

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
ที่ปรับปรุงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและซีโอไลต์โซเดียมเอ



นางสาวเนตรนภา ลามอ

นางสาวเบญจวรรณ ตานนท์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 62080
วัน,เดือน,ปี 27 ก.ค. 2549

b.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Mechanical Properties and Water Vapor Permeability of
LDPE Film Filled with Calcium Carbonate and Zeolite NaA**



Miss Natapar Lamor

Miss Benjawan Tanon

**A Special Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Bachelor of Science**

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง สมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปรับปรุงด้วยเคลือบคาร์บอนเนตและซีโอไลต์โซเดียมเอ

นักศึกษา นางสาวเนตรนภา ลามอ
นางสาวเบญจวรรณ ตานนท์

ภาควิชา เคมี
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	
กรรมการ ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย	
กรรมการ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี	


.....
(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)
หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	สมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปรับปรุงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและซีโอไลต์โซเดียมเอ	
นักศึกษา	นางสาวเนตรนภา	ลามอ
	นางสาวเบญจวรรณ	คานนท์
ภาควิชา	เคมี คณะวิทยาศาสตร์	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2547	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกล และการซึมผ่านไอน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) หรือซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) เป็นสารตัวเติม ปริมาณสารตัวเติมที่ใช้คือ 2, 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริกที่ปริมาณสารตัวเติม 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การผสมสูตรทำโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดพลาสติกและนำไปขึ้นรูปแบบฟิล์มเป่า แล้วนำแผ่นฟิล์มที่ได้มาศึกษาสมบัติต่าง ๆ พบว่าสารตัวเติมที่ใช้ไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มมีค่าความเค้น ณ จุดคราก และค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงฉีกขาดลดลง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดใกล้เคียงกัน ฟิล์มที่ใช้ Zeolite NaA ให้ค่ามอดูลัสสูงกว่ากรณีที่ใช้ CaCO_3 การปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริกไม่ได้ทำให้ค่าสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่มีสารตัวเติม 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเปลี่ยนแปลงนัก ส่วนการทดสอบสมบัติการซึมผ่านไอน้ำมีค่าที่ใกล้เคียงกันทุกสูตร โดยรวมพบว่าการใช้ Zeolite NaA ในปริมาณ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Mechanical Properties and Water Vapor Permeability of
LDPE Film Filled with Calcium Carbonate and Zeolite NaA

Name Miss Netnapar Lamor
Miss Benjawan Tanon

Departure Chemistry

Program Industrial Chemistry

Academic Year 2004

Special Project Advisor Asst. Prof. Dr. Suparat Rukchonlatee

Abstract

This research was focused on mechanical and water vapor permeability properties of low density polyethylene (LDPE) mixed with calcium carbonate (CaCO_3) or zeolite NaA (used as fillers). Filler contents were 2, 4 and 6 %by weight. Effects of stearic acid coated fillers at 6% loading were also studied. All samples were mixed using a twin-screw extruder and ground using a grinding machine. Thin films were shaped using a blown film extrusion technique, and then various properties of thin film specimens were determined. It was found that CaCO_3 and zeolite NaA had no effect on thermal properties. Tensile stress at yield and modulus of the films increased, tear strength decreased but elongation at break were unchanged with increasing fillers contents. Zeolite NaA-filled LDPE film showed greater modulus than CaCO_3 -filled LDPE film. Filler surface modification with stearic acid did not significantly alter the mechanical properties of the films with 6% filler loading. In addition, water vapor permeabilities of all the films were similar. Overall results demonstrated that the optimum properties of filled LDPE film were observed when using 6% Zeolite NaA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ กำลังใจ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อคณะผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำ การเอาใจใส่และตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ ตลอดจนความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และ ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษที่กรุณาตรวจทาน แก้ไขชี้แจงข้อบกพร่องของโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ ตลอดจนความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณบริษัท ซีซีซี ค้าเคมีภัณฑ์ จำกัด, บริษัท พีทีว เคมีคัล (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท สุรินทร์ออมยา เคมีคัล จำกัด ที่ช่วยให้ความอนุเคราะห์สารเคมีต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ คุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่าน และแม่บ้านทุกคนที่อำนวยความสะดวกและแนะนำการใช้เครื่องมือ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้

กราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ตลอดจนรุ่นพี่-รุ่นน้องและเพื่อน ๆ ที่น่ารักคอยให้กำลังใจและคอยช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

นอกเหนือจากนี้แล้วยังมีบุคคลอื่น ๆ ที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมายที่ยังมิได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวเนตรนภา ลามอ

นางสาวเบญจวรรณ ตานนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พอลิเอทิลีน	4
2.2 ซีไอไลต์โซเดียมเอ	8
2.3 แคลเซียมคาร์บอเนต	10
2.4 กระบวนการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่	11
2.5 การเป่าฟิล์มพลาสติก	13
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 การทดลอง	
3.1 สารเคมี	17
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	18
3.3 การหาขนาดอนุภาคของสมบัติสารตัวเดิม	19
3.4 การเตรียมฟิล์มตัวอย่าง	19
3.4.1 การเคลือบผิวสารตัวเดิมด้วยกรดสเตียริก 1%	19
3.4.2 การผสมสูตร	20
3.4.3 การขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า	21
3.5 การทดสอบสมบัติของสารตัวอย่าง	21
3.5.1 ปริมาณที่แน่นอนของสารตัวเดิมที่มีอยู่ในฟิล์มตัวอย่าง	21
3.5.2 สมบัติทางความร้อน	21
3.5.3 สมบัติความแข็งแรงดึง	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.4 สมบัติความแข็งแรงถึกขาด	22
3.5.5 สมบัติการซึมผ่านไอน้ำ	23
3.5.6 ลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในฟิล์มตัวอย่าง	23
3.5.7 การหาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่าง	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 การหาขนาดของสารตัวเติม	24
4.1.1 โดยใช้เครื่องหาขนาดอนุภาค (Mastersizer X)	24
4.1.2 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)	24
4.2 ปริมาณสารตัวเติมในฟิล์มตัวอย่าง	25
4.3 สมบัติทางความร้อน	26
4.4 สมบัติเชิงกล	26
4.4.1 ผลการทดสอบการรับแรงดึง	26
4.4.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงถึกขาด	31
4.5 การซึมผ่านของไอน้ำ	33
4.6 ลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในแผ่นฟิล์ม	35
4.7 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่าง	37
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	40
5.2 ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างครรชนีการไหลกับความสามารภในการขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพ	5
รูปที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลกับเศษส่วน โดยมวล	6
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	7
รูปที่ 2.4	การประยุกต์ใช้พอลิเอทิลีนตามความหนาแน่นและครรชนีการหลอมเหลว	8
รูปที่ 2.5	โครงสร้างของซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA)	9
รูปที่ 2.6	ลักษณะโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต	10
รูปที่ 2.7	(a) CICO Extruder (Closely Intermeshing Co-rotating) (b) CICT Extruder (Closely Intermeshing Counter-rotating) (c) NOCT Extruder (Non-intermeshing Counter-rotating)	12
รูปที่ 2.8	กระบวนการผลิตฟิล์มเป่า	13
รูปที่ 2.9	รูปทรงเรขาคณิตของเกลียวหนอนเดี่ยวในเครื่องอัดรีดแบบทั่วไป	14
รูปที่ 2.10	ภาคตัดขวางของคานาของหัวเป่า	15
รูปที่ 3.1	ชิ้นงานตัวอย่างรูปคิมเบลล์	22
รูปที่ 3.2	ชิ้นงานตัวอย่างรูปปีกนก	22
รูปที่ 4.1	ภาพ SEM : (a) CaCO ₃ และ (b) Zeolite NaA ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า	24
รูปที่ 4.2	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของ LDPE	28
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น ณ จุดคราก (MPa) กับปริมาณสารตัวเติมของฟิล์มตัวอย่าง	28
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัส (MPa) กับปริมาณสารตัวเติมของฟิล์มตัวอย่าง	29
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดกับปริมาณสารตัวเติมของฟิล์มตัวอย่าง	31
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m) กับปริมาณสารตัวเติมของฟิล์มตัวอย่าง	32
รูปที่ 4.7	ค่า WVTR และ WVP กับปริมาณสารตัวเติมของฟิล์มตัวอย่าง	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มตัวอย่างที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	35
รูปที่ 4.9 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มตัวอย่างที่มี Zeolite NaA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	36
รูปที่ 4.10 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่างที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ	37
รูปที่ 4.11 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่างที่มี Zeolite NaA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ	38



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LDPE	17
ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ Zeolite NaA	18
ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ CaCO_3	18
ตารางที่ 3.4 สูตรของฟิล์มพลาสติก	20
ตารางที่ 4.1 ปริมาณสารตัวเติมในฟิล์มตัวอย่าง	25
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนในฟิล์มตัวอย่าง	27
ตารางที่ 4.3 ค่าความเค้น ณ จุดครากของฟิล์มตัวอย่างที่มีและไม่มี การปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริก	30
ตารางที่ 4.4 ค่ามอดูลัสของฟิล์มตัวอย่างที่มีและไม่มี การปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริก	30
ตารางที่ 4.5 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มตัวอย่างที่มีและไม่มี การปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริก	31
ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m) ของฟิล์มตัวอย่างที่มีและไม่มี การปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริก	32
ตารางที่ 4.7 ค่า WVTR และ WVP ของฟิล์มตัวอย่างที่มีและไม่มี การปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริก	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

บรรจุภัณฑ์ประเภทพลาสติกได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถผลิตได้ง่าย มีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้ ซึ่งบรรจุภัณฑ์ประเภทพลาสติกมีหลายประเภท เช่น พลาสติก ขวดพลาสติก ถ้วยพลาสติก เป็นต้น งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงแต่พลาสติกเท่านั้น โดยพอลิเมอร์ที่ใช้คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เนื่องจากมีสมบัติเด่นคือ มีความแข็งแรง ยืดหยุ่น เหนียว เป็นฉนวนทางไฟฟ้า ทนกรด ด่าง และสารเคมี เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ประเภทฟิล์มบรรจุผักและผลไม้อย่างแพร่หลาย

ในอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกมีการใช้สารตัวเติม (Filler) เพื่อลดต้นทุนในการผลิตเพราะสารตัวเติมมีราคาถูก นอกจากนี้ยังมีการใช้สารตัวเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการด้วย ซึ่งสารตัวเติมในอุตสาหกรรมพลาสติกจัดเป็นประเภทต่าง ๆ ได้หลายเกรด แต่ละเกรดมีความแตกต่างกันในเรื่องต่อไปนี้ [1]

1. ขนาดของอนุภาคและการกระจายของขนาดอนุภาค อนุภาคที่มีขนาดเล็กทำให้มีสมบัติความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสสูง อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้สารประกอบมีความแข็งแรงน้อยกว่าก่อนผสมสารตัวเติม
2. รูปร่างของอนุภาคและความเป็นรูพรุน อนุภาคที่มีผิวเรียบนั้นยากแก่การที่จะยึดติดกับพอลิเมอร์ ในขณะที่อนุภาคที่มีรูพรุนจะดูดซับสารตัวเติมชนิดอื่นที่ผสมอยู่ในพอลิเมอร์ไว้ทำให้ประสิทธิภาพของสารตัวเติมเหล่านั้นลดลง
3. ธรรมชาติทางเคมีพื้นผิวของสารตัวเติม
4. สิ่งปนเปื้อน เช่น ขี้ผึ้งและไอออนของโลหะ อาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ในปัจจุบันนิยมใช้พอลิเอทิลีนในการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับเก็บรักษาผักและผลไม้สด เนื่องจากพอลิเอทิลีนยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ดีทำให้มีก๊าซออกซิเจนซึมผ่านเข้ามาเพียงพอให้พืชหายใจ นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำที่พืชคายออกมาก็สามารถซึมผ่านออกไปได้ง่าย ในบางกรณีจำเป็นต้องเจาะรูที่ถุงเพื่อช่วยระบายไอน้ำที่พืชคายออกมาได้เร็วเพียงพอ [2] แต่การเจาะรูนั้นทำให้บรรจุภัณฑ์ขาดความสวยงามและเกิดการฉีกขาดได้ง่าย นอกจากนี้อาจทำให้จุลินทรีย์ในอากาศเข้าไปสู่ผักและผลไม้ได้

ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จึงได้เกิดแนวคิดที่จะปรับปรุงพอลิเมอร์ที่จะขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับเก็บผักผลไม้ให้มีความสดอยู่ได้ในระยะเวลาหนึ่งโดยไม่ต้องมีการเจาะรูบรรจุภัณฑ์จึงได้มีการนำซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) มาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มให้มีการซึมผ่านของไอน้ำได้มากขึ้นเนื่องจากซีโอไลต์โซเดียมเอมีสมบัติที่ชอบน้ำและเปรียบเทียบกับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่นำมาใช้มากกับพลาสติกเนื่องจากมีราคาถูก [3] แต่เนื่องจากสารตัวเติมมีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมตัวกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงการกระจายตัวของสารตัวเติมให้พอลิเมอร์จึงได้มีการใช้กรดสเตียริก (Stearic acid) เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม และศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำกรณีที่มีและไม่มีปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริก

1.2 วัตถุประสงค์

เตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีการใช้สารตัวเติม 2 ชนิด คือ ซีโอไลต์โซเดียมเอและแคลเซียมคาร์บอเนตในเรื่องสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำเพื่อการนำไปใช้งาน

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการนำสารตัวเติมมาเติมในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยสารตัวเติมที่ใช้คือ ซีโอไลต์โซเดียมเอและแคลเซียมคาร์บอเนต โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตัวเติมทั้งสอง ตั้งแต่ 0–6% โดยน้ำหนัก และศึกษาผลของการเคลือบผิวของสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริก 1% โดยน้ำหนักในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีการเติมสารตัวเติม 6% โดยน้ำหนัก

ศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด สมบัติทางความร้อน ลักษณะการกระจายของสารตัวเติมในฟิล์ม ลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มและการซึมผ่านไอน้ำในแต่ละสูตรเพื่อสรุปหาสูตรที่เหมาะสมในการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถปรับปรุงและพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับเก็บรักษาผักและผลไม้ให้คงความสดอยู่ได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งโดยไม่ต้องมีการเจาะรูบรรจุภัณฑ์ซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์ในอากาศเข้าไปสู่ผักและผลไม้ได้
- 2) สามารถปรับปรุงและพัฒนาสูตรบรรจุภัณฑ์ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้กับบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอทิลีน

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

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

สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีน [4]

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

1. ความหนาแน่น

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

พอลิเอทิลีนจะมีความหนาแน่นสูงหรือต่ำขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ กระบวนการผลิตและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ โครงสร้างของโมเลกุล และขนาดน้ำหนักโมเลกุล แต่ละปัจจัยจะมีผลต่อความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกแตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลมาก คือ โครงสร้างของโมเลกุล โครงสร้างของโมเลกุลแบบที่มีกิ่งยาวและจำนวนมากจะทำให้ความหนาแน่นต่ำเพราะการที่มีกิ่งจะทำให้ความเป็นระเบียบของโมเลกุลมีน้อย โมเลกุลอยู่แบบหลวม ๆ แสงทะลุผ่านง่ายจึงมีความใสแต่ความแข็งแรงต่ำ ส่วนโครงสร้างที่มีกิ่งสั้นและจำนวนน้อยจะทำให้ความหนาแน่นสูงเพราะโมเลกุล

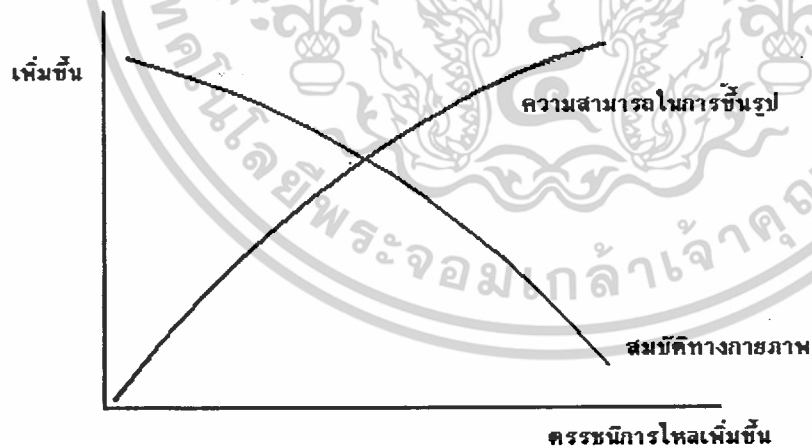
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่อย่างมีระเบียบและใกล้กัน จะมีความแข็งแรงแต่ไม่ใสเพราะแสงทะลุผ่านยาก ซึ่งเรียกส่วนที่เป็นระเบียบนี้ว่า “ส่วนที่เป็นผลึก” (Crystalline) และส่วนที่อยู่กันอย่างหลวม ๆ เรียกว่า “ส่วนที่เป็นอสัณฐาน” (Amorphous)

