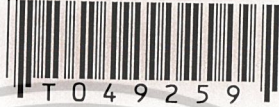


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และการซึมผ่านของไอน้ำของพอลิเอทิลีน
ชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผสมซีโอโลต์โซเดียมเอ



เลขที่.....
เลขทะเบียน 49259
วัน, เดือน, ปี 18 ก.พ. 2547

.b.....
.i.....

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6 21 2015 80

**Mechanical, Rheological, and Water Vapor Permeability of
LLDPE compounded with Zeolite NaA**



**A Special Project 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
Academic Year 2002**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และการซึมผ่านของไอน้ำของพอลิเอทิลีน
ชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ

นักศึกษา นางสาวนิตา แซ่ลิ่ม รหัส 42050108
นางสาวสุภาพร ประเสริฐสิริเจริญ รหัส 42050129

ภาควิชา เคมี
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2545
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุภารัตน์ รักชลธี

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

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


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และการซึมผ่านไอน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ
นักศึกษา	นางสาวนิตา แซ่ลิ่ม นางสาวสุภาพร ประเสริฐศิริเจริญ
ภาควิชา	เคมี คณะวิทยาศาสตร์
สาขา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2545
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สุภรัตน์ รักชลธิ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และการซึมผ่านของไอน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ ทั้งที่มีและไม่มี การปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก และพอลิเอทิลีนคอกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) ทำการผสมสูตรโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นนำไปบดแล้วแบ่งส่วนหนึ่งไปทดสอบการไหล ส่วนที่เหลือนำไปขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อ แล้วนำแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ได้มาหาปริมาณซีโอไลต์ที่มีอยู่จริง และทดสอบสมบัติเชิงกล และการซึมผ่านของไอน้ำ นอกจากนี้ได้มีการศึกษาสมบัติทางความร้อนและการกระจายตัวของซีโอไลต์โซเดียมเอ

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอเพิ่มมากขึ้นความหนืดเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามค่าความแข็งแรงก็ลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอเพิ่มจนถึง 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก หรือ PE-g-MA พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและความแข็งแรงก็ขาด มีค่าใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่มีการปรับปรุง เมื่อใช้ซีโอไลต์ในปริมาณ 9% (มีอยู่จริง 6%) ส่วนค่าอุณหภูมิในการหลอมผลึก (T_m) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าคงที่ ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น แต่การปรับปรุงสูตรโดยใช้กรดสเตียริก หรือ PE-g-MA ทำให้สมบัติดังกล่าวลดลง และจากภาพ SEM พบว่าการเติมซีโอไลต์โซเดียมเอในปริมาณน้อย มีการกระจายตัวที่ดี และอยู่กันเป็นอนุภาคเดี่ยว แต่เมื่อปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอเพิ่มขึ้นจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Mechanical, Rheological, and Water Vapor Permeability Properties of LLDPE compounded with Zeolite NaA
Name	Miss Wanida Sae-lim Miss Supaporn Prasertsiricharoen
Department	Chemistry
Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2002
Special Project Advisor	Dr. Suparat Rukchonlatee

Abstract

This research focused on mechanical, rheological and water vapor permeability properties of linear low density polyethylene (LLDPE) mixed with zeolite NaA. Stearic acid and maleic anhydride grafted polyethylene (PE-g-MA) were used as modifiers. All samples were prepared using a single screw extruder and ground before rheological characteristics. Thin film specimens were shaped using melt casting technique, and then tested for zeolite content determination, mechanical properties, and water vapor permeability. Moreover, thermal behavior and zeolite NaA dispersion of the film specimens were carried out. The results revealed that the higher the zeolite NaA content, the greater the viscosity. Tear strength lowered when zeolite NaA concentration increased. Tensile strength raised with increasing zeolite NaA content upto 6 % by weight. However, the modifiers (either stearic acid or PE-g-MA) did not significantly change tensile strength, modulus, %elongation at break, and tear strength of the LLDPE film at 9% zeolite NaA loading (6% actual zeolite NaA content). Crystalline melting temperature (T_m) and %crystallinity of the LLDPE film were constant with addition of zeolite NaA. Water vapor permeability increased with increasing Zeolite NaA loading, however; an incorporation of stearic acid or PE-g-MA in the compounds lowered this property. SEM micrographs showed that zeolite NaA had good dispersion and stayed as a single particle in the LLDPE film at low zeolite NaA contents. Though, the higher the zeolite NaA loading, its dispersion became more difficult.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ กำลังใจ ตลอดจนคำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้จัด บุคคลและองค์กรต่างๆ ที่มีส่วนร่วมร่วมในความสำเร็จของโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ การเอาใจใส่ และการอบรมให้รู้จักการทำงานที่มีความเป็นระเบียบรอบคอบ และกรุณาตรวจทานแก้ไขโครงการฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ ตลอดจนความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ซึ่งทำให้โครงการนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และ ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษที่ช่วยกรุณาตรวจทาน แก้ไข และชี้แจงข้อผิดพลาดของโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาเคมี ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนความช่วยเหลือด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด บริษัท PQ chemical (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท ยูนิรอยล์เคมีคอล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ เม็ดพลาสติก ซีโอ ไลต์โซเดียมเอ และ PE-g-MA

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เจ้าหน้าที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล เจ้าหน้าที่ MTEC ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์ปฏิบัติการโพลีเมอร์ และ ศูนย์เครื่องมือ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

กราบขอบพระคุณ บิดามารดา ญาติพี่น้อง ตลอดจน พี่ๆ น้องๆ เพื่อนๆ ที่น่ารัก และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้กำลังใจ และความช่วยเหลือด้านแรงงาน

นอกเหนือจากนี้ยังมีบุคคลอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดไม่ได้กล่าวถึง ทางผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาววนิดา แซ่ลิ่ม

นางสาวสุภาพร ประเสริฐศิริเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น	4
2.1.1 กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น	4
2.1.2 ลักษณะโดยทั่วไปของ LLDPE	4
2.1.3 สมบัติของฟิล์มที่ผลิตจากเม็ดพลาสติก LLDPE	5
2.1.4 การใช้ LLDPE ในประเทศ	5
2.2 ซีโอสไตรโซเดียมเอ	7
2.2.1 โครงสร้างของซีโอสไตรโซเดียมเอ	7
2.2.2 การสังเคราะห์ซีโอสไตรโซเดียมเอ	7
2.2.3 การนำซีโอสไตรโซเดียมเอไปใช้งาน	8
2.3 พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮดราไซด์	8
2.4 การอัดรีด	9
2.5 การขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อ	10
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 การทดลอง	16
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	16
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	17
3.3.1 การเลือกสูตรพอลิเมอร์	17
3.3.2 การเคลือบผิว Zeolite NaA ด้วยกรดสแตียริก 1%	18
3.3.3 การผสมสูตรพอลิเมอร์	19
3.3.4 การขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อ	19
3.3.5 การทดสอบสมบัติของสารตัวอย่าง	19
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	22
4.1 ผลการหาปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริงในสารตัวอย่าง	22
4.2 ผลการศึกษาสมบัติการไหล	23
4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล	25
4.3.1 การทดสอบแรงดึง	25
4.3.2 ผลการศึกษาความแข็งแรงเชิงกล	30
4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน	32
4.5 ผลการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ	33
4.6 การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของซีโอไลต์โซเดียมเอในพอลิเมอร์	37
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	40
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	40
5.2 ข้อเสนอแนะ	41
เอกสารอ้างอิง	42
ภาคผนวก	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE เกรด L2020F (ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต)	16
ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ Zeolite NaA (ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต)	17
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนของพอลิเมอร์ผสมสูตร LLDPE/Zeolite NaA	18
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนของพอลิเมอร์ผสมสูตร LLDPE/Zeolite NaA ที่ปรับปรุงด้วย กรดสเตียริก 1% (SA) และ PE-g-MA 1% (MA)	18
ตารางที่ 4.1 ปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่พบในสารตัวอย่าง	22
ตารางที่ 4.2 ค่า Pseudoplastic (Power law index) ของสารตัวอย่าง	24
ตารางที่ 4.3 ปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริงและชื่อย่อของสูตรที่จะใช้ใหม่	25
ตารางที่ 4.4 ปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนในสารตัวอย่าง	33
ตารางที่ 4.5 ความหนาของแผ่นฟิล์มในสูตรที่มีและไม่มีการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก และ PE-g-MA	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างสายโซ่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA)	8
รูปที่ 2.3 รูปทรงเรขาคณิตของเกลียวหนอนเดี่ยวในเครื่องอัดรีดแบบทั่วไป	9
รูปที่ 2.4 วิธีหล่อฟิล์มพลาสติก (Cast extrusion)	11
รูปที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปดัมเบล	20
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานตัวอย่างรูปปีกนก	20
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง True shear viscosity และ Shear rate เมื่อปริมาณ Zeolite NaA เพิ่มขึ้น	23
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของ LLDPE	26
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile strength กับ ปริมาณ Zeolite NaA (%wt)	26
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus กับ ปริมาณ Zeolite NaA (%wt)	27
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile strength กับ ปริมาณ Zeolite NaA 9(6) %wt ทั้งที่มีและไม่มี การปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก และ PE-g-MA	27
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus กับ ปริมาณ Zeolite NaA 9(6) %wt ทั้งที่มีและไม่มี การปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก และ PE-g-MA	28
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Elongation at break กับ ปริมาณ Zeolite NaA (%wt)	29
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Elongation at break กับ ปริมาณ Zeolite NaA 9(6) %wt ทั้งที่มีและไม่มี การปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก และ PE-g-MA	29
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบ Tear strength ของ LLDPE	30
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tear strength กับ ปริมาณ Zeolite NaA (%wt)	30
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tear strength กับ ปริมาณ Zeolite NaA 9(6) %wt ทั้งที่มีและไม่มี การปรับปรุงด้วย Stearic acid และ PE-g-MA	31
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของ LLDPE	32
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Zeolite NaA (%wt) กับค่า WVTR และ Water vapor permeability	34
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Zeolite NaA 9(6) %wt กับ WVTR และ Water vapor permeability ของสูตรที่มีและไม่มี การปรับปรุงด้วย Stearic acid และ PE-g-MA	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 4.15 ภาพ SEM ของอนุภาค Zeolite NaA ; (a) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	37
รูปที่ 4.16 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำของสารตัวอย่าง ที่กำลังขยาย 1500 เท่า	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

ปัจจัยในการดำรงชีวิตของมนุษย์ที่นับว่ามีความสำคัญอย่างมากจะขาดไปเสียไม่ได้ก็คือ อาหารนั่นเอง อาหารเป็นสิ่งจำเป็นที่มนุษย์ต้องรับประทานเข้าไปอยู่ทุกวัน เพื่อความอยู่รอดของชีวิต อาหารแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทด้วยกัน เช่น ประเภทเนื้อสัตว์ แป้ง ผักและผลไม้ เป็นต้น ซึ่งแต่ละประเภทที่รับประทานเข้าไปนั้นจำเป็นที่จะต้องเลือกสรรให้ดีที่สุด นั่นคือ อาหารนั้นต้องสด ใหม่ และสะอาด แต่อาหารเหล่านี้จะคงคุณค่าที่ดีได้ ต้องมีการเก็บรักษาอยู่ในบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีในระดับหนึ่ง คือมีความแข็งแรง มีความเหนียว และทนทานต่อการฉีกขาดมากพอควร

ในปัจจุบันจะพบว่า เทอร์โมพลาสติกได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันอย่างมากมา เนื่องจากสามารถผลิต คัดแปลง ขึ้นรูปได้ง่าย มีน้ำหนักเบา และสามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้ ด้วยเหตุนี้เองจึงมีการนำเทอร์โมพลาสติกมาขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย และในโครงการพิเศษนี้จะขอกล่าวถึงบรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับเก็บรักษาผักและผลไม้เท่านั้น ซึ่งเมื่อสังเกตจะพบว่าบรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับเก็บรักษาผักและผลไม้ให้คงความสดอยู่ได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งจะมีการเจาะรูไว้ด้วย เพื่อที่จะระบายน้ำที่มาจากเหงื่อและการคายน้ำของผักและผลไม้ออกไป จะได้ไม่ทำให้เกิดการเน่าเสียของผักและผลไม้ ซึ่งการเจาะรูนี้ทำให้บรรจุภัณฑ์ขาดความสวยงาม และอาจจะเกิดการเกี่ยวกับกิ่งก้านสาขาของผักและผลไม้ที่มีความแข็งแรงและมีปลายแหลม ส่งผลให้บรรจุภัณฑ์เกิดการฉีกขาดเสียหายได้

ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงได้เกิดแนวความคิดที่จะปรับปรุงพลาสติกที่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับเก็บรักษาผักและผลไม้ให้คงความสดอยู่ได้ในช่วงเวลาหนึ่ง โดยที่ไม่ต้องมีการเจาะรูบรรจุภัณฑ์ จึงได้มีการนำซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) มาใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาพลาสติก เพื่อที่จะให้เกิดการซึมผ่านของไอน้ำได้ เนื่องจากไอน้ำสามารถซึมผ่านรูพรุนของซีโอไลต์โซเดียมเอได้ และในการทดลองนี้ได้เลือกศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และการซึมผ่านของไอน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่มีซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) เป็นสารเติมแต่ง เนื่องด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเป็นพลาสติกที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ประกอบกับมีความเหนียวและมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ในหลายๆ ด้าน จึงทำให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเป็นพลาสติกที่น่าจับตามองไม่น้อยเลยทีเดียว และเนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว ส่วนซีโอไลต์โซเดียมเอเป็นสารที่มีขั้ว ดังนั้นเพื่อปรับปรุงการกระจายตัวของซีโอไลต์และเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์กับซีโอไลต์ จึงได้มีการศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งอีก 1 ชนิดผสมลงไปด้วย โดยสารที่เลือกศึกษามี 2 ตัวด้วยกันคือ กรดสเตียริก (Stearic acid) กับ พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮดราต (PE-g-MA) เพื่อที่จะเปรียบเทียบว่าการเติมกรดสเตียริกกับพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮดราตลงไปนั้น มีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และการซึมผ่านของไอน้ำหรือไม่ มากน้อยเพียงใด

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และการซึมผ่านของไอน้ำของพอลิเมอร์สูตร LLDPE/Zeolite NaA, LLDPE/Zeolite NaA/Stearic acid และ LLDPE/Zeolite NaA/PE-g-MA
2. ศึกษาถึงองค์ประกอบและอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ของสูตรที่ให้สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และการซึมผ่านของไอน้ำที่ดี เพื่อใช้ในงานบรรจุภัณฑ์

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษานำ Zeolite NaA มาเติมในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น โดยใช้ Zeolite NaA ทั้งชนิดที่มีและไม่มีกรเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก และศึกษาเปรียบเทียบโดยมีการนำ PE-g-MA มาเติมในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มี Zeolite NaA เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของพอลิเอทิลีนและ Zeolite NaA ในปริมาณที่ต่างๆ กัน (ตามรายละเอียดข้างล่าง)

- ◆ LLDPE 100 : Zeolite NaA 0
- ◆ LLDPE 97 : Zeolite NaA 3
- ◆ LLDPE 94 : Zeolite NaA 6
- ◆ LLDPE 91 : Zeolite NaA 9
- ◆ LLDPE 88 : Zeolite NaA 12
- ◆ LLDPE 85 : Zeolite NaA 15
- ◆ LLDPE 80 : Zeolite NaA 20
- ◆ LLDPE 91 : Zeolite NaA 9 (+ Stearic acid 1%)
- ◆ LLDPE 91 : Zeolite NaA 9 (+ PE-g-MA 1%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และสมบัติการซึมผ่านของโพลิเมอร์ในแต่ละสูตร เพื่อสรุปลักษณะที่เหมาะสมในการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถปรับปรุงและพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับเก็บรักษาผักและผลไม้ให้คงความสดอยู่ได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยที่ไม่ต้องมีการเจาะรูบรรจุภัณฑ์ ซึ่งจะช่วยให้ขาดความสวยงาม
2. นำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับสารเติมแต่งและพอลิเมอร์บรรจุภัณฑ์ชนิดอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น [1]

