรักษาในเวลาสั้นปริมาณ Soluble Solid และน้ำตาลจะสูง แต่เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานปริมาณจะลดลงอุณหภูมิและระยะเวลาที่เก็บรักษาจะไม่มีผลต่อ Total Acidity, ความเป็นกรด ค้าง น้ำมะเขือเทศ และปริมาณกรดแอสคอบิกในผลบรรจุในภาชนะที่ทนทานต่อการขนส่ง อย่าใส่ซ้อนกันมาก ซึ่งเมื่อมีแรงกดสูงทำให้ผลช้ำนำเสียบได้ง่าย คุณภาพต่ำ เสียราคาหรือไม่อาจจะขายได้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hale W.R. และคณะ [26] ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองของการแพร่ผ่านของไอน้ำผ่านรูพรุนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) กับแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) โดยสมมติให้มีพฤติกรรมแบบ Fickial ซึ่งสิ่งสำคัญของแบบจำลองนี้เกี่ยวข้องกับความสามารถในการผ่านเข้าออกในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก ตัวอย่างฟิล์มถูกเตรียมจาก LLDPE กับ CaCO₃ (ปริมาณร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก) ผสมโดยใช้เครื่องผสมอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 400 °F จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการหล่อฟิล์มที่อุณหภูมิ 550 °F ตัวอย่างฟิล์มถูกดึงที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เทคนิค Interdigitation ในอัตราการดึงที่แตกต่างกันทั้งในทิศทางขนานและแนวเดียวกับเครื่องจักร และนำไปทดสอบสมบัติการซึมผ่านน้ำ จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างของรูพรุนโดยการวัดความหนาแน่นและพื้นที่ผิวเพื่อหาค่าเฉลี่ยรัศมีของรูพรุนและจำนวนเฉลี่ยของรูพรุนต่อกรัม จากผลการ

ทดลองพบว่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำไม่เพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีของรูพรุนเพิ่มขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของรูพรุนเพิ่มขึ้น

Dirim S. และคณะ [5] ได้ศึกษากระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์มพอลิเอทิลีนและซีโอไลต์เพื่อใช้ทำบรรจุภัณฑ์อาหารด้วยวิธีต่างๆ 3 วิธีคือ กระบวนการอัดรูปร้อนซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาของฟิล์มที่มีการกระจายตัวที่ไม่ดี การเติมซีโอไลต์ลงในพอลิเอทิลีนขณะหลอมเหลวและมีการเครื่องช่วยในการกระจายตัวอัตโนมัติ เกิดปัญหาเนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวมีความหนืดที่สูงมากและมีอุณหภูมิที่สูงเกินไปที่จะใช้เครื่องช่วยในการกระจายตัวอัตโนมัติ จึงได้มีการเติม ซีโอไลต์ในพอลิเอทิลีนขณะถูกละลายในตัวทำละลายไซลีนเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นซึ่งฟิล์มที่ได้มีความใสและการยืดหยุ่นที่ดี แต่อย่างไรก็ตามตัวทำละลายที่ใช้มีความเป็นพิษไม่เหมาะสมในการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร การเคลือบเม็ดพอลิเอทิลีนด้วยซีโอไลต์ที่อุณหภูมิในการผสม 145 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการอัดรีดและทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 130 °C โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน ซึ่งวิธีนี้เป็นทางเลือกที่ดีในการผลิตฟิล์มเนื่องจากฟิล์มที่ผลิตได้มีการกระจายตัวดี ความยืดหยุ่นดี และมีความหนาที่สม่ำเสมอ

Ozmihci F. และคณะ[27] ได้ศึกษาถึงการเตรียมและสมบัติต่างๆของคอมโพสิตจากพอลิพรอพิลีน (PP) กับซีโอไลต์ธรรมชาติ (Natural Zeolite) ฟิล์ม PP และ ฟิล์มคอมโพสิตซีโอไลต์ที่ได้จากกระบวนการอัดรีดผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG 4000) ที่ปริมาณซีโอไลต์ 2-4% จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าความแข็งแรงลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากจากการยึดติดที่ไม่ดีของวัสดุภาค PP กับ ซีโอไลต์ ทำให้มีช่องว่างระหว่างวัสดุเกิดขึ้น การศึกษาสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิต พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์มคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เป็นตัวเหนียวทำให้การเกิดผลึกของ PP เพิ่มขึ้น และผลของการเติมซีโอไลต์ต่อการสลายตัวทางความร้อน โดยทำการศึกษาในสภาวะบรรยากาศและในบรรยากาศที่มีไนโตรเจน พบว่าในสภาวะบรรยากาศซีโอไลต์ไม่ได้เป็นสาเหตุให้เกิดการออกซิเดชันของ PP ส่วนในบรรยากาศที่มีไนโตรเจน ถึงแม้ว่าการเริ่มสลายตัวทางความร้อนของ PP จะถูกหน่วงด้วยซีโอไลต์ แต่คอมโพสิตก็สลายตัวด้วยอัตราเร็วที่เร็วกว่า PP ในช่วงแรกของการสลายตัว นอกจากนี้ยังศึกษาความสามารถการซึมผ่านไอน้ำ พบว่าฟิล์มที่มีปริมาณซีโอไลต์ 2% มีการซึมผ่านน้ำน้อยมาก แต่ที่ปริมาณซีโอไลต์ 4% ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมีค่าสูงมาก และงานวิจัยต่อมาโดย Matin D. และคณะ [28] ทำการศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่าง PP กับ ซีโอไลต์ โดยการปรับปรุงพื้นผิว เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์และสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต ซึ่งสารในการปรับปรุงพื้นผิวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) 3% โดยน้ำหนักและสารคู่ควบอีก 3 ชนิดคือ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (AMPTES) เมทิลไตรเอทอกซีไซเลน (MTES) และ 3-เมอแคปโกลโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (MPTMS) ที่ปริมาณ 0.5-2% โดยน้ำหนัก ปริมาณ

Matzinos P. และคณะ [34] ศึกษากระบวนการผสม LDPE และแปงโดยใช้สารช่วยผสม (Maleic Anhydride Graft Polyethylene, PE-g-MA) ผ่านกระบวนการผลิตโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนอกู จากนั้นนำมาเข้าเครื่องฉีดขึ้นรูปและเป่าฟิล์ม พบว่าสมบัติเชิงกลขึ้นกับความสามารถในการกระจายตัวของแปงใน LDPE จากการทดสอบสมบัติเชิงกลในส่วนของกรณีฉีดขึ้นรูป เมื่อปริมาณแปงมากขึ้นความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการส่งผ่านของแรงจาก LDPE ซึ่งเป็นส่วนที่อ่อนแอไปยังส่วนของแปงซึ่งเป็นส่วนที่แข็งแรงกว่า แต่จะมากที่สุดแค่ตัวอย่างที่มีปริมาณแปง 30% จากนั้นจะลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณแปงเพิ่มขึ้นการกระจายตัวของแปงจะลดลง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลงเมื่อปริมาณแปงเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปนั้น มีการให้ความดันแก่ของผสมที่มากกว่าความดันที่ใช้ในเครื่องเป่าฟิล์ม ทำให้เกิดการผสมที่ดีกว่า ซึ่งจากการศึกษาสถาบันวิทยการกระจายตัวของแปงจากชิ้นงานที่เป่าฟิล์มมีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคมากกว่าตัวอย่างที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูปเป็นสาเหตุให้สมบัติต่างๆของฟิล์มลดลง แต่ค่ามอดูลัสยังเพิ่มขึ้น

สุภารัตน์และคณะ [35] ได้ศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่ผสมซีโอไลต์ โดยเตรียมตัวอย่างจากเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนอกู และทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน พบว่าการเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ ำทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงกระทำระหว่างพื้นผิวสัมผัสของซีโอไลต์กับพอลิเอทิลีน สมบัติส่วนใหญ่ของทั้ง LDPE และ LLDPE เช่น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก มีค่าลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ส่วนการกระจายตัวของซีโอไลต์เป็นไปได้ยากขึ้น แต่อัตราการซึมผ่านของไอน้ำบนแผ่นฟิล์มมีมากขึ้นซึ่งเกิดจากปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้น

กัญญาวีร์ สุวรรณชัย [36] ได้ศึกษาการปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE สำหรับงานบรรจุภัณฑ์ โดยการผสม LDPE กับซีโอไลต์เอ (0-20%) และมีการปรับปรุงพื้นผิวซีโอไลต์เอด้วยกรดสเตียริก โดยขึ้นรูปด้วยเทคนิคการหล่อฟิล์มในสภาวะหลอมเหลว (Melt Casting) พบว่าเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ความหนืด ความเป็นผลึก ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก มอดูลัส และการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดและค่าความแข็งแรงฉีกขาดลดลง การปรับปรุงพื้นผิวซีโอไลต์เอด้วยกรดสเตียริกทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น ผลจากการทดสอบการเก็บรักษามะเขือเทศ พบว่าภายในถุงบรรจุภัณฑ์ที่มีซีโอไลต์เออยู่มาก (10-20%) มีไอน้ำเกิดขึ้นน้อยกว่าในสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์น้อย

วนิดา แซ่ลิ้มและสุภาพร ประเสริฐศิริเจริญ [37] ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอทที่มีและไม่มีกรปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกและพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) โดยผ่านกระบวนการอัดรีดและขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อ จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณ

ซีโอไลต์เพิ่มมากขึ้นความหนืดจะเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับค่าความแข็งแรงฉีกขาดที่มีค่าลดลง ความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้นจนถึง 6% โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก หรือ PE-g-MA พบว่าค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส เเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดและความแข็งแรงฉีกขาดมีค่าใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่มีการปรับปรุง เมื่อใช้ซีโอไลต์ในปริมาณ 9% ส่วนค่าอุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าคงที่ ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่ม แต่การปรับปรุงสูตรด้วยกรดสเตียริก และ PE-g-MA ทำให้สมบัติดังกล่าวลดลง จากฐานฐานวิทยาพบว่า การเติมซีโอไลต์ในปริมาณน้อย มีการกระจายตัวที่ดี และอยู่กันเป็นอนุภาคเดี่ยว แต่เมื่อปริมาณซีโอไลต์มากขึ้นจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น

Wang Y. และคณะ [38] ได้ศึกษาถึงการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนและเอทิลีนที่อุณหภูมิ $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มพอลิเอทิลีน 3 ชนิด คือ LDPE LLDPE และ HDPE และทดสอบฟิล์ม LDPE ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง $4\text{-}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าที่อุณหภูมิคงที่การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและเอทิลีนลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น การซึมผ่านไม่ขึ้นกับความหนาของฟิล์ม การซึมผ่านของก๊าซของฟิล์ม LDPE ที่มีการผสมซีโอไลต์ พบว่ามีการซึมผ่านมากกว่า LDPE ซึ่งสามารถนำฟิล์มชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับห่อผักและผลไม้สดเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาได้

Cameron A.C. และคณะ [39] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบบรรจุภัณฑ์ พบว่าการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ต้องให้เหมาะสมกับอัตราการหายใจของผลิตผลสด เช่น บร็อคคอรี่ เห็ด ผักใบเขียว และผักชนิดอื่นๆ ที่มีอัตราการหายใจสูงจะต้องใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีการซึมผ่านสูงพอที่จะไม่ให้เกิดการสะสมของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อไม่ให้เกิดกระบวนการหมัก ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์เพื่อให้มีอัตราการซึมผ่านก๊าซสูงขึ้น โดยใช้พอลิเมอร์ผสม หรือการทำพอลิเมอร์หลายชั้นเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ นอกจากนั้นยังได้มีการนำพอลิเมอร์มาผสมกับสารอนินทรีย์ เช่น CaCO_3 , SiO_2 และ ซีโอไลต์ เป็นต้น ทำให้เกิดเป็นฟิล์มที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micro porous Films) ซึ่งใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ในการยืดอายุการเก็บรักษาสตรอเบอรี่ ต้นกระเทียม หน่อไม้ฝรั่ง เซอร์รี่ และมะเขือเทศ เป็นต้น

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการดำเนินงาน

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรดอครีคสำหรับเป่าฟิล์ม (LD1905FA) จากบริษัทสยามค้าเคมีภัณฑ์ จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติของ LDPE ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	LD1905FA
ครรชนีการไหล	กรัม/10 นาที	ASTM D 1238	5.0
ความหนาแน่น	กรัม/ลบ.ซม.	ASTM D 1505	0.919
ความต้านทานแรงดึง	กก./ตร.ซม.	ASTM D 638	MD:240* TD:170*
การดึงยืดที่จุดขาด	%	ASTM D 638	MD:320* TD:680*
ความต้านทานแรงฉีกขาด	กรัม/25 ไมครอน	ASTM D 1922	MD:370* TD:210*
ความต้านทานแรงกระแทกของฟิล์ม	กรัม	ASTM D 1790	105*
ความฝ้า	%	ASTM D 1003	6*
ความเงามัน	%	ASTM D 2457	85*
มอดูลัสการโค้งงอ	กก./ตร.ซม.	ASTM D 790	2100
ความแข็ง, Shore D	-	ASTM D 2240	46
จุดหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	ASTM D 2117	108

* ฟิล์มหนา 40 ไมครอน (เป่าที่อัตราแบ่ง 2:1)

MD: ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

TD: ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

- ข้อมูลตารางที่ 3.1 มาจากบริษัทสยามค้าเคมีภัณฑ์ จำกัด

- ซีโอไลต์เอ (Zeolite A) จากบริษัทพีคิวเคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด

ตารางที่ 3.2 สมบัติซีโอไลต์ เอ ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ผล
ลักษณะ	ผงละเอียด
สี	ขาว
% ความเป็นผลึก	99 %
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นมวลรวม (กรัม/ลิตร)	366
ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค (ไมครอน)	3.91
ความแข็ง (Mohs)	4-5
ความชื้นที่สูญเสียไปที่อุณหภูมิ 800 °C (% โดยน้ำหนัก)	20.75

- ข้อมูลตารางที่ 3.2 มาจากบริษัทพีคิวเคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด
- กรดสเตียริก (Stearic Acid) เกรดการค้า
 - พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethyleneglycol, PEG 4000) เกรดการค้า
 - พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin)
 - สารทำให้แข็งตัว (Methyl Ethyl Ketone Peroxide)
 - สารกระตุ้นตัวเร่ง (Cobalt Napthenate)
 - เอทานอล จากบริษัท Lab Scan เกรดปฏิบัติการ จากบริษัท Carloerba จำกัด

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงาน

- เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-Screw Extruder): Thermo Haake Poly Drive รุ่น R252
- เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-Screw Extruder): Intro Engineering รุ่น PL-20
- เครื่องบดพลาสติก (Plastic Grinder): Bosco Engineering รุ่น Bosco A600
- เครื่องผสมความเร็วสูง (High Speed Mixer): Lab Tech Engineering Co.,Ltd รุ่น 0023
- เครื่องขึ้นรูปแผ่นฟิล์มพลาสติกแบบเป่า (Blown Film Extrusion): Lab Tech Engineering Co.,Ltd รุ่น LF 400
- เครื่องปั๊มลม :Hitachi Co., Ltd. รุ่น BEBICON 400
- เครื่องวัดความหนาของฟิล์ม (Digimatic Outside Micrometer): Mitutoyo รุ่น99MAB002W

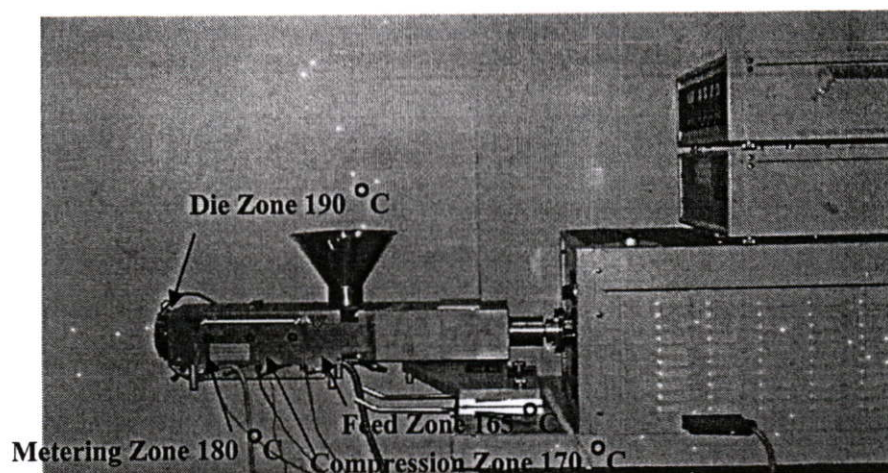
8. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine): LLOYD Instrument Co., Ltd.
รุ่น LLOYD LR 5 K
9. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน Differential Scanning Calorimeter, DSC: Shimadzu Co.,Ltd รุ่น DSC-50 และ Thermogravimetric Analysis, TGA:Perkin Elmer รุ่น Pyris 1
10. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum Gx
11. เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary Rheometer): Rosand Precision Co.,Ltd รุ่น Rosand 7
12. เครื่องวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว : Quantachrome รุ่น Autosorb-1
13. ตู้อบ : MEMMERT รุ่น UM 400
14. ตู้อบสุญญากาศ (Isotemp Vacuum Oven): Fish Scientific รุ่น 282A
15. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM): JEOL Co.,Ltd รุ่น JSM-5410
16. เครื่องทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์ม (Water Vapor Permeability Analyzer): Lyssy รุ่น L80-4000J
17. เครื่องทดสอบการซึมผ่านออกซิเจนของแผ่นฟิล์ม (Oxygen Permeability Analyzer): Illinois Instrument รุ่น 8500
18. เครื่องปิดผนึกถุงพลาสติก: Homemate Vacuum Bag Sealer รุ่น BS 4100
19. ตู้เย็น

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.1.1 การผสมสูตร

เตรียมสูตรผสมทุกสูตร สูตรละ 1 กิโลกรัม โดยทำการชั่งน้ำหนักของซีโอดีเอ และ LDPE ตามสัดส่วนที่แสดงตามตารางที่ 3.3 ทำการผสมโดยคลุกเคล้าซีโอดีเอและ LDPE ให้เข้ากันนำเข้าสู่ส่วนป้อนของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ โดยตั้งอุณหภูมิที่ Feed Zone 165 °C Compression Zone 170 °C Metering Zone 180 °C และ Die Zone 190 °C ความเร็ว 20 รอบ/นาที เมื่อได้สูตรผสมแต่ละสูตรและให้ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปบดเป็นชิ้นขนาดเล็กโดยใช้เครื่องบดพลาสติก



รูปที่ 3.1 เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนโดยน้ำหนักของสูตรผสมแต่ละสูตร

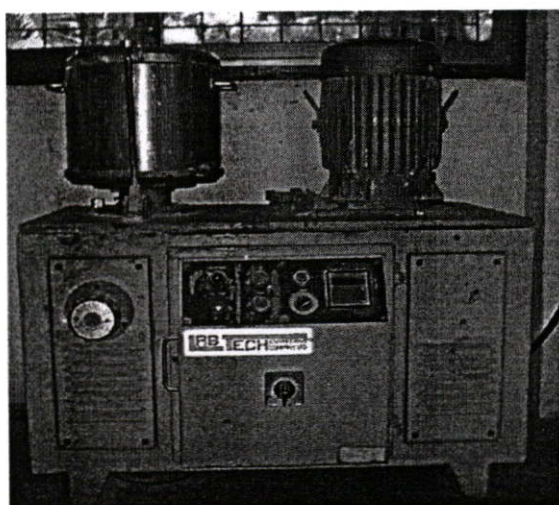
LDPE	Zeolite A	SA	PEG	ชื่อสูตร
100	0	-	-	LD/Z0
98	2	-	-	LD/Z2
96	4	-	-	LD/Z4
96	4	1%	-	LD/Z4/S
96	4	-	3%	LD/Z4/P
94	6	-	-	LD/Z6
94	6	1%	-	LD/Z6/S
94	6	-	3%	LD/Z6/P
92	8	-	-	LD/Z8

3.3.1.2 การปรับปรุงสูตรผสมโดยการเคลือบผิวซีโอไลต์แอดด้วยสารพอลิเอทิลีนไกลคอล

ทำการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์แอด โดยผสมซีโอไลต์กับพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) 3% โดยน้ำหนักของซีโอไลต์แอด ในสารละลายเอทานอล 50% โดยปริมาตร อัตราส่วนของซีโอไลต์ในสารละลายคือ 1:0.3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำการปั่นกวนของผสมทั้งหมดให้เข้ากัน โดยใช้เครื่องปั่นกวนชนิดแม่เหล็กเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 40 °C ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และจากนั้นนำไปทำให้แห้งโดยการอบด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 110 °C ความดัน 400 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำซีโอไลต์แอดที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวไปทำการผสมกับ LDPE ที่สัดส่วน LDPE: ซีโอไลต์แอด เท่ากับ 94:6 และ 96:4 โดยน้ำหนัก ตามวิธีข้อ 3.3.1.1

3.3.1.3 การปรับปรุงสูตรผสมโดยการเคลือบผิวซีโอไลต์เอด้วยกรดสเตียริก (SA)

ทำการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์เอ โดยผสมซีโอไลต์เอกับกรดสเตียริก โดยใช้ปริมาณกรดสเตียริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีโอไลต์เอ โดยการชั่งกรดสเตียริก 10 กรัมและซีโอไลต์เอ 990 กรัม เทผสมลงในเครื่องผสมความเร็วสูง โดยตั้งความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที ทำการปั่นกวนของผสมจนอุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 80°C จากนั้นทำการปั่นกวนต่อไปอีก 15 นาทีจึงปิดเครื่อง แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ 10 นาทีเปิดฝาเกลียวของผสมที่ติดอยู่ตามด้านบนและด้านข้างของเครื่องผสมลง แล้วทำการปั่นกวนอีกเป็นเวลา 10 นาทีจึงปิดเครื่อง จากนั้นนำซีโอไลต์เอที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวไปทำการผสมกับ LDPE ที่สัดส่วน LDPE: ซีโอไลต์เอ เท่ากับ 94:6 และ 96:4 โดยน้ำหนัก ตามวิธีข้อ 3.3.1.1