2. ครรชนีการไหล

สำหรับค่าครรชนีการไหลในบางครั้งอาจเรียกว่า “อัตราการไหลเมื่อหลอมเหลว” (Melt flow rate) ในที่นี้ขอใช้คำว่าครรชนีการไหลหรือเรียกย่อว่า “MI” คำว่า “ครรชนีการไหล” หมายถึงการวัดการไหลของพลาสติกขณะหลอมโดยกำหนดความยาวขนาดของช่องทางการไหลที่อุณหภูมิและแรงอัดมาตรฐาน หลักการนี้ใช้ควบคุมคุณภาพของเทอร์โมพลาสติก ค่าครรชนีการไหลของเม็ดพลาสติกควรมีค่าสม่ำเสมอ ถ้ามีค่าไม่สม่ำเสมอทางผู้ใช้จะมีปัญหาในการปรับเครื่อง เม็ดพลาสติกที่ใช้งานต่าง ๆ กันจะมีครรชนีการไหลที่เหมาะสมแตกต่างกันด้วย ค่าครรชนีการไหลสามารถแสดงถึงสมบัติและขนาดของโมเลกุลได้ดังนี้ ถ้าขนาดโมเลกุลมีขนาดใหญ่จะทำให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ดีขึ้น การที่ค่าครรชนีการไหลสามารถแสดงถึงขนาดน้ำหนักโมเลกุลได้เพราะถ้าโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น การเคลื่อนไหวการไหลตัวจะต้องใช้พลังงานมากขึ้น ดังนั้นถ้าใช้พลังงานเท่ากันในการทดสอบการไหลตัว ขนาดโมเลกุลใหญ่จะไหลตัวได้น้อยกว่า

ในด้านความสัมพันธ์ของครรชนีการไหลกับสมบัติอื่นที่สำคัญ ได้แก่ เรื่องของความยากง่ายในการผลิตขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพทั่วไปซึ่งแสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้



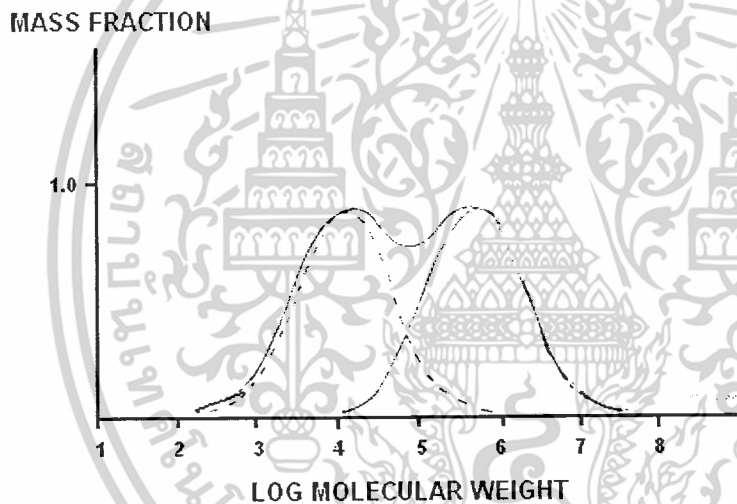
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างครรชนีการไหลกับความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น การผลิตขึ้นรูปจะง่ายขึ้น แต่สมบัติทางกายภาพส่วนใหญ่จะลดลงเพราะขนาดโมเลกุลเล็กลง

3. การกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุล

การกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุลเป็นสมบัติพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อสมบัติบางประการทั้งการผลิตขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพด้วย ในการผลิตพอลิเมอร์ซึ่งเกิดจากสารหน่วยเล็ก ๆ ที่เรียกว่า “มอนอเมอร์” เกิดพันธะเคมีต่อกันเป็นสายโซ่ยาว แต่จำนวนหน่วยมอนอเมอร์ในแต่ละสายโซ่โมเลกุลจะมีจำนวนไม่เท่ากันทุก ๆ โมเลกุล ดังนั้นขนาดโมเลกุลจึงไม่เท่ากันในทุกสายโซ่ ถ้าความแตกต่างของขนาดโมเลกุลในเนื้อพลาสติกมีมากจะเรียกว่า “การกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุลกว้าง” แต่ถ้าในแต่ละโมเลกุลมีขนาดใกล้เคียงกันจะเรียกว่า “การกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุลแคบ” ซึ่งพอจะอธิบายได้คร่าว ๆ จากกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลกับเศษส่วนโดยมวล [4]

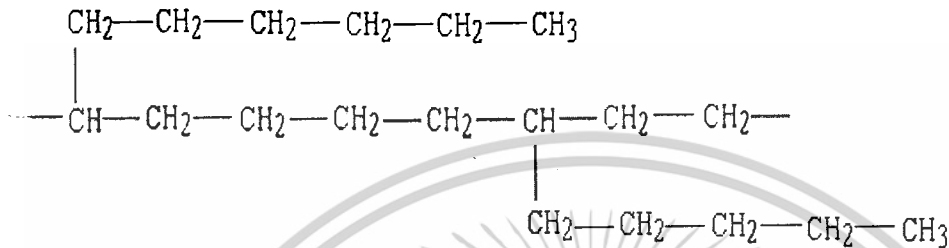
ผลกระทบที่เด่น ๆ ในเรื่องการกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุล ได้แก่ ความยากง่ายในการไหลตัวของพลาสติกในเครื่องอัดรีด ถ้าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างจะช่วยให้การไหลตัวง่ายขึ้นในค่าอัตราการไหลที่เท่ากัน

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นพลาสติกที่ใช้มากในงานฟิล์มบรรจุภัณฑ์ และมีชื่อสามัญเรียกว่า “ถุงเย็น” มักจะใช้ทำถุง ฟิล์มหัด ฟิล์มยืด ขวดน้ำ และฝาขวด เป็นต้น เนื่องจากยืดตัวได้ดี ทนต่อการขีดข่วนและการฉีกขาด พร้อมทั้งสามารถใช้ความร้อนเชื่อมติดปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนึกได้ดี โครงสร้างของพอลิเอทิลีนจะสามารถป้องกันความชื้นได้ดีพอสมควร นอกจากนี้ LDPE ยังทนต่อกรดและด่างทั่ว ๆ ไปและปล่อยให้อากาศซึมผ่านได้ง่าย แต่ข้อเสียของ LDPE คือ สามารถปล่อยให้ไขมันซึมผ่านได้ง่าย [2]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

การประยุกต์ใช้งานของ LDPE [5]

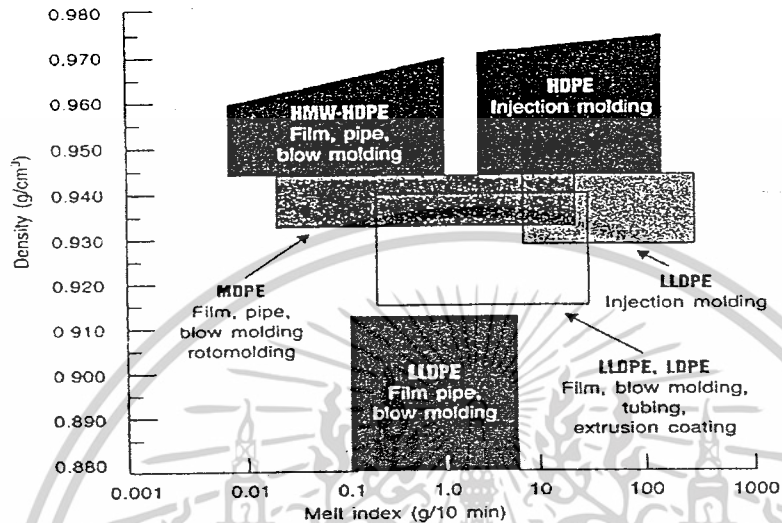
- ถุงบรรจุอาหาร เช่น ผัก ผลไม้สด เนื้อสด ขนมนึ่ง ลูกกวาด อาหารแช่แข็ง อาหารแห้ง
- ถุงสำหรับบรรจุสินค้าหนัก เช่น ผลิตผลเกษตร ข้าวสาร นู๋ย ชิ้นส่วนเครื่องจักร เป็นต้น
- ถุงชั้นในของถุงกระดาษหรือกระสอบพลาสติกซึ่งใช้บรรจุอาหารสัตว์ นู๋ย ฯลฯ
- ถุงบรรจุสินค้าอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น เสื้อผ้าสำเร็จรูป สิ่งทอ กระดาษชำระ ฯลฯ
- ฟิล์มหด (Shrink film) และฟิล์มยืด (Stretch film) ที่ต้องการความเหนียวสูง เช่น ใช้รัด

สินค้าที่วางเรียงบนแท่นรองรับสินค้า (Pallet) เพื่อการขนถ่ายเป็นหน่วยใหญ่

- ใช้ร่วมกับวัสดุอื่น เช่น พลาสติกต่างชนิดกัน กระดาษ อะลูมิเนียม ในลักษณะของการประกบ หรือการเคลือบ เพื่อเสริมสมบัติในการใช้งานที่เหมาะสม เช่น Oriented Polypropylene/Low Density Polyethylene (OPP/LDPE) Polyethylene teraphthalate เคลือบด้วย Polyvinylidene chloride/Low Density Polyethylene (PET เคลือบด้วย PVDC/LDPE) กระดาษ /Aluminium/Low Density Polyethylene (กระดาษ/Al/LDPE) ใช้ทำเป็นถุงบรรจุอาหารแห้งและขนมขบเคี้ยวต่าง ๆ Polyethylene teraphthalate /Linear Low Density Polyethylene (PET/LLDPE) Polyethylene teraphthalate /Low Density Polyethylene (PET/LDPE) ใช้ทำถุงบรรจุอาหารแช่แข็งที่ต้องการบรรจุด้วยระบบสุญญากาศ เป็นต้น โดยที่ LDPE หรือ LLDPE จะทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานช่วยในการปิดผนึก ป้องกันไอน้ำ และเพิ่มความเหนียวบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเอทิลีนต่างชนิดกันจะมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีที่เฉพาะ ลักษณะการขึ้นรูปและต้นทุนที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผังรูปที่ 2.4 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติ 2 ชนิด คือความหนาแน่นและดัชนีการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนที่มีผลต่อการประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 2.4 การประยุกต์ใช้พอลิเอทิลีนตามความหนาแน่นและดัชนีการหลอมเหลว [6]

2.2 ซีโอไลต์โซเดียมเอ [7]

ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) 1 อะตอม และออกซิเจน 4 อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็น โครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุลทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่าง (หรือ โพรง) ที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม

สมบัติของซีโอไลต์

1. มีความเป็นรูพรุนที่มีขนาดเล็กมาก (Microporosity) ทำให้มีอันตรกิริยาภายในรูพรุนสูงจึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับได้ดี
2. มีความเฉพาะเจาะจง (Selectivity) เนื่องจากรูพรุนมีความเป็นระเบียบและขนาดของรูพรุนเท่ากันทั้งหมดทำให้สามารถดูดซับและแยกสารได้ดี
3. มีความเสถียร (Stability) สูงมาก เมื่อเทียบกับสารมีรูพรุนอื่น ๆ เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนกับอะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลต์โซเดียมเอ

1. โครงสร้างของซีโอไลต์โซเดียมเอ

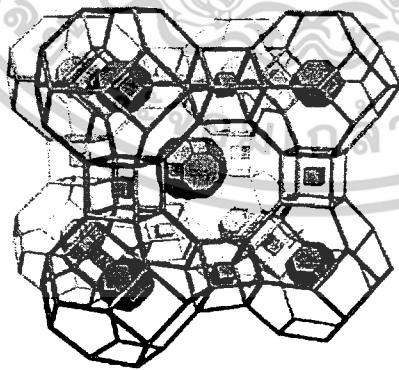
ซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) มีโครงสร้างเป็นกรงแบบแอลฟา (α -cage) และมีสูตรทางเคมีคือ $\text{Na}_2[(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_{12}]\cdot 27\text{H}_2\text{O}$ โดยมีสัดส่วนช่องว่างปริมาตรเท่ากับ 0.47 มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 4.2 อังสตรอม มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมเป็น 1 และจะสลายตัวด้วยความร้อนที่ 700°C

2. การสังเคราะห์ซีโอไลต์โซเดียมเอ

ซีโอไลต์โซเดียมเอสังเคราะห์ได้โดยกระบวนการทำให้เป็นเจลคล้ายกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยทั่วไป โดยใช้อะลูมินา (โดยทั่วไปใช้โซเดียมอะลูมิเนต) และซิลิกา (โดยทั่วไปใช้โซเดียมซิลิเกต) นำมาผสมในสารละลาย ได้แก่ สารละลายอัลคาไลน์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายเกลือแอมโมเนียมเอมีน หรือสารละลายอินทรีย์ที่มีขั้วอื่น ๆ เพื่อให้เกิดเป็นเจล นำเจลที่ได้มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $70\text{--}300^\circ\text{C}$ จะได้ผลึกของซีโอไลต์ในรูปของโซเดียมไอออน (Na^+)

3. การนำซีโอไลต์โซเดียมเอไปใช้งาน

ซีโอไลต์โซเดียมเอเป็นที่น่าสนใจอย่างมากเนื่องจากโครงสร้างเป็นกรงแบบแอลฟาเหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พื้นที่ภายในของโครงสร้างมีรูพรุนมากในการที่จะเข้าทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสาร ขนาดรูพรุนที่มีขนาดเล็กจะมีความเฉพาะเจาะจงในการจำกัดขนาดของโครงสร้างที่จะเข้าออกจากรูพรุนของซีโอไลต์ นอกจากนี้ยังถูกใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนอีกด้วย

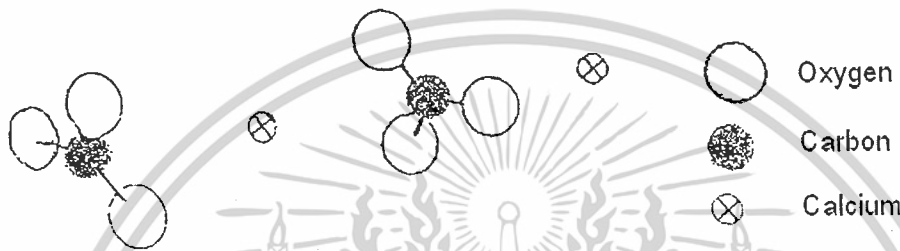


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 แคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) เป็นสารตัวเติม (Filler) สีขาวที่ได้จากธรรมชาติ นิยมนำมาใช้มากกับพลาสติกเพื่อลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากมีความขาว (Whiteness) สมบัติความเสียดทาน (Abrasion) ต่ำ มีหลายขนาดให้เลือกใช้และมีราคาถูก แต่มีข้อจำกัด คือ มีความหนาแน่นสูง (ประมาณ 2.72 g/cm^3) และไม่ทนกรด [3]



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต [9]

สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตแบ่งออกเป็น 2 รูปร่างกว้าง ๆ ดังนี้

1. สารตัวเติมแร่แคลเซียมคาร์บอเนต (Mineral CaCO_3 filler) สามารถแบ่งย่อยได้ 3 ชนิด คือ

1.1 สารขาวหรือไวต์ติ้ง

สารขาวหรือไวต์ติ้ง (Whiting) เป็นสารสีขาวที่ได้จากการบดและจัดอยู่ในพวกขอสลักซึ่งมีความบริสุทธิ์พอ ๆ กับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากธรรมชาติที่เกิดจากตะกอนของกระดูกของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่ทับถมกันเป็นเวลาหลายสิบล้านปีจากการบดแห้งทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 ไมโครเมตร