2.1.1 กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)

ในปัจจุบันกระบวนการผลิต LLDPE ได้แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการคือ

1. กระบวนการแบบสถานะก๊าซ (Gas phase process)
2. กระบวนการแบบสารละลาย (Solution process)
3. กระบวนการแบบสารแขวนลอย (Slurry process)

ซึ่งกระบวนการผลิตเป็นดังนี้

- ◆ ความดันที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่ำมากคือ 6-20 บรรยากาศ (100-300 psi)
- ◆ อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันน้อยกว่า 100°C
- ◆ พอลิเมอร์ที่ได้เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนกับบิวทีน (C₄) หรือเฮกซีน (C₆) หรือออกทีน (C₈) ลักษณะโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ได้ค่อนข้างมีระเบียบ กล่าวคือ โครงสร้างโมเลกุลค่อนข้างเป็นเส้นตรง มีกิ่งก้านสาขาภายในโมเลกุลมากแต่สั้น การกระจายน้ำหนักแคบ นอกจากนี้สมบัติ LLDPE ที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์ร่วมที่ใช้

2.1.2 ลักษณะโดยทั่วไปของ LLDPE

LLDPE เป็นพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดที่ผลิตโดยใช้กระบวนการความดันต่ำ สำหรับกระบวนการผลิต LLDPE ของบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด เป็นกระบวนการผลิตแบบสถานะก๊าซ (Gas phase fluidized bed process) ซึ่งกระบวนการผลิตแบบนี้สามารถควบคุมโครงสร้างของโมเลกุลพอลิเอทิลีนได้ดีกว่ากระบวนการผลิตแบบเก่าที่ใช้ความดันสูง ทำให้เม็ดพลาสติกที่ผลิตได้เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นเส้นตรง มีกิ่งก้านสาขาเล็กๆ กระจายตลอดความยาวของเส้นตรงและมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลแคบ จากลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลนี้ ทำให้ LLDPE เป็นเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีคุณภาพสูง และเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตฟิล์มที่ต้องการฟิล์มคุณภาพสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 สมบัติของฟิล์มที่ผลิตจากเม็ดพลาสติก LLDPE

ฟิล์มที่ได้จะมีความแข็งแรงดี ความสามารถในการต้านแรงกระแทก และสามารถในการทรงรูปที่ดีและสูงกว่าฟิล์มที่ผลิตจาก LDPE นอกจากนี้ฟิล์มที่ผลิตจากเม็ดพลาสติก LLDPE ยังมีคุณสมบัติเด่นคือ มีความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Hot tack/Sealing strength) ดีกว่าฟิล์มที่ผลิตจาก LDPE ซึ่งสมบัตินี้เป็นตัวกำหนดความเร็วของการทำงานในชั้นการเชื่อมด้วยความร้อนหรือการบรรจุ และเชื่อม โดยทำให้การทำงานในขั้นตอนต่างๆ สามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่องและเร็วขึ้น และที่สำคัญค่าความขุ่น (Haze) ของฟิล์มที่ได้จาก LLDPE จะลดลงและค่าความเงา (Gloss) จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความหนาแน่นลดลง อัตราการเย็นตัวที่เร็วมากๆ จะจำกัดขนาดของผลึกพอลิเอทิลีนที่เกิดขึ้น ทำให้ค่าความขุ่นของฟิล์มลดลงและค่าความเงาเพิ่มขึ้น

รูปที่ 2.1 โครงสร้างสายโซ่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) [1]

2.1.4 การใช้ LLDPE ในประเทศ

บทบาทและแนวโน้มของ LLDPE ในอนาคตคาดว่าจะมีดังนี้

- ◆ **ถุงบรรจุผลิตผลเกษตร** เนื่องจากถุง LLDPE มีความเหนียวรับแรงกระแทกและดึงขาดได้สูง จึงสามารถป้องกันการแตกขาดในระหว่างการลำเลียงขนส่ง ยิ่งไปกว่านั้นผลิตผลเกษตรส่วนใหญ่ยังมีลักษณะพิเศษในเรื่องของรูปทรงไม่สม่ำเสมอ อาจมีส่วนยื่นแหลม (เช่น ก้านหรือเปลือกของผักผลไม้) ซึ่งทำให้ถุงทึบทะลุได้ การใช้ถุง LLDPE แทนการใช้ถุง LDPE อยู่ในขณะนี้จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ เพราะ LLDPE มีคุณสมบัติในการต้านแรงทึบทะลุได้ดีกว่า LDPE ถึงร้อยละ 200

- ◆ **ถุงบรรจุอาหารสัตว์** ในปัจจุบันอาหารสัตว์นิยมบรรจุในกระสอบพลาสติกซึ่งทำด้วยด้ายแถบพอลิพรอพิลีน (PP) สานกัน และเคลือบด้วย PP หรือมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถุงอีกชั้นหนึ่งเพื่อให้สามารถป้องกันไอน้ำได้ ต้นทุนการผลิตกระสอบพลาสติกเหล่านี้ถือว่าสูงพอสมควร หากมีการใช้ถุง LLDPE แทนก็คาดว่า จะสามารถลดต้นทุนการผลิตอาหารสัตว์ได้

- ◆ **ถุงขยะ** แม้ว่าในขณะนี้ตามโรงพยาบาลและสถานที่ทำงานใหญ่ๆ บางแห่ง จะมีการใช้ถุงขยะ (สีดำ) ที่ทำมาจาก LDPE หรือเม็ดผสมระหว่าง LLDPE และ LDPE บ้างแล้วก็ตาม แต่ก็ยังนับว่าไม่กว้างขวางนัก สิ่งที่น่าจะนำมา พิจารณานอกเหนือจากความเหนียวและการต้านทานการที่มทะเลแล้วก็คือ ต้นทุน ความสามารถในการผลิตและเลือกใช้ฟิล์ม LLDPE ที่บางลงจะเป็น ปัจจัยในการใช้เพิ่มขึ้นในอนาคต
- ◆ **ถุงบรรจุอาหาร LLDPE** ที่ผลิตจากเทคโนโลยีที่ทันสมัยมีชั้นคุณภาพที่ สามารถใช้บรรจุอาหารได้โดยปลอดภัย และเป็นที่ยอมรับขององค์การ อาหารและยาของประเทศสหรัฐอเมริกา (FDA) แล้ว ดังนั้นการนำมาใช้ สัมผัสกับอาหาร โดยตรงจึงไม่ก่ออันตรายใดๆ ไม่ว่าจะเป็นการใช้เดี่ยวๆ หรือใช้ร่วมกับวัสดุอื่น อาหารที่น่าจะมีแนวโน้มการใช้ในอนาคตคือ อาหารแช่แข็งและอาหารสำเร็จรูป
- ◆ **ถุงใส่เสื้อผ้าสำเร็จรูป** เสื้อผ้าสำเร็จรูปที่วางจำหน่ายในร้านค้าทั่วไป การ บรรจุในถุงเพื่อป้องกันฝุ่นละอองเป็นสิ่งจำเป็น คุณสมบัติของถุงที่ต้องการ คือ ใส บาง และทรงรูปได้ การใช้ฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และ PP ซึ่งใช้อยู่ในขณะนี้ แม้ว่าจะมีความใสและทรงรูปก็ตาม แต่ก็มีข้อเสียคือ มี ความกระด้างเมื่อสัมผัส และยังเป็นรอยยับได้ (ทำให้เสื้อผ้าดูเหมือนเก่า) ดังนั้นการใช้ LLDPE แทนในอนาคตจะมีข้อดีทั้งในด้านความใส ทรงรูป นุ่มนัมเมื่อสัมผัส และไม่ยับง่าย
- ◆ **ฟิล์มหัด LLDPE** คาดว่าจะเป็นฟิล์มหัดที่สามารถใช้แทน LDPE ได้ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบเหนือกว่า LDPE ที่ความเหนียว และใช้ฟิล์มให้บางลงได้ ระบบการขนส่งที่ต้องการประสิทธิภาพสูงกำลังได้รับความนิยมนำมาใช้ ทุกที่ ส่งผลให้การบรรจุสินค้าบนแท่นรองรับให้เป็นหน่วยใหญ่เป็นสิ่งที่ จำเป็นและหลีกเลี่ยงไม่ได้ ประกอบกับความพยายามในการลดต้นทุนการผลิต ไม่ว่าจะเป็นการใช้ฟิล์มที่บางลง การเปลี่ยนวิธีการบรรจุในกล่อง กระดาษถูกผูกเป็นถาดแล้วหุ้มด้วยฟิล์มหัด ทำให้ปริมาณการใช้ฟิล์ม LLDPE จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ◆ **ฟิล์มยืด** ในปัจจุบันการใช้ฟิล์มยืดนิยมใช้ LDPE แต่คาดว่า LLDPE จะมาทดแทนการใช้ LDPE ได้มากขึ้นในอนาคต เนื่องจากมีข้อดีเด่นในด้านต้นทุนและสมบัติของการต้านแรงดึงขาดและการยืดตัวที่สูง
- ◆ **ฟิล์มเกษตรกรรม** เนื่องจากฟิล์ม LLDPE มีสมบัติดีเด่นในด้านสมบัติเชิงกลและการทนทานต่อสภาพแวดล้อม จึงมีการนำฟิล์ม LLDPE มาใช้กับงานเกษตรกรรมทั้งในลักษณะของคลุมหน้าดินเพื่อการเพาะกล้าหรือคั้นอ่อน การคลุมเรือนเพาะชำ (Greenhouse) และการกรบ่อน้ำ

2.2 ซีโอไลต์โซเดียมเอ [2-3]

ซีโอไลต์เป็นสารประกอบของ SiO_4 มีลักษณะเป็นเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ที่มีออกซิเจน 4 ตัวล้อมรอบ ซึ่งมีความเป็นผลึก มีรูพรุนขนาดเล็ก จึงมีพื้นที่ผิวในการดูดซับสารได้มาก โดยการแทนที่ Si ด้วย Al ทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุ จึงต้องมีประจุบวกมาดุลเพื่อให้เกิดความสมดุลของประจุ โดยมีสูตรทางเคมีของซีโอไลต์ดังนี้ $M_x^+D_y^{2+}[\text{Al}_{(x+2y)}\text{Si}_{n-(x+2y)}\text{O}_{2n}]m\text{H}_2\text{O}$ โดยที่ $M_x^+D_y^{2+}$ เป็นประจุบวกสมดุล (Charge balance cation) จากสูตรทางเคมีจะเห็นว่า ในโครงสร้างมีองค์ประกอบของน้ำ เนื่องจากซีโอไลต์มีความเป็นขั้วสูง ทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์สามารถดูดน้ำในอากาศได้

2.2.1 โครงสร้างของซีโอไลต์โซเดียมเอ

ซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) มีโครงสร้างเป็นกรงแบบแอลฟา (α -cage) และสูตรทางเคมีคือ $\text{Na}_{12}[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}]\cdot 27\text{H}_2\text{O}$ โดยมีสัดส่วนช่องว่างปริมาตรเท่ากับ 0.47 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.2 \AA มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอลูมิเนียมเป็น 1 และจะสลายตัวด้วยความร้อนที่ $700 \text{ }^\circ\text{C}$

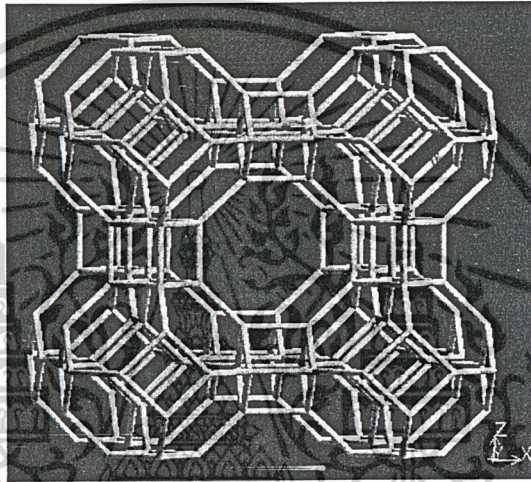
2.2.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์โซเดียมเอ

Zeolite NaA สังเคราะห์ได้โดยกระบวนการทำให้เป็นเจลคล้ายกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยทั่วไป โดยใช้อะลูมินา (โดยทั่วไปใช้โซเดียมอะลูมิเนต) และซิลิกา (โดยทั่วไปใช้ โซเดียมซิลิเกต) นำมาผสมในสารละลายเพื่อให้เกิดเป็นเจล โดยสารละลายดังกล่าวได้แก่ สารละลายอัลคาไลน์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายเกลือแอมโมเนียมเอมีน หรือสารละลายอินทรีย์ที่มีขั้วอื่นๆ ซึ่งเจลที่ได้จะนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $70\text{-}300 \text{ }^\circ\text{C}$ จะได้ผลึกของซีโอไลต์ในรูปของโซเดียมไอออน (Na^+)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การนำซีโอไลต์โซเดียมเอไปใช้งาน

ซีโอไลต์โซเดียมเอเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นแอลฟาเคจ เหมาะกับการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พื้นที่ภายในของโครงสร้างมีรูพรุนมากในการที่จะเข้าทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสาร ขนาดรูพรุนที่มีขนาดเล็กจะมีความเฉพาะเจาะจง (Selectivity) ในการจำกัดขนาดของโครงสร้างที่จะเข้าออกจากรูพรุนของซีโอไลต์ นอกจากนี้ยังถูกใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนอีกด้วย



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) [3]

2.3 พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮดริด [4]

มาลิกแอนไฮดริดเป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในการเคลือบผิวหน้า เป็นสารที่ใช้ในการยึดติดและสารตัวเติมในการหล่อขึ้น เป็นต้น โดยมาลิกแอนไฮดริดผลิตจากกระบวนการดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) ของกรดมาลิก (Maleic acid)

มาลิกแอนไฮดริดพอลิเมอร์เตรียมโดยปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ การพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerisation) และพอลิเมอไรเซชันแบบการเติม (Addition polymerisation) ต่อมาพบว่าสามารถเกิดการพอลิเมอไรเซชันเมื่อฉายด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV radiation) ทำให้เกิดตัวริเริ่มปฏิกิริยาโดยการฉายรังสีและตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เป็นอนุมูลอิสระ

พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮดริด (PE-g-MA) เป็นการต่อกิ่งพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physicochemical properties) ดีขึ้น โดยการเพิ่มความชื้นของพอลิเอทิลีนโดยการทำให้เป็นบวก (Hydrophilicity) เพิ่มขึ้นและความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

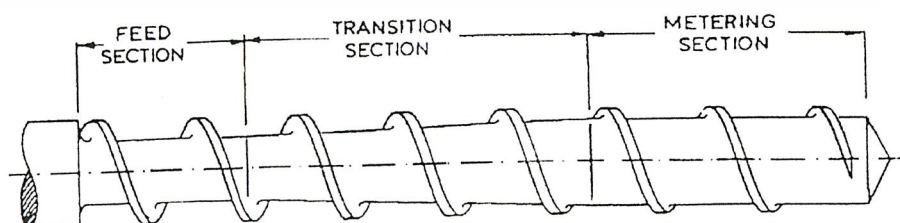
สามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้น พบว่าแอนไฮดรไรต์เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยง เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เพิ่มความสามารถในการต้านความร้อน และเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์อื่นรวมทั้งสารตัวเติมได้เป็นอย่างดี

2.4 การอัดรีด [5]

การอัดรีด (Extrusion) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมีราคาถูกกว่ากระบวนการอื่น อีกทั้งสามารถทำการผลิตชิ้นงานให้มีรูปร่างได้ตามต้องการ (เช่น แท่งกลม พิล์ม แผ่น เส้นใย และท่อ เป็นต้น) และทำได้อย่างต่อเนื่อง เครื่องอัดรีดจัดเป็นเครื่องมือที่มีจุดประสงค์หลากหลายในกระบวนการแปรรูปทางพอลิเมอร์ กล่าวคือ เม็ดพลาสติกที่ถูกป้อนเข้ามาในระหว่างเกลียวหอนของเครื่องอัดรีดและกระบอกใส่เกลียวหอน (Barrel) จะถูกอัด หลอม ผสม และวัดด้วยความดันสวนทางที่เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการไหลผ่านไปทางท่อและออกไปทางหัวตาย ทั้งนี้โดยอาศัยความแตกต่างของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของเกลียวหอนและกระบอกใส่เกลียวหอน ทำให้เกิดพลังงานเฉือน (Shearing energy) ช่วยในการผสมและการหลอม