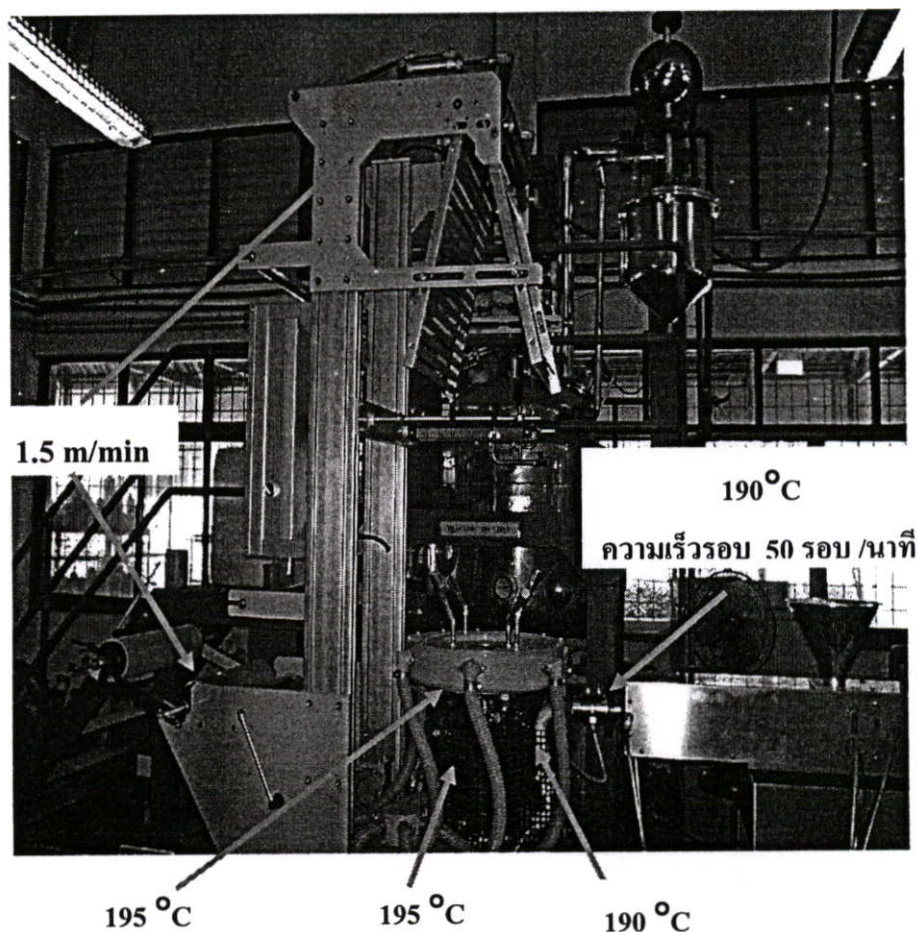


รูปที่ 3. 2 เครื่องผสมความเร็วสูงที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3.1.4 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

แบ่งสารผสมที่บดได้ทุกสูตรจากข้อ 3.3.1.1 มาทำการขึ้นรูปโดยเครื่องขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกแบบเป่า โดยตั้งอุณหภูมิที่เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวที่อุณหภูมิหัวคาย 190°C และความเร็วรอบของสกรูของเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวเท่ากับ 50 รอบต่อนาที อุณหภูมิบริเวณส่วนท่อนักที่ต่อเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวกับเครื่องเป่าฟิล์ม 190°C บริเวณส่วนท่อตรงด้านล่าง 195°C ส่วนท่อตรงด้านบน 195°C และใช้อัตราการดึงเก็บม้วนฟิล์มคือ 1.5 m/min ยกเว้นสูตร LD/Z8 ที่ใช้อัตราการดึงเก็บม้วนฟิล์มคือ 1 m/min เนื่องจากความหนืดของสูตรผสมมากทำให้สารไหลออกมาช้า จึงต้องลดอัตราการดึงเก็บ

การเลือกบางส่วนของฟิล์มที่ผลิตได้ในแต่ละสูตรมาทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ต่อไป โดยส่วนที่เลือกต้องมีผิวค่อนข้างเรียบ ไม่มีฟองอากาศ และมีความหนาค่อนข้างใกล้เคียงกัน (จากการสุ่มวัดความหนาของท่อฟิล์มด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ตัวอย่างละประมาณ 50 จุด)



รูปที่ 3.3 เครื่องขึ้นรูปแผ่นฟิล์มพลาสติกแบบเป่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3.2 การตรวจสอบวัตถุดิบ

3.3.2.1 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของ LDPE

นำเม็ด LDPE มาศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยเครื่อง DSC โดยใช้น้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 180°C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น แล้วนำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมตัว (T_m) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ตามมาตรฐาน ASTM E794 [40] ซึ่งสามารถคำนวณหา %Crystallinity ได้ดังนี้

$$\%Crystallinity = \frac{\Delta H}{\Delta H^0} \times 100$$

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

โดย

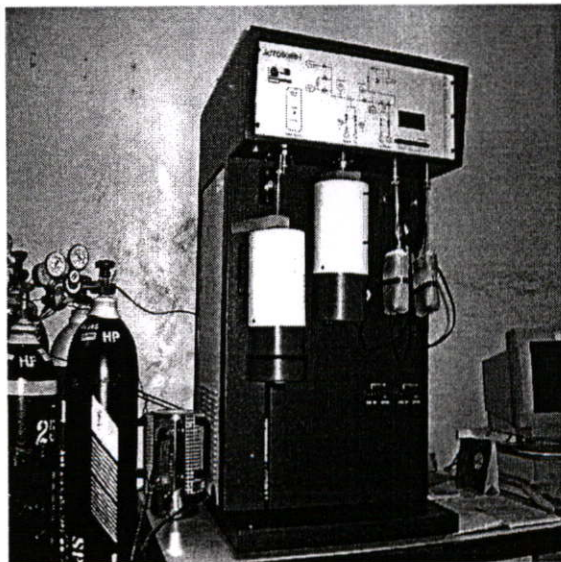
ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

ΔH_f^0 คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100 % ซึ่งมีค่าเท่ากับ 293 J/g [41]

3.3.2.2 การตรวจสอบหาพื้นที่ผิว ขนาดและรูปร่างอนุภาคของซีโอดีเอ

- การตรวจสอบหาพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ของซีโอดีเอ

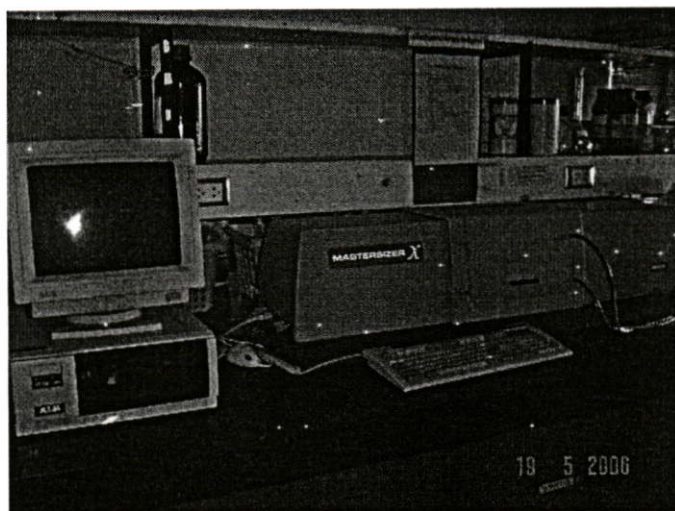
นำซีโอดีเอมาทดสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 0.02 - 0.04 กรัม ใส่ลงในเซลล์ที่แห้งและสะอาด ทำการ Degas ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นและสิ่งเจือปนที่ติดอยู่ก่อนทำการทดสอบ จากนั้นทำการทดสอบโดยผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปดูดซับตัวอย่างจนกระทั่งค่าความดันเทียบกับความดันอิ่มตัว (P/P_0) ในช่วงตั้งแต่ 0.01-0.1



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวที่ใช้ในงานวิจัยนี้

- ขนาดอนุภาค

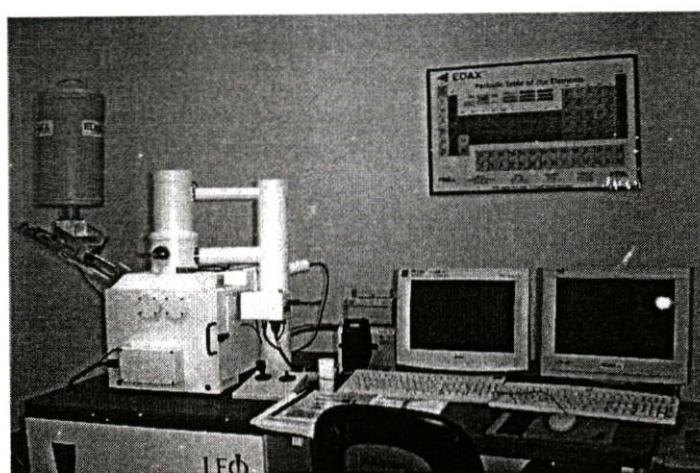
นำตัวอย่างซีโอไลต์เอ มาศึกษาการขนาดอนุภาค โดยใช้เครื่อง Mastersizer



รูปที่ 3.5 เครื่อง Mastersizer X ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

- รูปร่าง ขนาด และลักษณะของอนุภาค

นำตัวอย่างซีโอไลต์เอ มาศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3.2.3 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของซีโอโลดต์เอทีถูกเคลือบผิว

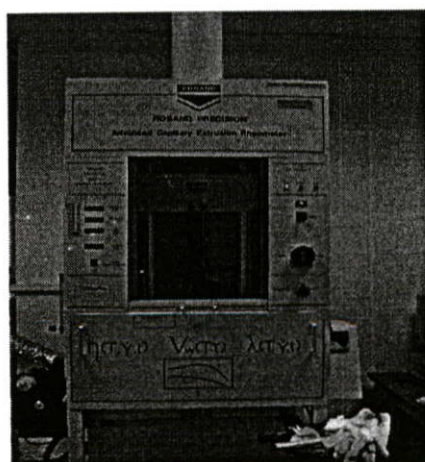
นำซีโอโลดต์เอทีถูกเคลือบผิวมาทำการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน โดยบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องฟูเรียนทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในช่วงเลขคลื่น $4,000\text{ cm}^{-1} - 600\text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 3.7 เครื่อง FTIR ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3.3 การทดสอบสมบัติการไหล

นำสารผสมที่บดได้ที่แบ่งไว้จากข้อ 3.3.1.4 มาทำการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เครื่อง Capillary Rheometer ที่อุณหภูมิหัวคาย $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในช่วงอัตราความเครียดเฉือน (Shear Rate) ที่ $30\text{-}3600\text{ s}^{-1}$ โดยใช้หัวคายเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ความยาว 0 และ 16 mm มุม 180 องศา ตามมาตรฐาน ASTM D3835 [42]



รูปที่ 3. 8 เครื่อง Capillary Rheometer ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3.4 การตรวจสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม

3.3.4.1 การตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของ ซีโอไลต์เอ ในสารตัวอย่าง

ตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของซีโอไลต์เอในสารตัวอย่างโดยใช้เครื่อง TGA โดยชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 °C /min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 600 °C ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาปริมาณซีโอไลต์เอ ที่แน่นอนตามมาตรฐาน ASTM E1131 [43]



รูปที่ 3.9 เครื่อง TGA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3.4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของฟิล์มตัวอย่าง

3.3.4.2.1 ความหนาของฟิล์ม

หลังจากกระบวนการเป่าฟิล์มเมื่อได้ทำการเลือกส่วนที่นำมาศึกษาแล้วทำการวัดความหนาของฟิล์มทุกสูตรที่ได้ด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ โดยทำการสุ่มวัดความหนาให้ทั่วทั้งความยาวของท่อฟิล์มในส่วนที่เลือกประมาณ 20 จุด

3.3.4.2.2 ความกว้างของท่อฟิล์มหลังรีดเรียบ

ทำการสุ่มวัดความกว้างของท่อฟิล์มที่ถูกรีดให้แบน โดยทำการสุ่มวัดให้ตลอดทั่วทั้งความยาวของท่อฟิล์มส่วนที่ถูกเลือกเช่นเดียวกับการวัดความหนาของฟิล์ม ประมาณ 10 จุดโดยใช้ไม้บรรทัด

3.3.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มตัวอย่างด้วยเครื่อง DSC โดยทำการทดลองสภาวะเดียวกับการตรวจสอบวัตุดิบ ASTM E794 ตามข้อ 3.3.2.1 [40]

$$\%Crystallinity = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{(100 - \text{ปริมาณซีโพลีเอในฟิล์ม})} \times 100$$

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

โดย

ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

ΔH_f^0 คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100 % ซึ่งมีค่าเท่ากับ 293 J/g [41]

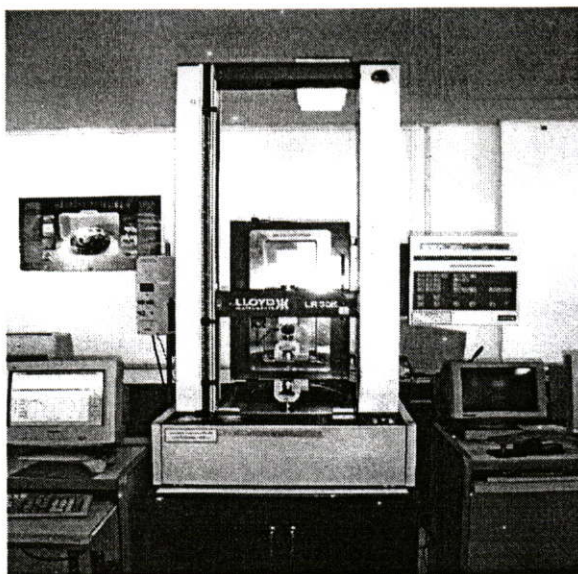
3.3.4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.3.4.4.1 สมบัติความแข็งแรงดึง

นำฟิล์มตัวอย่างที่ได้มาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ โดยตัดตัวอย่างทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และในแนวขวางเครื่องจักร (TD) ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล ใช้ Load Cell 100 N ความเร็วในการดึง 50 mm/min ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge Length) 25 mm ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D638 [44] เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile Yield Strength) ค่ายังมอดูลัส (Young's Modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at Break)

3.3.4.4.2 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด

นำฟิล์มตัวอย่างมาตัดเป็นชิ้นงานรูปปีกนก ตามมาตรฐาน ASTM 624 [45] ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล ใช้ Load Cell 100 N ความเร็วในการดึง 50 mm/min



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3.4.5 การศึกษาการกระจายตัวของซีโอไลต์ เอในฟิล์มตัวอย่าง

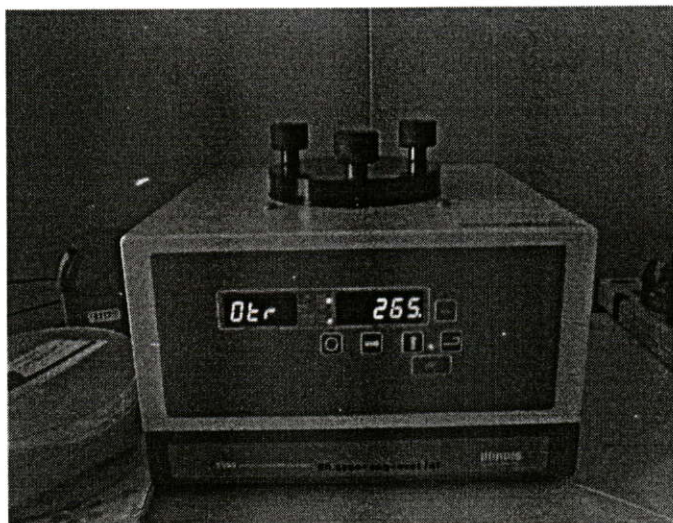
ผสมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัวและสารกระตุ้นตัวเร่ง 0.2% โดยน้ำหนักของเรซินลงในบีกเกอร์แล้วคนให้เข้ากัน จากนั้นเติมสารทำให้แข็งตัว 1% โดยน้ำหนักของเรซินลงไปและคนให้เข้ากันอีกครั้ง เทเรซินที่ผสมแล้วลงแผ่นใสแล้ววางฟิล์มลงบนบริเวณที่เทเรซินลงไป หลังจากนั้นเทเรซินลงทับบนแผ่นฟิล์มอีกครั้งในลักษณะแซนวิช ทิ้งไว้ให้แข็ง ลอกชิ้นงานออกจากแผ่นใส จากนั้นแช่ในไนโตรเจนเหลวประมาณ 30 นาที แล้วหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ลอกเอาแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ติดกับเรซินออก นำพื้นผิวตรงรอยแยกของแผ่นฟิล์มมาเคลือบทองแล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

3.3.4.6 การศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

ศึกษาปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง ต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มพลาสติกในระยะเวลาที่กำหนดและภายใต้สภาวะที่คงที่มีหน่วยเป็น $g/m^2 day$ ที่อุณหภูมิ $38\text{ }^{\circ}C$ และความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ 90% โดยวิธี Transfer Time Method โดยใช้เครื่อง Lyssy Water Permeability กำหนดขนาดของชิ้นงาน $11 \times 11\text{ cm}^2$ สูตรละ 3 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ISO 15106-1:2003 (E) [46]

3.3.4.7 การศึกษาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ศึกษาการซึมผ่านของออกซิเจน โดยวางฟิล์มรูปแปดเหลี่ยมที่ตัดด้วย Cutting Template ตรงกลางระหว่างเซลล์ ปล่องก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนเข้าไป โดยก๊าซไนโตรเจนจะเป็นตัวนำก๊าซออกซิเจนที่สามารถผ่านแผ่นฟิล์มไปยังด้านที่มีออกซิเจนต่ำกว่าไปยังเครื่องบันทึกค่า ค่าที่อ่านได้จะเป็นปริมาตรของก๊าซที่วัดได้จากการซึมผ่านที่คงที่ ณ อุณหภูมิและพื้นที่ผิวที่กำหนด มีหน่วยเป็น $\text{cc/m}^2\text{day}$ สูตรละ 2 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM D3985 [47]



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3.5 การทดสอบการเก็บรักษาผักผลไม้

- ทดสอบการเก็บรักษาโดยใช้มะเขือเทศพันธุ์ท้อเป็นตัวอย่างทดสอบ ทำการคัดมะเขือเทศเพื่อที่จะนำมาเก็บทดสอบรักษา โดยคัดเลือกมะเขือเทศที่มีน้ำหนักประมาณ 50 - 70 กรัม และผลที่มีขนาดและมีสีใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นล้างให้สะอาดและผึ่งให้แห้ง

- นำฟิล์มตัวอย่างในสูตร LD/Z0, LD/Z6, LD/Z6/S และ LD/Z6/P มาผลิตเป็นถุงบรรจุภัณฑ์ขนาด $12 \times 12 \text{ cm}^2$ โดยวิธีปิดผนึกร้อนส่วนกันถุงและบรรจุตัวอย่างมะเขือเทศพันธุ์ท้อ จำนวนถุงละ 1 ผล จำนวนสูตรละ 7 ถุง แล้วปิดผนึกที่บริเวณปากถุง จากนั้นนำไปเก็บรักษาในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 11°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 15 วัน ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ เช่น น้ำหนัก สี ของมะเขือเทศตัวอย่างที่บรรจุในถุงที่ผลิตจากฟิล์มพอลิเอทิลีนสูตรต่างๆ และหาค่ามวลไอน้ำกักเก็บที่เหลืออยู่ภายในบรรจุภัณฑ์ของถุงแต่ละสูตร

- มวลไอน้ำที่เก็บ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{น้ำหนักไอน้ำที่พบในบรรจุภัณฑ์ (g)} = \text{น้ำหนักรวมหลังการเก็บรักษา} - (\text{น้ำหนักฝักหลังการเก็บรักษา} + \text{น้ำหนักถุงหลังเก็บรักษา})$$

$$\% \text{ มวลไอน้ำที่เก็บ [36]} = \frac{\text{น้ำหนักไอน้ำที่พบในบรรจุภัณฑ์ (g)}}{\text{ผลต่างของน้ำหนักฝักก่อนและหลังการทดลอง (g)}} \times 100$$

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในการทดลองได้มีการผสมพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับซีโอไลต์เอ และมีการเติมสารเติมแต่งในปริมาณต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ชื่อย่อที่ใช้แทนสูตรผสมในแต่ละสูตร

รายละเอียดสูตร	ชื่อย่อที่ใช้แทน
LDPE 100%	LD/Z0
LDPE 98% /Zeolite A 2%	LD/Z2
LDPE 96% /Zeolite A 4%	LD/Z4
LDPE 94% /Zeolite A 6%	LD/Z6
LDPE 92% /Zeolite A 8%	LD/Z8
LDPE 96% /Zeolite A 4% /Stearic acid 1%	LD/Z4/S
กLDPE 94% /Zeolite A 6% /Stearic acid 1%	LD/Z6/S
LDPE 96% /Zeolite A 4% /Polyethylene glycol 3%	LD/Z4/P
LDPE 94% /Zeolite A 6% /Polyethylene glycol 3%	LD/Z6/P

4.1 ผลการศึกษาพื้นที่ผิว ขนาด และรูปร่างของซีโอไลต์เอ

4.1.1 ผลจากเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว

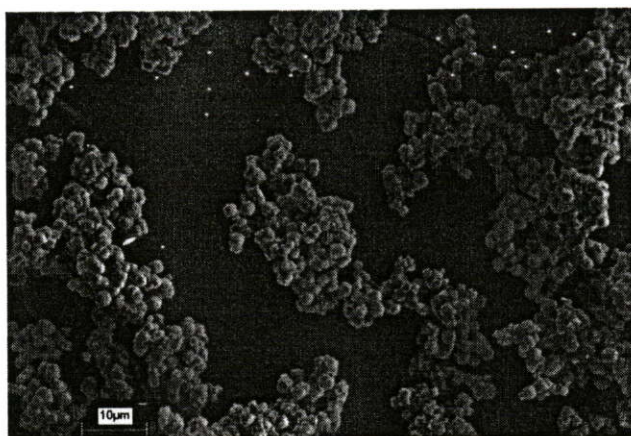
จากการตรวจสอบหาพื้นที่ผิวของซีโอไลต์เอ ผลที่ได้เป็นค่าพื้นที่ผิวที่ได้โดยตรงจากเครื่อง โดยการคำนวณจากสมการ BET ซึ่งพื้นที่ผิวของอนุภาคซีโอไลต์เอมีค่าเท่ากับ $812.18 \text{ m}^2/\text{g}$

4.1.2 ผลจากเครื่อง Mastersizer X

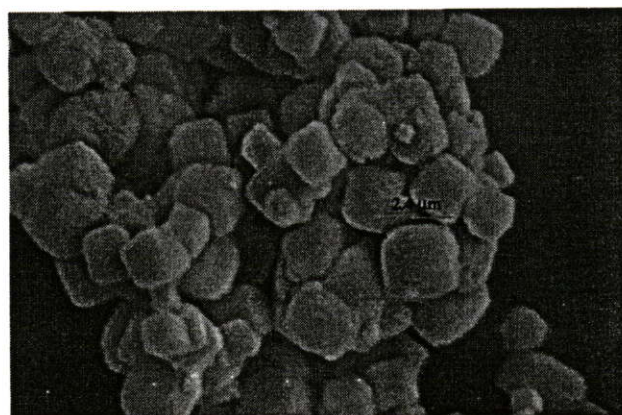
จากการศึกษาโดยใช้เครื่อง Mastersizer X พบว่าค่าเฉลี่ยขนาดของอนุภาคซีโอไลต์เอเท่ากับ 4.11 ไมครอน ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้มากกว่าข้อมูลที่ได้จากทางบริษัท คือ 3.91 ไมครอน เพียงเล็กน้อย เป็นเพราะอาจใช้เทคนิคในการวิเคราะห์แตกต่างกัน

