

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและ
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผสมซีโอโลต์โซเดียมเอ



นางสาวกั้งสดาล บัวบุศรา
นางสาวณัฐนิชาห์ ศิริเจียรนัย

เลขหน้.....
เลขทะเบียน 43908
วัน, เดือน, ปี 18 ต.ค. 2545

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

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rheological and Mechanical Properties of LDPE and LLDPE Compounded with Zeolite NaA



Miss Kangsadal Buabuttra
Miss Nuttnichar Sirijeeranai

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าอนุมัติ

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทีลีนชนิดความแน่นต่ำ และ
พอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ
โดย นางสาวกังสดาล บัวบุตรา
นางสาวณัฐนิชาห์ ศิริเจียรนัย
ภาควิชา เคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ศุภารัตน์ รักชลธิ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต


.....
(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย) หัวหน้าภาควิชาเคมี

คณะกรรมการโครงการพิเศษ


.....
(ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย) ประธานกรรมการ


.....
(ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญารากร) กรรมการ


.....
(ดร.ศุภารัตน์ รักชลธิ์) กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	สมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ	
นักศึกษา	นางสาวกัญศาด บัวบุตรา 41052005	
	นางสาวณัฐนิชาห์ ศิริเจียรนัย 41052014	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ	
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2544	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ ทำการเตรียมผสมตัวอย่างโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวคู่ แล้วตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของซีโอไลต์โซเดียมเอ ทดสอบสมบัติการไหล และสมบัติทางความร้อน เตรียมชิ้นงานตัวอย่างในรูปแผ่นฟิล์มบางจากเครื่องอัดขึ้นรูป และทำการทดสอบสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยา

จากการทดลองพบว่า สมบัติส่วนใหญ่ของทั้ง LDPE และ LLDPE ลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอเพิ่มขึ้น เช่น ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าลดลง แต่ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น และจากสัณฐานวิทยาที่ได้ พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคซีโอไลต์โซเดียมเอเป็นไปได้ยากขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอเพิ่มขึ้น

Special Project Title Rheological and Mechanical Properties of LDPE and LLDPE
Compounded with Zeolite NaA

Name Miss Kangsadal Buabuttra
Miss Nuttnichar Sirijeeranai

Special Project Advisor Dr. Suparat Rukchonlatee

Department Chemistry

Academic Year 2001

Abstract

This research studied rheological and mechanical properties of low density polyethylene (LDPE) and linear low density polyethylene (LLDPE) compounded with Zeolite NaA. Compounding technique was carried out using a twin-screw extruder. All compounds were examined for the actual Zeolite NaA content, rheological characteristics, and thermal behaviour. Also all the compounds were shaped into a thin film form using a compression molding machine and then tested for mechanical and morphological characteristics.

It was found that most properties of both LDPE and LLDPE slightly decreased when Zeolite NaA content increased. Such properties were tensile strength, %elongation at break, tear strength, and %crystallinity. However, their viscosities increased with increasing Zeolite NaA content. Morphological characteristics revealed that the higher the Zeolite NaA content, the more difficult the dispersion of Zeolite NaA became.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความรัก ความร่วมมือ ความอบอุ่น ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้จัดทำบุคคลและองค์กรต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ดร.สุภารัตน์ รักขลธิ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำอบรมให้รู้จักการทำงานที่เป็นระเบียบมีความละเอียดรอบคอบ และกรุณาตรวจทาน แก้ไขโครงการฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย และ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ช่วยกรุณาตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยโพลีเอททีลีน จำกัด และ บริษัท PQ Chemicals (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพลาสติกและซีโอโลต์โซเดียมเอ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เจ้าหน้าที่ MTEC และเจ้าหน้าที่ศูนย์บรรจุหีบห่อไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบพระคุณพี่ๆ น้องๆ เพื่อนๆ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือด้านแรงงาน พลังความคิด และความอบอุ่นตลอด 4 ปี

นอกเหนือจากนี้ยังมีบุคคลท่านอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำไม่ได้กล่าวถึง ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาวกังสดาล บัวบุตรา