เครื่องอัดรีดที่ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกมีหลายชนิด โดยแบ่งตามลักษณะการใช้งาน (Mode of operation) ของเครื่อง ซึ่งแบ่งออกเป็นการทำงานแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง เครื่องอัดรีดที่ทำงานในลักษณะต่อเนื่องเป็นเครื่องที่มีเกลียวหอน (Screw extruder) กับ แบบดิสก์ (Disk extruder) ส่วนเครื่องอัดรีดที่ทำงานในลักษณะไม่ต่อเนื่อง เป็นเครื่องที่มีเกลียวหอนเลื่อนไปมาในแนวแกนของเกลียวหอนได้ (Reciprocating screw extruder) และเครื่องอัดรีดแบบลูกสูบ (Ram extruder)

เครื่องอัดรีดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนเดี่ยว (Single-screw extruder) ซึ่งจัดว่ามีความสำคัญอย่างมากในทางอุตสาหกรรม โดยเกลียวหอนจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปทรงเรขาคณิตของเกลียวหอนเดี่ยวในเครื่องอัดรีดแบบทั่วไป [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่หนึ่งคือ ส่วนป้อน (Feed zone) จะมีความลึกของช่องเกลียวหนอนมากที่สุด ทำหน้าที่หลักคือดึงเม็ดพลาสติกจากกรวยเติมพลาสติกลงในกระบอกร และเริ่มให้ความร้อนแก่เม็ดพลาสติก โดยทำให้เกิดการผสมกันของพลาสติก และพาพลาสติกไปยังส่วนการอัด (Transition หรือ Compression zone)

ส่วนที่สองคือ ส่วนของการอัด (Transition หรือ Compression zone) ความลึกของช่องเกลียวหนอนจะค่อนข้างตื้น ซึ่งวัสดุที่ถูกนำพามาถึงบริเวณนี้ จะอยู่ในสถานะกึ่งของแข็งและจะหลอมเหลว ในส่วนนี้จะทำหน้าที่หลอมเหลววัสดุทั้งหมด และนำพาวัสดุนี้ส่งต่อไปยังบริเวณนำส่ง (Metering zone)

ส่วนสุดท้ายคือ ส่วนนำส่ง (Metering zone) ส่วนนี้ทำหน้าที่ในการหลอมวัสดุพอลิเมอร์ให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยความลึกของช่องเกลียวหนอนจะลดลงแบบเส้นตรงจากส่วนป้อนวัสดุไปยังส่วนนำส่ง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการอัดตัวของวัสดุในเกลียวหนอน ตัวแปรหนึ่งในการออกแบบเกลียวหนอนที่มีความสำคัญคือ อัตราส่วนความยาวของเกลียวหนอนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเกลียวหนอน (L/D ratio) พบว่าโดยปกติอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 แต่ที่นิยมใช้คือ 24 ในส่วนนี้จะมี ความดันเพิ่มขึ้น และมีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ และจะเสถียรอยู่ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน

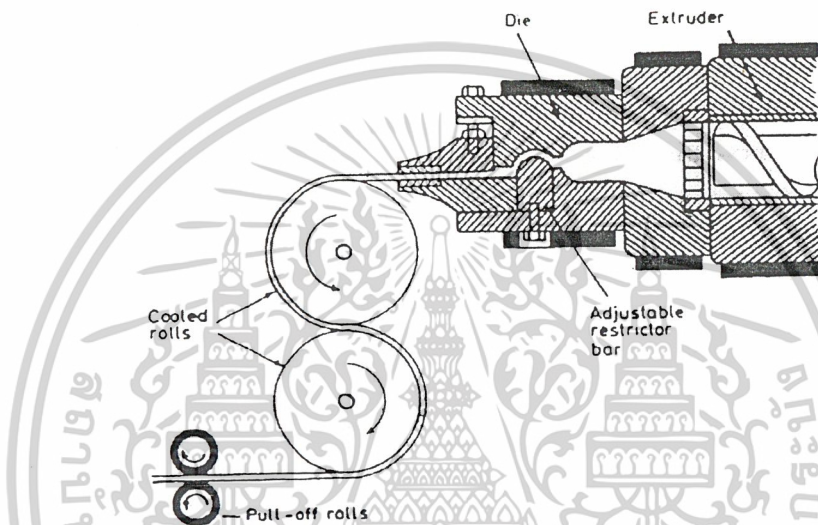
ในส่วนของคายน (Die) บริเวณคายนจะมีแผ่นกรองและแผ่นยึด (Screen pack and breaker plate) ทำให้เกิดความดัน ดันพอลิเมอร์หลอมเหลวออกนอกคายน และเปลี่ยนลักษณะการไหลจากแบบเกลียว (Helicoidal movement) ตามเกลียวหนอนไปเป็นแบบตามแนวแกน (Axial movement)

2.5 การขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อ [6]

วิธีหล่อเม็ดพลาสติกจะถูกรีดผ่านเกลียวขับเคลื่อนพร้อมทั้งให้ความร้อนไปด้วย เพื่อให้เม็ดพลาสติกหลอมละลาย พลาสติกเหลวจะถูกขับผ่านหัวคายนให้ไหลออกมาบนลูกกลิ้งทรงกระบอกรที่ขัดมันและเย็น เพื่อให้พลาสติกเกิดการแข็งตัวเป็นแผ่นฟิล์ม จากนั้นม้วนเก็บแผ่นฟิล์มที่ได้เพื่อนำไปใช้ต่อไป (รูปที่ 2.4)

รายละเอียดของเกลียวขับเคลื่อนเช่นเดียวกับวิธีเป่าคือ ภายในเกลียวจะประกอบด้วยเกลียวหนอนซึ่งทำหน้าที่ป้อน และอัดเม็ดพลาสติกให้หลอมเหลว โดยมีความร้อนช่วยจากภายนอก และส่งให้พลาสติกเหลวผ่านออกสู่หัวคายน การออกแบบเกลียวขับให้มีสัดส่วนของช่วงป้อน ช่วงอัด และช่วงส่งสัมพันธ์กันนั้นเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้พลาสติกที่ออกจากหัวคายนมีความดันและความเร็วคงที่ ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงดัชนีการไหลของเม็ดพลาสติกที่ใช้

หัวตาย เป็นส่วนที่ติดอยู่ปลายสุดของเกลียวข้อซึ่งเป็นแบบตายช่องยาวจึงอาจเรียกชื่อวิธีอีกชื่อหนึ่งว่า การอัดรีดชนิดตายช่องยาว (Slit-die extrusion) โลหะที่ใช้ทำลูกกึ่งทรงกระบอกดังกล่าวควรเป็นโครเมียม การทำให้ฟิล์มพลาสติกที่ผ่านลูกกึ่งเย็นลงเร็วที่สุดเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง เพราะจะทำให้ได้ฟิล์มใส การหล่อเย็นนิยมนำน้ำเย็นซึ่งต้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่และเหมาะสม เพราะจะมีผลต่อสมบัติความลื่นและสมบัติทางกลของฟิล์มพลาสติกที่ได้



รูปที่ 2.4 วิธีหล่อฟิล์มพลาสติก (Cast extrusion) [6]

ฟิล์มพลาสติกที่ผลิตโดยวิธีทั้งสองต่างก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกัน กล่าวคือฟิล์มที่ผลิตโดยวิธีเป่าจะเหมาะกับการนำไปผลิตถุง เพราะไม่ต้องมีตะเข็บข้าง และให้คุณสมบัติทางกลและความแข็งแรงที่สม่ำเสมอทั้งในทิศทางตามแนวขนานและขวางเครื่อง อีกทั้งผลผลิตที่ได้จะสูงกว่า ส่วนฟิล์มที่ผลิตโดยวิธีหล่อจะมีความใสที่ดีมาก หากเป็นฟิล์มที่มีความกว้างไม่มากนักจะให้ความหนาของฟิล์มที่สม่ำเสมอกว่าวิธีเป่า คือมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 2 ในขณะที่ฟิล์มแบบเป่ามักมีความคลาดเคลื่อนของความหนาประมาณร้อยละ 10

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jame และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดเป่าขึ้นรูป พบว่าปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านของฟิล์มพอลิเอทิลีนคือ ความหนาแน่น ความหนาของฟิล์ม และการจัดเรียงตัวของผลึก ซึ่งพบว่าอัตราเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การซึมผ่านของไอน้ำลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่วนความหนาของฟิล์มไม่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านมากนัก เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวยังมีความสัมพันธ์และเกี่ยวข้องกับการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลและการจัดเรียงตัวของผลึกด้วย ซึ่งพอลิเมอร์ที่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลแคบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนพอลิเมอร์ที่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลกว้างทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราการซึมผ่านของไอน้ำถึง 50 % หรือมากกว่านั้น และยังพบว่าฟิล์มที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกมากทำให้ความสามารถในการซึมผ่านลดน้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำแปรผันโดยตรงกับอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและอัตราส่วนระหว่างการดึงตามแนวขวางเครื่องจักรกับการดึงตามแนวของเครื่องจักร (TD/MD Ratio)

Lee และ Yoon [8] ได้ทำการศึกษาสมบัติด้านกายภาพของฟิล์มที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศและแบบหีบห่อที่ใช้สำหรับเนื้อสัตว์เช่นพบว่า พอลิไวนิลคลอไรด์/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (PVDC/EVA) ซึ่งเป็นนิยมนำมาใช้เป็นฟิล์มห่อที่มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนน้อยกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนเคลือบพอลิเอไมด์ (Polyamide laminated to polyethylene (PA/PE) films) แต่มีความแข็งแรงดึงที่สูงกว่า และเมื่อฟิล์ม PVDC/EVA เกิดการหดตัว อัตราการหดตัวอยู่ในช่วง 34.9 ถึง 48.5% ตามทิศทางของเครื่องจักรและหดตัว 40.9 ถึง 57.3% ตามทิศทางขวางเครื่องจักร ยิ่งไปกว่านั้นความหนาที่เพิ่มขึ้นประมาณ 2-3 เท่า ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนลดลง ความหนาของฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ใช้สำหรับการห่ออยู่ในช่วง 11 ถึง 13 ไมครอน ในขณะที่ฟิล์ม LLDPE มีความหนาอยู่ในช่วง 9 ถึง 12 ไมครอน นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ใช้สำหรับห่อมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงกว่าฟิล์ม LLDPE และยังมีความขุ่นน้อยกว่าด้วย

Zhengzhou และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาผลของการใช้สารช่วยผสมพอลิเอทิลีนต่อกึ่งด้วยไดบิวทิลมาติเอต (PE-g-DBM) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และความเป็นผลึกของการผสมระหว่างแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และ LLDPE ที่มีองศาการต่อกึ่งที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลได้แก่ ความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารผสม PE-g-DBM จะช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และ LLDPE โดย PE-g-DBM ที่มีองศาการต่อกึ่งสูงคือ 2.2 % จะมีประสิทธิภาพน้อยกว่า PE-g-DBM ที่มีองศาการต่อกึ่งต่ำคือ 0.9 % โดยจากการศึกษาฐานฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และ LLDPE พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารช่วยผสม PE-g-DBM จะทำให้อุณหภูมิของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) กระจายตัวอยู่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LLDPE ซึ่งเป็นวัฏภาคหลัก (Matrix phase) ได้ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมมีความแข็งแรงของการยึดเกาะมากขึ้น

Seong และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาความแข็งแรงที่พื้นผิวของพอลิเอทิลีนผสมกับแป้ง ซึ่งพอลิเอทิลีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ LLDPE โดยมีการเติมสารช่วยผสมประเภท Reactive คือ Maleated polyethylene (m-PE) ในปริมาณที่ต่างกันเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม โดยมี LLDPE เป็นเมทริกซ์ (Matrix) และแป้งเป็นส่วนกระจายตัว (Disperse) จากการศึกษาพบว่า การเติมสารช่วยผสมประเภท Reactive (m-PE) จะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของมาลิกอีนไฮดรอกไซด์ ใน m-PE กับหมู่ไฮดรอกซิลในแป้ง กลายเป็น Ester linkage และหมู่คาร์บอกซิลิกจะส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล คือ ความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการเติมสารช่วยผสม Reactive (m-PE) ที่มีปริมาณที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ซึ่งสมบัติเชิงกลที่ทดสอบได้และความแข็งแรงของการยึดเกาะที่พื้นผิวดีกว่ากรณีที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะแสดงถึงการกระจายของแป้งใน LLDPE ที่มีการเติมสารช่วยผสม และในกรณีที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม

Danjaji และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาถึงการเติมแป้งสาकुลงใน LLDPE films เพื่อช่วยในการดูดซับน้ำ พบว่าค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความเหนียวจะลดลงเมื่อปริมาณแป้งมากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม ค่ามอดุลัส การดูดความชื้นในอากาศและในน้ำจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณแป้งมากขึ้น และที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าจะมีการดูดความชื้นได้ดีกว่า ดังนั้นจึงแสดงถึงความต้านทานความชื้นที่ลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น การดูดความชื้นสูงสุดจะมีเมื่อสารประกอบถูกแช่ในน้ำอย่างสมบูรณ์ โดยจากการใช้ SEM พบกลุ่มก้อนของเม็ดแป้งกระจายตัวในอนุภาคของสารตัวเติม

Matzinos [12] ศึกษาการผสม LDPE และ Starch โดยใช้ PE-g-MA เป็นสารช่วยผสม ผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ จากนั้นนำมาเข้าเครื่องฉีดขึ้นรูปและเครื่องเป่าฟิล์ม พบว่าสมบัติเชิงกลขึ้นกับความสามารถในการกระจายตัวของ Starch ใน LDPE จากการทดสอบสมบัติเชิงกลในส่วนของการฉีดขึ้นรูปนั้น ความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสของยังจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการส่งผ่านของแรงจาก LDPE ซึ่งเป็นส่วนที่อ่อนแอไปยังส่วนของ Starch ซึ่งเป็นส่วนที่แข็งแรงกว่า แต่จะมากที่สุดแค่ 30 wt% Starch จากนั้นค่าจะลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณ Starch มากขึ้น การกระจายตัวของ Starch แย่ลง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลงเมื่อปริมาณ Starch เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปนั้น มีการให้ความดันแก่ของผสมที่มากกว่าความดันที่ใช้ในเครื่องเป่าฟิล์ม ทำให้เกิดการผสมกันที่ดีกว่า ซึ่งจากการศึกษาสถาบันวิทยานาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ Starch จากชิ้นงานที่เป่าขึ้นรูป จะมีขนาดใหญ่กว่าตัวอย่างที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูป ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สมบัติของฟิล์มลดลง แต่ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น

Lee และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของระบบ Epoxy เมื่อเติมซีโอไลต์ธรรมชาติลงไป โดยศึกษาถึงผลกระทบของสารตัวเติมและขนาดอนุภาคเมื่อทำการเติมซีโอไลต์ที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน 3 ขนาด (270-200 mesh , 325-270 mesh และต่ำกว่า 325 mesh) ลงใน Epoxy resin ในปริมาณที่ต่างกัน ได้ทำการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง ความสามารถในการทนแรงกระแทก และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว พบว่าเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและค่ามอดูลัสของยังก็เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งแรงดึงและความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกจะลดลง และในกรณีที่ขนาดของอนุภาคซีโอไลต์ลดลง คุณสมบัติทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น รวมทั้งค่าความแข็งแรงดึงก็เพิ่มขึ้นด้วย ร้อยร้าวบนพื้นผิวของส่วนประกอบแสดงถึงสัญญาณวิทายของสารเชิงซ้อนที่มาก เมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น