4.1.3 ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากการศึกษาโดยใช้ SEM พบว่าลักษณะของซีโอไลต์เอมีลักษณะคล้ายรูปลูกบาศก์ และมีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเนื่องจากซีโอไลต์เอมีความเป็นขั้วสูง แต่ละอนุภาคจึงพยายามดึงดูดซึ่งกันและกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1



a) กำลังขยาย 1,000 เท่า

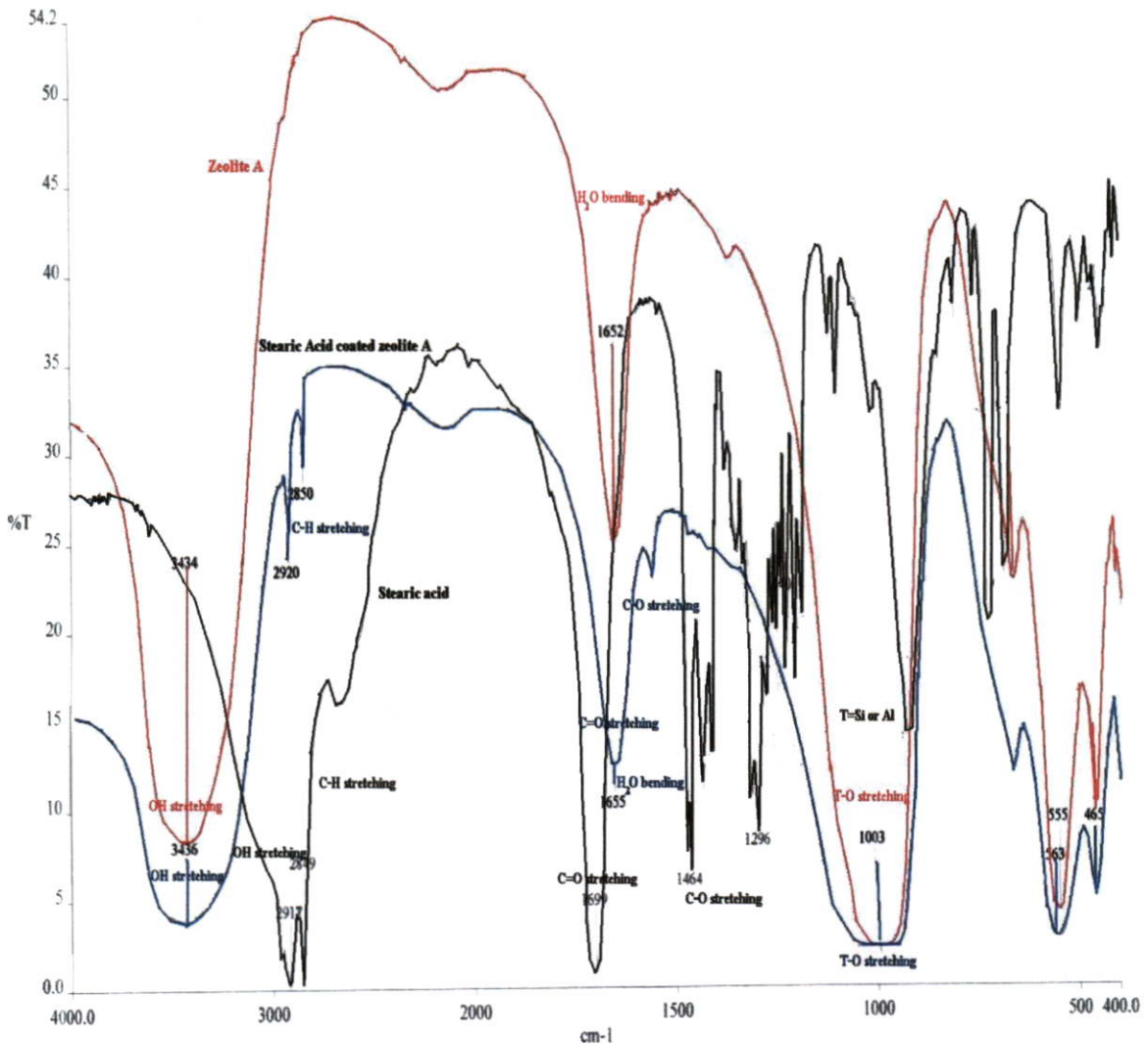


b) กำลังขยาย 5,000 เท่า

รูปที่ 4.1 รูปร่างและลักษณะของซีโอไลต์เอที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย SEM

4.2 ผลการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของซีโอไลต์เอที่ถูกเคลือบผิว

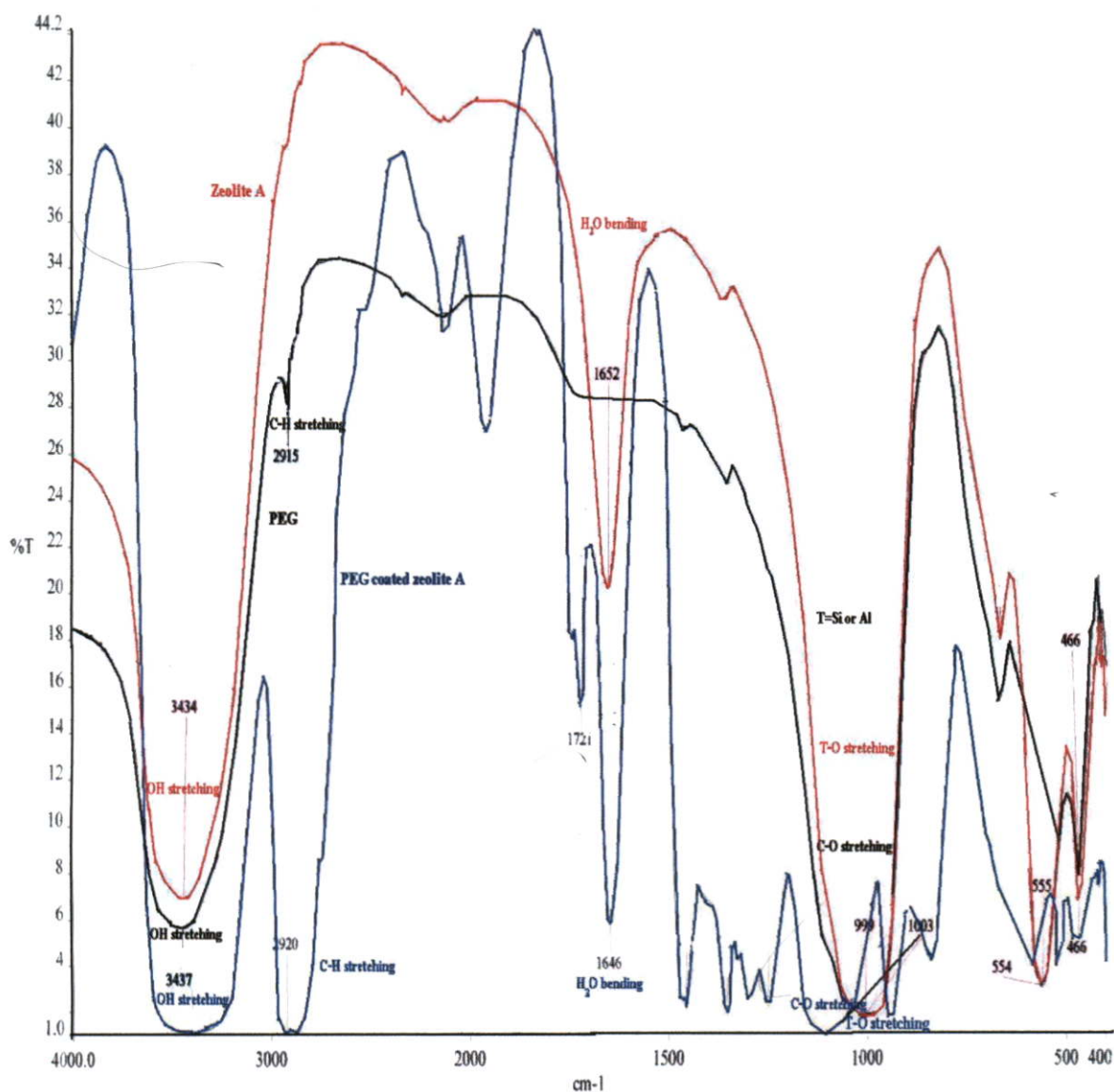
ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์เอ โดยการเคลือบด้วยสารปรับปรุงพื้นผิว 2 ชนิด คือ กรดสเตียริก (Stearic Acids, SA) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) จากการศึกษารายละเอียดการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของซีโอไลต์เอที่ถูกเคลือบผิวโดยใช้เครื่อง FTIR แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันจากเครื่อง FTIR ของซีโอไลต์เอ ซีโอไลต์เอที่ถูกเคลือบด้วย SA และ SA

จากรูปที่ 4.2 พบว่าซีโอไลต์เอแสดงหมู่ที่สำคัญคือ O-H Stretching ที่ตำแหน่ง $3,400\text{ cm}^{-1}$ จากพันธะ Si-OH ของซีโอไลต์เอ หมู่ H_2O bending ที่ตำแหน่ง $1,652\text{ cm}^{-1}$ จากความชื้นในอากาศที่ถูกดูดซับไว้ในโครงสร้างซีโอไลต์เอซึ่งมีความไวต่อการดูดซับความชื้น และหมู่ของ T-O Stretching ซึ่ง T คือ Si หรือ Al ที่ตำแหน่ง $1,000\text{ cm}^{-1}$ [27,48] SA แสดงหมู่ที่สำคัญคือหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) ซึ่งประกอบด้วยหมู่ C=O Stretching ที่ตำแหน่ง $1,700\text{ cm}^{-1}$ และ หมู่ O-H Stretching ที่ตำแหน่ง $3,000\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งพีกทั้งสองจะให้ความเข้มสูง และนอกจากนั้นยังมีหมู่ C-H Stretching ของ CH_3 ที่ตำแหน่ง $2,800 - 2,900\text{ cm}^{-1}$ [49] ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับซีโอไลต์เอที่ถูกเคลือบด้วย SA พบว่าซีโอไลต์เอที่ถูกเคลือบด้วย

SA แสดงหมู่ที่สำคัญของทั้งซีโอไลต์เอและ SA ดังนั้นแสดงว่ามีการเคลือบของ SA อยู่บนผิวของซีโอไลต์เอจริง



รูปที่ 4.3 ผลการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันจากเครื่อง FTIR ของซีโอไลต์เอ ซีโอไลต์เอที่ถูกเคลือบด้วย PEG และ PEG

จากรูปที่ 4.3 พบว่าซีโอไลต์เอแสดงหมู่ที่สำคัญดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วน PEG แสดงหมู่ที่สำคัญคือหมู่ O-H Stretching ที่ตำแหน่ง $3,400\text{ cm}^{-1}$ และหมู่ C-H Stretching ที่ตำแหน่ง $2,900\text{ cm}^{-1}$ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลของซีโอไลต์เอ ที่ถูกเคลือบ PEG พบว่าซีโอไลต์เอที่ถูกเคลือบด้วย PEG พบทั้งหมู่ C-H Stretching ที่มาจาก PEG และหมู่ H₂O Bending ที่มาจากซีโอไลต์เอ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PEG ได้เคลือบอยู่บนผิวของซีโอไลต์เอจริง

4.3 ปริมาณของซีโอไลต์ได้จากสารตัวอย่างและแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

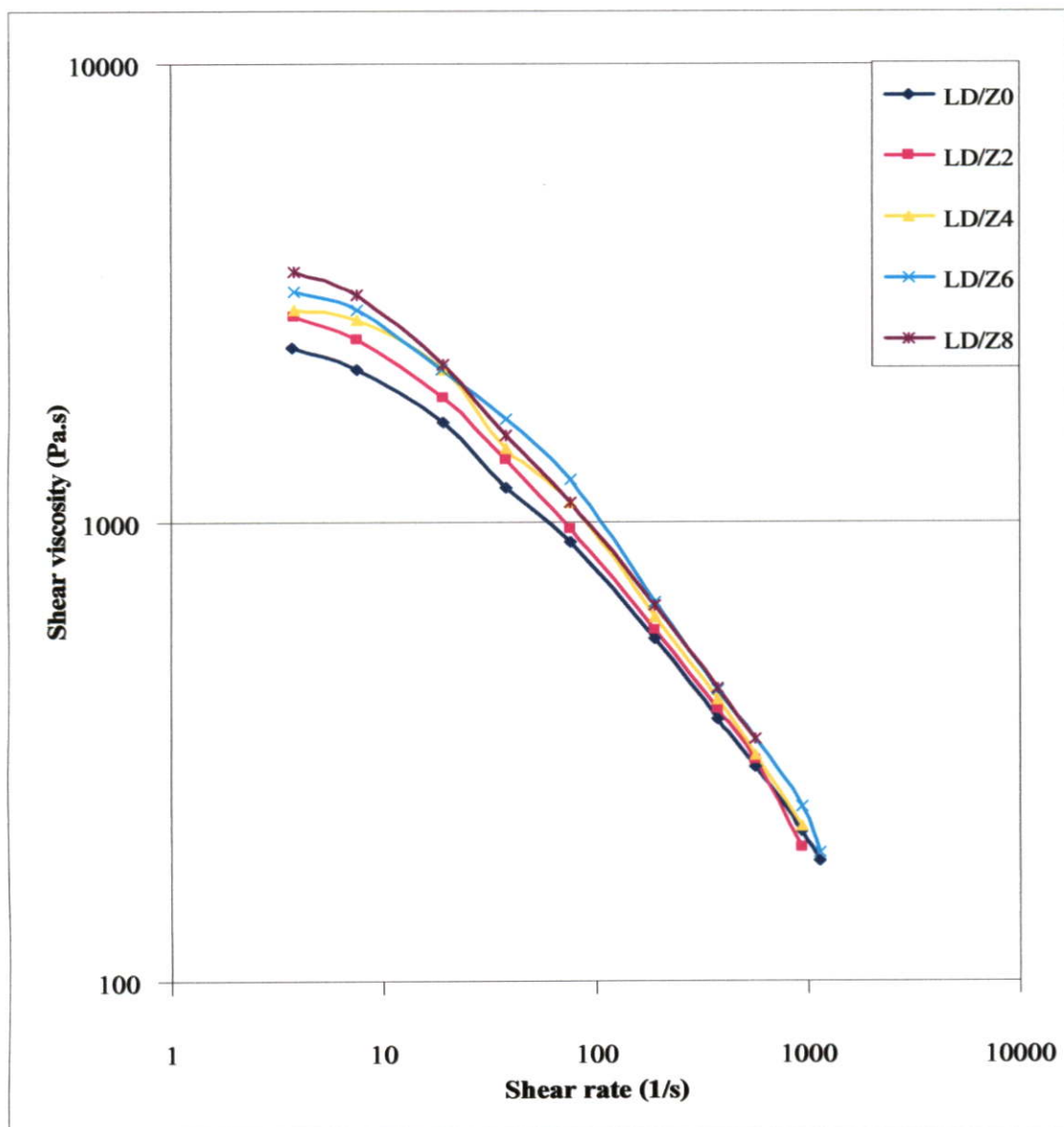
จากผลการตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์ได้จากตัวอย่างที่ผลิตได้ในแต่ละสูตร พบว่าปริมาณของซีโอไลต์เอที่พบหลังจากผสมสูตรมีค่าน้อยกว่าที่กำหนดเล็กน้อย และเมื่อนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า พบว่าปริมาณซีโอไลต์เอที่พบมีค่าน้อยลงไปอีก โดยแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 เป็นผลเนื่องมาจากซีโอไลต์เอเป็นสารที่ดูดซับน้ำได้ดี ดังนั้นปริมาณของซีโอไลต์เอที่หายไปอาจเกิดจากการระเหยออกไปของน้ำที่อยู่บนพื้นผิวของซีโอไลต์เอเนื่องจากความร้อนในระหว่างกระบวนการผลิต และนอกจากนี้ในสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์เอมาก (6-8%) อาจเกิดจากความหนาแน่นที่แตกต่างกันของ LDPE และซีโอไลต์เอ ซึ่งซีโอไลต์เอมีความหนาแน่นที่มากกว่า LDPE ซีโอไลต์เอจึงตกลงสู่ส่วนล่างของกรวยเติมและเคลื่อนไปตามแรงขับเคลื่อนของสกรูได้ยากกว่าพอลิเมอร์ซึ่งมีเม็ดกลมใหญ่กว่าและสามารถหลอมเหลวได้ และในขั้นตอนการเป่าฟิล์มซีโอไลต์เอที่หายไป อาจเนื่องจากบางส่วนของซีโอไลต์เอไปติดอยู่ตามร่องของสกรู และบริเวณวงแหวนปากทางออกของหัวคายท่อฟิล์ม จึงทำให้ปริมาณซีโอไลต์เอที่พบในสารตัวอย่างและแผ่นฟิล์มตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าค่าที่คาดไว้

ตารางที่ 4.2 ปริมาณของซีโอไลต์เอที่พบอยู่ในแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

สูตร	ปริมาณซีโอไลต์เอที่กำหนด (%wt/wt)	ปริมาณซีโอไลต์เอที่พบหลังจากผสมสูตร (%wt/wt)	ปริมาณซีโอไลต์เอที่พบจากฟิล์ม (%wt/wt)
LD/Z0	0	0.00	0.00
LD/Z2	2	1.98	1.91
LD/Z4	4	3.61	3.27
LD/Z6	6	5.40	4.70
LD/Z8	8	5.61	4.00
LD/Z4/S	4	3.89	3.50
LD/Z6/S	6	4.98	4.27
LD/Z4/P	4	3.05	2.48
LD/Z6/P	6	5.37	4.66

4.4 ผลการศึกษาสมบัติการไหล

ผลการทดสอบสามารถแสดงค่าความหนืดเฉือนของพอลิเมอร์ในสูตรผสมต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5

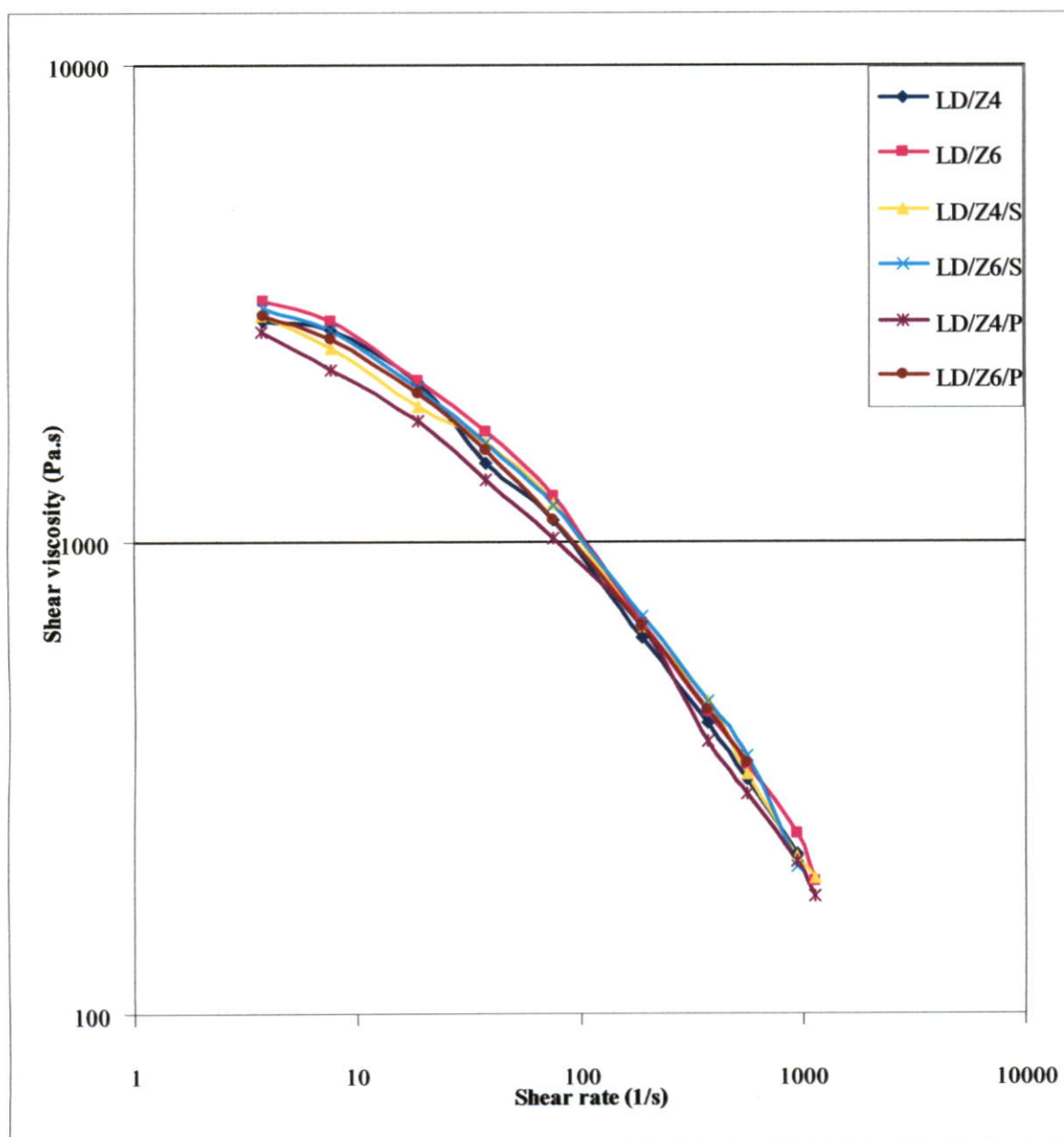


รูปที่ 4.4 ค่าความหนืดเฉือนของพอลิเมอร์ที่มีปริมาณซีโอไลต์เอต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าพอลิเมอร์ทุกสูตรเมื่อให้อัตราความเครียดเฉือนมากขึ้นทำให้ความหนืดเฉือนของระบบมีค่าลดลง ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการไหลที่เป็นแบบ Pseudoplastic คือเมื่อให้แรงเฉือนสายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดการคลายตัว (Chain Disentanglement) ได้มากขึ้น ทำให้การเกี่ยวพันกันของสาย

โซ่ลดลง สายโซ่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระตามแนวแรงกระทำได้ดีขึ้น ทำให้ระบบมีความหนืดลดลง

จากรูปที่ 4.4 เมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์เอ พบว่าความหนืดของระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นอนุภาคที่เป็นของแข็ง เมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรงกระทำซีโอไลต์เอไม่สามารถเปลี่ยนรูปได้เหมือนพอลิเมอร์จึงเกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากขึ้นจึงต้องใช้แรงกระทำมากขึ้นในการขยับสายโซ่และจัดตัวตามแนวแรงกระทำ ซึ่งเป็นผลให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [50-53]



รูปที่ 4.5 ค่าความหนืดเฉือนของพอลิเมอร์ผสมซีโอไลต์เอที่มีและไม่มี การเคลือบผิวด้วย SA และ PEG

จากรูปที่ 4.5 เป็นการแสดงผลการเคลือบผิวของซีโอไลต์เอด้วย SA 1% และ PEG 3% ที่ปริมาณซีโอไลต์ 4 และ 6% พบว่า ความหนืดของระบบจะลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการเคลือบผิวของซีโอไลต์เอด้วย SA เนื่องจาก SA อาจเข้าไปช่วยทำให้ซีโอไลต์เอที่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนเกิดการแตกตัวง่ายขึ้น เพราะ SA ทำหน้าที่ช่วยกระจายตัว (Dispersing Agent) เนื่องจากโครงสร้างที่มีหมู่ปลายข้างหนึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนซึ่งไม่มีขั้วและอีกข้างหนึ่งเป็นหมู่คาร์บอกซิลิกซึ่งมีขั้ว เมื่อมีการเคลือบลงบนผิวของซีโอไลต์เอ โมเลกุลของ SA ข้างที่มีขั้วจะหันเข้าหาอนุภาคของซีโอไลต์เอ และหันด้านที่ไม่มีขั้วออกไปอีกด้านหนึ่ง ส่งผลให้อนุภาคของซีโอไลต์เอกระจายตัวได้ดีขึ้น ทำให้อนุภาคของซีโอไลต์เอไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ได้น้อยลง ความหนืดของระบบจึงลดลง [51] และจากผลของการเคลือบผิวด้วย PEG มีผลทำให้ความหนืดของระบบลดลงอีกเล็กน้อย เนื่องจากซีโอไลต์เออาจเกิดอันตรกิริยากับ PEG บริเวณส่วนที่มีขั้วของซีโอไลต์เอกับโมเลกุล PEG [27] ลดการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนของซีโอไลต์เอ ทำให้ซีโอไลต์เอมีแนวโน้มแตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวมากขึ้น ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ได้น้อยลง และนอกจากนี้ PEG ยังมีสมบัติเป็นพลาสติกไซเซอร์ซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลของ LDPE เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ผลของความหนืดของระบบลดลงอีกเล็กน้อย