นางสาวณัฐมิชาห์ ศิริเจียรนัย

สารบัญ

บทคัดย่อ โครงการงานพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อ โครงการงานพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของ โครงการงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของ โครงการงานพิเศษ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE)	3
2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE: Low Density Polyethylene)	4
2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE : Linear Low Density Polyethylene)	5
2.4 Zeolite NaA	6
2.5 การอัดรีด (Extrusion)	7
2.6 งานวิจัยที่ผ่านมา	9
บทที่ 3 การทดลอง	13
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	13
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	14
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	14
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	18
4.1 การเลือกเครื่องมือที่ใช้ผสมสูตร	18
4.2 ผลการหาปริมาณที่แน่นอนของ Zeolite NaA ในสารตัวอย่าง	18
4.3 การศึกษาสมบัติการไหล	19
4.4 การศึกษาสมบัติเชิงกล	21
4.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ Zeolite NaA ในพอลิเมอร์	26
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	31
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	31
5.2 ข้อเสนอแนะ	32
เอกสารอ้างอิง	33
ภาคผนวก	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ PE	13
ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ Zeolite NaA	13
ตารางที่ 3.3 พอลิเมอร์ผสมสูตร LDPE/Zeolite NaA	14
ตารางที่ 3.4 พอลิเมอร์ผสมสูตร LLDPE/Zeolite NaA	15
ตารางที่ 4.1 ปริมาณ Zeolite NaA ที่แน่นอนที่พบในสารตัวอย่าง	19
ตารางที่ 4.2 ค่า Pseudoplastic (Power law index) ของสารตัวอย่าง	21
ตารางที่ 4.3 ปริมาณ Zeolite NaA ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนในสารตัวอย่าง LDPE	24
ตารางที่ 4.4 ปริมาณ Zeolite NaA ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนในสารตัวอย่าง LLDPE	25



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	โครงสร้างของ Zeolite NaA	6
รูปที่ 2.2	ลักษณะของสกรูในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนอนุภาคต่างๆ	8
รูปที่ 3.1	ชิ้นงานตัวอย่างรูปคัมเบลล์	17
รูปที่ 3.2	ชิ้นงานตัวอย่างรูปปีกนก	17
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง shear viscosity และ shear rate ในสารตัวอย่าง	19
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง log shear stress กับ log shear rate ของสารตัวอย่าง LDPE 100%	20
รูปที่ 4.3	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของ LLDPE + Zeolite NaA 0 phr	21
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Zeolite NaA ที่มีต่อค่า Tensile Strength ในสารตัวอย่าง	22
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Zeolite NaA ที่มีต่อค่า % Elongation at Break ในสารตัวอย่าง	22
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Zeolite NaA ที่มีต่อค่า Tear Strength ในสารตัวอย่าง	23
รูปที่ 4.7	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของ LDPE + Zeolite NaA 0 phr	24
รูปที่ 4.8	สัณฐานวิทยาของอนุภาค Zeolite NaA ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า มีขีดบอกระยะเท่ากับ 1 μm	26
รูปที่ 4.9	สัณฐานวิทยาของ LDPE + Zeolite NaA 0 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า	27
รูปที่ 4.10	สัณฐานวิทยาของ LDPE + Zeolite NaA 5 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า	27
รูปที่ 4.11	สัณฐานวิทยาของ LDPE + Zeolite NaA 10 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า	28
รูปที่ 4.12	สัณฐานวิทยาของ LDPE + Zeolite NaA 15 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า	28
รูปที่ 4.13	สัณฐานวิทยาของ LDPE + Zeolite NaA 25 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า	29

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

พอลิเมอร์เป็นสารประกอบเคมีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยมอนอเมอร์จำนวนมาก เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ พอลิเมอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆด้วยกันคือ เทอร์โมเซต และเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตเป็นพอลิเมอร์ที่มีพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ จึงไม่สามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้ ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นโซ่ตรงหรือโซ่กึ่งแต่ไม่มีพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ จึงนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาเทอร์โมพลาสติกเนื่องจากผลิต ดัดแปลง แปรรูป ได้ง่าย มีน้ำหนักเบาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จากสมบัติดังกล่าวจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกถูกนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องในชีวิตประจำวันมากมาย การขึ้นรูปพลาสติกเป็นกระบวนการที่ทำให้เทอร์โมพลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากเม็ดพลาสติกไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติก กระบวนการแปรรูปพลาสติกแบ่งเป็นหลายประเภท เช่น การอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การเป่าขึ้นรูป (Blow molding) การรีด (Calendering) การหล่อ (Casting) การขึ้นรูปร้อน (Thermoforming) เป็นต้น