Ozmihci และคณะ [14] ได้ศึกษาถึงการเตรียมและลักษณะของคอมโพสิตจาก พอลิพรอพิลีน (PP) กับ ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Natural zeolite) ฟิล์มเตรียมได้จากการอัดรีด PP และ Zeolite ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) 4000 คอมโพสิตที่มีการเติมซีโอไลต์มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.73 และ 0.83 g/cm³ และมีค่าสัดส่วนช่องว่าง (Void fractions) 0.07-0.20 ถึงแม้ว่าการซึมผ่านของไอน้ำของคอมโพสิตที่เติมซีโอไลต์ลงไป 2 % จะมีค่าน้อยมาก แต่ฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์ลงไป 4% จะมีค่าการซึมผ่านของไอน้ำสูงมาก ค่าความเค้น (Yield stress) ของฟิล์มที่เติมซีโอไลต์ 2-4% มีค่าอยู่ประมาณ 26-27 N/mm² และมีค่าน้อยกว่า PP ซึ่งไม่มีการยึดเกาะกันระหว่าง PP กับซีโอไลต์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงผลของการเติมซีโอไลต์ลงไปที่มีต่อการสลายตัวทางความร้อน โดยทำการศึกษาในสภาวะบรรยากาศ และในบรรยากาศที่มีก๊าซไนโตรเจน พบว่าในสภาวะบรรยากาศซีโอไลต์ไม่ได้เป็นสาเหตุให้เกิดการออกซิเดชันของ PP ส่วนในบรรยากาศที่มีก๊าซไนโตรเจน ถึงแม้ว่าการเริ่มสลายตัวทางความร้อนของ PP จะถูกหน่วงด้วยซีโอไลต์ แต่คอมโพสิตก็สลายตัวด้วยอัตราที่เร็วกว่า PP ในช่วงแรกของการเริ่มการสลายตัว

สุภารัตน์ และคณะ [15] ได้ศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่ผสมซีโอไลต์ เพื่อเตรียมแผ่นฟิล์มสำหรับงานบรรจุภัณฑ์ โดยเตรียมตัวอย่างจากเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่และบดเป็นเม็ดเล็กด้วยเครื่องบดพลาสติก นำเม็ดพอลิเมอร์ที่ผสมได้ไปศึกษาสมบัติการไหล และอีกส่วนนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยเทคนิคการอัดรีด เพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล การกระจายตัวของซีโอไลต์ และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ พบว่าการเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ ทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงกระทำระหว่างพื้นผิวสัมผัสของซีโอไลต์กับพอลิเอทิลีน สมบัติส่วนใหญ่ของทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LDPE และ LLDPE เช่น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงฉีกขาด และ เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก มีค่าลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ส่วนการกระจายตัวของซีโอไลต์ เป็นไปได้ยากขึ้น แต่อัตราการซึมผ่านของไอน้ำบนแผ่นฟิล์มมีมากขึ้นซึ่งเกิดจากปริมาณรูพรุนที่ เพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เป็นเกรดเป่าฟิล์ม L2020F ผลิตโดยบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด (สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.1)
2. ซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) เป็นเกรดทั่วไป ผลิตโดยบริษัท PQ Chemicals (ประเทศไทย) จำกัด (สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.2)
3. กรดสเตียริก เกรดการค้า
4. พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted polyethylene , PE-g-MA) เกรด Polybond 3009 จากบริษัท ยูนิรอยัลเคมีคอล จำกัด มีดรรชนีการไหลเท่ากับ 5 g / 10 min มี %MA ใน PE-g-MA เท่ากับ 1
5. พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อมตัว
6. เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (Methyl ethyl ketone peroxide)
7. โคบอลต์เนฟทีเนต (Cobalt naphthenate)

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE เกรด L2020F (ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต)

Property	LLDPE เกรด L2020F	ASTM
Melt flow index (g/10 min)	2.0	D1238
Density (g/cm ³)	0.920	D1505
Tensile strength (kg/cm ²)	MD:400* , TD:310*	D638
Elongation at break (%)	MD:600* , TD:810*	D638
Impact strength of film (g)	80**	D1790
Hardness	52	D2240
T _m (°C)	122	D2117

**สมบัติของฟิล์มหนา 38 ไมครอน (เป่าที่อัตราแบ่ง 2:1)

*MD : ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

*TD : ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ Zeolite NaA (ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต)

Characteristic	Results
Form	Free-flowing power
pH of 1% Dispersion	11.34
Average bulk density (g/l)	366
Median particle size (µm)	3.91
Moisture loss at 800°C (% by weight)	20.75

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder , Polydrive with Rheomex R252 : บริษัท Haake)
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinding machine) , Bosco รุ่น A600 ; Bosco engineering)
3. เครื่องขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อ (Melt film casting machine)
4. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine , LLOYD รุ่น LR 30K ; LLOYD Instrument)
5. เครื่อง Differential scanning calorimeter (รุ่น Pyris diamond DSC : บริษัท Perkin Elmer instruments)
6. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope , SEM)
7. เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary rheometer : บริษัท ROSAND)
8. เตาเผา (รุ่น F6010 : ยี่ห้อ Thermolyne)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเลือกสูตรพอลิเมอร์

ในการทดลองนี้ได้เลือกศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำของ LLDPE ที่มี Zeolite NaA เป็นสารเติมแต่ง โดยทำการผสม LLDPE กับ Zeolite NaA ที่เป็นสารเติมแต่งที่มีรูพรุนทั้งที่มีและไม่มีเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก และอีกสูตรหนึ่ง que เลือกศึกษา คือสูตรที่มีการนำ PE-g-MA มาเติมลงใน LLDPE ที่มีซีไอโอดีโซเดียมเอเป็นองค์ประกอบ โดยใช้อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.3 ถึง 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนของพอลิเมอร์ผสมสูตร LLDPE/Zeolite NaA

LLDPE	Zeolite NaA	ชื่อย่อ
100	0	LLDPE
97	3	LL/ZA3
94	6	LL/ZA6
91	9	LL/ZA9
88	12	LL/ZA12
85	15	LL/ZA15
80	20	LL/ZA20

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนของพอลิเมอร์ผสมสูตร LLDPE/Zeolite NaA ที่ปรับปรุงด้วย Stearic acid 1% (SA) และ PE-g-MA (MA)

LLDPE	Zeolite NaA	ชื่อย่อ
91	9	LL/ZA9/SA
91	9	LL/ZA9/MA

3.3.2 การเคลือบผิว Zeolite NaA ด้วยกรดสเตียริก 1%

ชั่ง Zeolite NaA มา 990 g และกรดสเตียริก 10 g แล้วเทผสมลงในเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) โดยตั้งความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที ทำการปั่นกวนของผสมจนอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 80°C จากนั้นทำการปั่นกวนต่อไปอีก 15 นาทีจึงปิดเครื่อง แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ 10 นาที เปิดฝาเกลี่ยของผสมที่ติดอยู่ตามด้านบนและด้านข้างของเครื่องผสมลง แล้วทำการปั่นกวนอีกเป็นเวลา 10 นาที จึงปิดเครื่อง

3.3.3 การผสมสูตรพอลิเมอร์

นำส่วนผสมตามตารางที่ 3.3, 3.4 และ 3.5 ซึ่งในแต่ละสูตรมีน้ำหนักรวมเท่ากับ 800 g มาเทลงในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) เพื่อทำการผสม โดยตั้งอุณหภูมิที่ Feed zone 150°C Compression zone 160°C Metering zone 170°C และ Die zone 180°C ใช้ความเร็วรอบในการหมุน 75 รอบต่อนาที นำสารผสมที่ได้จากการอัดรีดมาตั้งทิ้งไว้ให้เอกสารถึงเป็นเอกสารถึงที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้เป็นชิ้นเล็กๆ โดยใช้เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinding machine)

3.3.4 การขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อ

นำสารผสมที่ได้จากข้อ 3.3.3 มาทำการขึ้นรูปโดยเครื่องขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม (เครื่องอัดรีดตัดหัวคายแบบแผ่น) โดยมีอุณหภูมิที่หัวคาย 180°C และใช้อัตราการดึงยึดคือ 5 m/min

3.3.5 การทดสอบสมบัติของสารตัวอย่าง

1. ปริมาณ Zeolite NaA ที่แน่นอน

นำครุชเชิลมาเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง รอให้อุณหภูมิในเตาเผาเย็นลงต่ำกว่า 150°C จึงนำครุชเชิลออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักครุชเชิลด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง นำสารตัวอย่างมาใส่ในครุชเชิล โดยความสูงต้องไม่สูงกว่าครึ่งของความสูงของครุชเชิล แล้วชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นนำครุชเชิลมาเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง รอให้อุณหภูมิในเตาเผาเย็นลงต่ำกว่า 150°C หลังจากนั้นทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณหาปริมาณน้ำที่หายไปและเปอร์เซ็นต์แอส (%Ash) นำ %Ash ที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของ Zeolite NaA ที่มีอยู่จริงในสารตัวอย่าง

2. สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ

หาปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มพลาสติกในระยะเวลาที่กำหนดและภายใต้สภาวะที่คงที่มีหน่วยเป็น $\text{g/m}^2/\text{day}$ ที่อุณหภูมิ 38°C และความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ 90 % โดยวิธี Transfer time method โดยใช้เครื่อง Lyssy water permeability กำหนดขนาดของชิ้นงาน $11 \times 11\text{ cm}$

3. สมบัติการไหล

การทดสอบสมบัติการไหล โดยการนำเม็ดพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้วมาทดสอบที่อุณหภูมิ 190°C โดยใช้หัวคายเรียบ (180°) L/R เท่ากับ 16:1 และ 0:1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ความเร็วในการเคลื่อนที่ลูกสูบ $0-300\text{ mm/min}$ ค่าที่ได้จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นความหนืด (viscosity) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D3835 [16]

4. สมบัติความแข็งแรงดึง

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อมาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ ทดสอบด้วย Universal testing machine ที่ความเร็วในการดึง 200 mm/min ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) เป็น 25 mm ที่อุณหภูมิห้อง เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 [17] เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ค่ามอดุลัส (Modulus) และความแข็งแรงดึง (Tensile strength)



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปดัมเบลล์ [17]

5. สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อมาตัดเป็นรูปปีกนก โดยการทดสอบเป็นลักษณะเดียวกันกับการทดสอบแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการดึงเท่ากับ 100 mm/min ที่อุณหภูมิห้อง เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1004 [18] เพื่อหาค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear Strength)



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานตัวอย่างรูปปีกนก [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. อุณหภูมิการหลอมเหลวของผลึก (T_m) พลังงานความร้อนของการหลอมผลึก (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)

นำเม็ดพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้วมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยใช้น้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น 10 °C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 180 °C นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิในการหลอมตัวของผลึก (T_m) พลังงานความร้อนของการหลอมผลึก (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)

7. ลักษณะการกระจายตัวของสารเติมแต่งในพอลิเมอร์

นำสารตัวอย่างที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อตามขั้นตอน 3.3.4 มาตัดให้มีขนาด 1×3 cm แล้วทำการเคลือบด้วยเรซิน โดยซึ่งเรซินพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) ในบีกเกอร์พลาสติกประมาณ 20 g และเติมสารกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Cobalt naphthenate) ลงไป 0.2 % โดยน้ำหนัก คนให้เข้ากันจากนั้นใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Methyl ethyl ketone peroxide) 1 % โดยน้ำหนักของเรซิน คนให้เข้ากัน แล้วจึงใช้แปรงทาเรซินลงบนแผ่นใสในขนาดที่ใหญ่กว่าชิ้นงานเล็กน้อย จึงวางแผ่นฟิล์มลงบนเรซิน แล้วใช้แปรงทาเรซินทับบนแผ่นฟิล์มอีกครั้งหนึ่ง โดยใช้แปรงเกลี่ยให้บางๆ จากนั้น นำเข้าตู้อบอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที นำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็น จึงแกะชิ้นงานออกจากแผ่นใส แต่ชิ้นงานหล่อในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 นาที แล้วหักในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ เพื่อนำพื้นผิวตรงรอยแตกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการหาปริมาณซีโอโลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริงในสารตัวอย่าง

นำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.4 มาทำการทดสอบเพื่อศึกษาปริมาณซีโอโลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริงในสารตัวอย่างแต่ละสูตร โดยนำเปอร์เซ็นต์เถ้า (%Ash) ที่ได้จากการเผาสารตัวอย่างในแต่ละสูตร มาคำนวณหาปริมาณซีโอโลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริง (%Ash และวิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ซีโอโลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริงได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณซีโอโลต์โซเดียมเอที่พบในสารตัวอย่าง

สูตร	ปริมาณซีโอโลต์โซเดียมเอที่กำหนดไว้ (%wt)	ปริมาณซีโอโลต์โซเดียมเอที่พบ (%wt)
LLDPE	0	0.01
LL/ZA3	3	2.78
LL/ZA6	6	3.89
LL/ZA9	9	6.11
LL/ZA12	12	9.26
LL/ZA15	15	12.38
LL/ZA20	20	16.75
LL/ZA9/SA	9	5.78
LL/ZA9/MA	9	6.01

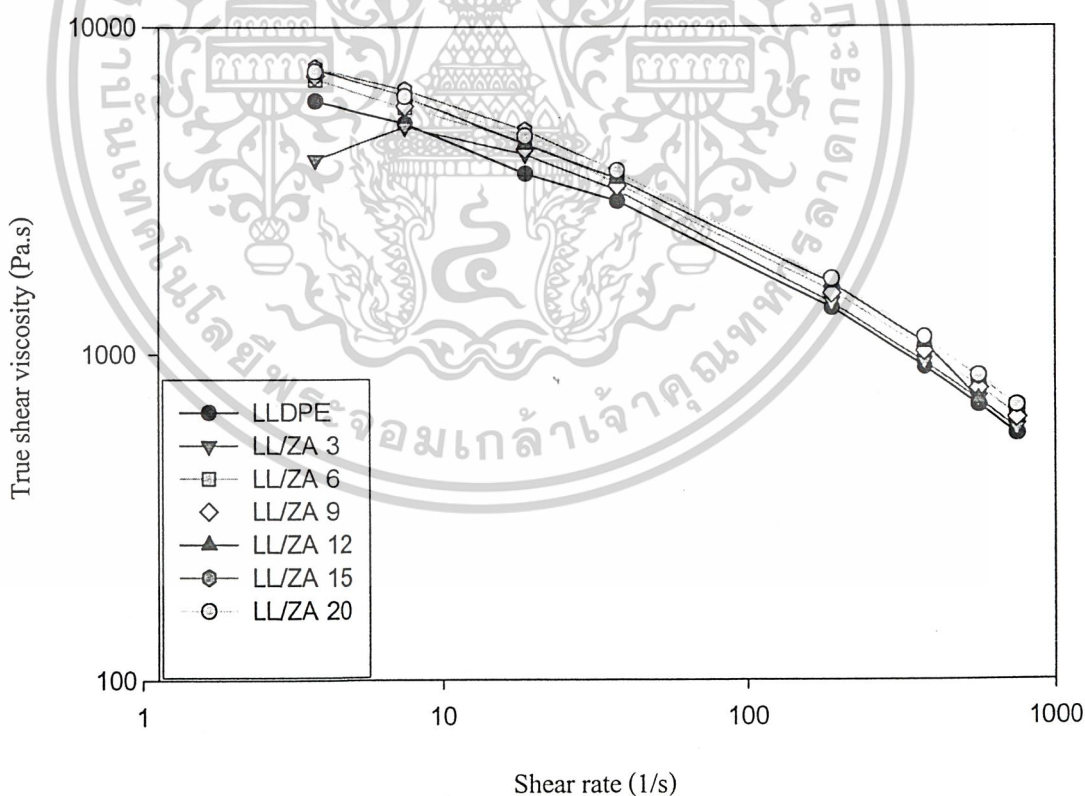
จากตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณซีโอโลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริงในสารตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างขั้ว และความหนาแน่นของ LLDPE กับ ซีโอโลต์โซเดียมเอที่แตกต่างกัน LLDPE มีอนุภาคขนาดใหญ่ ความหนาแน่นน้อยกว่าซีโอโลต์โซเดียมเอที่มีอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อเท LLDPE ที่ผสมกับซีโอโลต์โซเดียมเอลงในฮอปเปอร์ (Hopper) ของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว อนุภาคของซีโอโลต์โซเดียมเอจะตกลงอยู่ในส่วนล่างของ Hopper และเคลื่อนที่ได้ยากกว่าเม็ด LLDPE เมื่อสกรูหมุนเคลื่อนที่ไป ทำให้เกิดการแยกกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างเม็ด LLDPE กับอนุภาคซีโอไลต์โซเดียมเอได้ง่าย นอกจากนี้โครงสร้างซีโอไลต์โซเดียมเอ มีรูพรุน ซึ่งน้ำสามารถเข้าไปในรูพรุนและล้อมรอบซีโอไลต์โซเดียมเอ เมื่อเผาที่ 600 องศาเซลเซียส น้ำทั้งภายในและภายนอกซีโอไลต์ระเหยออกไป และหลังเผาเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นในเคซิเคเตอร์ น้ำสามารถเข้าไปภายในรูพรุนและล้อมรอบซีโอไลต์โซเดียมเอเช่นเดิม แต่ปริมาณน้ำที่อยู่ในรูพรุน อาจมีน้อยกว่าก่อนเผา อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้พบว่าของผสมมีปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอ น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้