ค่าความเป็น Pseudoplastic (Pseudoplasticity) สามารถหาได้จากค่า Power law index (n) ซึ่งหาได้จากสมการ Power law

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

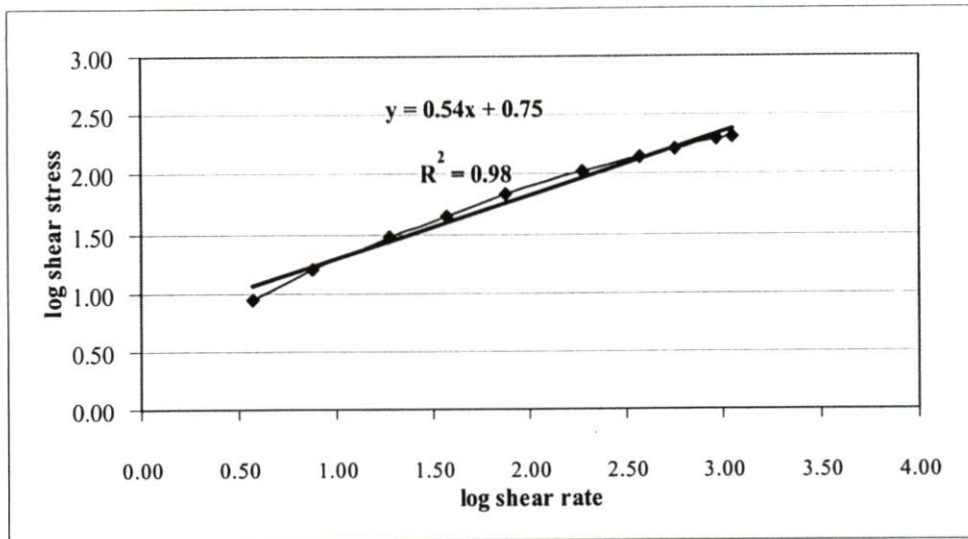
เมื่อ τ = ความเค้นเฉือน (Shear Stress)

$\dot{\gamma}$ = อัตราความเครียดเฉือน (Shear Strain Rate)

n = Power law index

K = Consistency index

ค่า Pseudoplasticity สามารถดูได้จากค่า n ถ้าค่า n เข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น หมายความว่า สารตัวอย่างมีความเป็น Pseudoplastic มากขึ้น [54] โดยค่า n หาได้จากการเขียนกราฟระหว่างค่า log shear stress กับ log shear rate ดังตัวอย่างรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง log shear stress กับ log shear rate ของพอลิเมอร์ตัวอย่าง LD/Z0

จากกราฟค่า n คือความชันของกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.54 ดังนั้นค่าความเป็น Pseudoplastic ของ LDPE ที่ไม่มีการเติมซีโอโลดเอน (LD/Z0) มีค่าเท่ากับ 0.54 ซึ่งในพอลิเมอร์ในสูตรผสมอื่นๆ ทำได้โดยวิธีเดียวกัน (ข้อมูลดิบแสดงในภาคผนวก ก) โดยค่าความเป็น Pseudoplastic ของพอลิเมอร์ในสูตรอื่นแสดงตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่า Power law index ของพอลิเมอร์ในสูตรผสมต่างๆ

สูตร	n
LD/Z0	0.54
LD/Z2	0.51
LD/Z4	0.51
LD/Z6	0.49
LD/Z8	0.51
LD/Z4/P	0.51
LD/Z6/P	0.52
LD/Z4/S	0.51
LD/Z6/S	0.55

จากตารางที่ 4.3 พบค่า n มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.49-0.55 แสดงว่าการเติมซีโอไลต์ลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่ทำให้พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงเพียงแต่ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเท่านั้น เนื่องจากซีโอไลต์และพอลิเมอร์ไม่มีแรงกระทำระหว่างกัน ซึ่งซีโอไลต์ไม่มีขั้วและพอลิเมอร์ไม่มีขั้ว และรูปร่างของซีโอไลต์เอคังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ที่มีลักษณะเป็นลูกบาศก์มุมก่อนข้างมนจึงไม่เหนียวน่าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงของสายโซ่โมเลกุล (Molecular Orientation)

4.5 ผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มในแต่ละสูตร

4.5.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของฟิล์มตัวอย่าง

จากการศึกษาสี ความขุ่น ความหนา และความกว้างของฟิล์มที่ผลิตได้ในแต่ละสูตร พบว่าแผ่นฟิล์มที่ไม่มีซีโอไลต์เอมีสีที่ขาวใสมากกว่าสูตรที่มีซีโอไลต์เอ ซึ่งซีโอไลต์เป็นอนุภาคที่มีสีขาวจึงส่งผลให้แผ่นฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอมีความขุ่นเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้นความขุ่นของฟิล์มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยทั้งนี้อาจมองเห็นได้ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการใช้ซีโอไลต์เอในปริมาณน้อย (0-8%/wt) ส่วนผลของความหนาและความกว้างของฟิล์มที่ผลิตได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความหนาและความกว้างของฟิล์มที่ผลิตได้ในสูตรต่างๆ

สูตรผสม	ความหนาเฉลี่ย (μm)	ความกว้างเฉลี่ยของท่อฟิล์มเมื่อถูกรีดให้แบนราบ (cm)
LD/Z0	71.8 ± 4.0	12.8 ± 3.0
LD/Z2	57.5 ± 10.0	11.8 ± 2.0
LD/Z4	54.5 ± 5.0	11.5 ± 4.0
LD/Z6	38.4 ± 5.0	11.4 ± 3.0
LD/Z8	70.0 ± 10.0	11.0 ± 3.0
LD/Z4/P	73.5 ± 7.0	11.8 ± 3.0
LD/Z6/P	71.4 ± 8.0	11.0 ± 3.0
LD/Z4/S	70.0 ± 10.0	11.6 ± 4.0
LD/Z6/S	68.4 ± 10.0	11.7 ± 2.0

จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อปริมาณซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มมีแนวโน้มลดลงจนถึงเมื่อเติมซีโอไลต์เอปริมาณ 6 % (LD/Z6) เป็นผลเนื่องมาจากผลของสมบัติการไหล คือ เมื่อปริมาณซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้นความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ไหลอมเหลวที่ออกจากหัวคายของเครื่องเป่าฟิล์ม

ไหลออกได้ยากขึ้นพอลิเมอร์หลอมเหลวออกมาได้น้อยลง (จากรูปที่ 4.4) เมื่อใช้สภาวะในการผลิตคงเดิม จึงเป็นผลให้ฟิล์มตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการเป่าฟิล์มมีความหนาลดลง แต่เมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอปรีมาณ 8 % (LD/Z8) ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นซึ่งมีความหนาใกล้เคียงกับสูตร LD/Z0 ซึ่งเป็นผลมาจากในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มสูตร LD/Z8 ขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากมีปริมาณซีโอไลต์มากทำให้เกิดฟองอากาศเกิดขึ้นมาก และความหนืดของสูตรนี้มีค่ามากด้วยทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวออกมาได้ช้า จึงต้องปรับลดความเร็วในการดึงท่อฟิล์มเพื่อผลิตฟิล์มให้มีความสมบูรณ์ ฟิล์มในสูตรนี้จึงมีความหนามากกว่าใน LD/Z6 เมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวเมื่อใช้ปริมาณซีโอไลต์ 4 และ 6% ด้วย SA 1% หรือ PEG 3 % พบว่าฟิล์มที่ปรับปรุงมีความหนามากกว่าสูตรที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งอาจมีผลเนื่องจากผลจากสมบัติการไหล (รูปที่ 4.5) โดยในสูตรที่มีการปรับปรุงพื้นผิวมีความหนืดน้อยกว่าสูตรที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวเล็กน้อย ทำให้ขณะขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ไหลออกมาได้มากกว่า ฟิล์มจึงหนาขึ้นเมื่อใช้ SA หรือ PEG ส่วนจากการวัดความกว้างของท่อฟิล์ม พบว่าเมื่อท่อฟิล์มถูกรีดให้แบนราบขณะม้วนเก็บฟิล์มความกว้างของฟิล์มลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความหนืดของระบบเพิ่มขึ้นสารออกมามีได้น้อย เมื่อใช้แรงลมเป่าเท่ากันฟิล์มเป่าขยายได้น้อยลงและมีความบางลดลง จะเห็นได้ว่าความหนืดของระบบมีผลต่อทั้งความกว้างและความหนาของท่อฟิล์ม และจากความหนาที่ไม่เท่ากันของฟิล์มที่ผลิตได้ สามารถส่งผลกระทบต่อสมบัติบางประการของฟิล์ม เช่น สมบัติการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซ เป็นต้น แต่ถ้าจะทำให้ฟิล์มที่ผลิตได้มีความหนาที่เท่ากันนั้นในทุกสูตรต้องทำการปรับสภาวะการผลิต เช่น อุณหภูมิในการผลิต และอัตราการดึงรีดเก็บม้วนฟิล์ม ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของโมเลกุล และอาจส่งผลไปถึงสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลที่ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพยายามควบคุมทั้งอุณหภูมิในการผลิต และอัตราการรีดเก็บม้วนฟิล์มให้คงที่

4.5.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

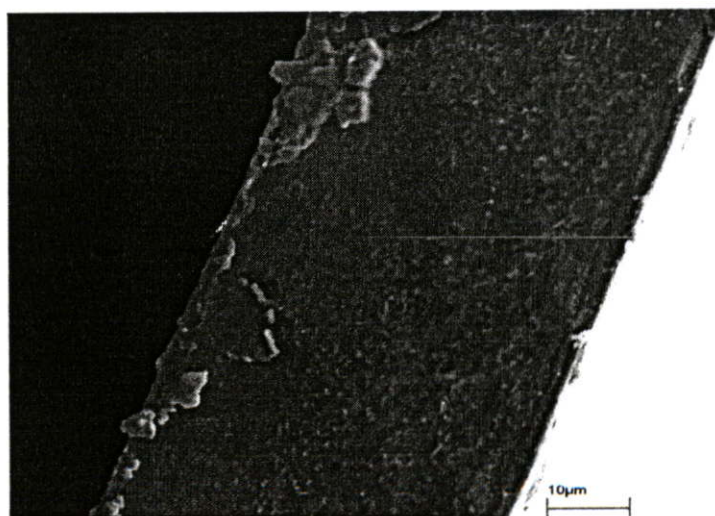
จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มตัวอย่างโดยใช้เครื่อง DSC แสดงผลการตรวจวัดได้ดังจากตารางที่ 4.5 พบว่า เมื่อปริมาณซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น อุณหภูมิในการหลอมผลึก (T_m) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ใกล้เคียงกัน แสดงว่าการเติมซีโอไลต์เอลงใน LDPE ไม่มีผลต่อความสมบูรณ์และขนาดผลึกของพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงเป็นผลให้ค่า T_m ไม่เปลี่ยนแปลง และนอกจากนี้ %Crystallinity มีค่าคงที่ แสดงว่าซีโอไลต์เอไม่ได้ไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึก และการใช้ SA และ PEG ไม่ส่งผลต่อค่า T_m และ %Crystallinity เช่นกัน

ตาราง 4.5 สมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

สูตร	ปริมาณซีโอโลดเอน ที่แท้จริง (%wt)	ΔH_f จากเครื่อง (J/g)	T_m	%Crystallinity
LD/Z0	0.00	44.38	111.6	15.15
LD/Z2	1.91	44.48	111.6	15.48
LD/Z4	3.27	45.46	110.5	16.04
LD/Z6	4.70	47.00	111.3	16.83
LD/Z8	4.00	52.16	110.8	18.54
LD/Z4/S	3.50	45.53	111.5	16.10
LD/Z6/S	4.27	45.78	110.9	16.32
LD/Z4/P	2.48	50.24	110.4	17.58
LD/Z6/P	4.66	43.13	111.4	15.44

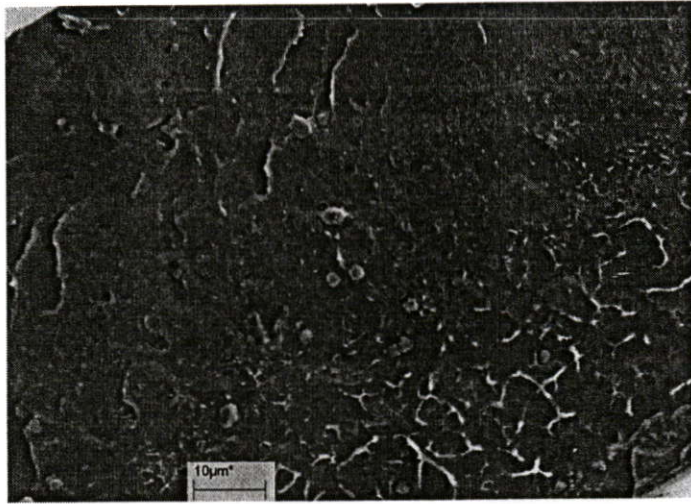
4.5.3 ผลการศึกษาการกระจายตัวของซีโอโลดเอนในแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สามารถพิจารณาการกระจายตัวของซีโอโลดเอนในเมทริกซ์ของ LDPE จากแผ่นฟิล์มตัวอย่าง ซึ่งผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 4.7

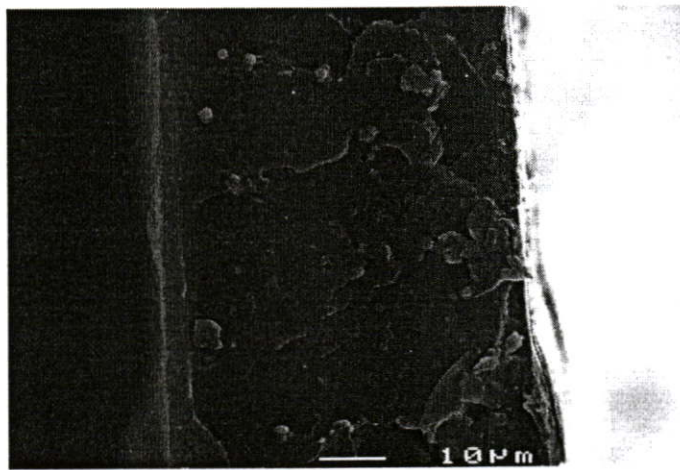


a) LD/Z0

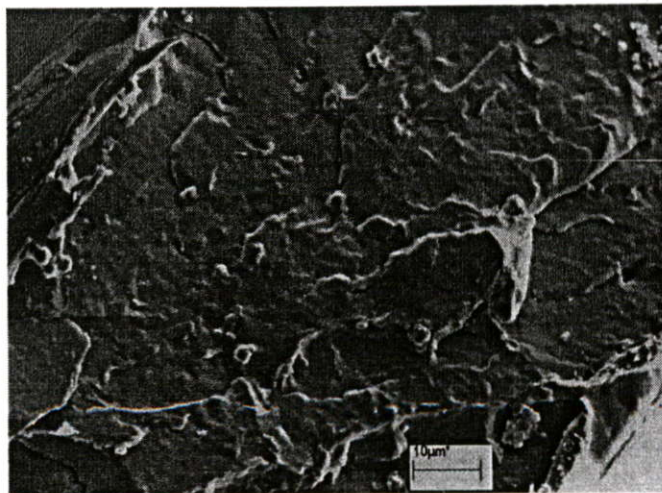
รูปที่ 4.7 พื้นผิวที่แตกหักของฟิล์มตัวอย่างในสูตรต่างๆ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



b) LD/Z2

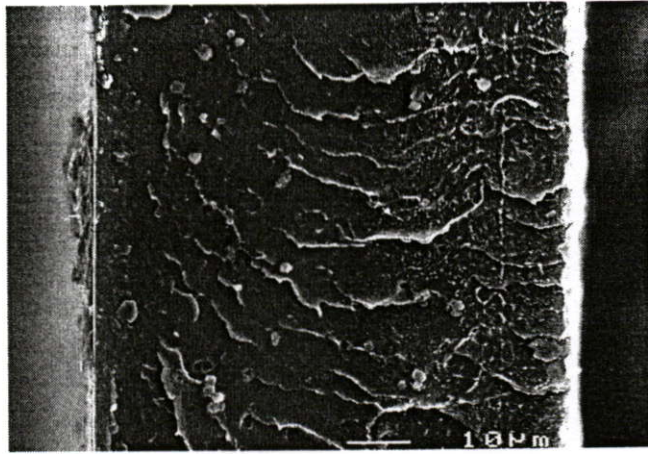


c) LD/Z4

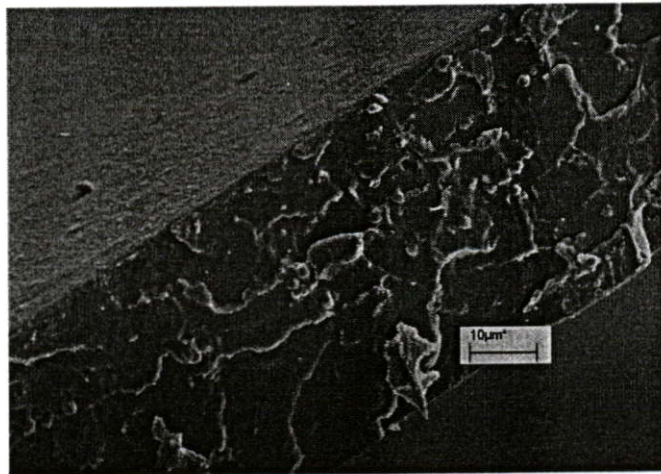


d) LD/Z4/P

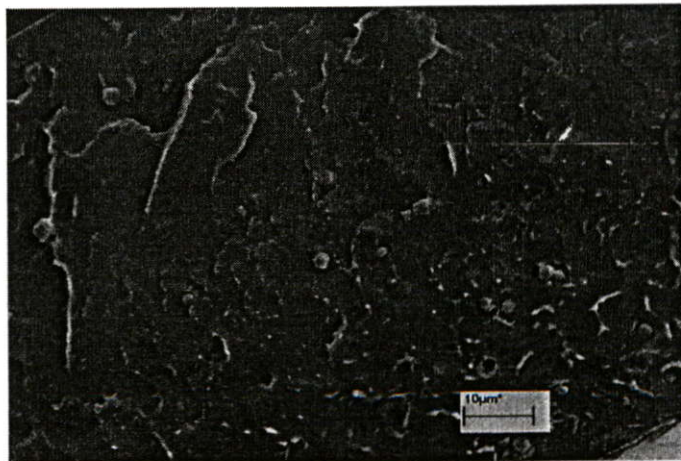
รูปที่ 4.7 (ต่อ)



e) LD/Z4/S

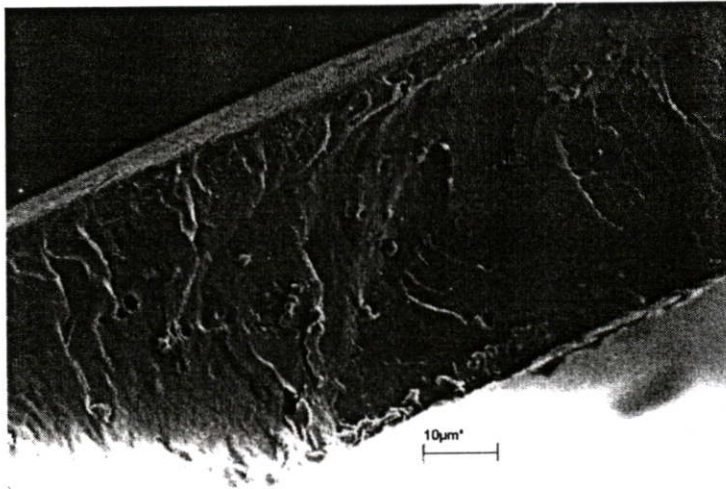


f) LD/Z6

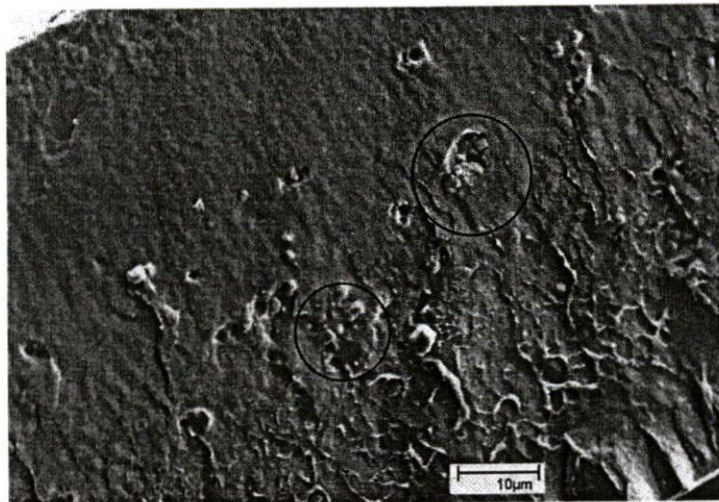


g) LD/Z6/P

รูปที่ 4.7 (ต่อ)



h) LD/Z6/S

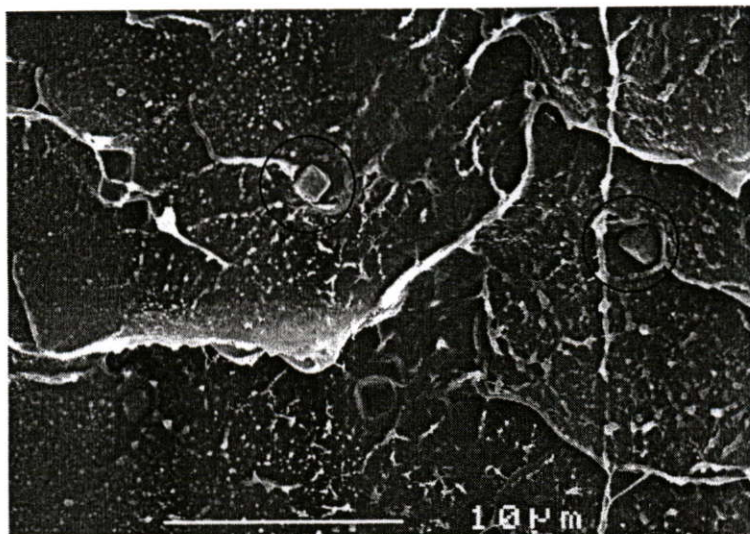


i) LD/Z8

รูปที่ 4.7 (ต่อ)