1.2 หินปูน หินอ่อนและแคลไซต์

หินปูน (Limestone) เป็นรูปแบบของแคลเซียมคาร์บอเนตที่พบมากที่สุดตามธรรมชาติ เกิดจากการตกตะกอนของ Foraminifera ซึ่งแรกเริ่มจะเกิดการตกตะกอนและรวมเข้าด้วยกันโดยความร้อนและความดัน หินอ่อนและแคลไซต์ (Marble and Calcite) มีความแข็ง โครงผลึกแน่นกระชับแตกต่างจากหินปูน มีความบริสุทธิ์เพียงพอสำหรับการบดและนำมาผลิตเป็นสารตัวเติม หินปูนมีความหยาบมากที่สุดจึงมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันและพลาสติกไซเซอร่าได้น้อยที่สุดและให้สีขาวที่ไม่ดี ซึ่งหินอ่อนและแคลไซต์ให้สีขาวที่ดี แต่มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันต่ำกว่าสารขาวหรือไวต์ติ้ง

1.3 โดโลไมต์

โดโลไมต์ (Dolomite) เป็นหินปูนที่มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium carbonate, $MgCO_3$) ประมาณ 45% หรือน้อยกว่า อาจเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า Magnesium Limestone โดโลไมต์ที่ใช้ผลิตเป็นสารตัวเติมจะให้สีที่ดีและมีสมบัติในการดูดซับพลาสติกไซเซอร์สูงกว่าหินอ่อน

2. แคลเซียมคาร์บอเนตแบบตกตะกอน

แคลเซียมคาร์บอเนตแบบตกตะกอน (Precipitated calcium carbonate) ปกติใช้ในรูปที่มีการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการรวมกันเป็นก้อนและช่วยให้เกิดการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์ซึ่งข้อดีของกระบวนการตกตะกอน คือ การเคลือบผิวอนุภาคสามารถกระทำร่วมในกระบวนการผลิตได้เลยโดยไม่ต้องแยกออกมาเป็นอีกส่วนหนึ่งแต่ข้อเสีย คือ มีราคาสูง [3]

การปรับปรุงพื้นผิว

เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารอนินทรีย์มีขั้ว มักจับตัวเป็นก้อน ไม่กระจายตัว ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงพื้นผิวโดยการเคลือบสารบางประเภท เช่น กรดสเตียริก ซึ่งการปรับปรุงพื้นผิวมีข้อดีหลายประการดังนี้

1. สารตัวเติมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวนั้นทำให้สามารถกระจายตัวได้ง่ายและทั่วถึงในพอลิเมอร์ระหว่างกระบวนการผสมและกระบวนการผลิต
2. การปรับปรุงพื้นผิวทำให้ระยะระหว่างพื้นผิวของสารตัวเติมและเมทริกซ์ใกล้กันมากขึ้น [3]
3. ป้องกันพื้นผิวเกิดการแตก (Crack) รอยบุ๋ม (Notch) และอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการนำไปใช้งานและเป็นการทำให้วัสดุมีความแข็งแรง
4. กำจัดรอยตำหนิและรอยขีดข่วนบนพื้นผิว
5. ป้องกันสารตัวเติมจากน้ำและความชื้นที่จะทำให้เป็นจุดอ่อนและบวมคอมโพสิต [10]

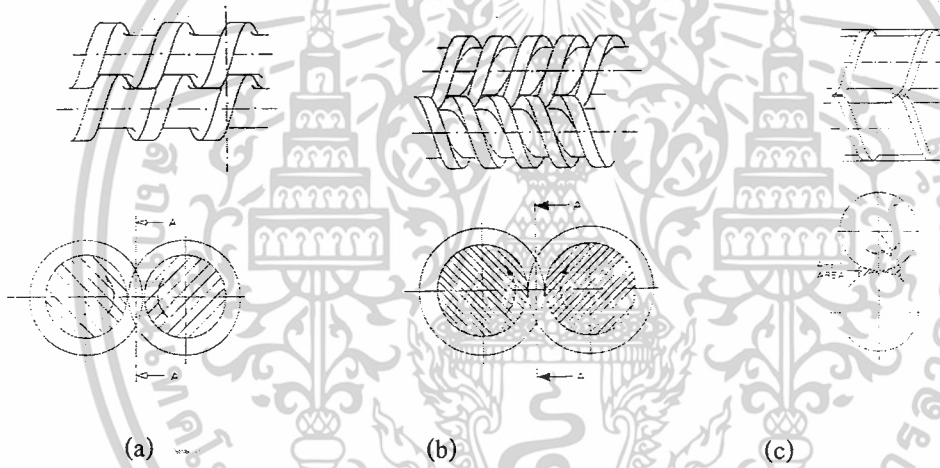
2.4 กระบวนการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

การอัดรีด (Extrusion) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมีราคาถูกกว่ากระบวนการอื่น อีกทั้งสามารถทำการผลิตชิ้นงานให้มีรูปร่างได้ตามต้องการ (เช่น แท่งกลม พิล์ม แผ่น เส้นใย ท่อ เป็นต้น) และทำได้อย่างต่อเนื่อง เครื่องอัดรีดจัดเป็นเครื่องมือที่มีจุดประสงค์หลากหลายในกระบวนการแปรรูปทางพอลิเมอร์ กล่าวคือ เม็ดพลาสติกที่ถูกป้อนเข้ามาจะระหว่างเกลียวหนอนของเครื่องอัดรีดและกระบอกใส่เกลียวหนอน (Barrel) จะถูกอัด หลอม และผสม ทั้งนี้โดยอาศัยความแตกต่างของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของเกลียวหนอนและ

กระบอกใส่เกลียวหนอนทำให้เกิดพลังงานเฉือน (Shearing energy) ช่วยในการผสมและการหลอม [11]

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) มีการแบ่งเป็นเครื่องอัดรีดแบบหมุนตามกัน (Co-rotating twin-screw extruder) และเครื่องอัดรีดแบบหมุนสวนทางกัน (Counter-rotating twin-screw extruder) โดยจะแตกต่างกันที่ทิศทางการหมุนของสกรู คือ เครื่องอัดรีดแบบหมุนตามกัน สกรูทั้งสองจะหมุนในทิศทางเดียวกันแต่เครื่องอัดรีดแบบหมุนสวนทางกัน สกรูสองตัวจะหมุนสวนทางกัน การแบ่งอีกอย่างหนึ่ง คือ เครื่องอัดรีดแบบเฟืองตรงกัน (Intermeshing) และเครื่องอัดรีดแบบเฟืองไม่ตรงกัน (Non-meshing) แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 (a) CICO Extruder (Closely Intermeshing Co-rotating)
 (b) CICT Extruder (Closely Intermeshing Counter-rotating)
 (c) NOCT Extruder (Non-intermeshing Counter-rotating) [12]

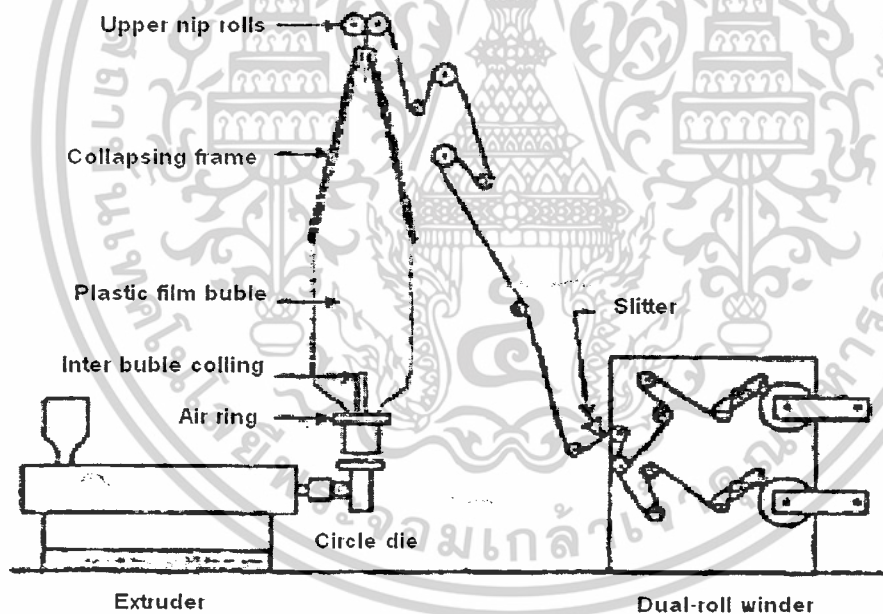
การประยุกต์ใช้งานเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่แบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ ใช้ในการอัดรีดวัสดุที่ไวต่อความร้อน เช่น PVC และใช้กับกระบวนการที่เฉพาะของพอลิเมอร์ เช่น Compounding, Devolatilization, และอื่น ๆ กระบวนการอัดรีดของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่จะใช้ Flight และ Channel ที่แคบกระทำที่ความเร็วรอบของสกรูไม่สูงมาก (ประมาณ 10 rpm) โดยมีข้อดีที่เหนือกว่าเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวหลายประการ คือ มีการป้อนที่ดีกว่า ลักษณะการลำเลียงหรือการพามีลักษณะที่เป็นการเคลื่อนที่แบบกระจัดทางบวก (Positive conveyance) มากกว่าและมีเวลาที่สารอยู่ในสกรูที่สั้นกว่า การที่มีการผสมที่ดีกว่าและมีพื้นที่ผิวในการส่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนที่กว้างกว่า ทำให้ง่ายแก่การควบคุมอุณหภูมิที่เก็บสะสมไว้ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการอัดรีดวัสดุที่อ่อนไหวต่อความร้อน

2.5 การเป่าฟิล์มพลาสติก

การเป่าฟิล์มพลาสติก (Blown extrusion) มีหลักการง่าย ๆ คือ เม็ดพลาสติกจะถูกอัดรีดผ่านเกลียวขับพร้อมทั้งให้ความร้อนไปด้วยเพื่อให้เม็ดพลาสติกหลอมและถูกขับผ่านหัวตาย (Die head) ที่ร้อน [5] จะได้เป็นท่อฟิล์ม ท่อฟิล์มหลังจากออกจากหัวตายแล้วจะถูกเป่าให้พองด้วยลมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาตามต้องการ [13] จากนั้นใช้ลูกกลิ้งรีดท่อพลาสติกให้แบนราบแล้วม้วนเก็บเพื่อนำไปตัดเป็นแผ่นฟิล์มหรือ ใช้ผลิตเป็นถุงต่อไป กล่าวได้ว่ากระบวนการผลิตฟิล์มเป่าประกอบด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวต่อกับคายนประเทวงแหวน (Annular die)

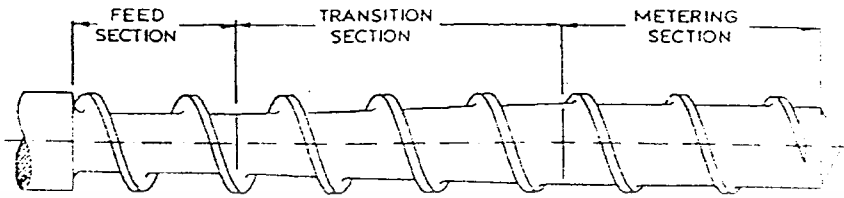


รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตฟิล์มเป่า [14]

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว [11]

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) จัดว่ามีความสำคัญอย่างมากในทางอุตสาหกรรม โดยเกลียวหนอนจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 รูปทรงเรขาคณิตของเกลียวหนอนเดี่ยวในเครื่องอัดรีดแบบทั่วไป [12]

ส่วนที่หนึ่ง คือ ส่วนป้อน (Feed zone) จะมีความลึกของช่องเกลียวหนอนมากที่สุด ทำหน้าที่หลัก คือ ดึงเม็ดพลาสติกจากกรวยเติมพลาสติกลงในกระบอกลูก และเริ่มให้ความร้อนแก่เม็ดพลาสติกโดยให้เกิดการผสมกันของพลาสติก และพลาสติคไปยังส่วนการอัด (Transition หรือ Compression zone)

ส่วนที่สอง คือ ส่วนของการอัด ความลึกของช่องเกลียวหนอนจะค่อนข้างตื้น ซึ่งวัสดุที่ถูกนำพามาถึงบริเวณนี้จะอยู่ในสถานะกึ่งของแข็งและจะหลอมเหลว ในส่วนนี้จะทำหน้าที่หลอมเหลววัสดุทั้งหมดและนำพาวัสดุนี้ส่งต่อไปยังบริเวณนำส่ง (Metering zone)

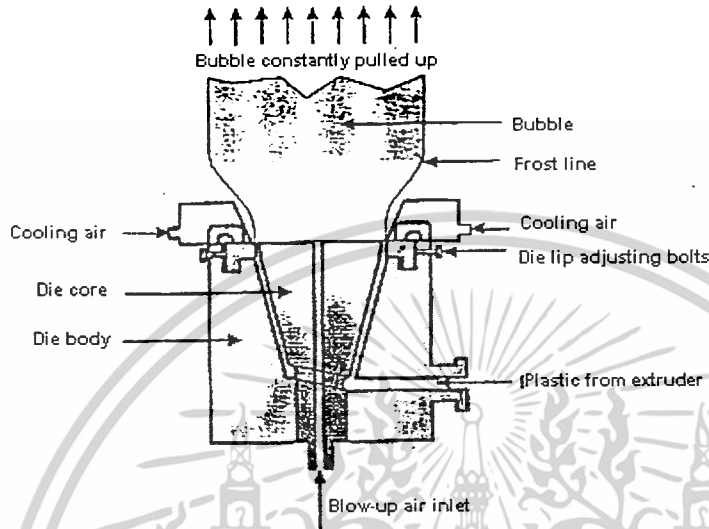
ส่วนสุดท้าย คือ ส่วนนำส่งทำหน้าที่ในการหลอมวัสดุพอลิเมอร์ให้เป็นเนื้อเดียวกันและนำพาพอลิเมอร์หลอมเหลวไปยังดาย (Die) โดยความลึกของช่องเกลียวหนอนลดลงจากส่วนป้อนวัสดุไปยังส่วนนำส่ง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการอัดตัวของวัสดุในเกลียวหนอน ตัวแปรหนึ่งในการออกแบบเกลียวหนอนที่มีความสำคัญ คือ อัตราส่วนความยาวของเกลียวหนอนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเกลียวหนอน (L/D ratio) พบว่าโดยปกติอยู่ในช่วง 20/1 ถึง 30/1 แต่ที่นิยมใช้คือ 24/1 ในส่วนนำส่งนี้จะมีความดันเพิ่มขึ้น มีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์และจะเสถียรอยู่ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน

ในส่วนของดายจะมีแผ่นกรองและแผ่นยึด (Screen pack and Breaker plate) ทำให้เกิดความดัน ดันพอลิเมอร์หลอมเหลวออกนอกดายและเปลี่ยนลักษณะการไหลจากแบบเกลียว (Helicoidal movement) ตามเกลียวหนอนไปเป็นแบบตามแนวแกน (Axial movement)

หัวเป่า [5]

หัวเป่าเป็นส่วนที่ติดอยู่ที่ปลายสุดของเกลียวจับ ทำหน้าที่ควบคุมพลาสติกเหลวให้เป่าได้ขนาดตามต้องการ พลาสติกหลอมเหลวที่ออกจากหัวเป่าจะถูกเป่าให้เป็นท่อกลวงโดยเครื่องเป่าลม (Blower) ซึ่งมีการเป่าลมเย็นเพื่อไม่ให้ฟิล์มติดกันและลดแรงดึงภายในเนื้อฟิล์ม อีกทั้งควบคุม

ความใสและขนาดของฟิล์มด้วย การเป่าลมเย็นที่ผิวฟิล์มทำได้ 2 ลักษณะ คือ เป่าลมหล่อเย็นที่ผิวฟิล์มด้านนอกและที่ผิวด้านใน



รูปที่ 2.10 ภาคตัดขวางของคานของหัวเป่า [14]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hale และคณะ [15] ทำการศึกษาอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมและฟลูออโรพอลิเมอร์ (Fluoropolymer) เป็นสารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids) พบว่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความพรุนต่อความคดเคี้ยว (Porosity/Tortuosity) พื้นที่ผิว (Surface area) เปอร์เซ็นต์ความพรุนและจำนวนรูพรุนเพิ่มขึ้น