4.2 ผลการศึกษาสมบัติการไหล

เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างดังตารางที่ 3.3-3.5 จึงนำมาทดสอบสมบัติการไหลดังหัวข้อ 3.3.5.3 เพื่อศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอ และอิทธิพลของสารเติมแต่งที่เติมลงไปในการ ตัวอย่างที่มีผลต่อสมบัติการไหล โดยดูค่าความหนืดที่อัตราความเครียดเฉือนต่างๆ ผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง True shear viscosity และ Shear rate เมื่อปริมาณ Zeolite NaA

เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 พบว่าสารตัวอย่างมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบ Pseudoplastic คือเมื่อให้อัตราความเครียดเพิ่มขึ้น ความหนืดจะลดลง เนื่องจากเมื่อให้แรงเฉือนสายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดการคลายตัวได้มากขึ้น นั่นคือ สายโซ่จัดเรียงตัวตามแนวแรงกระทำได้มากขึ้น ด้านการเคลื่อนที่น้อยลง ทำให้ความหนืดลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อปริมาณซีโอโลต์โซเดียมเอเพิ่มมากขึ้น ความหนืดก็เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิว (Interfacial friction) ของซีโอโลต์กับพอลิเมอร์มากขึ้น

การหาค่าความเป็น Pseudoplastic (Pseudoplasticity) ของสูตรตัวอย่าง ซึ่งคำนวณได้จากสมการ Power law model

$$\tau = K\gamma^n$$

เมื่อ n = Power law index

K = Consistency index

ค่า Pseudoplasticity สามารถดูได้จากค่า n ถ้าค่า n เข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น หมายความว่า สารตัวอย่างมีความเป็น Pseudoplastic มากขึ้น สูตรตัวอย่างที่ทดสอบทั้งหมดมีค่าความเป็น Pseudoplastic ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่า Power law index ของสารตัวอย่าง

สูตร	n
LLDPE	0.55
LL/ZA3	0.60
LL/ZA6	0.55
LL/ZA9	0.54
LL/ZA12	0.55
LL/ZA15	0.54
LL/ZA20	0.55
LL/ZA9/SA	0.54
LL/ZA9/MA	0.55

และจากตารางที่ 4.2 พบว่า ค่า n มีค่าใกล้เคียงกันคือ อยู่ในช่วง 0.54-0.60 แสดงว่าซีโอโลต์โซเดียมเอที่ใส่เข้าไป ไม่ได้ทำให้รูปแบบการไหลของ LLDPE เปลี่ยนแปลงไป เพียงแต่ทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการทำการทดลองสูตรที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยวิธีขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อได้ คือ สูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเออยู่ที่ 0-9 % (มีอยู่จริง 0-6%) ส่วนสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเออยู่มากกว่า 9 % ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ เนื่องจากในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปเกิดฟองอากาศเป็นจำนวนมาก ทำให้ในขั้นการดึงแผ่นฟิล์มผ่านลูกกลิ้งเกิดการฉีกขาดขึ้น ดังนั้นในการทดลองจึงสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ในสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอสูงสุดเพียงแค่ 9 % (มีอยู่จริง 6%) และเนื่องจากปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริงมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ จึงขอใช้ชื่อย่อของสูตรใหม่ดังตารางที่ 4.3

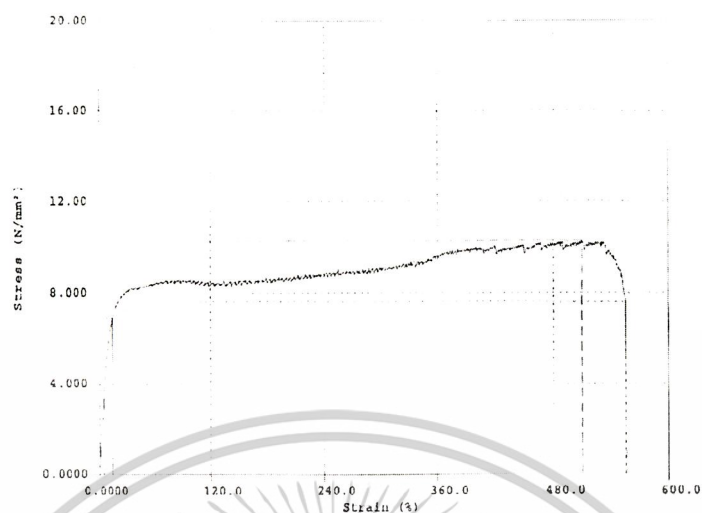
ตารางที่ 4.3 ปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริงและชื่อย่อของสูตรที่จะใช้ใหม่

สูตร	ปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่กำหนดไว้ (%wt)	ปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่พบ (%wt)	ชื่อย่อของสูตรที่จะใช้ใหม่
LLDPE	0	0	LLDPE
LL/ZA3	3	2.78	LL/ZA3(3)*
LL/ZA6	6	3.89	LL/ZA6(4)*
LL/ZA9	9	6.11	LL/ZA9(6)*
LL/ZA9/SA	9	5.78	LL/ZA9(6)*SA
LL/ZA9/MA	9	6.01	LL/ZA9(6)*MA

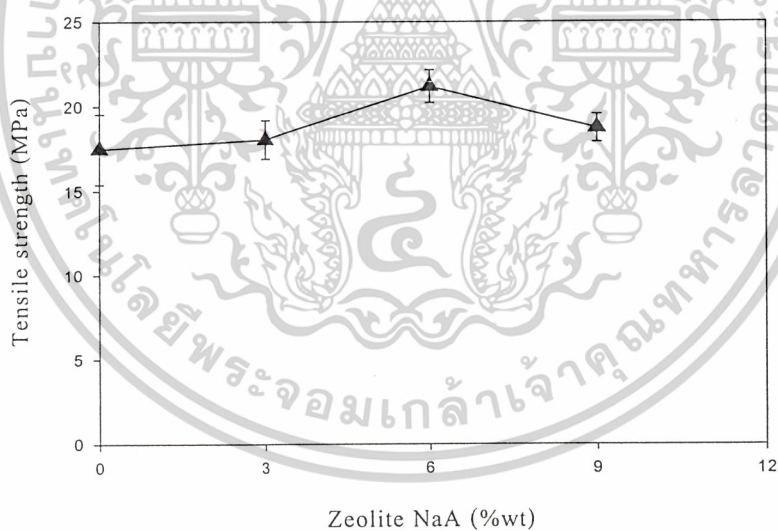
หมายเหตุ * เลขในวงเล็บ หมายถึง ปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริง

4.3.1 การทดสอบแรงดึง

จากการทดสอบแรงดึงตามหัวข้อ 3.3.5.4 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอและสารเติมแต่งชนิดอื่นคือ กรดสเตียริกและ PE-g-MA ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของ LLDPE แสดงดังรูปที่ 4.2

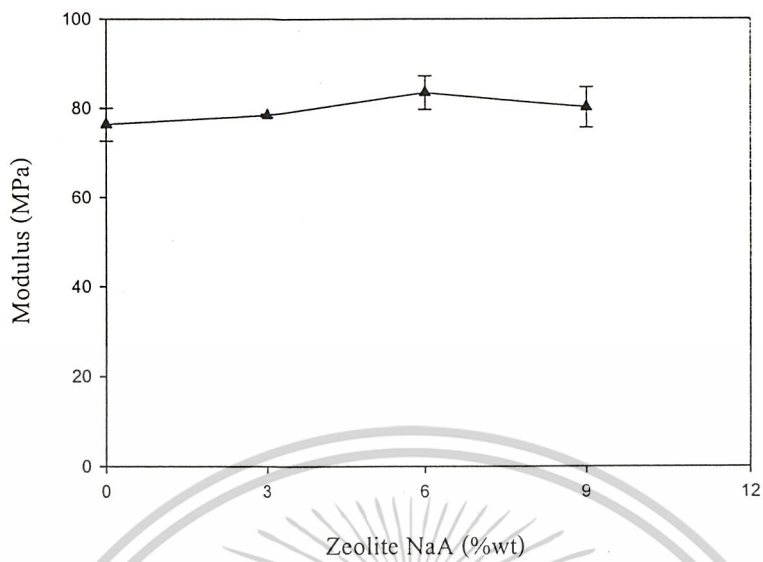


รูปที่ 4.2 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของ LLDPE

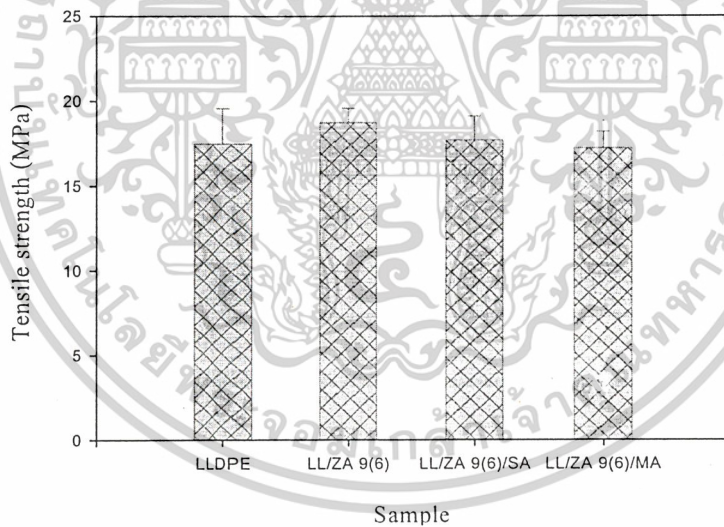


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile strength กับ ปริมาณ Zeolite NaA (%wt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

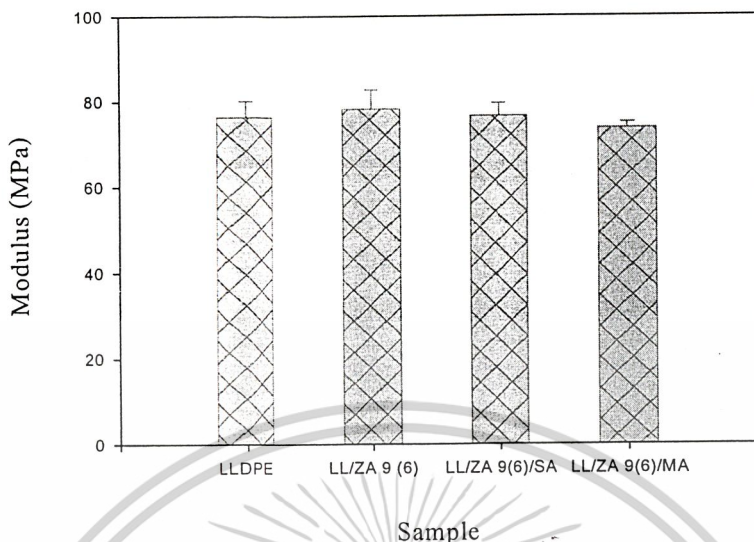


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus กับ ปริมาณ Zeolite NaA (%wt)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile strength กับ ปริมาณ Zeolite NaA 9(6)%wt
ที่มีการปรับปรุงด้วย Stearic acid และ PE-g-MA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



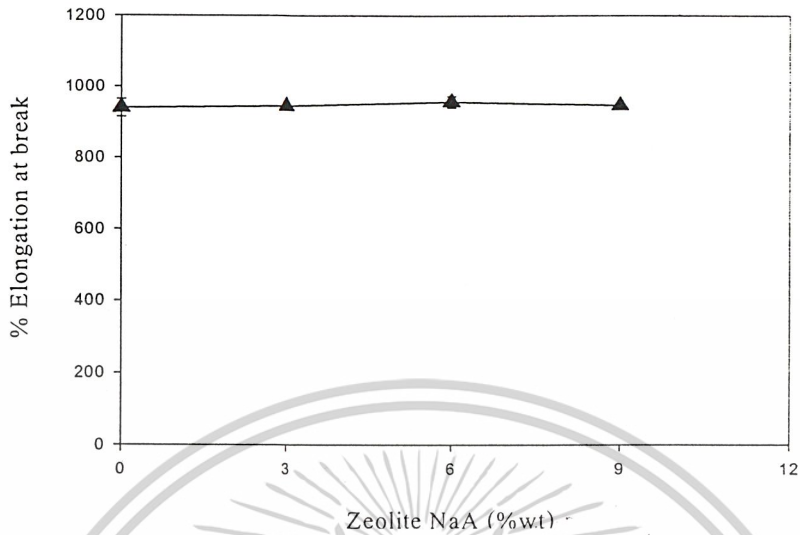
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus กับ ปริมาณ Zeolite NaA 9(6)%wt ทั้งที่มีและไม่มี การปรับปรุงด้วย Stearic acid และ PE-g-MA

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า เมื่อปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอเพิ่มขึ้นจนถึง 6% (มีอยู่จริง 4%) ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์โซเดียมเอในปริมาณ น้อยๆ มีความสามารถในการกระจายตัวได้ดี ทำให้มีการสัมผัสกับ LLDPE ได้ทั่วถึง เสริมความ แข็งแรงของแผ่นฟิล์มได้ดี ถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างระหว่างซั้วก็ตาม โดยดูได้จากค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสที่เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอเพิ่มขึ้น ทำให้ซีโอไลต์โซเดียมเอ มีโอกาสที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) มากขึ้น การกระจายตัวลดลง ซีโอไลต์ โซเดียมเอที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนนี้ทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวสะสมความเค้น (Stress concentrators) เมื่อให้แรงดึงจะเกิดช่องว่างระหว่างวัฏภาคขึ้น เป็นผลให้บริเวณนั้นกลายเป็นจุดบก พร่องของชิ้นงาน จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสลดลง

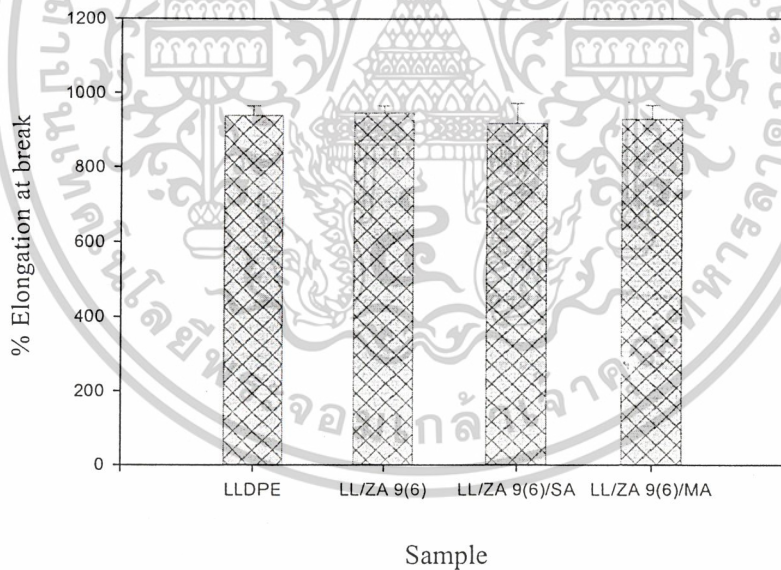
จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสของสูตร LL/ZA9(6)/SA กับ LL/ZA9(6)/MA ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับสูตร LL/ZA9(6) เนื่องจากปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่ ใส่ลงไป 9% นั้นอาจเป็นปริมาณที่ทำให้การปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก หรือการเติม PE-g-MA ลง ไป ไม่สามารถปรับปรุงการกระจายตัวของซีโอไลต์โซเดียมเอให้ดีขึ้นได้ (เมื่อผสม LLDPE กับ ซี โอไลต์โซเดียมเอในสถานะที่โซเดียม) ดังแสดงในภาพ SEM ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงไม่ เปลี่ยนแปลง

ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ฉ จุดขาดไม่เปลี่ยนแปลงในทุกสูตร (ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Elongation at break กับ ปริมาณ Zeolite NaA (%wt)



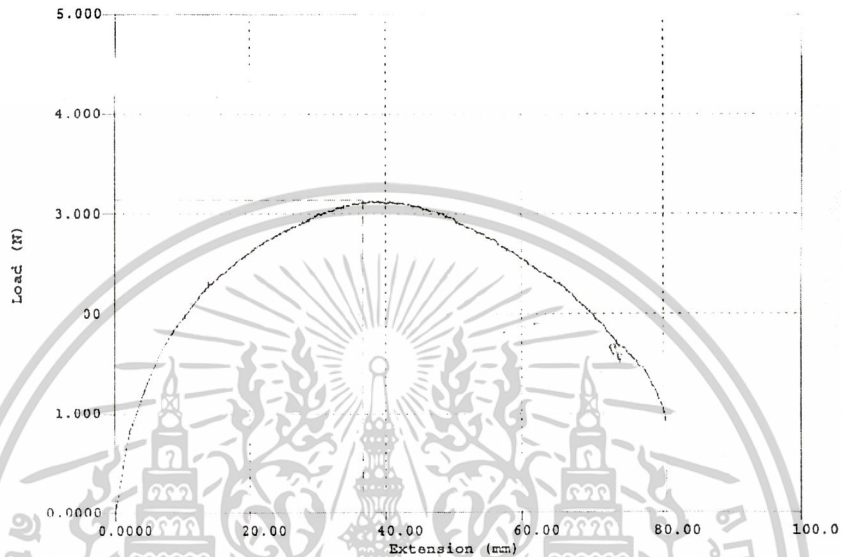
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Elongation at break กับ ปริมาณ Zeolite NaA 9(6)%wt ทั้งที่มีและไม่มี การปรับปรุงด้วย Stearic acid และ PE-g-MA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

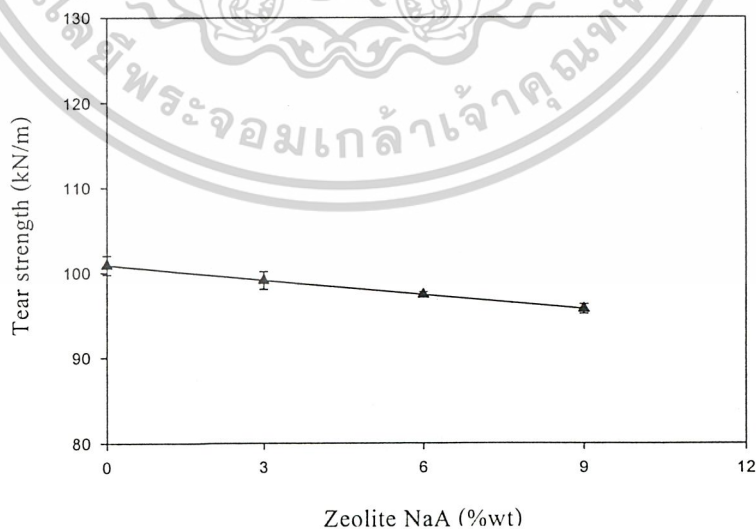
4.3.2 ผลการศึกษาความแข็งแรงฉีกขาด

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.3.4 มาตัดเป็นรูปปีกนก แล้วทำการทดสอบตามหัวข้อ

3.3.5.5 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงฉีกขาดของ LLDPE แสดงดังรูปที่ 4.9

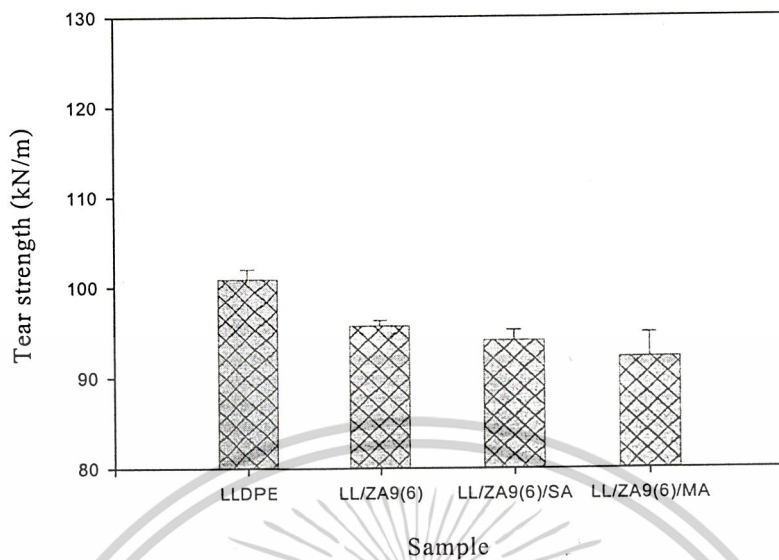


รูปที่ 4.9 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบ Tear strength ของ LLDPE



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tear strength กับ ปริมาณ Zeolite NaA (%wt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

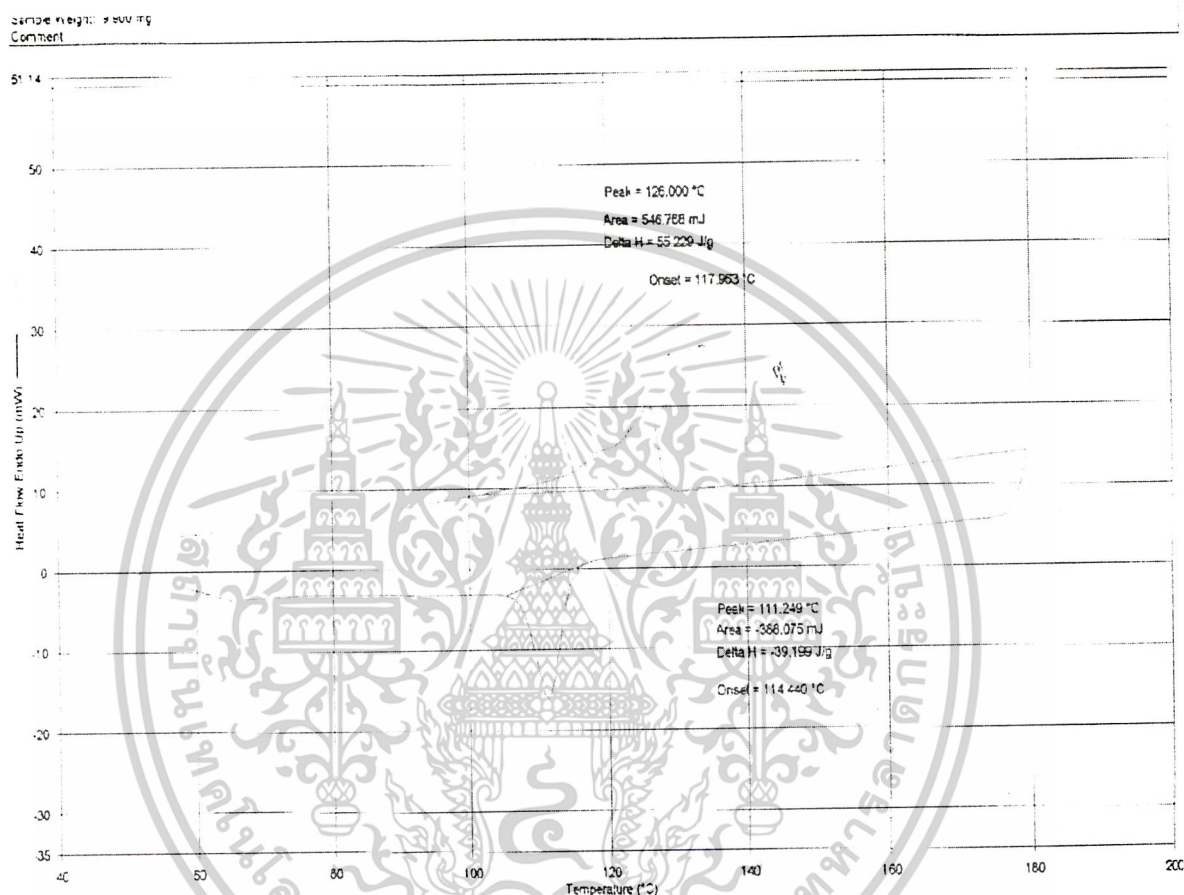


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tear strength กับ ปริมาณ Zeolite NaA 9(6)%wt ทั้งที่มีและไม่มี การปรับปรุงด้วย Stearic acid และ PE-g-MA

จากรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงก็ลดลง เนื่องจากชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปปีกนก ตรงบริเวณมุมของชิ้นงานเสมือนเป็นจุดรวมความเค้นพร้อมที่จะเกิดการฉีกขาดได้อย่างง่ายดายเมื่อออกแรงดึง ดังนั้นเมื่อใส่ซีโอไลต์โซเดียมเอที่เป็นอนุภาคของแข็งมากขึ้น ทำให้โอกาสที่จะเกิดความเข้มของความเค้น (Stress concentrator) เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการฉีกขาดมากขึ้น ความแข็งแรงก็ลดลงเล็กน้อย

4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

เมื่อนำสารตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.4 มาทำการตรวจสอบเพื่อศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC จะได้ผลการทดลองดังตัวอย่างกราฟรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของ LLDPE

นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ดังตารางที่ 4.3 เมื่อ

T_m	คือ อุณหภูมิของการหลอมผลึก
ΔH_f	คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก
%Crystallinity	คือ เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกในสารตัวอย่าง
ΔH_f°	คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 293 J/g [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta H_f (\text{J/g}) = \frac{\text{พื้นที่ใต้ peak ของการ heating (mJ)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}}$$

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

ซึ่งผลของการวัดเป็นดังตารางที่ 4.4

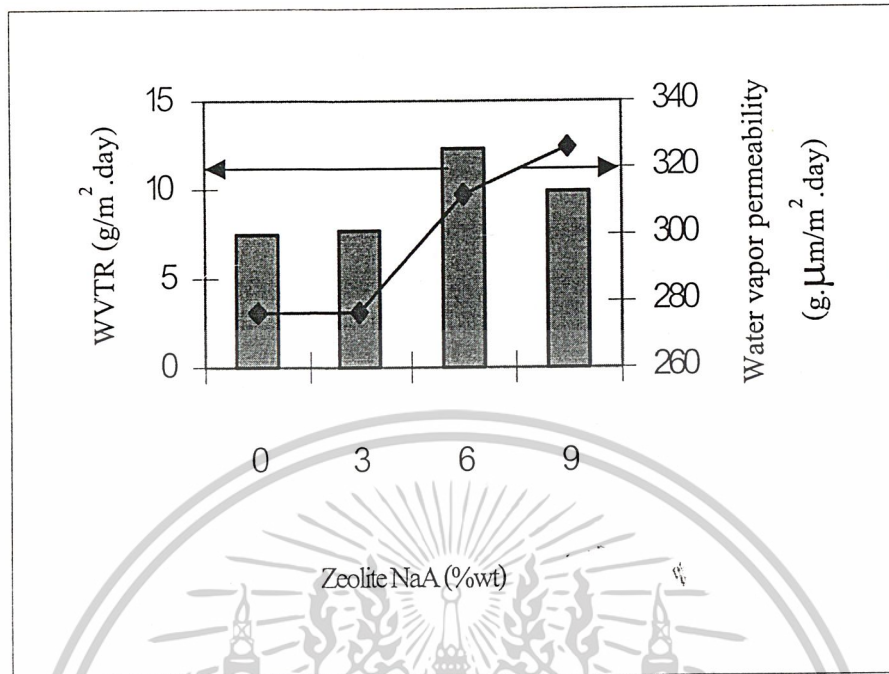
ตารางที่ 4.4 ปริมาณซีโอโลต์โซเดียมเอที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนในสารตัวอย่าง

สูตร	ปริมาณซีโอโลต์โซเดียมเอ ที่มีอยู่จริงในสารตัวอย่าง (%wt)	T_m (°C)	ΔH_f (J/g)	%Crystallinity
LLDPE	0.01	126	55	19
LL/ZA3	2.78	124	58	20
LL/ZA6	3.89	125	60	21
LL/ZA9	6.11	124	58	21
LL/ZA9/SA	5.78	124	58	21
LL/ZA9/MA	6.01	125	59	21

จากตารางที่ 4.4 พบว่า เมื่อปริมาณซีโอโลต์โซเดียมเอเพิ่มขึ้น อุณหภูมิในการหลอมผลึก (T_m) มีค่าคงที่ นั่นแสดงว่า ความหนาของชั้นลามেলাไม่เปลี่ยนแปลง โดยดูได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่ค่อนข้างคงที่ แสดงว่าซีโอโลต์โซเดียมเอไม่ได้เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent)

4.5 ผลการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ

นำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.4 มาทำการทดสอบดังหัวข้อ 3.3.5.2 ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 โดยในการทดลองต้องหาค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำก่อน จากนั้นนำมาคำนวณหาความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ โดยนำความหนาเฉลี่ยคูณกับอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ซึ่งข้อมูลดิบและวิธีการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง



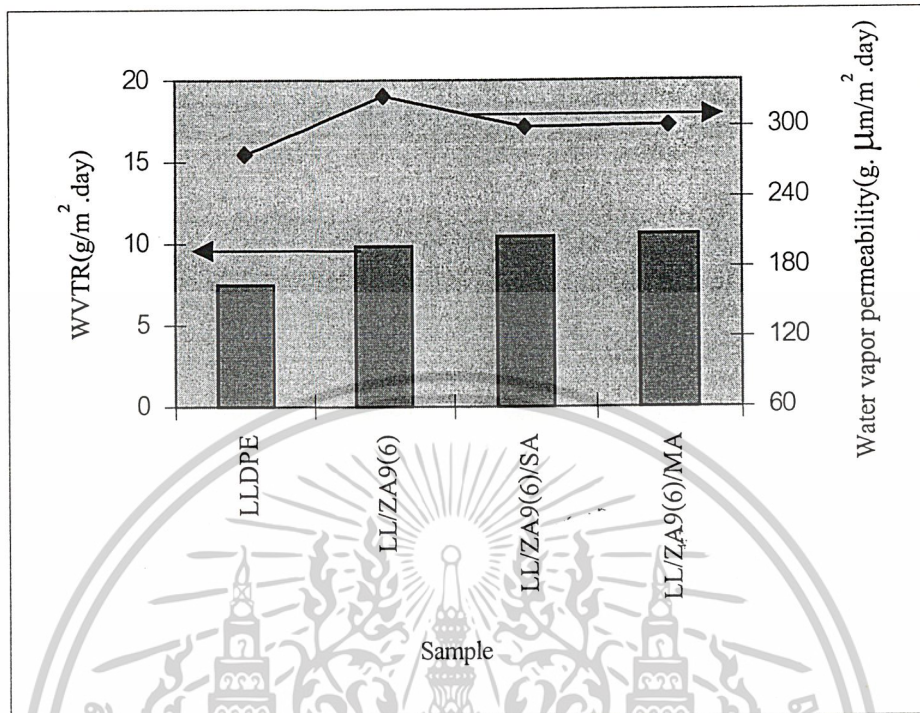
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Zeolite NaA (%wt) กับ WVTR และ Water vapor permeability