จากรูปที่ 4.7 (a-i) เป็นการแสดงสัณฐานวิทยาที่ได้จากการแตกหักพื้นผิวของฟิล์ม LDPE ที่ผสมซีโอไลต์เอในปริมาณต่าง ๆ โดยใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า ในทุกๆ รูป โดยจากรูปพบว่าเมื่อเติมซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น (0-8%) จะพบจำนวนอนุภาคและกลุ่มก้อนของซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้นหรือพบช่องว่างที่แสดงถึงตำแหน่งที่อนุภาคซีโอไลต์เอเคยอยู่มาก่อนที่จะแตกหัก โดยอนุภาคของซีโอไลต์เอนั้นแตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว (Good Dispersion) และกระจายตัวได้ดี (Good Distribution) ในฟิล์มตัวอย่างสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์ 0-6% เนื่องจากปริมาณซีโอไลต์เอมีปริมาณน้อย แต่เมื่อมีปริมาณซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้นถึง 8% อนุภาคซีโอไลต์เอบางส่วนมีแนวโน้มเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 4.7 (i) ทั้งนี้อาจเนื่องจากความเป็นขั้วซีโอไลต์เอ ซึ่งเมื่อมีปริมาณซีโอไลต์เอมากขึ้นจึงมีโอกาสที่แต่ละ

อนุภาคจะเหนียวนำไปเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบสูตรที่มีและไม่มี การปรับปรุงพื้นผิว (c-g) พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์เอด้วย PEG (d,g) และ SA (e,h) ซีโอไลต์เอมีการกระจายตัวพอๆ กัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณซีโอไลต์เอที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังมีปริมาณที่น้อย ซึ่งยังไม่มากพอที่อนุภาคซีโอไลต์เอเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Aggregate)



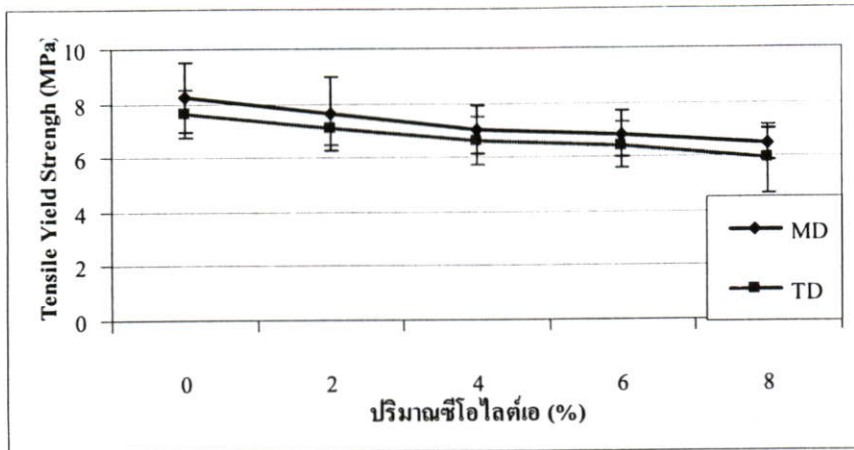
รูปที่ 4.8 พื้นผิวที่แตกหักของฟิล์มตัวอย่างแสดงรอยแยกระหว่างวัฏภาคของซีโอไลต์เอกับ LDPE ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

รอยแยกระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์เมตริกซ์ LDPE กับซีโอไลต์เอแสดงได้รูปที่ 4.8 ซึ่งเกิดจากความเปราะบางที่แตกต่างกันของวัฏภาคทั้งสอง ทำให้เกิดเป็นช่องว่างขึ้นระหว่างวัฏภาคทั้งสองเป็นจุดบกพร่องบนพื้นผิวของวัฏภาคทั้งสอง โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นดังกล่าวอาจส่งผลถึงสมบัติเชิงกลของฟิล์มตัวอย่าง และทำให้มีการซึมผ่านไอน้ำได้เพิ่มขึ้นด้วย

4.5.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

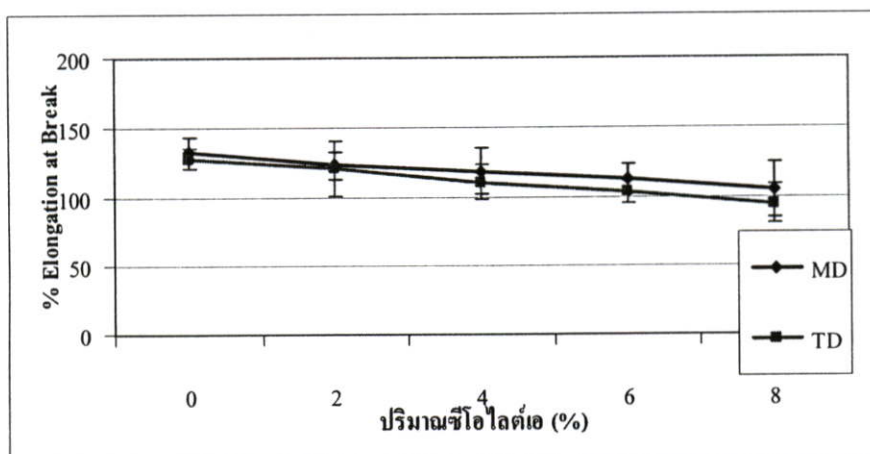
ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มตัวอย่างในทิศทางแนวเครื่องจักร (Machine Direction, MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse Direction, TD) แสดงได้ดังรูปที่ 4.9-4.16

จากรูปที่ 4.9 พบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นสารอนินทรีย์ที่มีขั้ว เมื่อถูกผสมลงใน LDPE ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว จะไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคทั้งสอง โดยอาจพิจารณาได้จากผลการทดลองในส่วนของสถานศึกษาของฟิล์มตัวอย่าง ซึ่งทำให้เกิดเป็นช่องว่างระหว่างวัฏภาคเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน (รูปที่ 4.8) ฟิล์มตัวอย่างจึงมีความสามารถในการต้านทานแรงดึงได้ลดลง

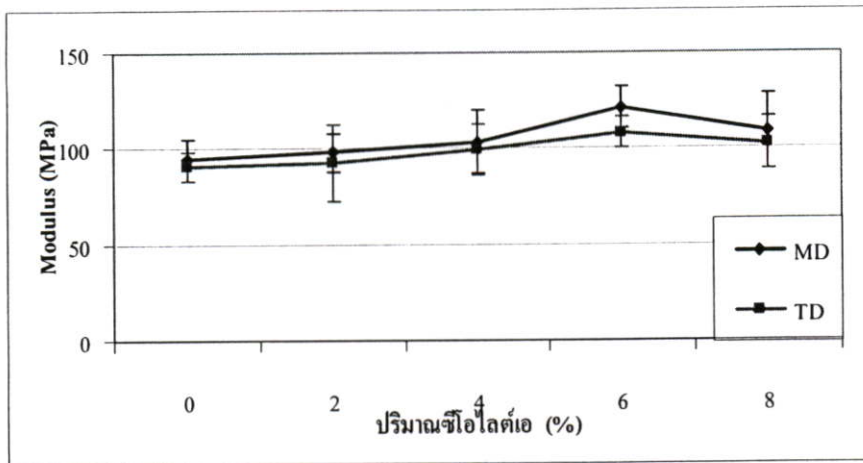


รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงดึงที่จุดครากของฟิล์มที่มีปริมาณซีโอโลต์เอเพิ่มขึ้น

ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.10) มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซีโอโลต์เอเพิ่มขึ้น เพราะซีโอโลต์เป็นอนุภาคของแข็งซึ่งทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ลดน้อยลง และอาจเกิดจากช่องว่างที่เกิดขึ้นบนพื้นผิววัฏภาคทั้งสอง ซึ่งเสมือนว่าเป็นจุดบกพร่องในแผ่นฟิล์ม ตัวอย่าง โดยให้ผลคล้ายกับที่พบในฟิล์มคอมโพสิตพอลิพรอพิลีน (PP) ผสมกับซีโอโลต์ในงานวิจัยที่ผ่านมา [27, 28, 55]

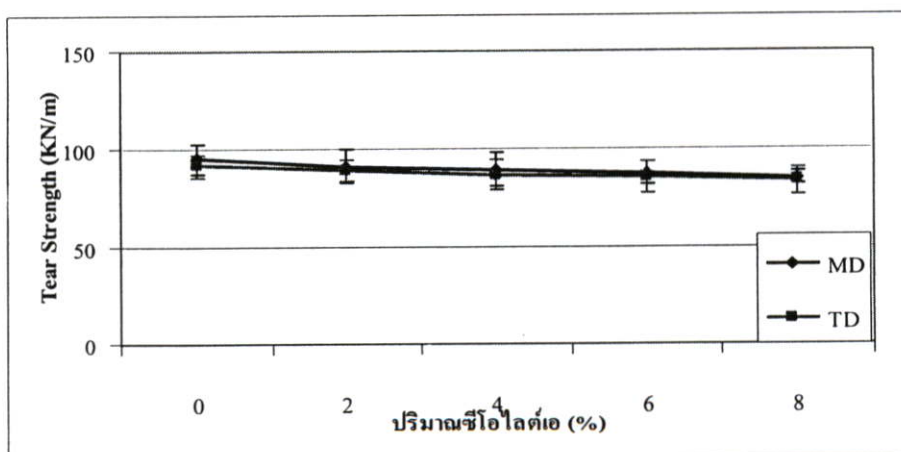


รูปที่ 4.10 ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มที่มีปริมาณซีโอโลต์เอเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.11 ค่ามอดุลัสของแผ่นฟิล์มที่มีปริมาณซีโอโลต์เอเพิ่มขึ้น

ค่ามอดุลัสของแผ่นฟิล์มตัวอย่างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสัดส่วนของซีโอโลต์เอเพิ่มขึ้นจนถึง 6% เนื่องจากการเติมซีโอโลต์เอซึ่งเป็นอนุภาคที่แข็งแรงที่จะเปลี่ยนรูปเข้าไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้ต้องใช้แรงกระทำเพิ่มขึ้นในการขยับสายโซ่ ดังเช่นในงานวิจัยของ Liauw C.M. และคณะ [56] ที่มีการเติมแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) ในพอลิพรอพิลีน (PP) แต่นอกจากนี้พบว่า มอดุลัสมีค่าลดลงที่ปริมาณซีโอโลต์เอ 8% อาจเนื่องมาจากปริมาณซีโอโลต์เอที่พบในแผ่นฟิล์มในสูตรนี้มีค่าน้อยกว่าที่ปริมาณซีโอโลต์เอ 6% โดยปริมาณซีโอโลต์เอที่มีพบในแผ่นฟิล์มดูได้จากตารางที่ 4.2 ซึ่งในงานวิจัยค่าสมบัติเชิงกลต่างๆอาจมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากปริมาณซีโอโลต์เอที่แท้จริงที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณที่น้อย (0-6%)

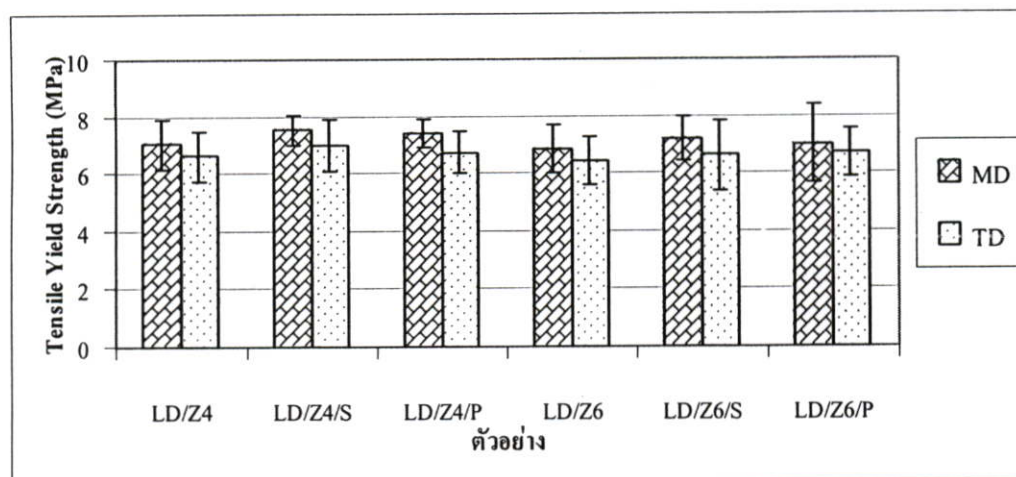


รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มที่มีปริมาณซีโอโลต์เอเพิ่มขึ้น

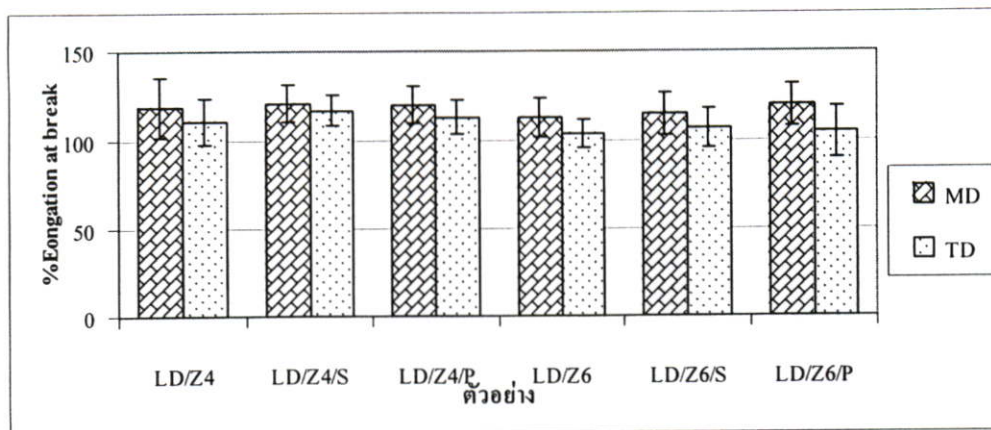
ค่าความความแข็งแรงตึง (รูปที่ 4.12) มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการทดสอบความแข็งแรงตึงของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง จากการตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนกซึ่งจะทำให้เกิดความเค้นสะสม (Stress concentration) ที่บริเวณมุมรอยเว้าของชิ้นงาน เมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นงานจะเกิดการฉีกขาดได้ง่ายตรงบริเวณรอยเว้านี้ และการเพิ่มปริมาณซีโอไลต์เอลงในพอลิเมอร์เมตริกซ์เป็นการเพิ่มปริมาณอนุภาคของแข็งในชิ้นงาน และเป็นการเพิ่มจุดสะสมความเค้นบนชิ้นงาน จึงทำให้ความแข็งแรงตึงลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์เอลเพิ่มขึ้น

จากการทดสอบฟิล์มใน 2 ทิศทางคือ ในทิศทางแนวเครื่องจักร (Machine Direction, MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse Direction, TD) พบว่าสมบัติเชิงกลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองทิศทาง โดยในทิศทาง MD มีสมบัติเชิงกลโดยรวมมากกว่าในทิศทาง TD เล็กน้อย เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown Film Process) ในการขึ้นรูปฟิล์มมีการให้แรงแก่ฟิล์มที่ผลิตได้ทั้งสองทิศทาง คือ แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มม้วนเก็บในแนว MD และแรงลมที่ใช้ในการเป่าขยายท่อฟิล์มในแนว TD ทำให้มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของ LDPE ทั้งสองทิศ โดยแรงที่ใช้ในการดึงม้วนในแนว MD อาจมีมากกว่าแรงที่ใช้ในการเป่าขยายในแนว TD จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทาง MD ได้มากกว่าจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลในทิศทาง MD มากกว่าในทิศทาง TD เล็กน้อย

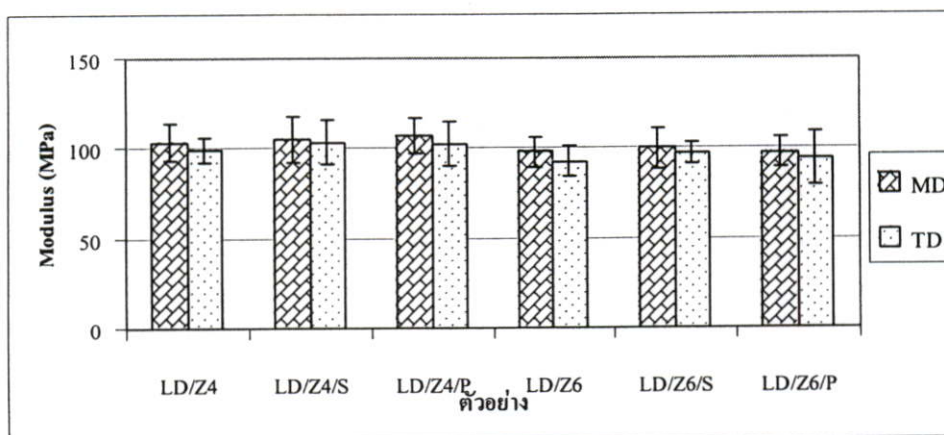
เมื่อปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์เอโดยการเคลือบผิวด้วย SA 1% และ PEG 3% (รูปที่ 4.13 - 4.16) พบว่าไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ผสมซีโอไลต์เอ (4 และ 6%) เนื่องจากอาจเป็นเพราะซีโอไลต์เอที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณน้อยซึ่งมีการกระจายตัวค่อนข้างดีอยู่แล้วในพอลิเมอร์เมตริกซ์ (รูปที่ 4.8) จึงส่งผลให้ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงด้านสมบัติเชิงกลที่ได้ชัดเจน



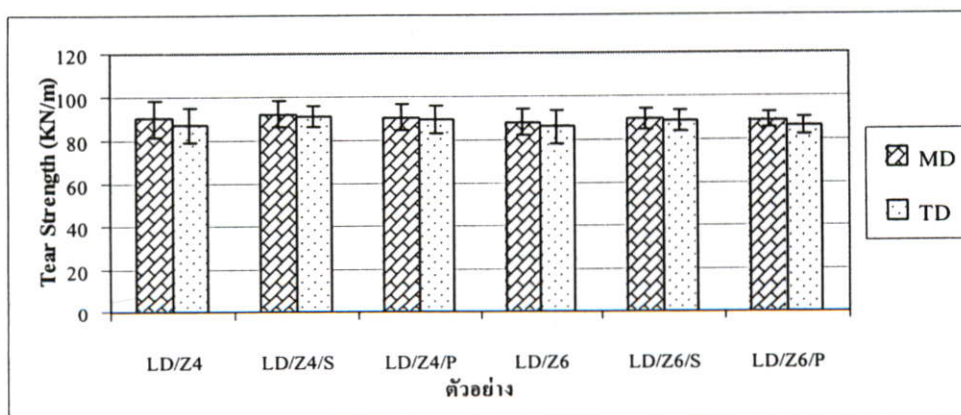
รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงตึง ณ จุดครากของแผ่นฟิล์มที่ซีโอไลต์เอได้รับและไม่ได้รับการเคลือบผิว



รูปที่ 4.14 ค่าร้อยละการคึงยืด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ซีโอดีเอได้รับและไม่ได้รับการเคลือบผิว



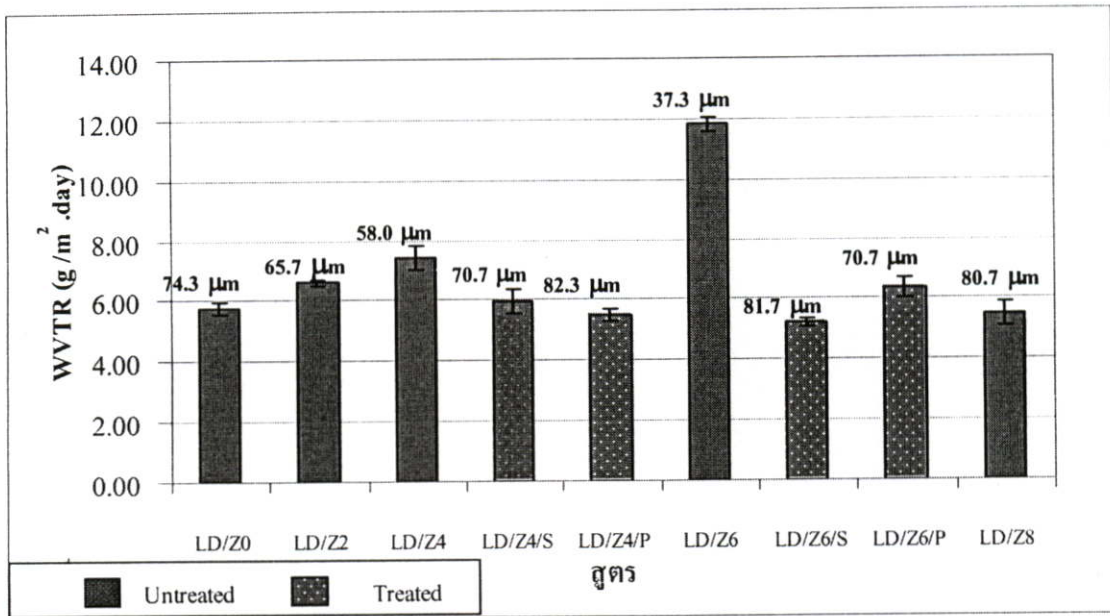
รูปที่ 4.15 ค่ามอดุลัสของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ซีโอดีเอได้รับและไม่ได้รับการเคลือบผิว



รูปที่ 4.16 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ซีโอดีเอได้รับและไม่ได้รับการเคลือบผิว

4.5.5 การศึกษาการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง

สมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และ ตารางที่ 4.6 โดยจากค่า อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate, WVTR) สามารถนำไปคำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ WVP (Water Vapor Permeability Performance, WVP) ของฟิล์มตัวอย่าง ได้จากการนำเอาความหนาของฟิล์มตัวอย่างคูณกับค่า WVTR ที่วัดได้ (ข้อมูลที่ได้นำไปแสดงไว้ในตารางภาคผนวก ก)



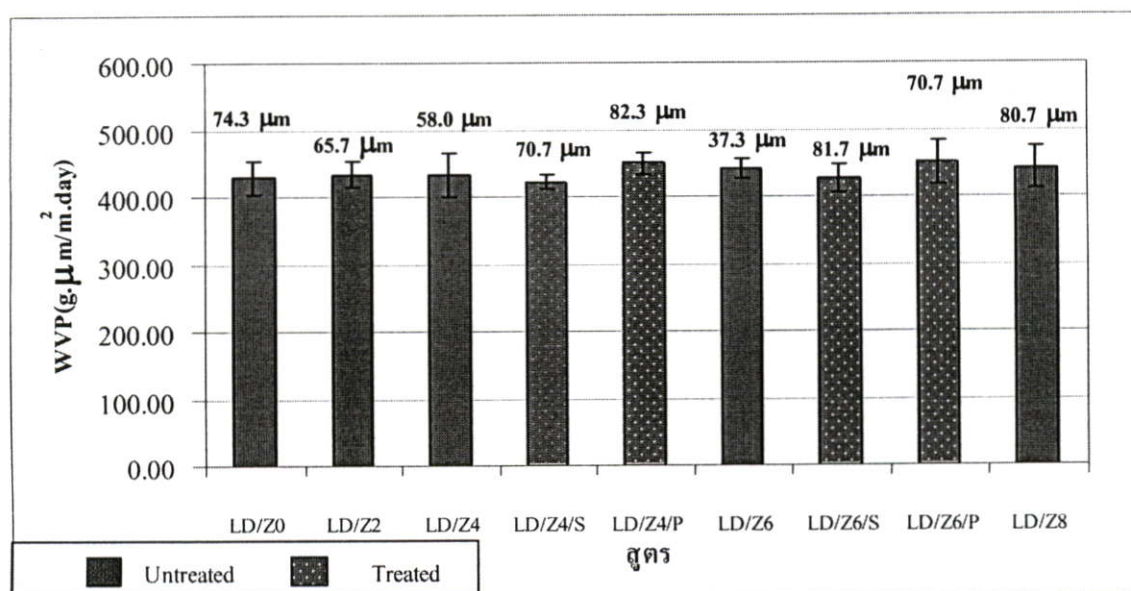
รูปที่ 4.17 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มในสูตรต่างๆ