Osman และคณะ [16] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของสารประกอบของ LDPE ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติม ซึ่งมีทั้ง CaCO_3 ที่มีและไม่มี การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก เมื่อเพิ่มปริมาณกรดสเตียริก พบว่าค่ามอดุลัส (Modulus) และค่าความเค้น (Yield stress) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength), ค่าความเครียด (Yield strain) และการดึงยืดที่จุดสูงสุด (Ultimate elongation) มีแนวโน้มลดลงและเมื่อทดสอบเทียบกับ CaCO_3 ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแคลเซียมสเตียเรต (Calcium stearate) พบว่าให้ผลมีแนวโน้มเหมือนกับกรดสเตียริกแต่มีค่าน้อยกว่า

ธนเรศ ประเสริฐวงษ์และธราศรัย แสงภักดี [17] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงค่อกิ่งด้วยกรดอะคริลิก (HDPE-g-AA) ซึ่งเป็นสารช่วยผสม โดยมี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการฉีดขึ้นรูป พบว่าการเติม CaCO_3 ทำให้ค่ามอดูลัส ความแข็ง และความหนืดเพิ่มขึ้นแต่ค่าความแข็งแรงดึง การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง ปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นแต่ค่าความดึงยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง ส่วนการทดสอบสมบัติความหนืดของสารให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน การใช้ HDPE-g-AA ให้สมบัติที่ดีกว่าการใช้ HDPE-g-MA ในปริมาณที่เท่ากัน โดยการใช้ HDPE-g-AA 0.1%wt ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด

วนิดา แซ่ลิ้มและสุภาพร ประเสริฐศิริเจริญ [18] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของ LLDPE ที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอซึ่งมีการขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อในสภาพหลอมเหลว พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอเพิ่มขึ้น แต่ในสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอ 9% พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีค่าลดลง ส่วนค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงฉีกขาดพบว่ามีค่าลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยกรด สเตียริก และพอลิเอทิลีนค่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) พบว่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำพบว่ามีการเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ และค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำจะมีค่าลดลงเล็กน้อยในสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกและ PE-g-MA

Arbanitoyannis และคณะ [19] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE โดยมีแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันฝรั่งเป็นสารตัวเติม ทำการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียว หนอนคู่และขึ้นรูปด้วยวิธีกดอัด พบว่าเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีค่าลดลง แต่ค่าความแข็งแรงโค้งงอและอัตราการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น

Strooks [20] ทำการศึกษาอิทธิพลของความหนาของฟิล์มและความหนาของชั้นอากาศที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ร่วมระหว่างอีเทอร์และเอสเทอร์ ซึ่งอีเทอร์ที่ใช้คือ พรอพิลีนออกไซด์ และเอสเทอร์ที่ใช้คือ บิวทิลีนเทอพทาเลท ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ พบว่าค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น และเมื่อชั้นของอากาศหนามากขึ้นจะทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลงด้วย

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีด้วยกัน ดังต่อไปนี้

1. พอลิเมอร์: ในงานวิจัยนี้คือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรดเป่าฟิล์ม LD1905F/FA จากบริษัท ซีซีซี เคมีภัณฑ์ จำกัด ซึ่งมีสมบัติดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LDPE [21]

สมบัติ	หน่วย	วิธีทดสอบ	LD1905F/FA
ครรชนีการไหล	กรัม/10นาทีก	ASTM D 1238	5.0
ความหนาแน่น	กรัม/ลบ.ซม.	ASTM D 1505	0.919
ความต้านทานแรงดึงยืด	กก./ตร.ซม.	ASTM D 638	-
ความต้านทานแรงดึงขาด	กก./ตร.ซม.	ASTM D 638	MD:210*, TD:170*
ความยืดที่จุดขาด	%	ASTM D 638	MD:320*, TD:680*
ความต้านทานแรงดึงหักขาด	กรัม/25ไมครอน	ASTM D 1922	MD:370*, TD:210*
ความต้านทานแรงกระแทกของฟิล์ม	กรัม	ASTM D 1790	105*
ความเงามัน	%	ASTM D 2457	85*
มอดูลัสการโค้งงอ	กก./ตร.ซม.	ASTM D 790	2,100
ความแข็งกด, SHORE D	-	ASTM D 2240	46
จุดหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	ASTM D 2117	108

*สมบัติของฟิล์มหนา 40 ไมครอน (เป่าที่อัตราแบ่ง 2:1)

MD: ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

TD: ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

**ความหนาของชิ้นงาน 1 มม.

62080

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สารตัวเติม: สารตัวเติมที่ใช้มีดังนี้

2.1) ซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) เกรดทั่วไป จากบริษัทพีคิว เคมีคัล (ประเทศไทย) จำกัด สมบัติบางประการของ Zeolite NaA แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ Zeolite NaA [22]

สมบัติ	หน่วย	ผลการทดสอบ
ลักษณะ	-	ผงที่มีการไหลอย่างอิสระ
ค่า pH of 1% การกระจายตัว	-	11.34
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	ไมครอน	4.03

2.2) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จากบริษัทสุรินทร์ออย่า เคมีคัล จำกัด สมบัติบางประการของ CaCO_3 แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ CaCO_3 [23]

สมบัติ	หน่วย	CaCO_3	CaCO_3
		(OMYACARB-2T)	(OMYACARB-2)
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	ไมครอน	2.7	2.8
ความหนาแน่น	กรัม/ลบ.ซม.	2.7	2.7
ความไม่ละลายในกรด	%	1.0	0.0

3. กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า
4. เรซินพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin)
5. โคบอลต์แนฟทีเนต (Cobalt naphthenate)
6. เมทิล เอทิล คีโตน เปอร์ออกไซด์ (Methyl ethyl ketone peroxide)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder, รุ่น Polydrive with Rheomex R252)
2. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder, รุ่น PL-200; IntroEngineering)
3. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder machine, Bosco รุ่น A600; Bosco Engineering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เครื่องเป่าฟิล์มพลาสติก (Film blowing tower, รุ่น LF-400; Labtech Engineering)
5. เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer; Labtech Engineering)
6. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal tester, LLOYD รุ่น LR 30K; LLOYD Instrument)
7. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC-50; Shimadzu)
8. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermal gravimetric analyzer, Perkin รุ่น Pyris 1 TGA; Perkin Elmer Co., Ltd.)
9. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, LEO รุ่น 1455VP; LEO)
10. เครื่องหาขนาดอนุภาค (Particle size analyzer, Malvern; Mastersizer X)
11. เครื่องวัดการซึมผ่านไอน้ำ (Lyssy water permeability)
12. เครื่องอัดแรงลม

3.3 การหาขนาดอนุภาคของสารตัวเติม

การวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของสารตัวเติม คือ แคลเซียมคาร์บอเนตและซีโอไลต์โซเดียมเอหาได้จาก

1. เครื่องหาขนาดอนุภาค มีขั้นตอนการวัดดังนี้ เติมน้ำซึ่งเป็นสารช่วยกระจายที่เครื่องกระจายอนุภาคแล้ววัดค่าเบคกราวด์ (Background measurement) หลังจากนั้นเติมสารที่ต้องการวัดลงในระบบด้วยความเข้มข้นที่เหมาะสมโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 10%–30% แล้ววัดค่าขนาดอนุภาคของสารที่ต้องการวัด

2. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด มีขั้นตอนการวัดดังนี้ โปรรายสารตัวเติมลงบนแท่นอลูมิเนียม จากนั้นเคลือบด้วยทองแล้วนำไปหาขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง

3.4 การเตรียมฟิล์มตัวอย่าง

3.4.1 การเคลือบผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริก 1%

ชั่งสารตัวเติม (CaCO_3 และ Zeolite NaA) มา 990 กรัม และกรดสเตียริก 10 กรัม เทผสมลงในเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) โดยตั้งความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ทำการปั่นกวนของผสมจนมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 80°C จากนั้นทำการปั่นกวนต่อไปอีก 15 นาทีจึงปิดเครื่องแล้วปล่อยให้เย็น 10 นาที เปิดฝาเกลี่ยของผสมที่ติดอยู่ด้านบนและด้านข้างของเครื่องผสมลงในถังปั่นกวน แล้วทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 10 นาที จึงปิดเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การผสมสูตร

ตารางที่ 3.4 สูตรของฟิล์มพลาสติก

สูตร	พอลิเมอร์ (%wt)	สารตัวเติม (%wt)			
	LDPE	CaCO ₃	Zeolite NaA	CaCO ₃ +SA	Zeolite NaA+SA
LDPE	100	0	0	0	0
LD/Ca2	98	2	0	0	0
LD/Ca4	96	4	0	0	0
LD/Ca6	94	6	0	0	0
LD/ZA2	98	0	2	0	0
LD/ZA4	96	0	4	0	0
LD/ZA6	94	0	6	0	0
LD/Ca6/SA	94	0	0	6	0
LD/ZA6/SA	94	0	0	0	6

ซึ่งส่วนผสมตามตารางที่ 3.4 ให้มีน้ำหนักรวม 1000 กรัม ในถุงพลาสติก เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเทลงใส่เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ โดยตั้งสถานะของเครื่องดังนี้

- Feed zone 160°C
- Compression zone 170°C
- Metering zone 180°C
- Die zone 190°C
- Screw speed 20 rpm

นำสารผสมที่ได้จากการอัดรีดมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยใช้เครื่องบดพลาสติก

3.4.3 การขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า

นำสารผสมที่บดแล้วมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวที่ต่อกับเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- Feed zone 150°C
- Compression zone 160°C
- Metering zone 170°C
- Blown zone 180°C
- Screw speed 65 rpm
- อัตราเร็วการดึงยืด 1.5 mm/min
- แรงลมเป่า 0.2 MPa

3.5 การทดสอบสมบัติของฟิล์มตัวอย่าง

3.5.1 ปริมาณที่แน่นอนของสารตัวเติมที่มีอยู่ในฟิล์มตัวอย่าง

หาปริมาณของสารตัวเติมในสารตัวอย่างแบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

3.5.1.1 โดยใช้เครื่อง Thermal gravimetric analyzer โดยสภาวะที่ใช้ทดสอบเป็นดังนี้

- ภายใต้สภาวะอากาศ
- อุณหภูมิ 50–600°C
- อัตราการให้ความร้อน 20°C/min

3.5.1.2 โดยใช้วิธีเผาสารตัวอย่าง

นำครุชิวีลมาเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิ 100°C นำมาทิ้งให้เย็นต่อในเดซิเคเตอร์อย่างน้อยเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งครุชิวีลด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง นำสารตัวอย่างมาใส่ปริมาณไม่เกินครึ่งของความสูงของครุชิวีลแล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำมาเผาด้วยตะเกียบบนเซนจนกระทั่งไม่มีเขม่าดำ จากนั้นนำมาเผาต่อในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิ 100°C นำมาทิ้งให้เย็นต่อในเดซิเคเตอร์อย่างน้อยเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักของครุชิวีลแล้วคำนวณปริมาณสารที่เหลืออยู่เพื่อใช้คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของสารตัวเติมที่มีอยู่จริง

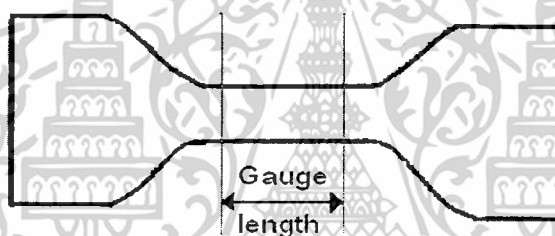
3.5.2 สมบัติทางความร้อน

วิเคราะห์หาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter ทำการชั่งสารตัวอย่างมาประมาณ 5–10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50°C ด้วยอัตราการให้ความ

ร้อน $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 180°C และทำการลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น ด้วยอัตราการให้ความร้อน $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ในบรรยากาศที่เป็นก๊าซไนโตรเจน นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิในการหลอมตัวของผลึก (T_m), อุณหภูมิของการเกิดผลึก (T_c), พลังงานความร้อนของการหลอมผลึก (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)

3.5.3 สมบัติความแข็งแรงดึง

นำฟิล์มตัวอย่างที่ได้จากการเป่าขึ้นรูปมาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ด้วยเครื่องอัดแรงลมทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ที่ความเร็วในการดึง $200\text{ mm}/\text{min}$ ระยะของการจับขึ้นงาน 25 mm ที่อุณหภูมิห้อง เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 [24] เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break), ค่ามอดูลัส (Modulus) และความแข็งแรงดึง (Tensile strength)



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปดัมเบลล์ [24]

3.5.4 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด

นำฟิล์มตัวอย่างที่ได้จากการเป่าขึ้นรูปมาตัดเป็นรูปปีกนกด้วยเครื่องอัดแรงลมทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ที่ความเร็วในการดึง $100\text{ mm}/\text{min}$ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1004 [25] เพื่อหาค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานตัวอย่างรูปปีกนก [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5 สมบัติการซึมผ่านไอน้ำ

หาปริมาณ ไอน้ำที่ซึมผ่านจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มพลาสติกในระยะเวลาที่กำหนดและภายใต้สภาวะที่คงที่มีหน่วยเป็น $g/m^2/day$ ที่อุณหภูมิ $38^\circ C$ และความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ 90% โดยวิธี Transfer time method โดยใช้เครื่อง Lyssy water permeability คัดชิ้นงานให้มีขนาด $11 \times 11 \text{ cm}^2$ เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E96-90 [26]

3.5.6 ลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในฟิล์มตัวอย่าง

นำฟิล์มตัวอย่างที่ได้จากการเป่าขึ้นรูปมาตัดให้มีขนาด $1 \times 3 \text{ cm}^2$ แล้วทำการเคลือบด้วยเรซิน โดยชั่งเรซินพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) ในบีกเกอร์พลาสติกประมาณ 20 กรัม และเติมสารกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Cobalt naphthenate) ลงไป 0.2% โดยน้ำหนักของเรซิน คนให้เข้ากัน จากนั้นใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Methyl ethyl ketone peroxide) 1% โดยน้ำหนักของเรซิน คนให้เข้ากันแล้วจึงใช้แปรงทาเรซินลงบนแผ่นใสในขนาดใหญ่มากกว่าชิ้นงานเล็กน้อย วางแผ่นฟิล์มลงบนเรซินแล้วใช้แปรงทาเรซินทับบนฟิล์มอีกครั้ง โดยใช้แปรงเกลี่ยให้บาง จากนั้นนำเข้าตูบที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที นำออกจากตูบทิ้งไว้ให้เย็นจึงแกะชิ้นงานออกจากแผ่นใส แช่ชิ้นงานลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 นาที แล้วหักในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ จากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองแล้วนำพื้นผิวตรงรอยแตกมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

3.5.7 การหาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่าง

คัดชิ้นงานขนาดประมาณ $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ จากนั้นเคลือบด้วยทองแล้วนำมาหาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

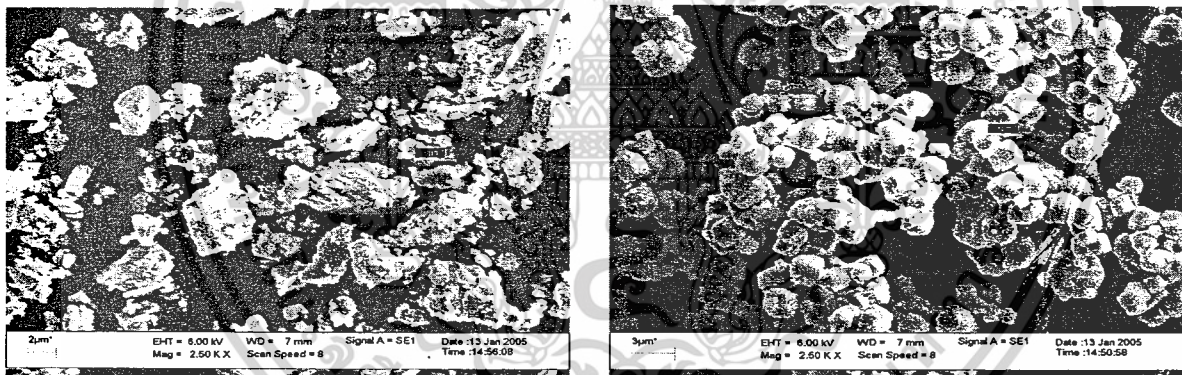
4.1 การหาขนาดของสารตัวเดิม

มี 2 วิธีดังนี้

4.1.1 โดยใช้เครื่องหาขนาดอนุภาค (Mastersizer X)

จากการทดลองพบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ CaCO_3 มีค่าเท่ากับ 3.4 ไมครอน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ Zeolite NaA มีค่าเท่ากับ 5.3 ไมครอน ซึ่งค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสารตัวเดิมทั้งสองมีค่ามากกว่าค่าที่บริษัทให้มา (CaCO_3 2.7 ไมครอนและ Zeolite NaA 4.0 ไมครอน) อาจเป็นเพราะเทคนิคในการใช้หาขนาดอนุภาคแตกต่างกันทำให้ได้ค่าที่ต่างกัน แต่ก็ถือว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน

4.1.2 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)



(a)

(b)

รูปที่ 4.1 ภาพ SEM : (a) CaCO_3 และ (b) Zeolite NaA ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า

จากรูปที่ 4.1 (a) แสดงตัวอย่างขนาดอนุภาคของ CaCO_3 ที่มีขนาดเท่ากับ 2.8 ไมครอน มีขนาดอนุภาคที่หลากหลายทั้งขนาดที่เล็กกว่าค่าขนาดอนุภาคที่วัดได้และใหญ่กว่ามาก ๆ พบว่า CaCO_3 มีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมและมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) มากกว่าอยู่เป็นอนุภาคเดี่ยว (Single particle) เนื่องจากแรงดึงดูดของอนุภาคเป็นแรงดึงดูดระหว่างกันของสารที่มีขั้ว และรูปที่ 4.2 (b) แสดงตัวอย่างขนาดอนุภาคของ Zeolite NaA ที่มีขนาดเท่ากับ 2.3 ไมครอน โดยรวมมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดอนุภาคที่วัดได้และใหญ่กว่าเล็กน้อย มีรูปร่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ อยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ที่เห็นได้ชัดว่าเกิดจากการรวมกันของอนุภาคเดี่ยว ๆ แสดงว่ามีแรงดึงดูดของอนุภาคมากเพราะ Zeolite NaA มีขั้วสูง นั่นคือในขั้นตอนการผสมสารตัวเติมที่มีขั้วกับ LDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วจะต้องใช้แรงเฉือนที่สูงกว่าแรงดึงดูดของอนุภาคสารตัวเติมเพื่อให้เกิดการแตกและกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ที่ดี

4.2 ปริมาณสารตัวเติมในฟิล์มตัวอย่าง

จากการทดสอบเพื่อหาปริมาณที่แน่นอนของสารตัวเติมที่มีอยู่ในฟิล์มตัวอย่างตามหัวข้อ 3.5.1 โดยใช้ 2 เทคนิค คือ TGA และการเผา (แสดงการคำนวณไว้ในภาคผนวก ก) จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณสารตัวเติมในฟิล์มตัวอย่าง

สูตร	ปริมาณสารตัวเติมที่กำหนดไว้ (%wt)	ปริมาณสารตัวเติมที่พบในเทคนิค TGA (%wt)	ปริมาณสารตัวเติมที่พบในเทคนิคการเผา (%wt)
LDPE	0.00	0.00	0.00
LD/Ca2	2.00	2.36	2.15
LD/Ca4	4.00	3.48	3.00
LD/Ca6	6.00	4.60	4.06
LD/Ca6/SA	6.00	3.83	5.76
LD/ZA2	2.00	1.11	1.79
LD/ZA4	4.00	2.34	3.32
LD/ZA6	6.00	5.42	4.75
LD/ZA6/SA	6.00	4.63	5.31

จากการทดลองเบื้องต้น (ดูตารางที่ 4.1 ประกอบ) พบว่าปริมาณสารตัวเติมที่มีอยู่จริงในฟิล์มตัวอย่างในเทคนิค TGA มีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ อาจเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างขั้วของ LDPE กับสารตัวเติม และ LDPE มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าและความหนาแน่นน้อยกว่าสารตัวเติม เมื่อเท LDPE ที่ผสมสารตัวเติมลงในฮอปเปอร์ (Hopper) ของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ อนุภาคของสารตัวเติมจะตกลงอยู่ที่ส่วนล่างของ Hopper และเคลื่อนที่ได้ยากกว่าเม็ด LDPE เมื่อสกรูหมุนเคลื่อนที่ไปทำให้เกิดการแยกกันระหว่างเม็ด LDPE กับอนุภาคสารตัวเติมได้ง่าย ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตได้ว่าหลังการผสมจะมีสารตัวเติมบางส่วนติดค้างอยู่ส่วนล่างของ Hopper และจากเทคนิค TGA นั้นมีการใช้ฟิล์มตัวอย่างในปริมาณน้อย (ประมาณ 5-6 มิลลิกรัม) จึงนำฟิล์มตัวอย่างมาทดสอบด้วยวิธีเผาเพื่อยืนยันผลการทดลอง ซึ่งเทคนิคนี้มีการใช้ฟิล์มตัวอย่างในปริมาณที่มากกว่า (ประมาณ 1 กรัม) พบว่าค่าที่ได้จากเทคนิคการเผามีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้เช่นกันและค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลจาก TGA

ในงานวิจัยนี้จึงขอใช้ผลจากเทคนิค TGA แม้ว่าจะใช้ปริมาณสารน้อยกว่า แต่ในกรณีทดสอบฟิล์มตัวอย่างที่มีการใช้ Zeolite NaA เป็นสารตัวเติมซึ่งมีความชอบน้ำมาก การทดสอบด้วยเทคนิค TGA น่าจะมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าเทคนิคการเผาเพราะการที่ต้องนำสารออกจากเตาเผาเพื่อมาชั่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดจากการดูดซึมน้ำของ Zeolite NaA ระหว่างการทดสอบได้

4.3 สมบัติทางความร้อน

นำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มาทำการตรวจสอบเพื่อศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 โดยนำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

T_m คือ อุณหภูมิของการหลอมผลึก

ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

%Crystallinity คือ เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกในสารตัวอย่าง

ΔH_f° คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PC ที่มีความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 293 J/g [27]

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนในฟิล์มตัวอย่าง

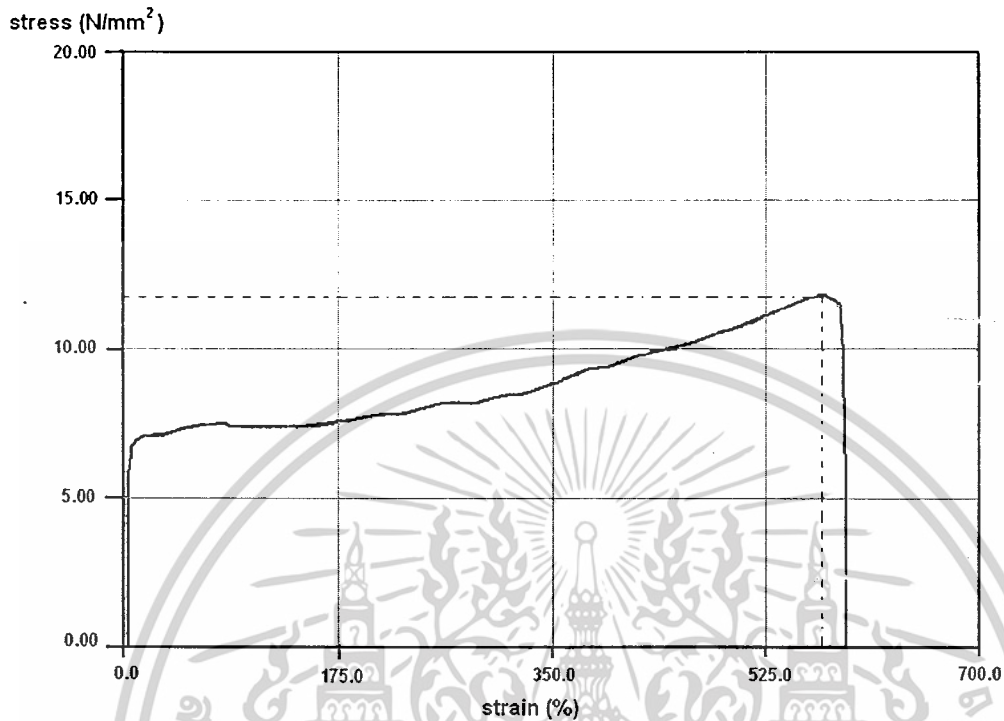
สูตร	ปริมาณสารตัวเติม ที่มีอยู่จริง (%wt)	T_m (°C)	ΔH_f (Normalised) (J/g)	%Crystallinity
LDPE	0.00	109	82.85	28
LD/Ca2	2.36	109	82.90	28
LD/Ca4	3.48	109	86.23	29
LD/Ca6	4.60	109	87.81	30
LD/Ca6/SA	3.83	110	87.46	30
LD/ZA2	1.11	110	121.82	42
LD/ZA4	2.34	110	87.63	30
LD/ZA6	5.42	109	70.53	24
LD/ZA6/SA	4.63	110	71.04	24

จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น อุณหภูมิในการหลอมผลึก (T_m) มีค่าคงที่ แสดงให้เห็นว่าการใช้ CaCO_3 หรือ Zeolite NaA ในฟิล์มตัวอย่างมิได้มีผลต่อความสมบูรณ์และขนาดของผลึก นอกจากนี้สารตัวเติมทั้งสองชนิดไม่ได้ไปขัดขวางการเกิดผลึก โดยดูได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกในฟิล์มตัวอย่างที่มีค่าใกล้เคียงกันกับ LDPE ยกเว้นการใช้ Zeolite NaA ในปริมาณที่มากขึ้น (ที่ประมาณ 6%wt) จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลงเล็กน้อย

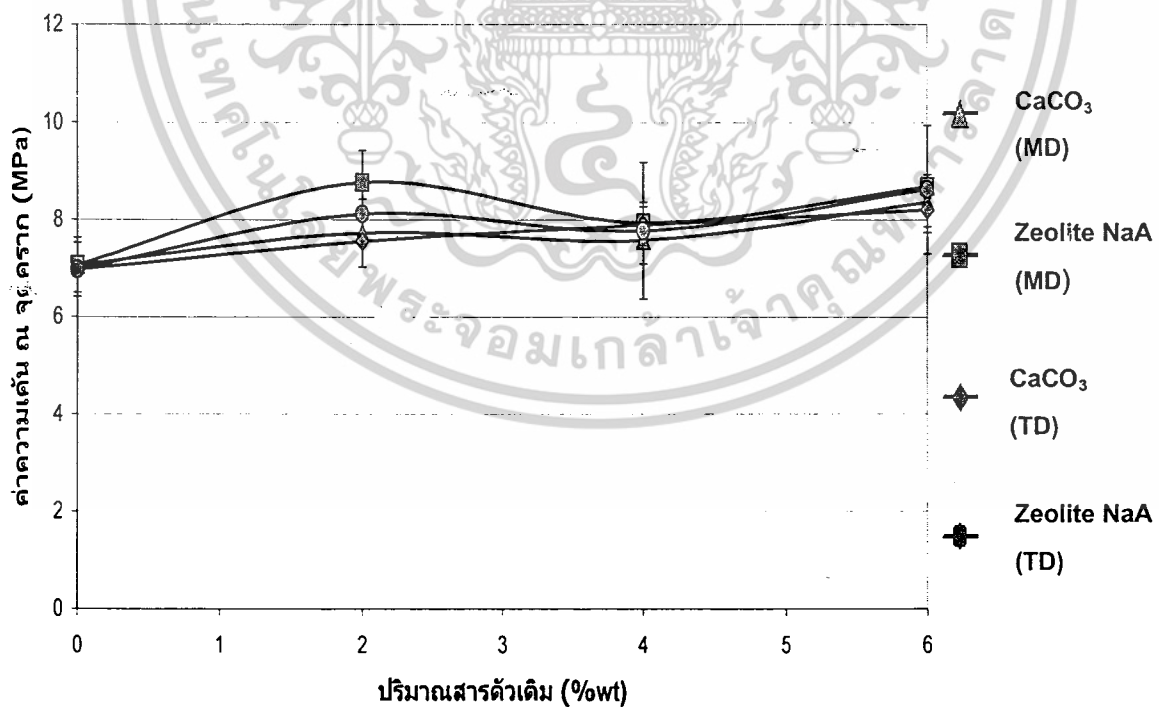
4.4 สมบัติเชิงกล

4.4.1 ผลการทดสอบการรับแรงดึง

จากการทดสอบการรับแรงดึงตามหัวข้อ 3.5.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมทั้งที่มีและไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) โดยรูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของฟิล์ม LDPE เมื่อได้รับแรงดึง

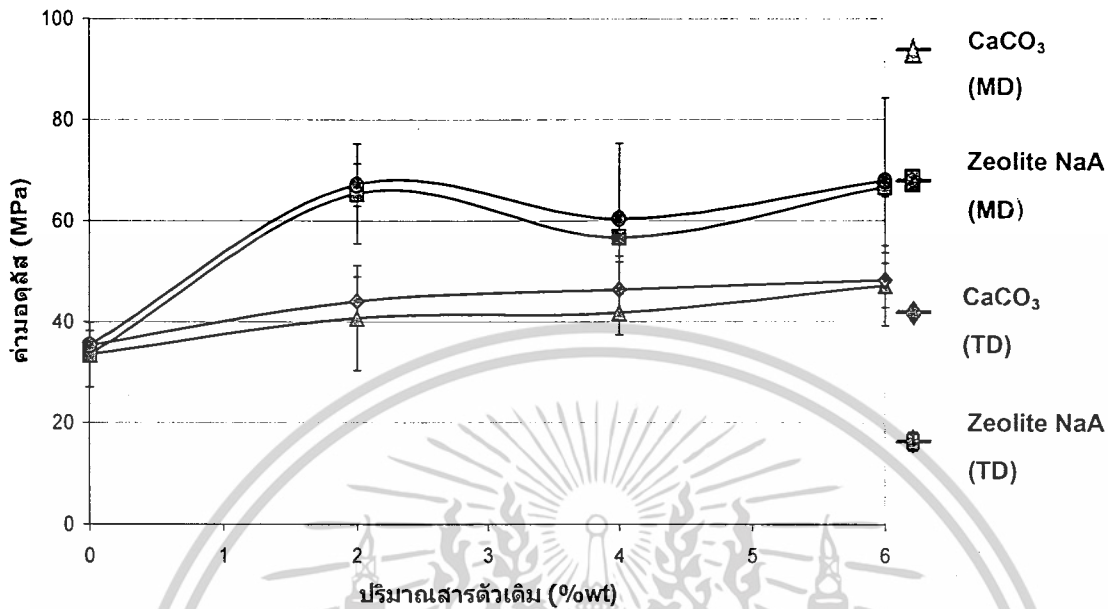


รูปที่ 4.2 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบการรับแรงดึงของ LDPE



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น ณ จุดครากกับปริมาณสารตัวเติมของฟิล์มตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสกับปริมาณสารตัวเติมของฟิล์มตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ค่าความเค้น ณ จุดครากมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากการใช้สารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง (Non-reinforcing filler) ในปริมาณน้อยทำให้ค่าความเค้น ณ จุดครากไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสารตัวเติมที่ใช้มีมอดูลัสสูงกว่าพอลิเมอร์ เพราะสารตัวเติมเป็นของแข็งยากที่จะเปลี่ยนรูปทำให้ต้องใช้แรงกระทำสูงเพื่อยับสายโซ่พอลิเมอร์ และเมื่อพิจารณาสารตัวเติมที่ต่างชนิดกัน นั่นคือ CaCO₃ และ Zeolite NaA พบว่าฟิล์มที่มี Zeolite NaA เป็นสารตัวเติมมีค่ามอดูลัสมากกว่าฟิล์มที่มี CaCO₃ เป็นสารตัวเติม เนื่องจาก Zeolite NaA เป็นสารอนินทรีย์และมีโครงสร้างเป็นซิลิเกตที่มีความแข็งมากกว่า CaCO₃ (Zeolite NaA 7 mohs [28] และ CaCO₃ 3 mohs [29]) จากการทดสอบฟิล์มทั้งสองแนวพบว่าฟิล์มที่ทดสอบในแนว MD มีค่าความเค้น ณ จุดครากและค่ามอดูลัสใกล้เคียงกันกับฟิล์มที่ทดสอบในแนว TD จากกระบวนการเป่าฟิล์มความเค้น ณ จุดครากของฟิล์มที่ผลิตได้มาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของ LDPE ที่ดึงขึ้นมาจากอัตราเร็วในการดึงฟิล์มม้วนเก็บสำหรับแนว MD และจากแรงลมที่ใช้ในการเป่าให้ท่อฟิล์มขยายสำหรับแนว TD ในงานวิจัยนี้ใช้อัตราเร็วในการดึงฟิล์มม้วนเก็บ เท่ากับ 1.5 mm/min และแรงลมในการเป่าขยายท่อฟิล์มเท่ากับ 0.2 MPa แสดงว่าสถานะในการผลิตฟิล์มที่ใช้ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลทั้งสองทิศทางได้ดีพอ ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าความเค้น ณ จุดครากของฟิล์มตัวอย่างที่มีและไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริก

สูตร	ค่าความเค้น ณ จุดคราก (MPa)	
	แนว MD	แนว TD
LD/Ca6	8.37 ± 0.51	8.21 ± 0.47
LD/Ca6/SA	8.19 ± 0.47	7.90 ± 0.22
LD/ZA6	8.69 ± 0.24	8.62 ± 1.32
LD/ZA6/SA	8.38 ± 0.40	8.17 ± 0.45

ตารางที่ 4.4 ค่ามอดูลัสของฟิล์มตัวอย่างที่มีและไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริก

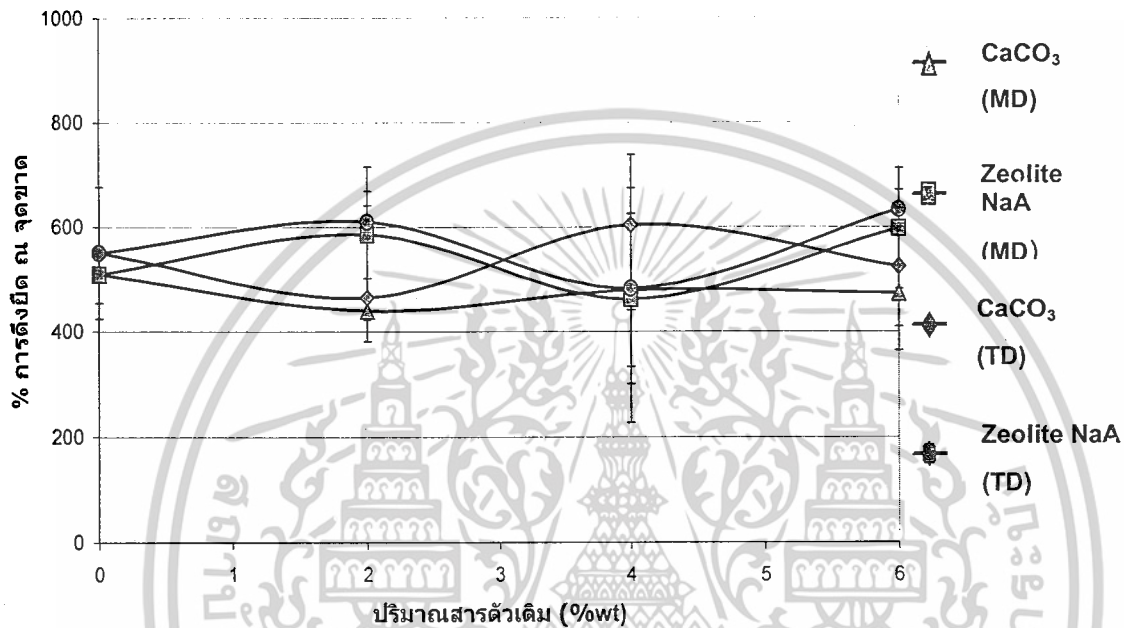
สูตร	ค่ามอดูลัส (MPa)	
	แนว MD	แนว TD
LD/Ca6	47 ± 8	48 ± 5
LD/Ca6/SA	44 ± 5	46 ± 4
LD/ZA6	67 ± 2	68 ± 16
LD/ZA6/SA	61 ± 5	64 ± 6

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [18] พบว่าการใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยผสมจะทำให้การกระจายตัวของสารตัวเติมดีขึ้นส่งผลให้ค่าความเค้น ณ จุดครากเพิ่มมากขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้น ณ จุดครากและค่ามอดูลัสของฟิล์มที่มีสารตัวเติม 6%wt เมื่อใช้กรดสเตียริกอาจเป็นเพราะสารตัวเติมที่ใช้มีปริมาณน้อยซึ่งมีการกระจายตัวคืออยู่แล้ว และเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริกจึงไม่มีผลต่อค่าความเค้น ณ จุดครากและค่ามอดูลัสของฟิล์มตัวอย่างที่ชัดเจนดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม (0-6%wt) ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงไม่แน่นอน ค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างมาก แต่โดยรวมค่าที่ได้ถือว่ามีความใกล้เคียงกันกับฟิล์ม LDPE อาจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเพราะมีปริมาณสารตัวเติมค่อนข้างน้อยและอาจมีฟองอากาศในฟิล์มตัวอย่างบ้างและเมื่อเปรียบเทียบสูตรที่สารตัวเติมมีและไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดเตียริก พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดกับปริมาณสารตัวเติมของฟิล์มตัวอย่าง

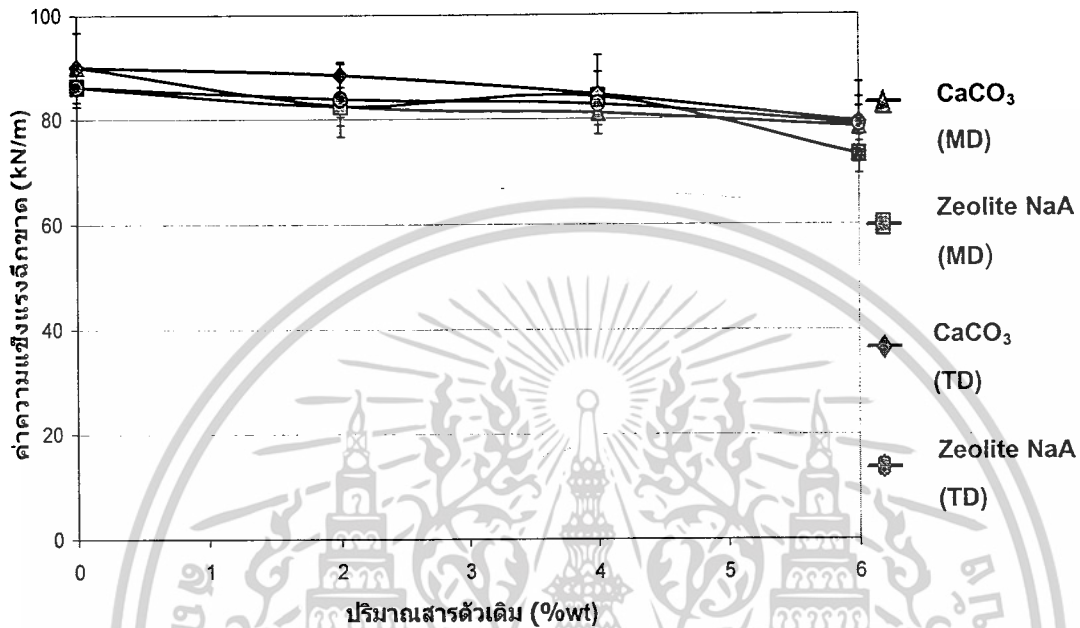
ตารางที่ 4.5 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของฟิล์มตัวอย่างที่มีและไม่มีกรปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดเตียริก

สูตร	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด	
	แนว MD	แนว TD
LD/Ca6	474 ± 110	525 ± 98
LD/Ca6/SA	558 ± 36	656 ± 57
LD/ZA6	597 ± 145	633 ± 38
LD/ZA6/SA	532 ± 95	483 ± 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด

จากการทดสอบตามหัวข้อ 3.5.4 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m) กับปริมาณสารตัวเติมของฟิล์มตัวอย่าง

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m) ของฟิล์มตัวอย่างที่มีและไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริก

สูตร	ค่าความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	
	แนว MD	แนว TD
LD/Ca6	78 ± 6	79 ± 8
LD/Ca6/SA	76 ± 2	74 ± 3
LD/ZA6	73 ± 4	79 ± 3
LD/ZA6/SA	83 ± 6	72 ± 1

จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อปริมาณสารตัวเติมทั้ง CaCO₃ และ Zeolite NaA เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงฉีกขาดทั้งในทิศทาง MD และ TD มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการใช้ชั้นงานตัวอย่างเป็นรูปปึกนกเป็นการสร้างให้บริเวณที่มุมของชิ้นงานเสมือนเป็นจุดสะสมความเค้น

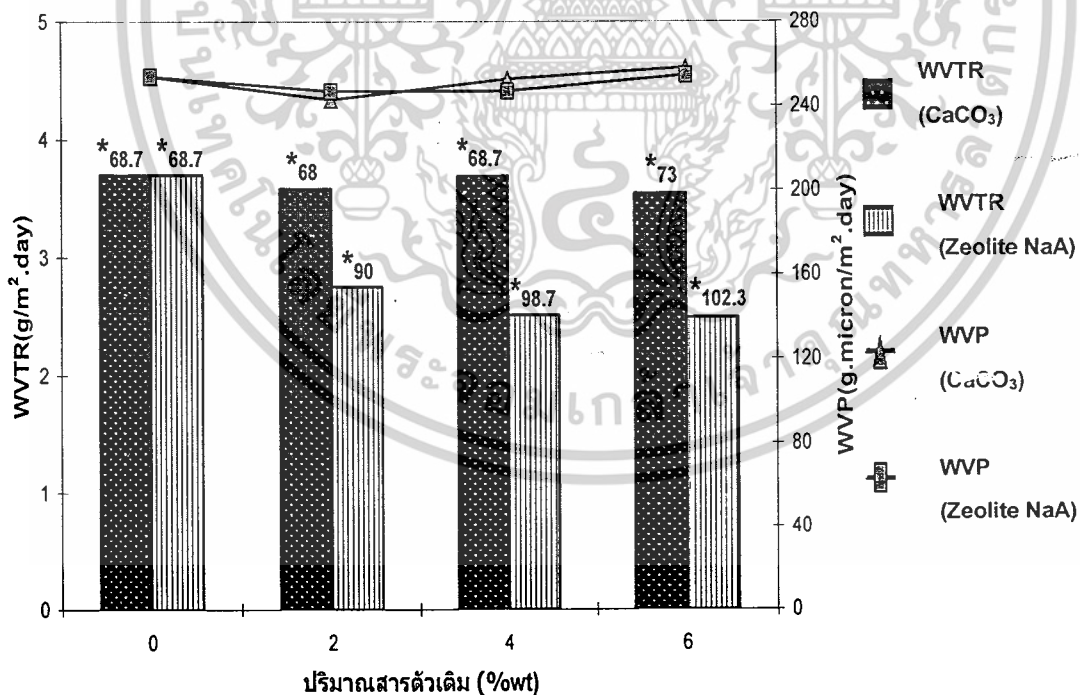
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พร้อมที่จะเกิดการฉีกขาดได้อย่างง่ายดายเมื่อได้รับแรงดึง ดังนั้นเมื่อใส่สารตัวเติมที่เป็นอนุภาคของแข็งมากขึ้นทำให้มีโอกาสที่จะเกิดความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration) เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการฉีกขาดมากขึ้น ค่าความแข็งแรงฉีกขาดจึงลดลง

จากตารางที่ 4.6 พบว่าค่าความแข็งแรงฉีกขาดในฟิล์มตัวอย่างที่ผสม CaCO_3 ทั้งในสูตรที่มีและไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริกมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนสูตรที่มี Zeolite NaA ที่มีและไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริกมีค่าความแข็งแรงฉีกขาดในแนว MD เพิ่มขึ้นแต่ในแนว TD ลดลง ซึ่งไม่แน่นอนอาจเนื่องมาจากฟองอากาศในฟิล์มที่มี Zeolite NaA เป็นสารตัวเติมมีมากกว่าในสูตร CaCO_3 เนื่องจาก Zeolite NaA มีความชอบน้ำมากกว่า

4.5 การซึมผ่านของไอน้ำ

จากการทดสอบตามหัวข้อ 3.5.5 จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 โดยจากค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate; WVTR) สามารถนำมาคำนวณหาความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Permeability; WVP) โดยนำค่าความหนาคูณกับ WVTR (ข้อมูลดิบและวิธีการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.7 ค่า WVTR และ WVP กับปริมาณสารตัวเติมของฟิล์มตัวอย่าง (หมายเหตุ * หมายถึงความหนาของฟิล์ม : ไมครอน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่า WVTR และ WVP ของฟิล์มตัวอย่างที่มีและไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติม ด้วยกรดเตตระอิก

สูตร	ความหนาเฉลี่ย (μm)	WVTR เฉลี่ย ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)	WVP เฉลี่ย ($\text{g} \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)
LD/Ca6	73.0	3.54	257.96
LD/Ca6/SA	74.7	3.22	240.19
LD/ZA6	102.3	2.49	254.51
LD/ZA6/SA	101.0	2.74	276.60

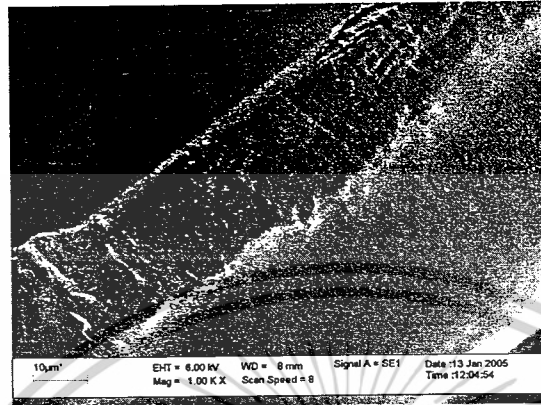
จากรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.7 พบว่าฟิล์มตัวอย่างทุกสูตรมีค่า WVP มีค่าน้อยมากเนื่องจากฟิล์มตัวอย่างที่ได้มีความหนาและการขึ้นรูปแบบเป่าฟิล์มทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวดีทั้งสองทิศทาง (Biaxial Orientation) จึงขัดขวางการซึมผ่านไอน้ำได้ดี การซึมผ่านไอน้ำจึงน้อย ทั้งนี้ความเป็นไปได้ที่ไอน้ำจะซึมผ่านแผ่นฟิล์มมีอยู่ 4 ทางด้วยกันคือ

1. ไอน้ำสามารถซึมผ่านบริเวณที่เป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์
2. ไอน้ำสามารถซึมผ่านช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคของ LDPE กับสารตัวเติม
3. ไอน้ำสามารถซึมผ่านรูพรุนของสารตัวเติม ซึ่งจะเกิดได้ในกรณีที่รูพรุนของสารตัวเติมต้องมีความชอบน้ำและมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคของไอน้ำ
4. ไอน้ำสามารถซึมผ่านบริเวณที่เป็นช่องว่าง (Voids)

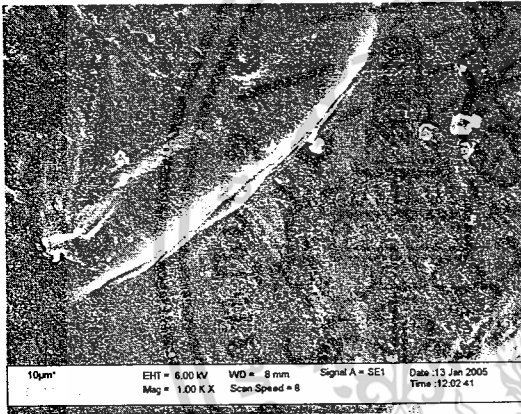
แต่จากสมบัติทางความร้อนพบว่าฟิล์มทุกตัวอย่างมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกพอ ๆ กัน ดังนั้นความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำในส่วนที่เป็นอสัณฐานน่าจะเหมือนกัน โดยทฤษฎีแล้วในกรณีของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้น่าจะมีการซึมผ่านไอน้ำมากขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมมากขึ้น โดยปัจจัยที่ 2 และ 4 สำหรับการใส่ CaCO_3 เป็นสารตัวเติม และปัจจัยที่ 2, 3 และ 4 สำหรับการใส่ Zeolite NaA เป็นสารตัวเติม และค่า WVP มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้นเป็นเพราะฟิล์มที่ผลิตได้มีความหนา จึงทำให้การเติมสารตัวเติมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจึงไม่ส่งผลมากนัก