เนื่องจากความเป็นไปได้ที่ไอน้ำจะซึมผ่านแผ่นฟิล์มมีอยู่ 3 ทางด้วยกันคือ

1. ไอน้ำสามารถซึมผ่านรูพรุนของซีโอไลต์โซเดียมเอ
2. ไอน้ำสามารถซึมผ่านรอยต่อระหว่างภูมิภาคของ LLDPE กับ ซีโอไลต์โซเดียมเอ
3. ในกระบวนการขึ้นรูปเกิดฟองอากาศขึ้น ซึ่งไอน้ำสามารถซึมผ่านได้

ดังนั้นเมื่อปริมาณของซีโอไลต์มากขึ้นจึงมีรูพรุน รอยต่อระหว่างภูมิภาค และฟองอากาศมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability) มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.13

และจากรูปที่ 4.13 พบว่า อัตราการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอเพิ่มขึ้นจนถึง 6 % (มีอยู่จริง 4%) แต่เมื่อมีปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอ 9% (มีอยู่จริง 6%) พบว่า อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเมื่อเทียบกับสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอ 6% (มีอยู่จริง 4%) เนื่องจากสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์ 9% (มีอยู่จริง 6%) มีความหนาโดยเฉลี่ย (33 ไมครอน) มากกว่าสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์ 6% (มีอยู่จริง 4%) ซึ่งมีความหนาโดยเฉลี่ยเท่ากับ 25 ไมครอน



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Zeolite NaA 9(6)%wt กับ WVTR และ Water vapor permeability ของสูตรที่มีและไม่มีการปรับปรุงด้วย Stearic acid และ PE-g-MA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

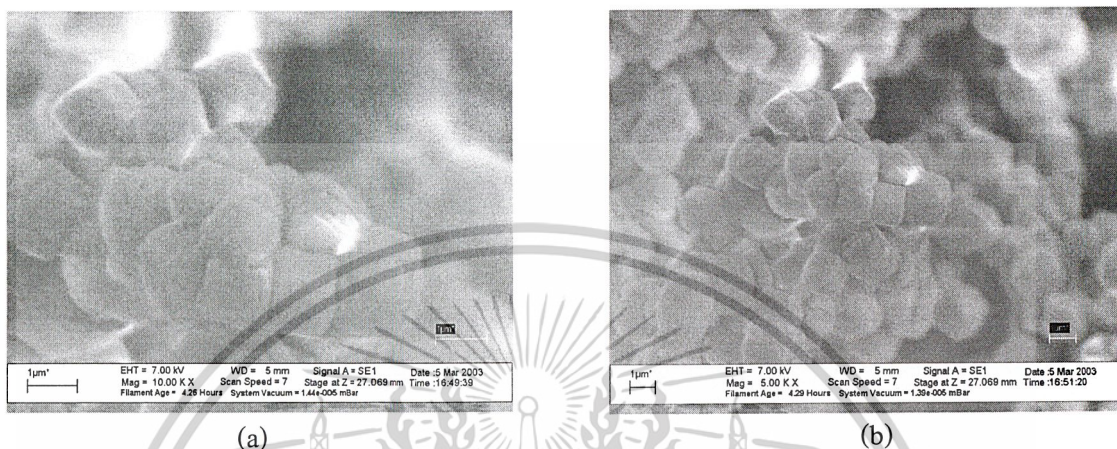
ตารางที่ 4.5 ความหนาของแผ่นฟิล์มในสูตรที่มีและไม่มีกรปรังด้วยกรดเตียริกและ PE-g-MA

สูตร	ความหนาของแผ่นฟิล์ม (μm)	ความหนาของแผ่นฟิล์มโดยเฉลี่ย (μm)
LLDPE	38	37
	35	
	38	
LL/ZA9(6)	34	33
	33	
	32	
LL/ZA9(6)/SA	26	29
	28	
	33	
LL/ZA9(6)/MA	26	29
	28	
	32	

จากรูปที่ 4.14 เมื่อพิจารณาความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของสูตร LL/ZA9(6)/SA กับ LL/ZA9(6)/MA พบว่ามีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำน้อยกว่าสูตร LL/ZA9(6) เนื่องจากในการใส่กรดเตียริกลงไป กรดเตียริกมีโอกาสที่จะกระจายตัวอยู่ระหว่างวัฏภาคของ LLDPE กับซีโอไลต์โซเดียมเอ ดังนั้นไอน้ำต้องซึมผ่านชั้นของกรดเตียริกก่อน ส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดลง และในกรณีของการปรังด้วย PE-g-MA ก็เช่นเดียวกัน และพบว่า สูตร LL/ZA9(6)/SA กับ LL/ZA9(6)/MA มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมากกว่าสูตร LL/ZA9(6) เนื่องจากผลของความหนาโดยเฉลี่ยของแผ่นฟิล์มที่ได้มีค่าแตกต่างกัน (ดังตารางที่ 4.5) โดยสูตร LL/ZA9(6)/SA กับ LL/ZA9(6)/MA มีความหนาโดยเฉลี่ยน้อยกว่า LL/ZA9(6) และจากสูตร LL/ZA9(6)/SA กับ LL/ZA9(6)/MA ซึ่งมีความหนาโดยเฉลี่ยเท่ากันพบว่า อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

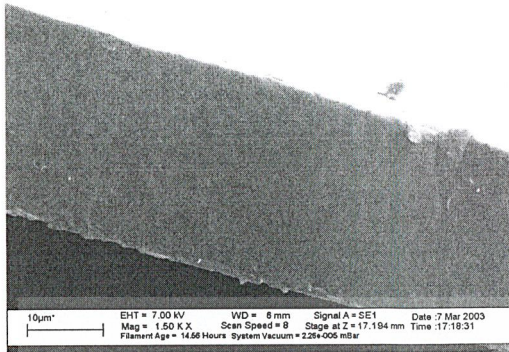
4.6 การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของซีโอไลต์โซเดียมเอในพอลิเมอร์



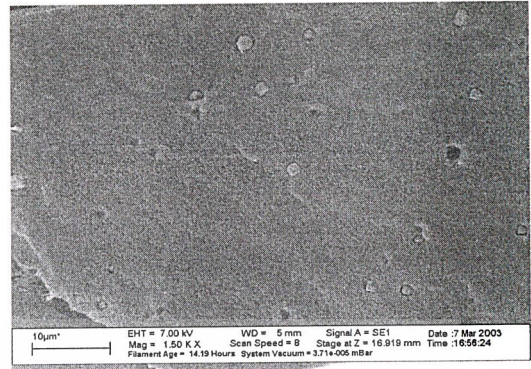
รูปที่ 4.16 ภาพ SEM ของอนุภาค Zeolite NaA ; (a) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

จากรูปที่ 4.16 (a) และ (b) พบว่าซีโอไลต์โซเดียมเอมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) มากกว่าอยู่เป็นอนุภาคเดี่ยวๆ (Single particle) เนื่องจากแรงดึงดูดของอนุภาคเป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ของสารที่มีขั้ว และรูปร่างมีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ มีการจัดเรียงกันเป็นชั้นๆ ในแต่ละอนุภาค ดังนั้นในขั้นตอนการผสมซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีขั้วกับ LLDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว จะต้องใช้แรงเฉือนที่สูงกว่าแรงดึงดูดของอนุภาคซีโอไลต์โซเดียมเอ เพื่อให้เกิดการกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดี

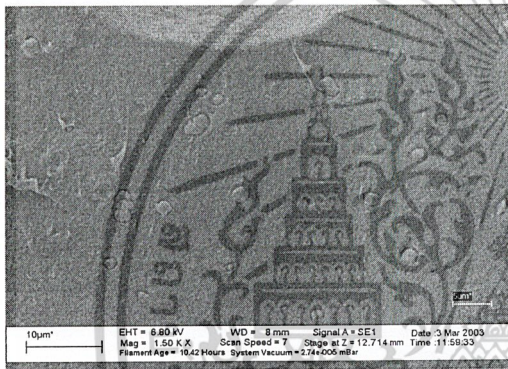
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



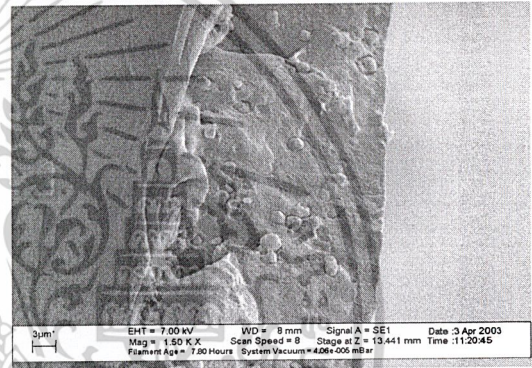
(a) LLDPE



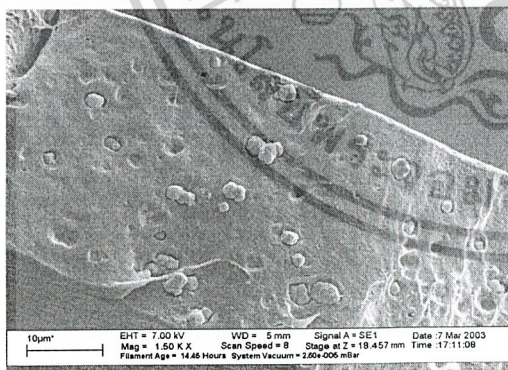
(b) LL/ZA3



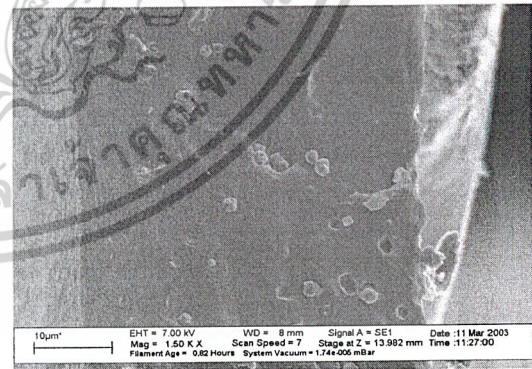
(c) LL/ZA6(4)



(d) LL/ZA9(6)



(e) LL/ZA9(6)/SA



(f) LL/ZA9(6)/MA

รูปที่ 4.17 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักที่อุณหภูมิต่างๆของสารตัวอย่างที่กำลังขยาย 1500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 (b) และ (c) พบว่า เมื่อใส่ซีโอโลต์โซเดียมเอในปริมาณ 3% และ 6% ซีโอโลต์โซเดียมเอยังคงมีความสามารถในการกระจายตัวได้ดี และโดยส่วนมากจะอยู่กันเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ซึ่งเป็นการสนับสนุนผลการทดลองสมบัติเชิงกลคือ ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัสเพิ่มมากขึ้น แต่ความแข็งแรงฉีกขาดลดลงดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

จากรูปที่ 4.17 (d) พบว่า เมื่อใส่ซีโอโลต์โซเดียมเอในปริมาณ 9% ซีโอโลต์มีความสามารถในการกระจายตัวลดลง และเริ่มอยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กลงมากขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณซีโอโลต์โซเดียมเอมากขึ้น ซีโอโลต์โซเดียมเอที่มีขั้วชอบที่จะอยู่รวมตัวกันมากกว่าที่จะกระจายตัวไปบน LLDPE ที่ไม่มีขั้ว ส่งผลให้ความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาดลดลง

จากรูปที่ 4.17 (e) และ (f) พบว่า เมื่อใส่ซีโอโลต์โซเดียมเอในปริมาณ 9% เท่ากัน แต่มีการเติมสารเติมแต่งชนิดอื่นเพิ่มเข้าไปคือ กรดสเตียริกและ PE-g-MA พบว่า ซีโอโลต์โซเดียมเอในสูตรที่มีและไม่มีการปรับปรุงมีการกระจายตัวดีพอๆ กัน อาจเนื่องจากปริมาณซีโอโลต์โซเดียมเอที่ 9% นี้ยังไม่มากเกินไปที่จะสร้างปัญหาเรื่องการกระจายตัว เพราะจากภาพ SEM พบว่า อนุภาคซีโอโลต์โซเดียมเออยู่ในลักษณะก้อนเดี่ยวๆ มีการรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กบ้างเล็กน้อยเท่านั้น

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

1. สารตัวอย่างมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบ Pseudoplastic นั่นคือ เมื่อให้อัตราความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น ความหนืดลดลง และเมื่อปริมาณซีโอโลดโซเดียมเอเพิ่มขึ้น ความหนืดของ LLDPE เพิ่มขึ้น
2. ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณซีโอโลดโซเดียมเอเพิ่มขึ้น จนถึง 6% (มีอยู่จริง 4%) แต่ในสูตรที่มีปริมาณซีโอโลดโซเดียมเอ 9% พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสมีค่าลดลง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน
3. เมื่อปริมาณซีโอโลดโซเดียมเอเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงก็ขาดลดลง
4. เมื่อเปรียบเทียบสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก หรือ PE-g-MA พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัส ความแข็งแรงก็ขาด และค่าเปอร์เซ็นต์การดึง ณ จุดขาดมีค่าใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่มีการปรับปรุง เมื่อใช้ซีโอโลดโซเดียมเอในปริมาณ 9% (มีอยู่จริง 6%)
5. เมื่อปริมาณซีโอโลดโซเดียมเอเพิ่มขึ้นพบว่า อุณหภูมิในการหลอมผลึก (T_m) มีค่าคงที่ นั่นแสดงว่า ความหนาของชั้นลามเลลาไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณซีโอโลดโซเดียมเอเพิ่มขึ้นแสดงว่า ซีโอโลดโซเดียมเอไม่ได้เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent)
6. เมื่อปริมาณซีโอโลดโซเดียมเอเพิ่มมากขึ้นพบว่า ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้น และในสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก และ PE-g-MA ซึ่งมีปริมาณซีโอโลดโซเดียมเออยู่ 9% เท่ากันพบว่า ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ได้ทำการปรับปรุง
7. จากการศึกษาสัมมนาวิทยาพบว่า เมื่อปริมาณซีโอโลดโซเดียมเอเพิ่มขึ้นจนถึง 6% (มีอยู่จริง 4%) พบว่า ซีโอโลดโซเดียมเอมีความสามารถในการกระจายตัวที่ดี และอยู่กันเป็นอนุภาคเดี่ยว แต่เมื่อปริมาณซีโอโลดโซเดียมเอเพิ่มขึ้น การกระจายตัวเป็นไปได้ยากขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก หรือ PE-g-MA พบว่า มีความสามารถในการกระจายตัวดีพอๆ กับสูตรที่ไม่มีการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการขึ้นรูปควรเลือกแบบที่มีระบบการระบายของไอน้ำ (Vent) ได้ เนื่องจากซีโอไลต์โซเดียมเอมีมีความสามารถในการดูดน้ำได้ดี ทำให้ในระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มเกิดฟองอากาศขึ้น
2. อาจจะทำการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) เนื่องจากให้แรงเฉือนที่มากกว่าเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวในกรณีที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวดวย (L/D) ratio เท่ากัน เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของซีโอไลต์ที่ดีขึ้น
3. ทดลองใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับห่อผักและผลไม้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ศูนย์บรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2532. **LLDPE พลาสติกใหม่ที่น่าจับตามอง**. กรุงเทพฯ. : ห้างหุ้นส่วนจำกัด ฟีนีพลัสบลิซซิ่ง.
2. ตะวัน สุขน้อย. 2544. “เอกสารประกอบการเรียนวิชาซีโอไลท์และสารที่มีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง” คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,
3. <http://www.iza-sc.etyz.ch/IZA-SC/Atlas/data/LTA.html>
4. ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2526. โพลีเมอร์เชิงพาณิชย์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
5. สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2543. เทคโนโลยีพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โครงการตำราคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
6. มยุรี ภาคลำเจียก, อมรรัตน์ สวัสดิ์ทิต. คู่มือการใช้พลาสติกเพื่อการหีบห่อ. ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
7. Kohn J., Tate R., Jordy D. 1997. ANTEC'97. 1654-1658.
8. Lee, K.T., Yoon, C.S. 2001. J.Food Sci. Biotechnol. 10(3): 282-285.
9. Wang Z., Qu B., Fan W., Hu Y. and Shen X. 2002. J.Polym. Degrad. and Stab. 76: 123-128.
10. Yoo S.I., Lee T.Y., Yoon J.S., Lee I.M., Kim M.N. and Lee H.S. 2002. J.Appl.Polym.Sci. 83: 767-776.
11. Danjaji I.D., Nawang R., Ishiaku U.S., Jamail H. and Z.A.Mohd.Ishak. 2001. J.Appl. Polym. Sci. 79: 29-37.
12. Matzions P., Bikiaris B., Kokkou S. and Panayiotou C. 2001. J.Appl. Polym. Sci. 79: 2548-2557.
13. Lee J., Shim M. and Kim S. 1999. Polym. Eng. Sci. 39: 1993-1997.
14. Ozmihci F., Balkose D. and Ulku S. 2001. J.Appl.Polym.Sci. 82: 2913-2921.
15. Rukchonlatee S., Buabuttra K., Sirijaeranai N. and Suwannachai K. 2002. KKU Sci.J. 30(4): 262-270.
16. Annual Book of ASTM Standard 08.03, 1992. 201-207.
17. Annual Book of ASTM Standard 08.01, 1992. 159-180.
18. Annual Book of ASTM Standard 08.01, 1992. 361-363.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19. Jacqueline I.K. 1986. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. vol 10.