ความเป็นไปได้ในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเกิดเนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้ [13] คือ

1. ไอน้ำสามารถซึมผ่านส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ของพอลิเมอร์
2. ไอน้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์เอ
3. ไอน้ำสามารถซึมผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ LDPE และ ซีโอไลต์เอ

โดยในงานวิจัยนี้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่าฟิล์มตัวอย่างทุกสูตรมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน (จากตารางที่ 4.5) เพราะฉะนั้นส่วนที่เป็นอสัณฐานน่าจะใกล้เคียงกันด้วย ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านไอน้ำในงานวิจัยนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ 2 และ 3 นอกจากนี้ยังมีผลของความหนาของฟิล์มซึ่งแต่ละตัวอย่างมีความหนาไม่เท่ากันซึ่งเป็นปัจจัยในการพิจารณาค่า WVTR ด้วย โดยจากรูปที่ 4.17 พบว่า WVTR ของฟิล์มตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น และสูงสุดที่ 6% ซึ่งน่าจะเป็นเพราะปัจจัยที่ 2 และ 3 เพิ่มขึ้นเพราะจำนวนอนุภาคของซีโอไลต์เอที่มากขึ้น และ

เป็นผลเนื่องจากฟิล์มมีความหนาลดลงจากสูตรที่มีซีโอโลต์ 0-6% ซึ่งแสดงด้วยตัวเลขที่อยู่บนกราฟแท่งของฟิล์มแต่ละสูตรในรูปที่ 4.17 ค่าความหนาที่แสดงเป็นความหนาเฉลี่ยของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ถูกนำมาทดสอบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (ค่าความหนาเป็นการเลือกฟิล์มมาทดสอบบริเวณตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งของฟิล์มเท่านั้น ซึ่งอาจจะไม่อยู่ในช่วงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาของแผ่นฟิล์มที่นำเสนอในตารางที่ 4.4) แต่ฟิล์มที่มีปริมาณซีโอโลต์ 8% มีความหนามากกว่าสูตรอื่น จึงมีค่า WVTR น้อยกว่าฟิล์มในสูตรอื่นๆ ซึ่งแสดงว่าในงานวิจัยนี้ปัจจัยเรื่องความหนาของแผ่นฟิล์มมีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มมากกว่าปัจจัยเรื่องปริมาณของซีโอโลต์ ทั้งนี้เพราะซีโอโลต์ที่ใช้มีปริมาณน้อย (0-8%) และเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอโลต์เอด้วย SA และ PEG ในฟิล์มตัวอย่างพบว่าค่า WVTR ของฟิล์มตัวอย่างที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอโลต์เอมีค่าน้อยกว่าสูตรที่ไม่ปรับปรุง เป็นเพราะฟิล์มที่มีการเคลือบผิวของซีโอโลต์เอมีความหนาของฟิล์มค่อนข้างมากกว่าฟิล์มที่ไม่มีการปรับปรุงสูตรมาก



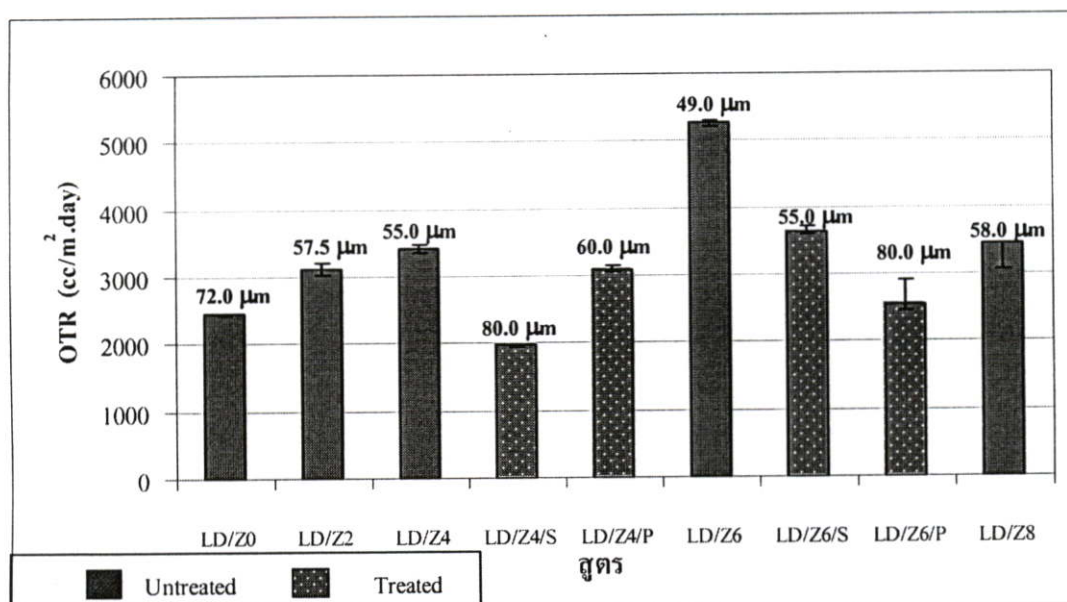
รูปที่ 4.18 ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มในสูตรต่างๆ

ผลการทดลองสามารถแสดงเป็นค่า WVTR (รูปที่ 4.18) เพื่อตัดปัจจัยเรื่องความหนาออก พบว่าการใช้ซีโอโลต์เพิ่มขึ้น (0-8%) ไม่ได้ให้แนวโน้มเพิ่มขึ้นของ WVTR อย่างชัดเจน ทำให้ทราบว่าในงานวิจัยนี้สำหรับสมบัติความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำปัจจัยเรื่องความหนามีผลมากกว่าปัจจัยเรื่องปริมาณซีโอโลต์ (0-8%) การเคลือบผิวด้วยซีโอโลต์เอด้วย PEG ทำให้ WVTR มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าสูตรที่ไม่ได้รับการเคลือบผิวเล็กน้อย เนื่องจาก PEG สามารถเกิดอันตรกิริยาในส่วนที่มีขั้วกับซีโอโลต์เอ โดยอาจช่วยให้ซีโอโลต์ลดการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ซีโอโลต์เอกระจายตัวดีขึ้นเป็น

ผลให้เกิดช่องว่างระหว่างวัฏภาคของซีโพลีเอทกับ LDPE เพิ่มมากขึ้นด้วย (ปัจจัยที่2) นอกจากนี้การที่ซีโพลีเอทกระจายตัวมากขึ้นยังทำให้การดูดซับน้ำบนพื้นผิวของซีโพลีเอทเพิ่มขึ้น ซึ่งจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และจากการที่ PEG สมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) มาก [24, 30] น่าจะช่วยให้สมบัติในการซึมผ่านน้ำของฟิล์มตัวอย่างในสูตรนี้มากกว่าสูตรที่ไม่ได้รับการปรับปรุง และฟิล์มที่มีการปรับปรุงพื้นผิวซีโพลีเอทด้วย SA ให้ค่า WVP น้อยกว่าฟิล์มที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวเล็กน้อย อาจเนื่องจากสมบัติที่ตรงกันข้ามกับ PEG คือ SA นั้นเป็นกรดไขมันซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จึงอาจทำหน้าที่เป็นตัวกั้นทำให้อิอน้ำซึมผ่านรูพรุนของซีโพลีเอทและซึมผ่านแผ่นฟิล์มได้ยากขึ้น เป็นผลให้ WVP ของฟิล์มตัวอย่างมีค่าลดลง [36]

4.5.6 การศึกษาการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มตัวอย่าง

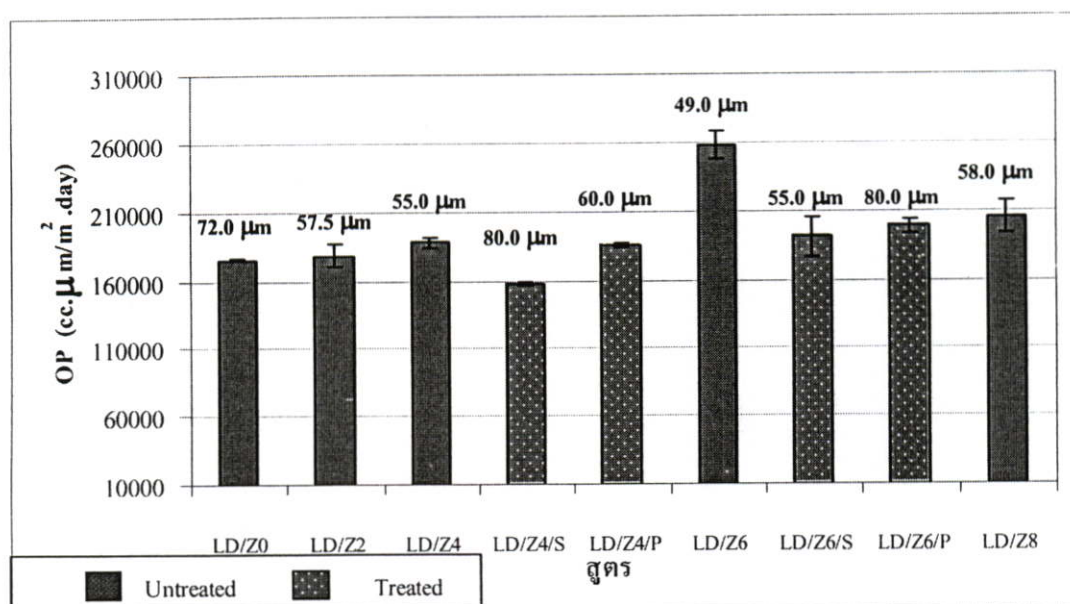
การซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มตัวอย่างขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่นเดียวกับกับการซึมผ่านไอน้ำ ซึ่งได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 – 4.20



รูปที่ 4.19 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มในสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.19 พบว่า อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Transmission Rate, OTR) ของฟิล์มตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีโพลีเอทเพิ่มขึ้น และสูงสุดที่ 6% และมีค่าลดลงในสูตรที่มีปริมาณซีโพลีเอท 8% เช่นเดียวกับกับอัตราการซึมผ่านไอน้ำ ค่า OTR ที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นผลเนื่องจากปริมาณซีโพลีเอทที่มากขึ้น และเพราะฟิล์มมีความหนาลดลงจากสูตรที่มีซีโพลีเอท 0-6% ซึ่งแสดงด้วยตัวเลขที่อยู่บนกราฟแท่งของฟิล์มแต่ละสูตรในรูปที่ 4.19 ค่าความหนาที่แสดงเป็นความหนาเฉลี่ยของ

แผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ถูกนำมาทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน แต่ฟิล์มที่มีปริมาณซีโอไลต์ 8% มีความหนามากกว่าฟิล์มที่มีปริมาณซีโอไลต์ 6% จึงมีค่า OTR น้อยกว่า เมื่อพิจารณาถึง OTR ของฟิล์มตัวอย่างสูตรที่มีและไม่มี การปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์เอด้วย SA และ PEG พบว่าค่า OTR ของสูตรที่ไม่มี การปรับปรุงมีค่ามากกว่าสูตรที่มีการปรับปรุง เป็นผลมาจากฟิล์มสูตรที่ไม่มี การปรับปรุงมีความหนาที่น้อยกว่า



รูปที่ 4.20 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มที่มีปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.20 ค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability, OP) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น และหากความหนาของฟิล์มมีค่าลดลงจะยิ่งช่วยให้ OP เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากก๊าซออกซิเจน (O_2) เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของน้ำ (H_2O) ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่า เป็นผลให้ก๊าซออกซิเจนสามารถซึมผ่านฟิล์มได้ดีกว่าไอน้ำ ซึ่งส่งผลการให้เปรียบเทียบฟิล์มสูตรต่างๆ ในเรื่อง OP เห็นผลความแตกต่างที่ชัดเจนมากกว่าในเรื่อง WVP โดยสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์เอ 6% มีความสามารถในการซึมผ่านได้มากกว่าสูตรอื่นๆ ซึ่งเนื่องมาจากปริมาณของซีโอไลต์ที่พบที่แท้จริงในฟิล์มตัวอย่าง (ตารางที่ 4.2) มีมากกว่าและความหนาของฟิล์มที่น้อยสูตรอื่นๆ จึงมีผลทำให้ก๊าซออกซิเจนสามารถซึมผ่านแผ่นฟิล์มในสูตรนี้ได้มากกว่า

สำหรับค่า OP ของฟิล์มที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวมีค่าน้อยกว่าฟิล์มที่ไม่มี การปรับปรุงอาจเนื่องจาก SA และ PEG ที่เคลือบบนผิวของซีโอไลต์เอไปกีดกันการเคลื่อนที่ของโมเลกุล O_2 ส่งผลให้ O_2 เคลื่อนที่แพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์เอได้ยากขึ้น และนอกจากนั้นยังพบว่าค่า OP ของสูตรที่มีการปรับปรุงด้วย PEG มีค่ามากกว่าสูตรที่มีการปรับปรุงด้วย SA ซึ่งอาจเป็นเพราะการที่ซีโอไลต์เอ

เกิดปฏิกิริยาเคมีกับ PEG ดังนั้นทำให้ซีโอดีเอกระจายตัวได้ดี เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนน้อยลงและทำให้เกิดเป็นช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุคอปอลิเมอร์เมตริกซ์กับซีโอดี่มากกว่าสูตรที่ปรับปรุงด้วย SA

4.5.7 การเก็บรักษามะเขือเทศตัวอย่าง

ในการทดลองการได้เลือกมะเขือเทศพันธุ์ท้อที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Lycopersicon esculentum* Mill มาทำการทดสอบการเก็บรักษา เนื่องจากผลมะเขือเทศสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของผลได้ง่าย เช่น สี ความแน่นของมะเขือเทศ น้ำหนักที่ลดลง [57] และปริมาณไอน้ำที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์เนื่องจากการคายน้ำของมะเขือเทศ และในงานวิจัยนี้ฟิล์มที่ใช้ทดลองเก็บรักษาผักคือ ฟิล์มตัวอย่างสูตร LD/Z0 (ชุดควบคุม) และ LD/Z6 ซึ่งมีการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำมากที่สุด และฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงพื้นผิว LD/Z6/P และ LD/Z6/S ที่มีความหนาใกล้เคียงกับชุดควบคุม โดยรูปที่ 4.21 – 4.24 แสดงภาพถ่ายของมะเขือเทศในบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างก่อนและหลังเก็บรักษาภายในตู้เย็นอุณหภูมิ 11 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 15 วัน



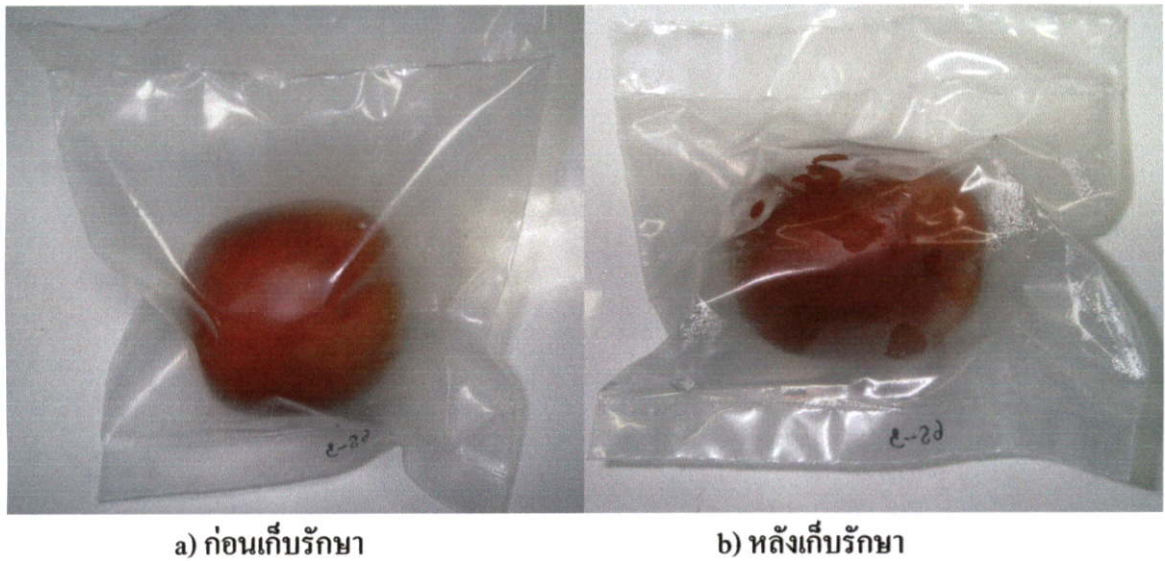
a) ก่อนเก็บรักษา

b) หลังเก็บรักษา

รูปที่ 4.21 มะเขือเทศในถุงบรรจุภัณฑ์จากฟิล์มสูตร LD/Z0 หลังการเก็บรักษา 15 วันในตู้เย็นที่ 11 °C



รูปที่ 4.22 มะเขือเทศในถุงบรรจุภัณฑ์จากฟิล์มสูตร LD/Z6 หลังการเก็บรักษา 15 วันในตู้เย็นที่ 11 °C



รูปที่ 4.23 มะเขือเทศในถุงบรรจุภัณฑ์จากฟิล์มสูตร LD/Z6/S หลังการเก็บรักษา 15 วันในตู้เย็นที่ 11 °C



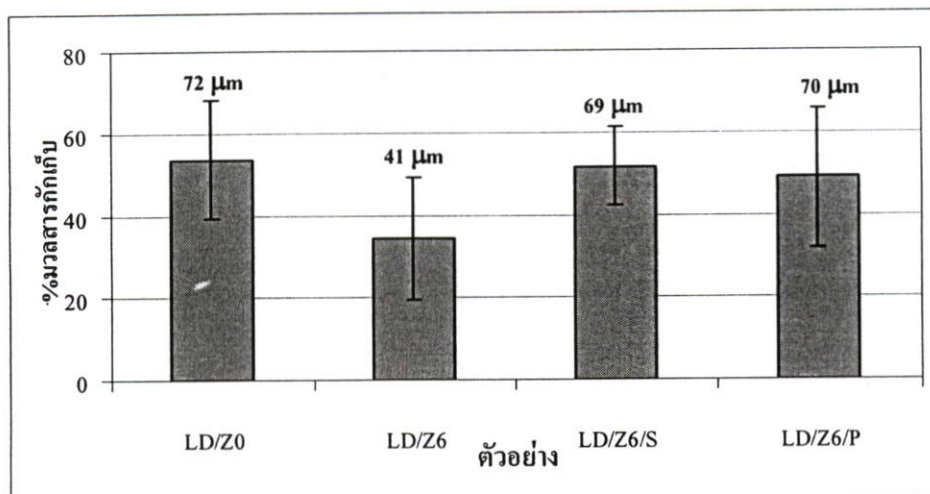
a) ก่อนเก็บรักษา

b) หลังเก็บรักษา

รูปที่ 4.24 มะเขือเทศในถุงบรรจุภัณฑ์จากฟิล์มสูตร LD/Z6/P หลังการเก็บรักษา 15 วันในตู้เย็นที่ 11 °C

จากผลการทดสอบการเก็บรักษาโดยการแช่มะเขือเทศในถุงบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมจากฟิล์มสูตรต่างๆ ในตู้เย็นอุณหภูมิ 11 °C รูปที่ 4.21-4.24 พบว่าภายหลังจากการเก็บรักษา 15 วัน มะเขือเทศมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเกิดขึ้นคือ มะเขือเทศเปลี่ยนจากสีส้มแดงเป็นสีแดงเข้ม เนื่องจากมะเขือเทศมีการสุกมากขึ้น น้ำหนักลดลงและมีไอน้ำเกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์ เนื่องมาจากมะเขือเทศมีการสูญเสียน้ำหนักจากการหายใจของพืช ซึ่งในการหายใจของพืชต้องใช้ก๊าซออกซิเจน (O_2) และมีการคายน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา [4] โดยน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกถ่ายเทออกไปสู่ภายนอกบรรจุภัณฑ์ตัวอย่าง ซึ่งตามปกติฟิล์มทั่วไปมักจะยอมให้ CO_2 ซึมผ่านเข้าออกได้คิมากกว่าน้ำและ O_2 จึงแทบไม่มีการสะสมของ CO_2 ภายในบรรจุภัณฑ์ [11] ส่วน O_2 ที่ใช้ในกระบวนการหายใจ และไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการคายน้ำนั้นจะสามารถถ่ายเทได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นกับค่า OTR และ WVTR ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ตัวอย่าง ซึ่งถ้าค่า OTR ของฟิล์มมีค่าน้อยเกินไปจนทำให้ O_2 ถูกใช้ไปหมดจากบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ จะส่งผลให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ O_2 เกิดการสะสมของแอลกอฮอล์และ CO_2 อาจทำให้เซลล์ของพืชตาย ผักและผลไม้จะส่งกลิ่นที่ผิดปกติ รสชาติเปลี่ยน และเกิดการเน่าเสีย และถ้ามีปริมาณ O_2 ภายในบรรจุภัณฑ์มากเกินไปทำให้พืชมีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผักหรือผลไม้สุกเร็วขึ้น อาจทำให้อายุการเก็บรักษาสั้นลง [7] ซึ่งในการทดลองนี้ให้ความสำคัญต่อปัจจัยของ ไอน้ำที่เกิดขึ้น มากกว่าปริมาณของ O_2 ภายในบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากการที่ OTR มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้มีปริมาณของ O_2 ภายในบรรจุภัณฑ์มากขึ้น ส่งผลให้มีอัตราการหายใจที่เพิ่มขึ้นและผลจากการหายใจจะเกิดไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น ซึ่งถ้าฟิล์มบรรจุภัณฑ์มีค่า WVTR น้อย ทำให้ไอน้ำที่เกิดขึ้นสะสมจำนวนมากและรวมตัวเป็นหยดน้ำขนาดใหญ่ อาจทำให้ผักและผลไม้ภายในบรรจุภัณฑ์