นอกจากนี้พบว่าฟิล์มที่ใช้ Zeolite NaA เป็นสารตัวเติมมีความหนามากกว่าฟิล์มที่ใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติมเนื่องจาก Zeolite NaA มีโอกาสที่จะเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนได้มากกว่า CaCO_3 ทำให้มีความหนืดของระบบมากกว่า ความหนาของฟิล์มที่ได้จึงหนากว่า และจากตารางที่ 4.7 พบว่าในกรณีการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดเตตระอิกก็ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง

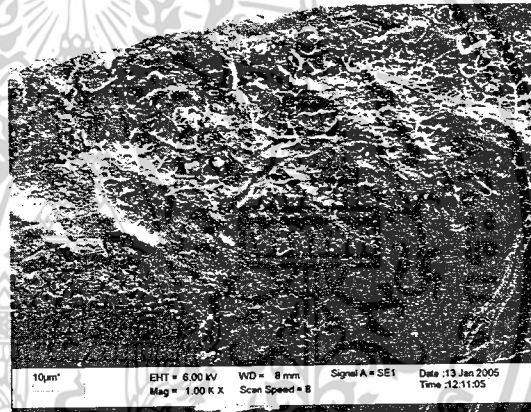
4.6 ลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในแผ่นฟิล์ม



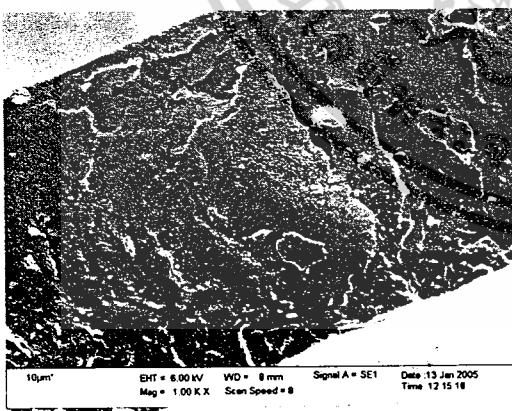
(a) LDPE



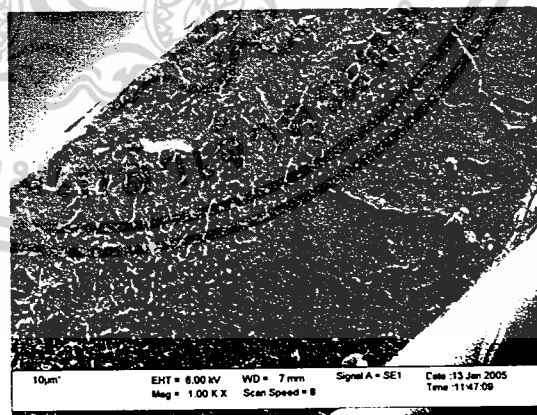
(b) LD/Ca2



(c) LD/Ca4



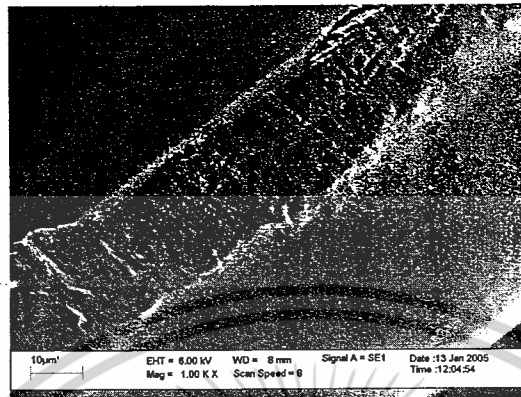
(d) LD/Ca6



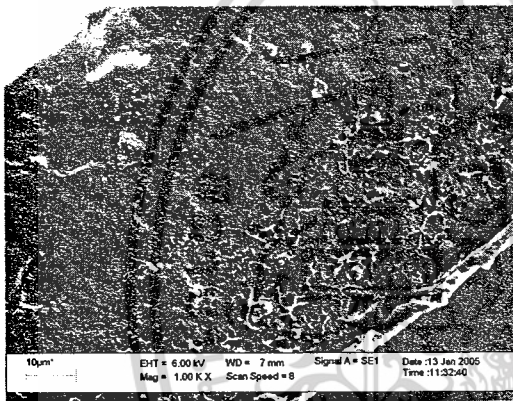
(e) LD/Ca6/SA

รูปที่ 4.8 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักที่อุณหภูมิต่างๆของฟิล์มตัวอย่างที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

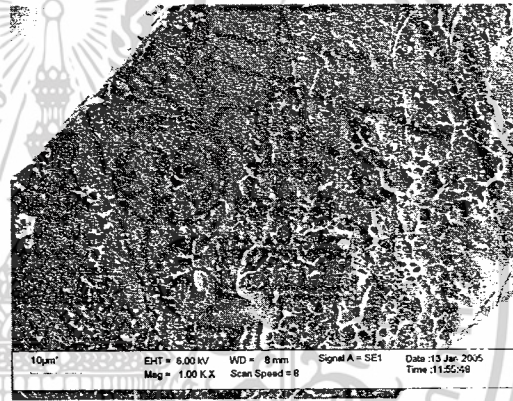
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



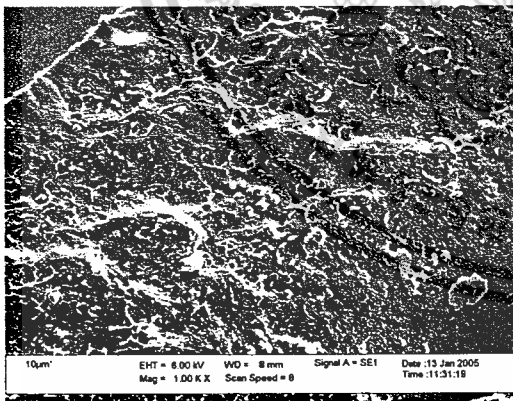
(a) LDPE



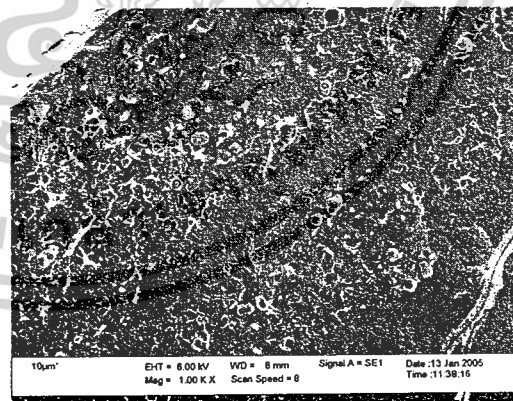
(f) LD/ZA2



(g) LD/ZA4



(h) LD/ZA6



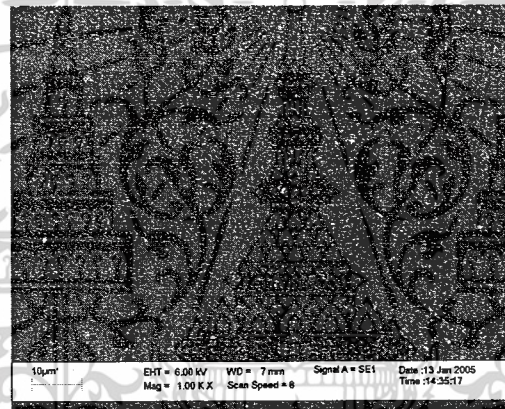
(i) LD/ZA6/SA

รูปที่ 4.9 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มตัวอย่างที่มี Zeolite NaA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

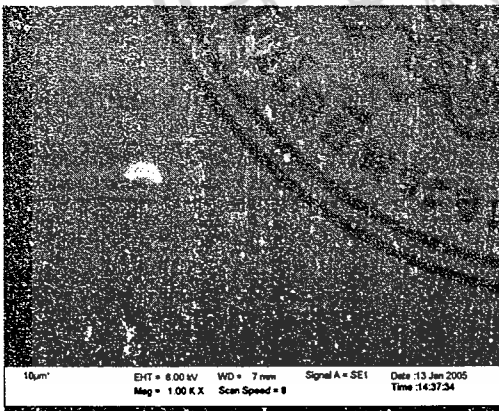
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าเมื่อใส่สารตัวเติมทั้ง CaCO_3 และ Zeolite NaA ในปริมาณมากขึ้น (0-6%wt) สามารถเห็นอนุภาคของสารตัวเติมได้มากขึ้นและเห็นได้ว่าทุกตัวอย่างนั้นสารตัวเติมอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (Poor Distribution) แต่แตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว (Good Dispersion) และเมื่อพิจารณาในสูตรที่มีการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริกพบว่า มีการกระจายตัวดีพอ ๆ กับสูตรที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริก เนื่องจากปริมาณสารตัวเติมที่ 6%wt นี้ยังมีปริมาณไม่มากพอที่จะทำให้สารตัวเติมเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน (Aggregate)

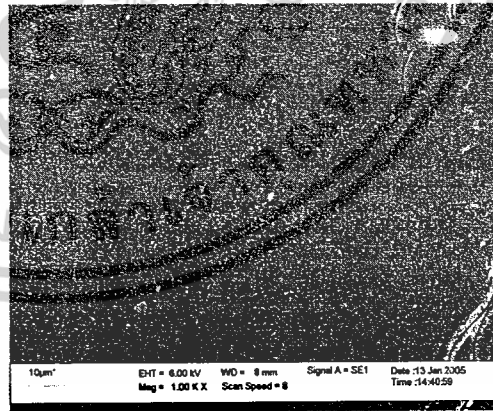
4.7 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่าง



(a) LDPE

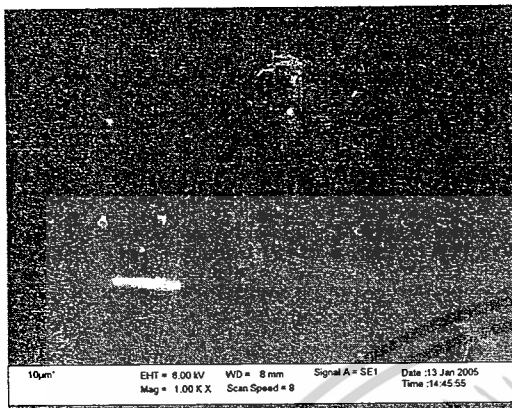


(b) LD/Ca2



(c) LD/Ca4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

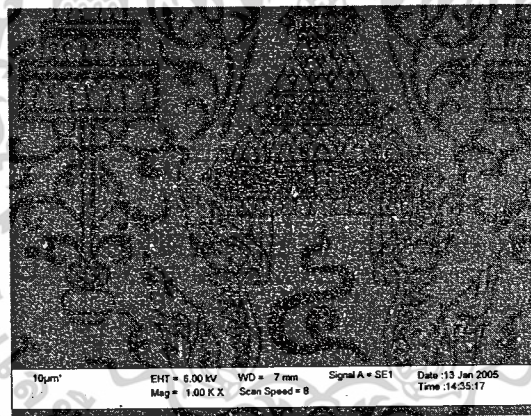


(d) LD/Ca6

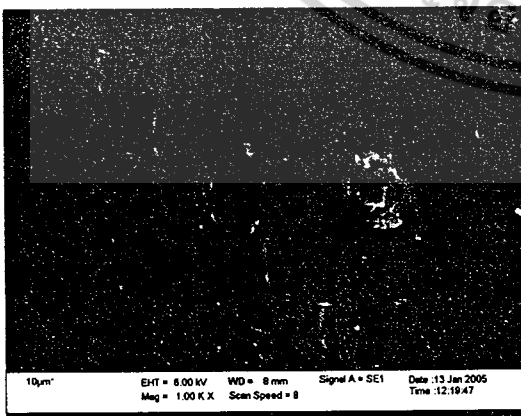


(e) LD/Ca6/SA

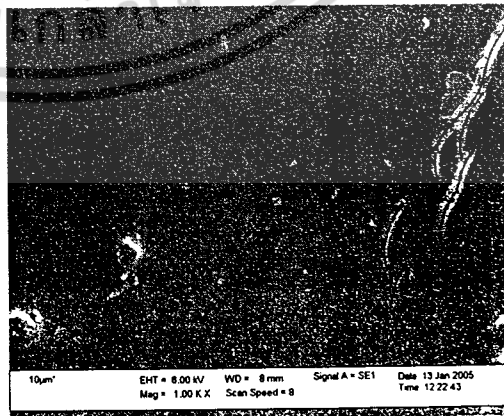
รูปที่ 4.10 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่างที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ



(a) LDPE

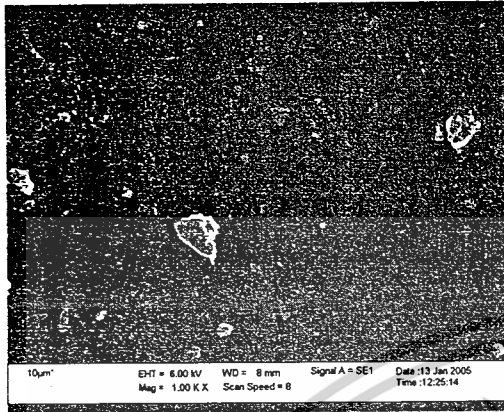


(f) LD/ZA2

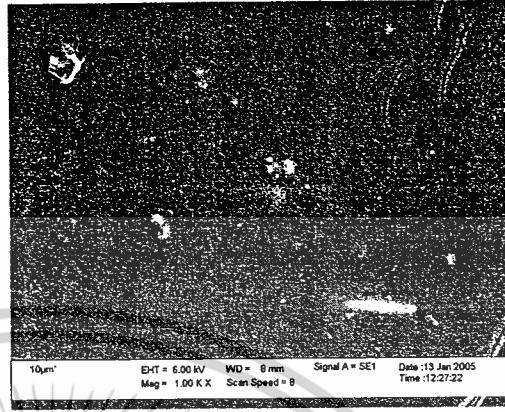


(g) LD/ZA4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(h) LD/ZA6



(i) LD/ZA6/SA

รูปที่ 4.11 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่างที่มี Zeolite NaA เป็นสารตัวเติมใน ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าเมื่อปริมาณสารตัวเติมทั้ง CaCO_3 และ Zeolite NaA เพิ่มขึ้น จะทำให้พื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระเพิ่มขึ้น สังเกตจากสารตัวเติมและสิ่งเจือปนที่ปรากฏได้ชัดเจนบนพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น และเมื่อสัมผัสพบว่ามีความลื่นลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการใช้ CaCO_3 และ Zeolite NaA ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (ประมาณ 3-5 ไมครอน) เป็นสารตัวเติมในฟิล์ม LDPE พบว่าสารตัวเติมทั้งสองไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนคู่ได้จากค่าอุณหภูมิในการหลอมผลึก (T_m) ที่ไม่เปลี่ยนแปลงและไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก

ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารตัวเติมทั้ง CaCO_3 และ Zeolite NaA เพิ่มขึ้น ค่าความเค้น ณ จุดครากและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าความแข็งแรงฉีกขาดมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบชนิดของสารตัวเติมที่ใช้พบว่าฟิล์มที่มี Zeolite NaA เป็นสารตัวเติมมีค่ามอดูลัสสูงกว่าฟิล์มที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมแต่มีค่าความแข็งแรงฉีกขาดใกล้เคียงกัน

สมบัติเชิงกลของฟิล์มตัวอย่างที่ศึกษามีค่าใกล้เคียงกันทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และ แนวขวางเครื่องจักร (TD) แสดงว่าฟิล์มมีการจัดเรียงตัวสมดุลงทั้ง 2 แนว

สูตรที่มีการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติม (6%wt) ด้วยกรดสเตียริก (1%wt) พบว่ามีค่าความเค้น ณ จุดคราก ค่ามอดูลัส ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดและสมบัติการซึมผ่านไอน้ำที่ใกล้เคียงกันกับในกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติมด้วยกรดสเตียริก เนื่องจากมีการใช้สารตัวเติมปริมาณน้อยทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อใช้สารตัวเติมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกเมื่อใส่สารตัวเติมในปริมาณเพิ่มขึ้นพบว่ามีสมบัติการซึมผ่านไอน้ำใกล้เคียงกันเนื่องจากฟิล์มที่ผลิตได้มีความหนาแน่นและการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ทำให้ฟิล์มที่ได้มีความเป็นผลึกมาก