New York: John Wiley & Sons, Inc.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ผลการหาปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริงในสารตัวอย่าง

ถ้วย ที่	สาร	น.น. ถ้วย เปล่า	น.น.สาร+ ถ้วย ก่อนเผา	น.น.สาร ก่อนเผา	น.น.สาร+ ถ้วย หลังเผา	น.น.สาร หลังเผา	% Ash เฉลี่ย	% ZA ที่พบ
1	LLDPE	47.5928	48.6687	1.0759	47.5930	0.0002	0.01	0
2		43.3977	44.3997	1.0020	43.3978	0.0001	(y ₁)	
1	Zeolite	36.8829	37.9687	1.0858	37.8229	0.9400	88.81	100.00
2		34.9321	35.9094	0.9773	35.8277	0.8956	(y ₂)	
3		43.7357	44.7219	0.9862	44.6056	0.8699		
1	LL/ZA3	47.9044	48.9500	1.0456	47.9320	0.0276	2.48	2.78
2		43.2498	44.3613	1.1115	43.2780	0.0282	(y ₃)	
3		43.0362	44.0701	1.0339	43.0595	0.0233		
1	LL/ZA6	42.9455	43.9544	1.0089	42.9811	0.0356	3.46	3.89
2		41.0988	41.8871	0.7883	41.1243	0.0255	(y ₄)	
3		41.8071	43.1665	1.3594	41.8565	0.0494		
1	LL/ZA9	45.4978	46.5010	1.0032	45.5532	0.0554	5.44	6.11
2		44.1753	45.2151	1.0698	44.2307	0.0554	(y ₅)	
3		44.5638	45.5621	0.9983	44.6200	0.0562		
1	LL/ZA12	45.7011	46.8282	1.1211	45.7927	0.0916	8.23	9.26
2		47.2444	48.3308	1.0864	47.3344	0.0900	(y ₆)	
1	LL/ZA15	44.6394	45.7904	1.1510	44.7713	0.1319	11.00	12.38
2		43.4822	44.4955	1.0133	43.5890	0.1068	(y ₇)	
1	LL/ZA20	46.5351	47.8508	1.3157	46.7342	0.1991	14.88	16.75
2		46.0136	47.3388	1.3252	46.2073	0.1937	(y ₈)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถั่ว ที่	สาร	น.น. ถั่ว เปล่า	น.น.สาร+ ถั่ว ก่อนเผา	น.น.สาร ก่อนเผา	น.น.สาร+ ถั่ว หลังเผา	น.น.สาร หลังเผา	% Ash เฉลี่ย	% ZA ที่พบ
1	LL/ZA9/ SA	43.7776	44.9320	1.1544	43.8333	0.0557	5.14 (y ₉)	5.78
2		45.9208	46.9941	1.0733	45.9767	0.0559		
3		43.2139	44.3007	1.0868	43.2725	0.0586		
1	LL/ZA9/	46.8591	47.9870	1.1279	46.9183	0.0592	5.35 (y ₁₀)	6.01
2	MA	44.2345	45.2530	1.0185	44.2900	0.0555		

หลักการคำนวณหาปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริงสามารถคำนวณได้ดังนี้

ผลต่างของ %Ash ที่ $y_2 - y_1$ เทียบได้ว่ามี Zeolite NaA อยู่จริง 100 %

ผลต่างของ %Ash ที่ $y_3 - y_1$ เทียบได้ว่ามี Zeolite NaA อยู่จริง $\frac{100 \times (y_3 - y_1)}{(y_2 - y_1)}$ %

ตัวอย่างการคำนวณ

ผลต่างของ %Ash เท่ากับ 88.80 เทียบได้ว่ามี Zeolite NaA อยู่จริง 100 %

ผลต่างของ %Ash เท่ากับ 2.47 เทียบได้ว่ามี Zeolite NaA อยู่จริง $\frac{100 \times 2.47}{88.80}$ %

ดังนั้นสูตรอื่นๆ ที่เหลือสามารถคำนวณได้ โดยเปลี่ยนจาก y_3 เป็น $y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9$ และ y_{10} แทน ซึ่งผลที่คำนวณได้แสดงดังตารางข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของสารตัวอย่าง

1.1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength, MPa)

สูตร	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
LLDPE	10.30	21.79	16.88	24.48	14.28	17.16	17.48	2.08
LL/ZA3	17.81	14.12	22.76	18.17	18.49	16.96	18.05	1.14
LL/ZA6	18.48	20.23	21.44	19.29	22.97	24.83	21.20	0.97
LL/ZA9	18.57	15.93	18.53	17.97	19.18	22.20	18.73	0.83
LL/ZA9/SA	15.65	21.38	13.85	15.57	17.37	22.46	17.71	1.41
LL/ZA9/MA	18.50	12.73	18.32	18.93	18.54	16.35	17.23	0.97

1.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)

สูตร	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)							
	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
LLDPE	555	1164	994	1100	885	939	940	25
LL/ZA3	928	963	946	1015	954	962	945	4
LL/ZA6	896	951	976	995	1000	937	959	16
LL/ZA9	982	827	1134	845	852	954	947	20
LL/ZA9/SA	832	1051	816	824	874	1117	919	54
LL/ZA9/MA	922	816	968	980	1057	830	929	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ค่ามอดุลัส (Modulus, MPa)

สูตร	ค่ามอดุลัส (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
LLDPE	81.45	71.49	76.36	88.79	62.09	78.12	76.38	3.70
LL/ZA3	81.04	80.36	79.18	76.47	77.93	75.49	78.41	0.36
LL/ZA6	81.59	84.67	77.65	69.94	92.08	95.11	83.51	3.79
LL/ZA9	96.96	66.71	85.06	84.94	76.39	71.03	80.18	4.50
LL/ZA9/SA	81.05	80.64	79.07	69.38	65.53	83.50	76.53	2.97
LL/ZA9/MA	76.36	75.27	68.79	70.46	76.89	74.34	73.69	1.35

1.4 ค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength, kN/m)

สูตร	ค่าความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)							
	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
LLDPE	104.7	96.6	102.7	91.0	99.3	85.6	100.9	1.1
LL/ZA3	89.0	91.6	93.2	84.3	94.8	85.6	99.1	1.1
LL/ZA6	99.3	98.9	94.3	97.6	95.6	98.7	97.4	0.3
LL/ZA9	103.0	95.1	93.2	95.3	98.9	88.8	95.7	0.6
LL/ZA9/SA	96.0	97.8	91.0	90.6	94.5	94.9	94.1	1.2
LL/ZA9/MA	86.6	102.8	88.9	98.0	89.5	87.9	92.3	2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สมบัติการไหลด้วย Capillary rheometer

2.1 การคำนวณ

2.1.1 การคำนวณค่า Shear stress

$$\tau = \frac{(P_L - P_0)R}{2L}$$

เมื่อ P_L = ความดันที่ตกลงของหัวคายยาวเท่ากับ L ($L = 16$ mm)

P_0 = ความดันที่ตกลงของหัวคายยาวเท่ากับ 0 mm

R = รัศมีของหัวคาย (1 mm)

L = ความยาวของหัวคาย (16 mm)

2.1.2 การคำนวณค่า Shear strain rate

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate)

R = รัศมีของหัวคาย

2.1.3 การคำนวณค่า Shear viscosity

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

เมื่อ τ = ความเค้นเฉือน (Shear stress)

$\dot{\gamma}$ = อัตราความเครียดเฉือน (Shear strain rate)

2.1.4 การคำนวณค่า Power law index

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

$$\log \tau = \log K + n \log \dot{\gamma}$$

เมื่อ n = Power law index

2.2 ผลการทดสอบสมบัติการไหลของสารตัวอย่าง

2.2.1 LLDPE

Shear rate (1/s)	P_0 (kPa)	P_L (kPa)	Shear Viscosity (Pa.s)	n
3.75	0	71	5917.33	0.55
7.50	40	125	5041.33	0.55
18.75	160	228	3533.33	0.55
37.50	379	387	2909.07	0.55
187.50	1367	961	1373.81	0.55
375.00	2235	13110	906.24	0.55
562.50	2951	15410	629.16	0.55
750.00	3466	17030	565.16	0.55

2.2.2 LL/ZA3

Shear rate (1/s)	P_0 (kPa)	P_L (kPa)	Shear Viscosity (Pa.s)	n
3.75	0	47	3917.33	0.60
7.50	0	1180	4917.33	0.60
18.75	0	2430	4050.13	0.60
37.50	285	4050	3137.60	0.60
187.50	1529	10070	1423.52	0.60
375.00	2458	13700	936.83	0.60
562.50	3180	16130	719.45	0.60
750.00	3782	17870	587.00	0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 LL/ZA6

Shear rate (1/s)	P_0 (kPa)	P_L (kPa)	Shear Viscosity (Pa.s)	n
3.75	0.022	0.85	6906.80	0.55
7.50	0.040	1.40	5675.00	0.55
18.75	0.080	2.75	4450.00	0.55
37.50	0.438	4.40	3298.60	0.55
187.50	1.514	10.81	1549.90	0.55
375.00	2.364	14.63	1021.80	0.55
562.50	3.074	17.20	784.90	0.55
750.00	3.678	19.13	644.00	0.55

2.2.4 LL/ZA9

Shear rate (1/s)	P_0 (kPa)	P_L (kPa)	Shear Viscosity (Pa.s)	n
3.75	30	880	7082.00	0.54
7.50	60	1430	5708.00	0.54
18.75	207	2730	4204.80	0.54
37.50	537	4420	3235.73	0.54
187.50	1692	10810	1519.68	0.54
375.00	2649	14830	1015.09	0.54
562.50	3419	17450	779.50	0.54
750.00	4058	19260	633.41	0.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 LL/ZA12

Shear rate (1/s)	P_0 (kPa)	P_L (kPa)	Shear Viscosity (Pa.s)	n
3.75	30	880	7416.00	0.55
7.50	60	1430	6133.33	0.55
18.75	211	2730	4348.27	0.55
37.50	428	4420	3410.13	0.55
187.50	1516	10810	1635.68	0.55
375.00	2551	14830	1074.91	0.55
562.50	2769	17450	720.05	0.55

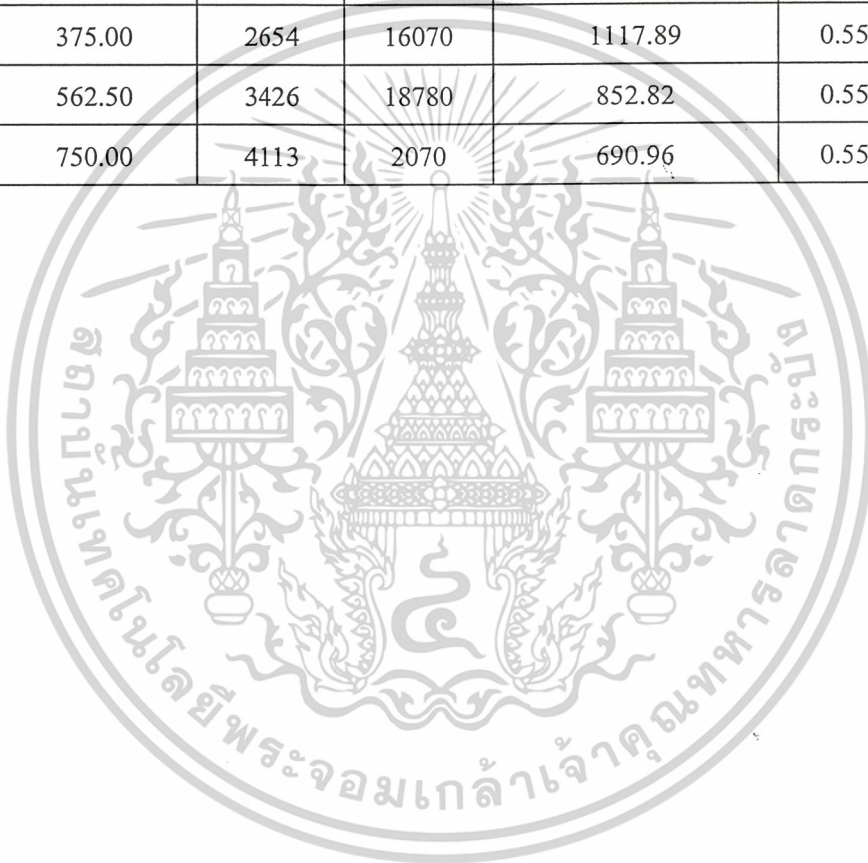
2.2.6 LL/ZA15

Shear rate (1/s)	P_0 (kPa)	P_L (kPa)	Shear Viscosity (Pa.s)	n
3.75	0	90	7501.33	0.54
7.50	0	1540	6417.33	0.54
18.75	75	2960	4808.53	0.54
37.50	442	4740	3581.60	0.54
187.50	1507	11570	1677.17	0.54
375.00	2549	15950	1116.75	0.54
562.50	3353	18550	844.28	0.54
750.00	4219	20810	691.29	0.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7 LL/ZA20

Shear rate (1/s)	P_0 (kPa)	P_L (kPa)	Shear Viscosity (Pa.s)	n
3.75	30	90	7285.33	0.55
7.50	98	1560	6106.67	0.55
18.75	279	3040	4610.35	0.55
37.50	501	4830	3606.93	0.55
187.50	1675	11780	1683.84	0.55
375.00	2654	16070	1117.89	0.55
562.50	3426	18780	852.82	0.55
750.00	4113	2070	690.96	0.55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง ผลการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ

สูตร	ความหนา (μm)	ความหนาโดยเฉลี่ย (μm)	WVTR (g/m ² .day)	ค่า WVTR โดยเฉลี่ย (g/m ² .day)	Water Vapor Permeability (g.μm/m ² .day)	Water Vapor Permeability โดยเฉลี่ย (g.μm/m ² .day)
LLDPE	38		7.39		281	277
	35	37	7.59	7.47	266	
	38		7.44		283	
LL/ZA3	45		6.23		280	276
	44	39	5.66	7.67	249	
	27		11.12		300	
LL/ZA6	26		11.45		298	312
	25	25	13.43	12.32	336	
	25		12.07		302	
LL/ZA9	34		9.57		325	326
	33	33	9.40	9.90	310	
	32		10.72		343	
LL/ZA9/SA	26		11.67		303	299
	28	29	10.61	10.45	297	
	33		9.06		298	
LL/ZA9/MA	26		11.50		299	301
	28	29	11.05	10.60	309	
	32		9.24		296	

การคำนวณ

$$\text{Water vapor permeability} = \text{WVTR} \times \text{ความหนาของแผ่นฟิล์ม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้