เน่าเสียได้ ดังนั้นจึงมีการพิจารณาในปัจจัยของการค่า WVTR เป็นหลัก และสำหรับหยดน้ำหรือไอน้ำที่พบในบรรจุภัณฑ์เป็นไอน้ำส่วนที่เหลืออยู่ภายในบรรจุภัณฑ์หลังการถ่ายเทออกไป ซึ่งถูกนำเสนอในรูปของมวลไอน้ำกักเก็บ (มวลไอน้ำที่ถ่ายเทออกไปไม่หมดถูกสะสมภายในบรรจุภัณฑ์) [36] โดยสามารถคำนวณมวลไอน้ำกักเก็บได้ตามภาคผนวก จ และแสดงผลดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 มวลสารกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ตัวอย่าง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่มีและไม่มีซีโอโลดเอ พบว่าสูตรที่ไม่มีซีโอโลดเอ (LD/Z0) สีของมะเขือเทศมีสีที่เข้มมากกว่าและมีผลที่หนักกว่าสูตรที่มีซีโอโลดเอ มีหลายตัวอย่างที่เน่าเสียและมีเชื้อราเกิดขึ้น เนื่องจากการที่มีหยดน้ำขนาดใหญ่จำนวนมากเกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์ เมื่อผลมะเขือเทศสัมผัสกับหยดน้ำที่เกิดขึ้นอาจทำให้เกิดเชื้อราหรือเกิดการเน่าเสียได้ สังเกตได้จากรูปที่ 4.21 b นอกจากนี้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างในสูตรนี้ยังแสดงมวลไอน้ำกักเก็บที่มากกว่าสูตรอื่นๆ (รูปที่ 4.25) เนื่องจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างในสูตรนี้มีค่า WVTR ที่น้อยกว่าฟิล์มในสูตรที่มีซีโอโลดเอ จึงทำให้มีหยดน้ำเกาะที่พื้นผิวของถุงบรรจุภัณฑ์เป็นจำนวนมาก และหยดน้ำจะมีการรวมตัวกันเป็นหยดน้ำที่มีขนาดใหญ่ ส่วนสูตรที่มีซีโอโลดเอ LD/Z6 (ความหนาแน่นน้อยกว่าฟิล์มในสูตรอื่นๆ) LD/Z6/S และ LD/Z6/P (ความหนาแน่นใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่มีซีโอโลดเอ) พบว่ามีเพียงบางตัวอย่างเท่านั้นที่เน่าเสียและมีเชื้อราเกิดขึ้น เนื่องจากตัวอย่างส่วนใหญ่มีเพียงหยดน้ำขนาดเล็กหรือเป็นเพียงฝ้าเกิดขึ้นบนผิวของบรรจุภัณฑ์เท่านั้น ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าเมื่อมีการเติมซีโอโลดเอในฟิล์มตัวอย่างช่วยลดการรวมของไอน้ำเป็นหยดน้ำและช่วยระบายไอน้ำได้ดีขึ้น และเมื่อมีการเปรียบเทียบระหว่างบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมจากสูตรที่มีและไม่มี การปรับปรุงพื้นผิวของซีโอโลดเอด้วย SA และ PEG พบว่าบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมจากสูตรที่มีการปรับปรุงพื้นผิวมีมวลไอน้ำกักเก็บมากกว่าสูตรที่ไม่มี การปรับปรุงพื้นผิว (รูปที่ 4.25) ซึ่งสามารถใช้เหตุผลของผลการซึมผ่านไอน้ำอธิบายได้ โดยปัจจัยหลักในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างใน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตแผ่นฟิล์มโดยกระบวนการเป่าฟิล์มจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มีการเติมสารเติมแต่งซีโอไลต์เอเพื่อใช้ในการช่วยปรับปรุงสมบัติในการซึมผ่านน้ำของฟิล์มและนำไปทดสอบโดยทำเป็นบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างสำหรับผักและผลไม้สดเพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สด ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. พอลิเมอร์ตัวอย่างมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบ Pseudoplastic คือ เมื่อให้อัตราความเครียดเพิ่มขึ้น ความหนืดลดลง เมื่อปริมาณซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้นความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณซีโอไลต์เอเท่ากัน (4 และ 6 %) พบว่า การใช้กรดสเตียริก (SA) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) อาจช่วยลดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนของซีโอไลต์ ลดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ทำให้ความหนืดลดลงอีกเล็กน้อย และมีผลต่อความหนาของฟิล์ม

2. ความหนาของฟิล์มที่ได้ขึ้นอยู่กับสมบัติการไหลหรือความหนืดของระบบ คือ แผ่นฟิล์มที่ผลิตได้ในตัวอย่างสูตรที่มีความหนืดน้อย (LD/Z6/P) ให้ความหนาของฟิล์มมากกว่าในสูตรที่ความหนืดมาก (LD/Z6) เมื่อมีการใช้สภาวะการผลิตเดียวกัน เมื่อความหนืดเพิ่มขึ้นพอลิเมอร์หลอมเหลวจึงออกมาได้มากกว่า

3. การเพิ่มขึ้นของปริมาณซีโอไลต์เอในตัวอย่าง (0-8%) และการใช้ SA และ PEG ไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก

4. เมื่อมีปริมาณซีโอไลต์ในตัวอย่างเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณซีโอไลต์เท่ากัน (4 และ 6%) พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวไม่ทำให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลง และสมบัติเชิงกลในแนวเครื่องจักร (MD) มีค่ามากกว่าในแนวขวางเครื่อง (TD) เพราะโมเลกุลส่วนใหญ่จัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักร

5. ปัจจัยในเรื่องความหนาให้ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มได้ชัดเจนกว่าการเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ในช่วง 0-8% ที่ปริมาณซีโอไลต์เท่ากัน (4 และ 6%) พบว่า ฟิล์มตัวอย่างที่ปรับปรุงพื้นผิวซีโอไลต์เอด้วย PEG มี WVP มากกว่าฟิล์มสูตรที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวเล็กน้อย ส่วนฟิล์มตัวอย่างที่ปรับปรุงพื้นผิวซีโอไลต์เอด้วย SA มี WVP มากกว่าสูตรที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวเล็กน้อย

6. ความสามารถในการซึมผ่านออกซิเจนของฟิล์ม (OP) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์เอในพอลิเมอร์ตัวอย่างเพิ่มขึ้นและเมื่อฟิล์มมีความหนาลดลง โดยที่สูตร LD/Z6 (ปริมาณซีโอไลต์

6%) ให้ค่า OP มากที่สุด และที่ปริมาณซีโอไลต์เท่ากัน (4 และ 6%) พบว่า OP ของฟิล์มไม่มีการปรับปรุงมีค่ามากกว่าฟิล์มที่มีการปรับปรุงพื้นผิว และการปรับปรุงด้วย PEG ให้ค่า OP มากกว่าการปรับปรุงด้วย SA

7. การทดสอบการเก็บรักษามะเขือเทศในบรรจุภัณฑ์ตัวอย่าง พบว่าสูตรที่พบมวลไอน้ำกักเก็บน้อยที่สุด และสามารถเก็บรักษามะเขือเทศให้มีคุณภาพดีที่สุด คือ สูตร LD/Z6 เนื่องจากมีค่า WVTR ที่มากกว่าสูตรอื่นๆ และมีความหนาแน่นน้อยที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการผลิตและการขึ้นรูปควรเลือกใช้เครื่องที่มีระบบระบายไอน้ำ (Vent) ได้ เนื่องจากซีโอไลต์จะสามารถดูดน้ำได้ดี ซึ่งจะช่วยลดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้

2. ควรผลิตฟิล์มที่มีความหนาพอๆ กัน โดยการปรับสภาวะการผลิต ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงสมบัติที่อาจเปลี่ยนแปลงไป เช่น สมบัติเชิงกล และสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สด เพราะความหนาเป็นปัจจัยหลักของค่า WVTR ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สด

หน้านี้ไม่มีในต้นฉบับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] จิรา ณ หนองคาย. เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แมสพลับลิชชิง. 2534.
- [2] ศิริวรรณ แสงนิกรเกียรติ. “บรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้สด” วารสารการบรรจุภัณฑ์. ปีที่ 9, ฉบับที่ 3. เดือนเมษายน-มิถุนายน 2544. หน้า 4-7.
- [3] Paine F.A. and Paine H.Y. **A Handbook of Food Packaging**. U.S.A.: Chapman & Hall. 1992.
- [4] สมชาย กล้าหาญ. วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวพืชสวน. ภาควิชาพืชสวน คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [5] Dirim S., Esin A. and Bayindirli A. “A New Protective Polyethylene Based Film Containing Zeolites for the Packaging of Fruits and Vegetables: Film Preparation.” **Journal of Food Engineering**. Vol.63. 2004. pp. 9-13.
- [6] จริงแท้ ศิริพานิช. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541.
- [7] คณัช บุญยเกียรติ และ นิธิยา รัตนานพนนท์. การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเคียนสโตร์. 2535.
- [8] Pantastico E.B. **Postharvest Physiology Handling and Utilization of Tropical and Subtropical Fruits and Vegetables**. Westport CT: The AVI Publishing Company Inc. 1975.
- [9] Ryall A. L. and Lipton W. J. **Handling, transportation and storage of fruits and vegetables Vol. 1**. Westport CT: The AVI Publishing Company Inc. 1972.
- [10] Biale J.B. and Young R.B. **In Recent Advances in the Biochemistry of Fruits and Vegetables**. New York: Academic Press. 1981.
- [11] Shewfelt R.L. and Bruckner B. **Fruit and Vegetable Quality**. Pennsylvania: Technomic Publishing Company, Inc. 2000.
- [12] Howe-Grant M. and Mackenzie K.J. **Encyclopedia of Chemical Technology Vol.10**. 4th ed. New York: John Willey & Sons Inc. 1993.
- [13] รุ่งนภา วิสิฐอุครการ. เอกสารประกอบการสอนการประเมินอายุการเก็บรักษาของอาหาร. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2540.
- [14] Billmeyer F.W. **Textbook of Polymer Science**. New York: John Wiley & Sons. 1984.

- [15] สุภารัตน์ รักชลธิ. เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีการบรรจุหีบห่อ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [16] Berins M.L. **Plastics Engineering Handbook**. New York: Chapman & Hall. 1991.
- [17] ตะวัน สุขน้อย. เอกสารประกอบการเรียนวิชาซีโพลิต์และสารประกอบที่มีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [18] Gates C.B. **Catalytic Chemistry**. Toronto: Wiley & Sons. 1992.
- [19] Woodward P. “**Solid State Chemistry**.” [Online]. Available: http://www.chemistry.ohio-state.edu/~woodward/chem_754.htm. 2004.
- [20] Nasaexplores. “**Zeolite the Secret Ingredient**.” [Online]. Available: http://media.nasa-explores.com/show_58_teacher_st.Php?id=030822110809. 2004.
- [21] Tanyapanyachon S. “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. 2001.
- [22] Rothon R.N. **Particulate-fillers Polymer Composites**. 2nd ed. Bellingham; Rapra Technology Limited. 2003
- [23] Jesse E. **Plastic Additives and Modifiers Handbook**. London; Chapman & Hall. 1996.
- [24] Imperial Industrial Chemicals (THAILAND) Co., Ltd. “**Technology Information Polyethylene Glycol**” [Online]. Available: <http://www.iic.co.th/products/PEG%20-%204000.asp?from=POLYETHYLENE++GLYCOL+%2D+4000>. 2006.
- [25] นิพนธ์ ไชยมงคล. “**มะเขือเทศ**” [Online]. Available: <http://www.agric-prod.mju.ac.th/vegetable/file link/tomato.pdf>. 2548.
- [26] Hale W.R., Dohrer K.K., Tant M.R. and Sand I.D. “A Diffusion Model for Water Vapor Transmission through Microporous Polyethylene/CaCO₃ films.” **Dohrercolloid and Surfaces A:Physicochemical and Engineering. Aspects**. Vol.187-188. 2001. pp. 483-491.
- [27] Ozmichi F., Balkose D. and Ulku S. “Natural Zeolite Polypropylene Composite Film Preparation and Characterization.” **Journal of Applied Polymer Science**. Vol.82. 2001. pp.2913-2921.

- [28] Metin D., Tihminlioglu F. and Balkose D. "The Effect of Interactions on The Mechanical Properties of Polypropylene/Zelite Composites." **Composite Part A**. Vol.35. 2004. pp. 23-32.
- [29] Mali S., Grossmann V.M., Garcia M.A.,Martino M.N. and Asritzky E.N. "Microstructural Characterization of Yam Starch Films." **Carbohydrate Polymers**. Vol.50. 2002. pp. 379-386.
- [30] Parra D.F., Tadini C.C., Ponce P. and Lugao A.B. "Mechanical Properties and Water Vapor Transmission in Some Blends of Cassava Starch Edible Films." **Carbohydrate Polymers**. Vol.58. 2004. pp.475-478.
- [31] Arvanitoyannis I., Psomiadou E., Biliaderis C., Kawasaki N. and Ogawa H. "Biodegradable Films Made from Low-Density Polyethylene (LDPE), Rice Starch and Potato starch for Food Packaging Applications:Part 1." **Carbohydrate Polymers**. Vol.36. 1998. pp.89-104.
- [32] Psomiadou E. Arvanitoyannis I., Biliaderis C., Kawasaki N. and Ogawa H. "Biodegradable Films Made from Low-Density Polyethylene (LDPE), Wheat Starch and Soluble starch for Food Packaging Applications: Part 1." **Carbohydrate Polymers**. Vol. 33. 1997. pp.227-242.
- [33] Krohn J., Tate R. and Jordy D. "Factors Affecting The Permeability of PE Blown Films." ANTEC'97. 1997. pp.1654-1658.
- [34] Matzinos P., Bikiaris B., Kokkou S. and Panayiotou C. "Processing and Characterization of LDPE/Starch Products." **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 79. 2001. pp.2548-2557.
- [35] สุภารัตน์ รักขลธิ์, กังสดาล บัวบุตรา, ณัฐนิชาซ์ ศิริเจียรนัย และกัญญาวีร์ สุวรรณชัย. "สมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ผสมสารเติมแต่งซีโอไลต์" **วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย ขอนแก่น**. ปีที่ 30, ฉบับที่4. 2545. หน้า 262-270.
- [36] กัญญาวีร์ สุวรรณชัย "การใช้ซีโอไลต์เอเพื่อปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มอครีคพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในงานบรรจุภัณฑ์ผักสด" **ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขา วิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**. 2548.
- [37] วณิดา แซ่ลิ้มและสุภาพร ประเสริฐศิริเจริญ. "สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และการซึมผ่านของไอน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ"

โครงการพิเศษหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.

- [38] Wang Y., Eastal A.J. and Chen X.D. "Ethylene and Oxygen Permeability through Polyethylene Packaging." **Packaging technology and Science**. Vol.11, No.4. 1998. pp.169-178.
- [39] Cameron A.C., Talasila P.C. and Joles D.J. "Predicting the Film Permeability needs for Modified Atmosphere Packaging of lightly Processed Fruits and Vegetables." Vol.30. 1995. pp.25-34.
- [40] ASTM E 794 Committee on standard "Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis.", Philadelphia: American Society for testing and Materials., 1992.
- [41] ASTM D 3835 Committee on standard "Standard Test method for Determination of Properties of Polymeric Materials by Means of a Capillary Rheometer.", Philadelphia: American Society for testing and Materials.1992.
- [42] Ehrenstein G.W. **Polymer Materials**. Munich: Hanser. 2001.
- [43] ASTM E 1131 Committee on standard "Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry." Philadelphia: American Society for testing and Materials., 1992.
- [44] ASTM D 638 Committee on standard "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic.", Philadelphia: American Society for testing and Materials., 1992.
- [45] ASTM D 624 Committee on standard "Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized and Thermoplastic Elastomers." Philadelphia: American Society for testing and Materials., 1992.
- [46] ISO 15106-1:2003 (E) "Plastics-Film and sheeting-Determination of water vapour transmission rate-Part 1: Humidity detection sensor method." Geneva: International Organization for Standardization., 2003
- [47] ASTM D3985 "Standard Test Method for Oxygen Gas Transmission Rate through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor." Philadelphia: American Society for testing and Materials., 1992.

- [48] Alkan A., Hopa C., Yilmaz Z. and Guler H. "The Effect of Alkali Concentration and Solid/Liquid ratio on the Hydrothermal Synthesis of Zeolite NaA from Natural Kaolinite." **Microporous and Mesoporous Materials**. Vol. 86. 2005. pp.176-184.
- [49] วิชัย ธีวตระกูล. การประยุกต์สเปคโตรสโคปีในเคมีอินทรีย์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ห้องเรียน. 2526.
- [50] Yang I. and Hu C. "Preparation and Rheological Characterization of (Poly-butyl methacrylate)/Montmorillonite Composite." **European Polymer Journal**. Vol.42. 2006. pp.402-409.
- [51] Dangtungee R. , Yun J. and Supaphol P. "Melt Rheology and Extrudate Swell of Calcium Carbonate Nanoparticle-filled Isotactic Polypropylene" **Polymer Testing**, Vol.24 Issue 1. 2005. pp.2-11.
- [52] Joseph R., McGregor W.J., Martyn M.T., Tanner K.E. and Coated P.D. "Effect of Hydroxyapatite Morphology/Surface on The Rheology and Processibility of Hydroxyapatite filled Polyethylene Composites" **Biomaterials**. Vol.23 Issue 21. 2002. pp.4295-4302.
- [53] รังสิมา หญืดสอน นฤมล เครื่ององอาจนุกูล สุพล โชติวรรณ และ วีรวรรณ ชรรรมงคล. "HDPE ผสมไมก้า หรือ ทาวกัม: สมบัติการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกล"วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 12, ฉบับที่ 3. 2545. หน้า 48-56.
- [54] Clegg D.W. and Collyer A.A. **The Structure and Properties of Polymeric Materials**. Great Britain: The Bourne Press. 1993.
- [55] Pehlivan H., Balköse D., Ülkü S. and Tihminliog`lu F. "Characterization of Pure and Silver Exchanged Natural Zeolite filled Polypropylene Composite Films" **Composites Science and Technolog**. Vol.65 Issue13. 2005. pp.2049-2058.
- [56] Liauw C.M., Lees G.C., Hurst S.J., Rotheron R.N. and Ali S. "Effect of Silane-Based Filler Surface Treatment Formulation on the Interfacial Properties of Impact Modified Polypropylene Magnesium Hydroxide Composites". **Composites Part A**. Vol.29. 1998. pp.313-318.
- [57] กิตติพงษ์ ห่วงรัญย์. เอกสารประกอบการสอนเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การทดสอบสมบัติการไหลด้วย Capillary Rheometer

ตารางที่ ก-1 LD/Z0

Shear Rate (1/s)	P_0 (MPa)	P_1 (MPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
3.70	0.08	0.24	2404.36
7.50	0.08	0.25	2152.78
18.75	0.13	0.64	1651.96
37.50	0.17	1.60	1194.90
75.00	0.30	2.47	906.30
187.50	0.69	4.06	561.80
375.00	1.22	5.72	374.40
562.50	1.70	6.99	293.50
937.50	2.48	8.87	213.00
1125.00	3.19	9.76	182.60

ตารางที่ ก-2 LD/Z2

Shear Rate (1/s)	P_0 (MPa)	P_1 (MPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
3.75	0.06	0.44	2811.90
7.50	0.06	0.66	2511.30
18.75	0.10	1.23	1883.60
37.50	0.21	1.85	1366.10
75.00	0.39	2.72	971.30
187.50	0.86	4.37	585.60
375.00	1.52	6.22	391.30
562.50	2.11	7.60	304.60
937.50	2.45	8.31	195.40

ตารางที่ ก-3 LD/Z4

Shear Rate (1/s)	P_0 (MPa)	P_1 (MPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
3.75	0.03	0.11	2904.02
7.50	0.03	0.13	2766.94
18.75	0.03	0.17	2152.78
37.50	0.05	1.68	1455.46
75.00	0.07	2.73	1108.50
187.50	0.82	4.55	621.90
375.00	1.47	6.40	410.60
562.50	2.22	7.83	311.90
937.50	2.77	9.30	217.50

ตารางที่ ก-4 LD/Z6

Shear Rate (1/s)	P_0 (MPa)	P_1 (MPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
3.75	0.03	0.39	3184.20
7.50	0.03	0.72	2904.02
18.70	0.03	1.33	2160.10
37.50	0.02	2.04	1684.90
75.00	0.03	3.01	1241.30
187.50	0.88	4.91	671.40
375.00	1.68	6.87	432.40
562.50	2.33	8.39	336.80
937.50	3.47	10.69	240.50
1125.00	3.23	10.08	190.30

ตารางที่ ก-5 LD/Z8

Shear Rate (1/s)	P_0 (MPa)	P_1 (MPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
3.75	0.03	0.45	3535.60
7.50	0.03	0.78	3148.90
18.75	0.08	1.41	2212.20
37.50	0.21	2.08	1555.50
75.00	0.40	3.05	1103.30
187.50	0.95	4.93	663.50
375.00	1.68	6.93	437.00
562.50	2.28	8.36	337.90

ตารางที่ ก-6 LD/Z4/P

Shear Rate (1/s)	P_0 (MPa)	P_1 (MPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
3.70	0.08	0.41	2745.50
7.50	0.08	0.63	2290.10
18.70	0.08	1.15	1782.00
37.50	0.08	1.70	1350.30
75.00	0.09	2.52	1014.00
187.50	0.10	4.06	659.80
375.00	1.39	5.91	376.30
562.50	1.90	7.15	291.50
937.50	2.91	9.21	210.00
1125.00	3.00	9.41	178.20

ตารางที่ ก-7 LD/Z6/P

Shear Rate (1/s)	P_0 (MPa)	P_1 (MPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
3.75	0.45	0.03	2985.38
7.50	0.78	0.03	2666.86
18.75	1.41	0.08	2037.04
37.50	2.08	0.21	1555.50
75.00	3.05	0.40	1103.30
187.50	4.93	0.95	663.50
375.00	6.93	1.68	437.00
562.50	8.36	2.28	337.90

ตารางที่ ก-8 LD/Z4/S

Shear Rate (1/s)	P_0 (MPa)	P_1 (MPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
3.70	0.00	0.36	2987.70
7.50	0.00	0.66	2536.40
18.70	0.00	1.27	1909.85
37.50	0.00	1.95	1601.60
75.00	0.00	2.97	1200.60
187.50	0.00	4.88	658.23
375.00	1.56	7.03	456.00
562.50	2.21	8.70	320.06
937.50	3.32	11.13	214.91
1125.00	3.92	11.94	193.64

ตารางที่ ก-9 LD/Z6/S

Shear Rate (1/s)	P_0 (MPa)	P_1 (MPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
3.75	0.04	0.44	3097.42
7.50	0.04	0.75	2766.94
18.75	0.05	1.37	2094.11
37.50	0.07	2.13	1599.56
75.00	0.10	3.12	1188.50
187.50	0.94	5.11	694.50
375.00	1.73	7.21	456.50
562.50	2.37	8.70	351.90
937.50	2.49	8.64	205.00

ภาคผนวก ข

การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

ตารางที่ ข-1 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength, MPa)

สูตร	ทิศทาง การทดสอบ	ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง										ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
LD/Z0	MD	6.64	8.09	10.31	7.92	8.09	8.15	10.62	7.67	7.55	7.31	8.23	1.26
	TD	6.09	6.62	7.03	7.06	7.50	8.49	8.63	7.99	8.23	8.40	7.60	0.88
LD/Z2	MD	7.03	7.06	7.92	8.09	8.15	10.62	7.67	7.55	7.31	5.08	7.65	1.37
	TD	7.39	7.97	7.60	7.16	6.05	6.73	6.65	7.05	7.41	6.61	7.06	0.56
LD/Z4	MD	5.86	7.10	7.18	5.31	7.18	7.09	8.26	7.01	8.27	7.01	7.03	0.91
	TD	5.03	7.18	7.04	6.55	8.03	6.40	6.87	7.17	6.38	5.55	6.62	0.86
LD/Z6	MD	6.56	7.48	7.30	6.73	7.22	4.60	7.18	7.08	7.52	6.75	6.84	0.85
	TD	7.90	5.42	6.99	5.59	6.96	5.54	6.79	6.85	5.50	6.81	6.43	0.86
LD/Z8	MD	5.17	6.30	6.75	5.69	6.99	6.53	6.87	6.59	6.72	6.96	6.46	0.59
	TD	7.44	7.19	6.35	7.44	5.77	4.20	4.35	5.50	6.50	4.56	5.93	1.26