จากผลการทดสอบโดยรวมพบว่าชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่ดีที่สุดคือ Zeolite NaA 6%wt เนื่องจากมีค่ามอดูลัสดีที่สุด ส่วนสมบัติอื่น ๆ ก็ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันกับสูตรอื่น ๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการขึ้นรูปควรเลือกใช้เครื่องอัดรีดที่มีระบบระบายไอน้ำ (Vent) เนื่องจาก Zeolite NaA มีความสามารถในการดูดน้ำได้ดีทำให้ระหว่างการขึ้นรูปฟิล์มอาจเกิดฟองอากาศขึ้นได้
2. ควรขึ้นรูปฟิล์ม Zeolite NaA ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบอื่นเพื่อให้สามารถเติม Zeolite NaA ในปริมาณที่มากขึ้นได้ เนื่องจากการเตรียมฟิล์มที่มี Zeolite NaA เป็นสารตัวเติมไม่เหมาะสมกับวิธีการขึ้นรูปแบบเป่าฟิล์มเพราะมีข้อจำกัดเรื่องปริมาณ Zeolite NaA ที่สามารถเติมได้

เอกสารอ้างอิง

1. มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์. 2541. เคมีพอลิเมอร์. โครงการตำรา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.
2. ปูนและสมพร คงเจริญเกียรติ. 2541. บรรจุภัณฑ์อาหาร. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมและสมาคมการบรรจุภัณฑ์ไทย. กรุงเทพฯ.
3. W.V. Titow. 1990. **PVC Plastics Properties, Processing and Applications**. Applied Science. London.
4. ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยร่วมกับ บริษัท ไทยโพลีเอทิลีน จำกัด. 2532. การสัมมนาเรื่อง HDPE...บรรจุภัณฑ์ทันสมัย. กรุงเทพฯ.
5. สุภารัตน์ รักชลธิ. 2547. เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีการบรรจุหีบห่อ. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.
6. D. Feldman and A. Barbalata. 1996. **Synthetic Polymers: Technology, Properties, Application**. London.
7. ตะวัน สุนน้อย. 2541. เอกสารประกอบการเรียนวิชาซีโอไลต์และสารมีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.
8. The University of Cambridge. 2002. **Zeolite NaA**. [online]. Available: <http://www-klinowski.ch.cam.ac.uk/>
9. E. Jesse. 1996. **Plastic Additive and Modifiers Handbook I**. London.
10. A.V. Shenoy. 1999. **Rheology of Filled Polymer Systems**. Kluwer Academic Publishers. London.
11. สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2545. เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1. โครงการตำรา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.
12. Chris Rauwendaal. 1994. **Polymer Extrusion**. 3rd ed. Hanser Plublishers. New York.
13. บรรเลง ศรีพิล. 2538. เทคโนโลยีพลาสติก. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ.
14. Walter Soroka. 1999. **Fundamentals of Packaging Technology**. 2nd ed. Institute of Packaging Professionals. Virginia.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. W.R. Hale ,K.K. Dohrer, M.R. Tant and I.D. Sand. 2001. Colloid and Surfaces. 187–188. 483–491.
16. Maged A. Osman, Ayman Atallah and Ulrich W. Suter. 2004. Polymer. 45. 1177–1183.
17. ธนเรศ ประเสริฐวงษ์และธรรารักษ์ แสงภักดี. 2544. การใช้สารช่วยผสมปรับปรุงสมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต. โครงการงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.
18. วนิตา แซ่ลิ่มและสุภาพร ประเสริฐศิริเจริญ. 2545. สมบัติเชิงกล สมบัติการไหลและการซึมผ่านไอน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ. โครงการงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.
19. Ioannis Arvanitoyannis, Costas G. Biliaderis, Hiromasa Ogawa and Norioki Kawasaki. 1998. Carbohydrate Polymers. 36. 89–104.
20. Alexander Stroeks. 2001. Polymer. 42. 9903–9908.
21. เอกสารบริษัท ซีซีซี เคมีภัณฑ์ จำกัด
22. เอกสารบริษัทพีคิว เคมีคัล (ประเทศไทย) จำกัด
23. เอกสารบริษัทสุรินทร์ออมยา เคมีคัล จำกัด
24. Annual Book of ASTM Standard. Vol.08.03. 1992. 159–180.
25. Annual Book of ASTM Standard. Vol.08.01. 1992. 361–363.
26. Annual Book of ASTM Standard. Vol.08.03. 1992. 845–852.
27. Annual Book of ASTM Standard. Vol.08.03. 1988. 52–73.
28. Zeolite Australia Limited. Zeolite NaA. [online]. Available:<http://www.zeolite.com.au/products/technical%20specs.pdf>
29. CCA-Europe. Caciarn Carbonate. [online]. Available:<http://www.ima-eu.org/en/ccawhat.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

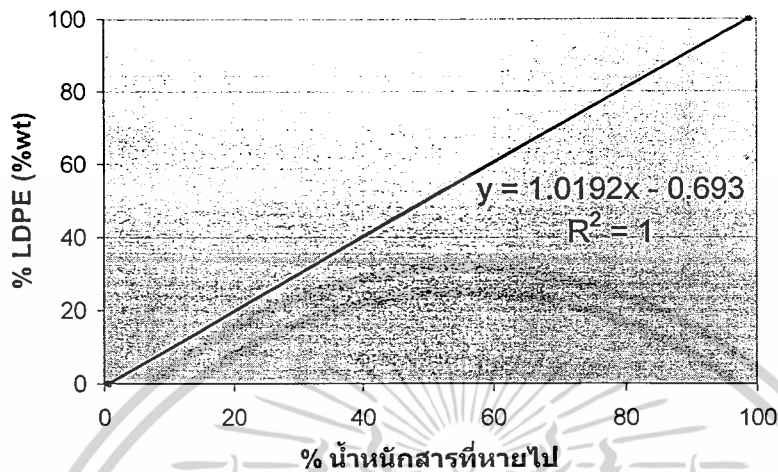
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ผลการหาสารตัวเติมที่มีอยู่จริงในฟิล์มตัวอย่าง

- โดยใช้เครื่อง Thermal gravimetric analyzer

สูตร	%สารที่หายไป			%LDPE	%สารตัวเติม
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		
LDPE	99.00	98.60	98.80	100.00	0.00
CaCO ₃	0.70	0.66	0.68	0.00	100.00
Zeolite NaA	17.70	17.50	17.60	0.00	100.00
LD/Ca2	96.50	96.50	96.50	97.64	2.36
LD/Ca4	94.60	96.10	95.40	96.52	3.48
LD/Ca6	94.10	94.40	94.30	95.40	4.60
LD/Ca6/SA	94.70	95.42	95.06	96.17	3.83
LD/ZA2	97.80	98.00	97.90	98.89	1.11
LD/ZA4	97.10	96.70	96.90	97.66	2.34
LD/ZA6	94.50	94.20	94.40	94.58	5.42
LD/ZA6/SA	95.10	94.98	95.04	95.37	4.63

นำเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารที่หายไป (%Weight loss) จากการเผา LDPE 100%wt และสารตัวเติม (CaCO₃ และ Zeolite NaA) มาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารที่หายไปกับเปอร์เซ็นต์ของ LDPE โดยพบว่า เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารที่หายไปของ LDPE และ CaCO₃ เท่ากับ 98.8 และ 0.68 %wt ตามลำดับ นำข้อมูลที่ได้มาวาดกราฟ



จากกราฟจะได้สมการเส้นตรง $y = 1.0192x - 0.693$ จากนั้นนำเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารที่หายไปในแต่ละสูตรมาแทนที่ค่า x ทำให้สามารถหาค่า y ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ของ LDPE ที่มีอยู่จริง แล้วนำมาหักออกจาก 100% จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ของ CaCO_3 ที่มีอยู่จริงได้ เช่น สูตร LD/Ca2 ค่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารที่หายไป เท่ากับ 96.5 %wt ซึ่งน้ำหนักสารที่หายไปนี้คือ LDPE นำไปแทนในสมการ

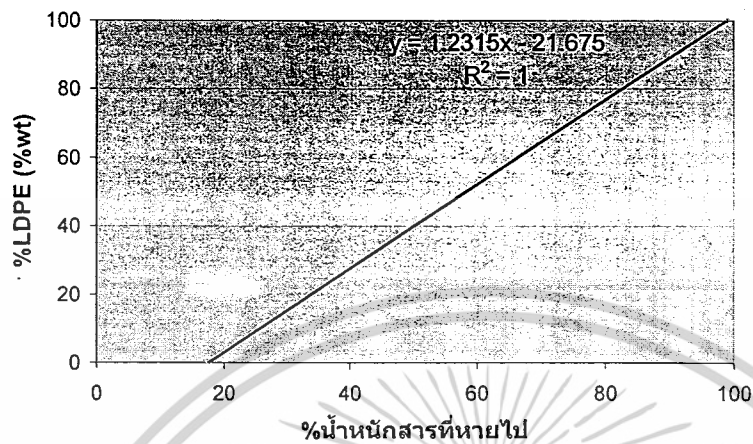
$$y = 1.0192x - 0.693$$

$$y = (1.0192 \times 96.5) - 0.693$$

$$y = 97.64$$

ดังนั้นปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในสูตร LD/Ca2 มีค่าเท่ากับ 2.36 %wt จำนวนเช่นเดียวกันนี้ในสูตรที่เหลือ

หาปริมาณของ Zeolite NaA ที่มีอยู่จริงในฟิล์มตัวอย่างด้วยวิธีเดียวกันดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จากข้อมูลเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารที่หายไปของ LDPE และ Zeolite NaA เท่ากับ 98.8 และ 17.6 %wt ตามลำดับ นำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารที่หายไปกับเปอร์เซ็นต์ของ LDPE



จากกราฟจะได้สมการเส้นตรง $y = 1.2315x - 21.675$ จากนั้นนำเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรที่หายไปในแต่ละสูตรมาแทนที่ค่า x ทำให้สามารถหาค่า y ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ของ LDPE ที่มีอยู่จริง แล้วนำมาหักออกจาก 100% จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ของ Zeolite NaA ที่มีอยู่จริงได้ เช่น สูตร LD/ZA2 ค่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรที่หายไป เท่ากับ 97.9 %wt ซึ่งน้ำหนักรที่หายไปนี้คือ LDPE นำไปแทนในสมการ

$$y = 1.2315x - 21.675$$

$$y = (1.2315 * 97.9) - 21.675$$

$$y = 98.89$$

ดังนั้นปริมาณที่แน่นอนของ Zeolite NaA ในสูตร LD/ZA2 มีค่าเท่ากับ 1.11%wt จำนวนเช่นเดียวกันนี้ในสูตรที่เหลือ

- ค่ายวิธีการเผาสารตัวอย่าง

สูตร	ถ้วย ที่	น้ำหนัก (g)					% สาร ที่เหลือ หลังเผา	% สารที่ เหลือหลัง เผาเฉลี่ย	% filler ที่พบ
		ถ้วย เปล่า	สาร+ถ้วย ก่อนเผา	สารก่อน เผา	สาร+ถ้วย หลังเผา	สารหลัง เผา			
LDPE	1	47.395	48.887	1.492	47.399	0.004	0.275	0.26	0.00
	2	46.053	47.550	1.497	46.057	0.004	0.240	(x1,y1)	
CaCO ₃	1	43.198	50.864	7.666	50.831	7.633	99.568	99.58	100.00
	2	45.044	52.465	7.421	52.434	7.390	99.585	(x2)	
Zeolite NaA	1	47.483	51.332	3.850	51.265	3.782	98.252	98.25	100.00
	2	46.094	50.205	4.111	50.133	4.039	98.249	(y2)	
LD/Ca ₂	1	37.956	38.953	0.998	37.977	0.021	2.095	2.39	2.5
	2	42.223	43.178	0.955	42.248	0.026	2.690	(x3)	
LD/Ca ₄	1	48.163	49.369	1.206	48.198	0.035	2.928	3.23	3.00
	2	45.990	47.398	1.408	46.039	0.050	3.537	(x4)	
LD/Ca ₆	1	40.943	42.081	1.138	40.999	0.056	4.938	4.30	4.06
	2	43.298	44.856	1.558	43.355	0.057	3.646	(x5)	
LD/Ca ₆ /SA	1	51.603	52.669	1.066	51.665	0.062	5.779	5.98	5.76
	2	46.947	48.479	1.532	47.042	0.095	6.182	(x6)	
LD/ZA ₂	1	44.427	46.036	1.610	44.457	0.030	1.870	2.01	1.75
	2	46.202	47.696	1.494	46.234	0.032	2.149	(y3)	
LD/ZA ₄	1	39.917	41.483	1.566	39.976	0.058	3.730	3.51	3.32
	2	41.717	43.292	1.575	41.768	0.052	3.282	(y4)	
LD/ZA ₆	1	47.440	48.956	1.516	47.519	0.079	5.230	4.91	4.75
	2	44.357	45.954	1.597	44.431	0.073	4.596	(y5)	
LD/ZA ₆ /SA	1	39.265	40.526	1.262	39.332	0.068	5.373	5.47	5.31
	2	47.993	48.961	0.968	48.047	0.054	5.557	(y6)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการคำนวณหาปริมาณสารตัวเดิมที่มีอยู่จริงสามารถคำนวณได้ดังนี้

ผลต่างของ %Ash ที่ x_2-x_1 เทียบได้ว่ามี CaCO_3 อยู่จริง 100%

ผลต่างของ %Ash ที่ x_3-x_1 เทียบได้ว่ามี CaCO_3 อยู่จริง $\frac{100 \times (x_3-x_1)}{(x_2-x_1)} \%$

ตัวอย่างการคำนวณ

ผลต่างของ %Ash ที่ 99.319 เทียบได้ว่ามี CaCO_3 อยู่จริง 100%

ผลต่างของ %Ash ที่ 2.134 เทียบได้ว่ามี CaCO_3 อยู่จริง $\frac{100 \times (2.392 - 0.258)}{(99.577 - 0.258)} \%$

ดังนั้นสูตรอื่น ๆ ที่เหลือสามารถคำนวณได้จาก x_3 เป็น x_4, x_5 และ x_6 แทน ส่วนการหาปริมาณ Zeolite NaA สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับวิธีดังกล่าวแต่เปลี่ยนจากค่า x เป็น y ซึ่งผลที่คำนวณได้แสดงดังตารางข้างต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

สูตร	ความหนา (μm)	ความหนาเฉลี่ย (μm)	WVTR ($\text{g}/\text{m}^2.\text{day}$)	WVTR เฉลี่ย ($\text{g}/\text{m}^2.\text{day}$)	WVP ($\text{g}.\mu\text{m}/\text{m}^2.\text{day}$)	WVP เฉลี่ย ($\text{g}.\mu\text{m}/\text{m}^2.\text{day}$)
LDPE	69		3.93		271.17	
	70	68.7	3.64	3.7	254.8	253.94
	67		3.52		235.84	
LD/Ca2	71		3.45		244.95	
	66	68	3.59	3.58	236.94	243.04
	67		3.69		247.26	
LD/Ca4	72		3.43		246.96	
	65	68.7	3.92	3.69	254.8	252.58
	69		3.71		255.99	
LD/Ca6	73		3.63		264.99	
	71	73	3.65	3.54	256.15	257.96
	75		3.33		249.75	
LD/Ca6/SA	75		3.15		236.25	
	78	74.7	3.26	3.22	254.28	240.19
	71		3.24		230.04	
LD/ZA2	91		2.74		249.34	
	92	90	2.6	2.75	239.2	246.95
	87		2.9		252.3	
LD/ZA4	95		2.68		254.6	
	103	98.7	2.37	2.51	244.11	246.92
	98		2.47		242.06	
LD/ZA6	102		2.61		266.22	
	104	102.3	2.49	2.49	258.96	254.51
	101		2.36		258.36	
LD/ZA6/SA	104		2.48		257.92	
	98	101	2.96	2.74	290.08	276.6
	101		2.79		281.79	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้