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

สูตร	ทิศทาง การทดสอบ	ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง										ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
LD/Z4/P	MD	7.18	7.09	8.26	7.01	8.27	7.01	7.18	7.06	7.70	7.09	7.39	0.51
	TD	6.89	5.67	6.38	7.70	6.54	7.99	5.93	7.07	6.72	6.44	6.73	0.72
LD/Z6/P	MD	7.93	7.86	6.42	7.43	8.30	5.62	3.92	7.70	6.83	8.20	7.02	1.38
	TD	7.18	7.06	6.40	7.40	5.77	5.03	6.38	6.87	8.03	6.78	6.69	0.85
LD/Z4/S	MD	7.17	8.62	7.47	7.35	7.47	7.78	7.59	7.78	6.59	7.39	7.52	0.52
	TD	6.94	7.05	6.25	7.93	8.12	8.27	6.62	5.44	6.73	6.51	6.99	0.89
LD/Z6/S	MD	8.26	7.01	8.27	7.01	7.18	7.06	7.70	5.67	7.04	6.89	7.21	0.75
	TD	6.37	6.05	6.73	7.03	8.49	8.63	4.63	5.38	6.25	6.62	6.62	1.24

ตารางที่ ข-2 ร้อยละการคืบยืด (% Elongation at break)

สูตร	ทิศทาง การทดสอบ	ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง										ค่าเฉลี่ย มาตรฐาน	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
LD/Z0	MD	156.20	121.00	126.00	131.80	139.00	129.67	130.68	131.82	137.58	114.35	131.81	11.26
	TD	133.19	128.30	139.90	127.20	122.08	128.96	121.46	124.68	113.60	132.67	127.20	7.32
LD/Z2	MD	133.19	115.80	132.42	113.20	133.30	106.00	121.46	124.68	113.60	132.67	122.63	10.12
	TD	119.79	107.30	115.80	102.42	113.20	153.30	106.00	121.20	157.98	106.98	120.40	19.58
LD/Z4	MD	115.80	92.42	128.00	122.70	124.50	133.80	146.50	96.39	115.59	108.60	118.43	16.48
	TD	104.60	98.76	102.90	134.50	117.50	126.20	107.30	95.09	118.04	99.48	110.44	13.03
LD/Z6	MD	96.31	120.58	115.60	114.77	108.68	105.36	121.08	122.07	124.08	93.95	112.25	10.80
	TD	115.80	92.42	113.20	103.30	106.00	108.00	98.67	96.39	93.59	108.60	103.60	8.12
LD/Z8	MD	88.85	120.40	96.31	127.58	135.60	94.77	85.43	83.21	121.30	88.90	104.24	19.72
	TD	92.11	100.85	93.98	91.22	110.60	100.00	97.30	120.20	132.11	95.85	94.54	13.48

ตารางที่ ข-2 (ต่อ)

สูตร	ทิศทาง การทดสอบ	ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง										ค่าเฉลี่ย มาตรฐาน	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
LD/Z4/P	MD	97.91	123.46	134.07	127.39	117.99	120.94	122.74	114.20	127.87	109.17	119.57	10.41
	TD	112.78	119.53	97.46	109.94	124.96	115.86	98.48	118.59	122.89	108.56	112.91	9.45
LD/Z6/P	MD	95.96	106.67	127.68	112.98	119.89	119.57	98.35	123.45	99.38	122.65	112.66	11.73
	TD	117.57	97.57	94.47	86.46	118.45	96.89	81.78	118.56	117.46	113.56	104.28	14.38
LD/Z4/S	MD	112.95	128.12	115.20	107.94	127.43	106.08	116.40	134.82	122.50	133.60	120.50	10.30
	TD	101.40	129.23	126.30	119.70	122.00	114.90	108.45	116.47	115.76	112.98	116.72	8.21
LD/Z6/S	MD	117.60	116.80	108.10	100.70	129.80	119.10	100.90	133.08	117.95	98.57	114.26	12.00
	TD	121.10	98.58	93.40	118.73	109.90	101.90	96.70	104.70	96.50	122.89	106.44	11.04

ตารางที่ ข-3 มอดุลัส (Modulus, MPa)

สูตร	ทิศทาง การทดสอบ	ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง										ค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
LD/Z0	MD	94.00	109.11	120.73	104.85	120.67	132.44	129.97	122.38	110.67	165.24	121.01	19.46
	TD	102.83	108.43	107.20	112.83	111.77	97.20	129.93	95.17	91.77	120.53	107.77	11.77
LD/Z2	MD	89.97	94.63	109.50	105.10	97.20	153.27	114.90	97.10	110.30	110.43	108.24	8.32
	TD	106.85	94.19	109.50	111.40	91.23	107.61	97.52	108.83	104.40	90.90	102.24	7.97
LD/Z4	MD	93.03	88.33	115.82	108.71	103.33	93.03	111.66	119.16	102.05	96.67	103.18	10.48
	TD	91.03	97.25	107.03	101.60	91.03	97.25	110.37	101.60	101.60	91.03	98.98	6.75
LD/Z6	MD	81.97	107.30	96.90	96.07	91.67	108.63	103.97	93.57	93.79	105.00	97.89	8.32
	TD	94.22	102.80	84.02	87.78	94.22	99.47	90.69	94.44	96.14	80.69	92.45	8.22
LD/Z8	MD	94.87	93.87	106.07	96.17	98.20	88.20	114.73	82.83	64.53	99.40	93.89	13.56
	TD	96.83	92.77	96.11	77.60	97.20	90.17	78.77	86.44	87.27	100.53	90.37	8.99

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

สูตร	ทิศทาง การทดสอบ	ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง										ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
LD/Z4/P	MD	102.13	114.33	103.93	98.50	99.13	120.33	122.03	104.50	108.33	91.60	106.48	9.82
	TD	111.97	114.33	100.90	106.10	95.97	106.80	97.70	82.87	120.10	86.93	102.37	11.86
LD/Z6/P	MD	82.87	102.55	96.37	97.84	107.90	94.40	105.77	94.33	103.67	85.23	97.09	8.33
	TD	104.93	104.07	91.00	84.57	123.60	68.43	98.50	89.40	89.27	89.17	94.29	14.66
LD/Z4/S	MD	94.07	88.13	100.70	98.67	122.97	94.23	122.93	118.53	102.00	109.63	105.03	12.63
	TD	91.57	103.70	102.87	90.17	122.00	126.80	103.50	94.33	100.13	96.80	103.19	12.22
LD/Z6/S	MD	89.03	93.83	118.63	115.53	81.53	93.53	99.63	101.97	104.20	98.20	99.61	11.32
	TD	89.67	93.57	105.63	91.30	92.63	93.83	105.83	103.30	94.63	92.63	96.97	6.14

ตารางที่ ข-4 ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear Strength, kN/m)

สูตร	ทิศทาง การทดสอบ	ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง										ค่าเฉลี่ย มาตรฐาน	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
LD/Z0	MD	96.75	105.57	100.42	109.21	96.70	87.68	88.18	90.88	92.04	88.67	95.61	7.54
	TD	89.49	87.69	84.62	93.93	86.07	95.18	88.23	101.89	93.15	99.55	91.98	5.76
LD/Z2	MD	93.10	97.90	99.22	82.17	90.33	86.65	73.98	98.40	99.02	96.18	91.70	8.48
	TD	92.13	88.93	88.06	97.87	93.49	92.17	90.15	85.77	91.27	76.76	89.66	5.60
LD/Z4	MD	81.38	84.58	93.52	89.50	99.79	89.47	82.57	87.55	108.70	81.02	89.81	8.84
	TD	92.88	95.49	87.03	95.76	80.45	79.97	96.07	84.39	86.71	72.97	87.17	7.90
LD/Z6	MD	91.80	90.53	87.44	82.28	89.88	94.11	78.10	91.18	79.11	95.46	87.99	6.12
	TD	97.06	77.58	83.37	97.74	83.96	75.49	86.91	81.30	81.09	93.25	85.78	7.83
LD/Z8	MD	88.21	84.46	88.36	83.64	87.13	88.85	87.62	82.13	84.86	77.89	85.32	3.46
	TD	92.88	87.30	87.03	92.31	80.45	79.97	85.89	77.97	85.27	70.47	83.95	6.84

ตารางที่ ข-4 (ต่อ)

สูตร	ทิศทาง การทดสอบ	ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง										ค่าเฉลี่ยเบน มาตรฐาน	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
LD/Z4/P	MD	86.30	84.58	93.52	89.50	99.79	89.47	82.57	85.98	99.75	91.81	90.33	5.97
	TD	81.70	87.69	79.43	93.93	84.72	95.18	96.89	88.29	89.03	98.13	89.50	6.42
LD/Z6/P	MD	90.60	90.94	89.38	87.48	92.91	91.81	80.61	87.70	90.49	85.32	88.72	3.64
	TD	81.39	79.49	85.35	89.98	84.86	90.97	86.84	85.74	90.56	89.05	86.42	3.87
LD/Z4/S	MD	87.60	90.41	90.04	89.31	88.38	104.90	98.20	84.94	89.03	98.13	92.09	6.21
	TD	87.92	86.08	90.83	86.10	88.37	86.94	90.80	93.79	97.46	99.72	90.80	4.79

ภาคผนวก ค

การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง

ตารางที่ ค-1 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ความหนา (μm)	ค่า WVTR ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)	WVP ($\text{g} \cdot \mu\text{m}./\text{m}^2 \cdot \text{day}$)
LD/Z0	75	5.98	449
	76	5.77	439
	72	5.53	398
ค่าเฉลี่ย	74 ± 2	5.76 ± 0.23	428 ± 27
LD/Z2	68	6.6	449
	61	6.73	411
	68	6.51	443
ค่าเฉลี่ย	65 ± 4	6.61 ± 0.11	434 ± 21
LD/Z4	61	7.45	454
	56	7.04	394
	57	7.85	447
ค่าเฉลี่ย	58 ± 2	7.45 ± 0.41	432 ± 33
LD/Z6	37	11.57	428
	38	12.03	457
	37	11.87	439
ค่าเฉลี่ย	37 ± 1	11.82 ± 0.23	441 ± 14
LD/Z8	82	5.03	412
	81	5.89	477
	79	5.56	439
ค่าเฉลี่ย	81 ± 2	5.49 ± 0.43	443 ± 32

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ความหนา (μm)	ค่า WVTR ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)	WVP ($\text{g} \cdot \mu\text{m}./\text{m}^2 \cdot \text{day}$)
LD/Z4/S	70	6.01	421
	68	6.38	434
	74	5.56	411
ค่าเฉลี่ย	70 ± 3	5.98 ± 0.41	422 ± 11
LD/Z6/S	80	5.15	412
	81	5.13	416
	84	5.37	451
ค่าเฉลี่ย	81 ± 2	5.22 ± 0.13	426 ± 22
LD/Z4/P	84	5.58	469
	78	5.59	436
	85	5.25	446
ค่าเฉลี่ย	82 ± 4	5.47 ± 0.19	450 ± 17
LD/Z6/P	70	6.01	421
	68	6.58	447
	74	6.56	485
ค่าเฉลี่ย	71 ± 3	6.38 ± 0.32	451 ± 32

ภาคผนวก ง

การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มตัวอย่าง

ตารางที่ ง-1 การซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ความหนา(μm)	OTR ($\text{cc}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)	OP ($\text{cc} \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)
LD/Z0	72	2462	177264
	72	2434	175248
ค่าเฉลี่ย	72	2448	176256
LD/Z2	58	3180	184440
	57	3050	173850
ค่าเฉลี่ย	57	3115	179145
LD/Z4	55	3470	190850
	55	3372	185460
ค่าเฉลี่ย	55	3421	188155
LD/Z6	50	5320	266000
	48	5233	251184
ค่าเฉลี่ย	49	5276	258592
LD/Z8	62	3180	197160
	58	3691	214078
ค่าเฉลี่ย	60	3435 \pm 361	205619

ตารางที่ ง-1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ความหนา(μm)	OTR ($\text{cc}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)	OP($\text{cc} \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)
LD/Z4/S	80	1960	156800
	80	1988	159040
ค่าเฉลี่ย	80	1974	157920
LD/Z6/S	55	3664	201520
	50	3620	181000
ค่าเฉลี่ย	53	3642	191260
LD/Z4/P	60	3170	190200
	60	3274	196440
ค่าเฉลี่ย	60	3222	193320
LD/Z6/P	78	2596	202488
	78	2492	194376
ค่าเฉลี่ย	78	2544	198432

ภาคผนวก จ
การทดสอบเก็บรักษาผักตัวอย่าง

การคำนวณหา % ไขมันที่พบ

$$\text{น้ำหนักไขมัน (g)} = \text{น้ำหนักรวมหลังการเก็บรักษา} - (\text{น้ำหนักผักหลังการเก็บรักษา} + \text{น้ำหนักถุงหลังเก็บรักษา})$$

$$\% \text{ มวลสารกักเก็บ} = \frac{\text{น้ำหนักไขมันที่พบ (g)}}{\text{ผลต่างของน้ำหนักผักก่อนและหลังการทดลอง (g)}} \times 100$$

ตารางที่ จ-1 ผลการทดสอบการเก็บรักษามะเขือเทศในถุงตัวอย่าง LD/Z0

ตัวอย่าง ที่	ความ หนา (μm)	ก่อนเก็บรักษา			หลังเก็บรักษา			ผลต่าง น้ำหนัก ผัก	น้ำหนัก ไขมัน	% มวล ไขมัน กักเก็บ
		น้ำหนัก ผัก	น้ำหนัก รวม	น้ำหนัก ถุง	น้ำหนัก ผัก	น้ำหนัก รวม	น้ำหนัก ถุง			
1	71	59.7977	61.7008	2.0030	58.9527	61.4690	2.0176	0.8450	0.4987	59.02
2	72	69.7947	72.1567	2.4819	68.9818	71.9439	2.4961	0.8129	0.4660	57.33
3	72	58.7795	60.0668	2.1678	58.3128	60.6909	2.1735	0.4667	0.2046	43.84
4	70	53.6880	55.5592	1.9916	52.8890	55.2908	2.0078	0.7990	0.3940	49.31
5	73	54.3539	56.2846	2.6152	53.9374	56.1620	1.9163	0.4165	0.3083	74.02
6	72	59.6644	61.7371	2.1606	58.9157	61.5496	2.1688	0.7487	0.4651	62.12
7	72	49.8823	51.7480	1.9200	49.1947	51.4123	2.0167	0.6876	0.2009	29.22
ค่าเฉลี่ย %มวลไขมันกักเก็บ									53.55 \pm 14.38	

ตารางที่ จ-2 ผลการทดสอบการเก็บรักษามะเขือเทศในถุงตัวอย่าง LD/Z6

ตัวอย่าง ที่	ความ หนา (μm)	ก่อนเก็บรักษา			หลังเก็บรักษา			ผลต่าง น้ำหนัก ผัก	น้ำหนัก ไอน้ำ	%มวล ไอน้ำ กักเก็บ
		น้ำหนัก ผัก	น้ำหนัก รวม	น้ำหนัก ถุง	น้ำหนัก ผัก	น้ำหนัก รวม	น้ำหนัก ถุง			
1	38	49.1311	50.1096	1.0087	48.6234	49.7336	1.0090	0.5077	0.1012	19.93
2	40	58.0182	59.1091	1.1287	57.3732	58.6821	1.1338	0.6450	0.1751	27.15
3	39	57.9386	59.0225	1.1304	56.9904	58.5658	1.1360	0.9482	0.4394	46.34
4	42	66.4835	67.6934	1.2421	65.7979	67.1837	1.2466	0.6856	0.1392	20.30
5	45	66.8209	68.0278	1.2600	65.9601	67.6728	1.2753	0.8608	0.4374	50.81
6	38	56.7798	57.8497	1.1042	56.1638	57.4270	1.1160	0.6160	0.1472	23.90
7	44	58.4841	59.5882	1.1491	57.5938	59.2418	1.1774	0.8903	0.4706	52.86
ค่าเฉลี่ย %มวลไอน้ำกักเก็บ									34.47 \pm 14.85	

ตารางที่ จ-3 ผลการทดสอบการเก็บรักษามะเขือเทศในถุงตัวอย่าง LD/Z6/S

ตัวอย่าง ที่	ความ หนา (μm)	ก่อนเก็บรักษา			หลังเก็บรักษา			ผลต่าง น้ำหนัก ผัก	น้ำหนัก ไอน้ำ	%มวล ไอน้ำ กักเก็บ
		น้ำหนัก ผัก	น้ำหนัก รวม	น้ำหนัก ถุง	น้ำหนัก ผัก	น้ำหนัก รวม	น้ำหนัก ถุง			
1	70	65.0710	67.0862	2.2158	64.3950	67.0142	2.2300	0.6760	0.3892	57.57
2	71	65.8220	68.1775	2.3332	65.3278	67.9317	2.3376	0.4942	0.2663	53.89
3	66	49.2398	51.1059	1.9386	48.8516	51.0034	1.9497	0.3882	0.2021	52.06
4	67	59.9661	61.9230	2.0383	59.0919	61.7131	2.0590	0.8742	0.5622	64.31
5	69	59.5018	61.0427	1.6458	58.8312	60.7463	1.6480	0.6706	0.2671	39.83
6	72	51.4280	53.1902	1.8579	50.7850	53.0434	1.8926	0.6430	0.3658	56.89
7	68	63.6786	65.9110	2.3242	63.1825	65.7160	2.3463	0.4961	0.1872	37.73
ค่าเฉลี่ย %มวลไอน้ำกักเก็บ									51.75 \pm 9.67	

ตารางที่ จ-4 ผลการทดสอบการเก็บรักษามะเขือเทศในถุงตัวอย่าง LD/Z6/P

ตัวอย่าง ที่	ความ หนา (μm)	ก่อนเก็บรักษา			หลังเก็บรักษา			ผลต่าง น้ำหนัก ผัก	น้ำหนัก ไอน้ำ	%มวล ไอน้ำ กักเก็บ
		น้ำหนัก ผัก	น้ำหนัก รวม	น้ำหนัก ถุง	น้ำหนัก ผัก	น้ำหนัก รวม	น้ำหนัก ถุง			
1	70	66.4843	68.3257	1.9162	65.7070	68.1213	1.9396	0.7773	0.4747	61.07
2	78	57.5742	59.3021	1.822	56.9363	59.1535	1.8599	0.6379	0.3573	56.01
3	65	47.6380	49.8885	1.882	47.1218	49.2879	1.8984	0.5162	0.2677	51.86
4	70	55.8175	57.7885	1.9657	55.3252	57.4704	1.9669	0.4923	0.1783	36.22
5	70	59.2175	61.6825	2.5348	58.8107	61.5740	2.5589	0.4068	0.2044	50.25
6	65	61.0067	62.8791	1.9654	60.4778	62.5410	1.9672	0.5289	0.0960	18.15
7	69	63.8776	65.9520	2.1625	62.9173	65.7456	2.1651	0.9603	0.6632	69.06
ค่าเฉลี่ย %มวลไอน้ำกักเก็บ									48.95 \pm 16.94	

ประวัติของผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาววรรณ พุทธิสสะ
วัน เดือน ปีเกิด	20 กันยายน 2521
ที่อยู่	258 ซ.กุนนที ถ.รัชดาภิเษก แขวงดินแดง เขตดินแดง กรุงเทพฯ 10400
ประวัติการศึกษา	2543 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ของซีโอไลต์ที่เติมลงใน PP คือ 2-6% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าตัวอย่างฟิล์มคอมโพสิต PP ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย AMPTES 1% โดยน้ำหนักให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และจากการศึกษา สันฐานวิทยาพบว่าคอมโพสิต PP ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนแสดงการกระจายตัวของสาร ตัวเติมที่ดีกว่าที่พื้นผิวของฟิล์ม PP ที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว

Mali S. และคณะ [29] ได้ศึกษาฟิล์มที่ผลิตจากมันเทศโดยกระบวนการทำให้เป็นเจลด้วยความ ร้อน (Thermal Gelatinization) จากการตกตะกอนของแป้งและมิกลิเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติก- ไซเซอรอล จากการศึกษาพบว่า สันฐานวิทยาของตัวอย่างฟิล์มที่ได้แสดงถึงพื้นผิวที่เรียบปราศจาก รูพรุนและรอยแตกหัก แสดงได้ถึงโครงสร้างที่สมบูรณ์ ฟิล์มที่มีกลีเซอรอลผสมอยู่ให้ความสามารถ การซึมผ่านของไอน้ำที่สูงกว่า ส่วนอุณหภูมิที่สถานะคล้ายแก้วที่วัดได้จากเครื่องทดสอบสมบัติทาง ความร้อน (DSC) น้อยกว่าฟิล์มที่ไม่มีกลีเซอรอลผสมอยู่ และ Parra D.F. และคณะ [30] ยังได้ศึกษา สมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำในฟิล์มที่รับประทานได้โดยใช้แป้งมัน ผสมกับ กลีเซอรอลและ พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) เป็นพลาสติกไซเซอรอลและ ใช้กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde, GLU) เป็นสารเชื่อมโยง โดยใช้กระบวนการหล่อฟิล์ม พบว่าการเพิ่มปริมาณ GLU มีผลทำให้ค่าความ แข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของกลีเซอรอลปริมาณ 1% เท่านั้น ถ้ามีปริมาณกลีเซอรอลมากกว่านี้จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดลง และสมบัติการ ซึมผ่านน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PEG เพิ่มขึ้น

Arvanitoyannis I. และคณะ [31] ได้มีการศึกษาฟิล์มที่สามารถย่อยสลายได้โดยการผสม ระหว่าง LDPE และแป้งจากข้าวและมันฝรั่ง โดยผ่านกระบวนการอัดรีด พบว่า เมื่อปริมาณแป้ง เพิ่มขึ้น ทำให้มีการแตกแบบเปราะเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความแข็งแรงดึงลดลง แต่โมดูลัสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซเพิ่มขึ้นอีกด้วย และนอกจากนี้ Psomiadou E. และคณะ [32] ยังได้ศึกษาถึงฟิล์มที่สามารถย่อยสลายได้จากการผสม LDPE และแป้ง ข้าวสาลีหรือแป้งที่ละลายน้ำได้ โดยกระบวนการอัดรีดและอัดขึ้นรูปร้อน จากการศึกษาพบว่าเมื่อ ปริมาณแป้งสูงขึ้นสมบัติเชิงกลและอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณ แป้งเพิ่มขึ้นมากกว่า 30% สมบัติเชิงกลจะมีค่าลดลง แต่ถึงอย่างไรก็ตามอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซ และไอน้ำจะแปรผันตรงกับปริมาณของแป้ง

Krohn J. และคณะ [33] ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซ ออกซิเจนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดเป่าขึ้นรูปพบว่าปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนคือ ความหนาแน่น ความหนาของฟิล์ม และการจัดเรียงตัวของผลึก ซึ่ง พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่วนความหนาของฟิล์มไม่มีผล ต่ออัตราการซึมผ่านมากนัก และยังพบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำแปรผัน โดยตรงกับอัตราการซึม ผ่านของก๊าซออกซิเจนและอัตราส่วนระหว่างการดึงตามแนวขวางของเครื่องจักรกับการดึงตาม แนวขนานกับเครื่องจักร (TD/MD Ratio)