ปริมาณการใช้งานพลาสติกในปัจจุบันมีความแพร่หลายอย่างมาก แต่เนื่องจากพลาสติกเป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากวัตถุดิบจำพวกปิโตรเลียม ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัดจึงทำให้ราคาพลาสติกมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ จึงมีการใส่สารเติมแต่ง (Additive) ต่างๆเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ เช่น สารเสริมแรง (Reinforcing agent) เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล สารให้ฟอง (Blowing agent) สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardant) สารป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Antioxidant) เพื่อรักษาเสถียรภาพของพลาสติก และสารตัวเติม (Filler) เพื่อลดต้นทุนการผลิต ทั้งนี้การใส่สารตัวเติมจะต้องไม่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปในทางลบมากเกินไป

ในการทดลองนี้ได้เลือกศึกษาสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกที่มีสารเติมแต่งเป็นองค์ประกอบ โดยเทอร์โมพลาสติกที่ใช้คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ซึ่งนิยมใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร ทำถุงใส่ของพลาสติก ผ้ากันน้ำและผ้าปูโต๊ะ สารเติมแต่งที่ใช้คือ ซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) ซึ่งเป็นสารมีรูพรุนมาพัฒนาพลาสติกเพื่อปรับปรุงหน้าที่สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถควบคุมปริมาณน้ำ ทำให้เกิดสมดุลของน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ได้ ในการทดลองนี้จะศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น โดยจะศึกษาถึงวิธีการผสมเข้ากันและปริมาณของ สารเติมแต่งที่ให้สมบัติของพลาสติกที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- ศึกษาสมบัติการไหล และสมบัติเชิงกล ของพอลิเมอร์ผสมสูตร LDPE/Zeolite NaA และ LLDPE/Zeolite NaA
- ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ทำให้สมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลดีที่สุด

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการนำ Zeolite NaA ซึ่งเป็นสารที่มีรูพรุนมาเติมในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของพอลิเอทิลีนและ Zeolite NaA ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน (ตามรายละเอียดข้างล่าง) เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลดีที่สุด

- LDPE 100 : Zeolite NaA 0 – 30
- LLDPE 100 : Zeolite NaA 0 - 30

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

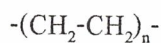
- เพื่อเพิ่มคุณภาพของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้กับพืช ผัก ผลไม้ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
- เพื่อพัฒนาความรู้เกี่ยวกับผลของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์
- เพื่อพัฒนาปรับปรุงสมบัติ ของ LDPE และ LLDPE และนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับ LDPE และ LLDPE
- เพื่อนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับสารเติมแต่งและพอลิเมอร์บรรจุภัณฑ์ชนิดอื่นๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE) [1]

พอลิเอทิลีนจัดเป็นพอลิโอเลฟินชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากเอทิลีนอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated aliphatic Hydrocarbon) สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีนเป็นดังนี้



พอลิเอทิลีนที่ผลิตขึ้นในทางการค้าครั้งแรกในปี ค.ศ. 1939 เป็นพอลิเอทิลีนที่มีกิ่งก้านสาขาชนิดความหนาแน่นต่ำ เรียกว่า พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE) พอลิเอทิลีนถูกค้นพบขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1933 โดย Fawcett และ Gibson ณ Imperial Chemical Industries Ltd., (ICI) ประเทศอังกฤษ โดยการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่มีความดันสูงๆ และได้ค้นพบพอลิเอทิลีนโดยบังเอิญจากปฏิกิริยาของเอทิลีนกับเบนซัลดีไฮด์ ภายใต้ความดันบรรยากาศหลายพันบรรยากาศ ปัจจุบันมีการผลิตพอลิเอทิลีนให้เหมาะสมกับการใช้งาน มีทั้ง High Density Polyethylene (HDPE) Low Density Polyethylene (LDPE) และ Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) พอลิเอทิลีนสามารถแบ่งตามความหนาแน่นตามที่ ASTM ได้แบ่งไว้มีดังนี้

1. ชนิดความหนาแน่นต่ำ เรียกว่า แอล ดี พี อี (LDPE : Low Density Polyethylene) มีความหนาแน่นช่วง $0.910-0.925 \text{ g/cm}^3$
2. ชนิดความหนาแน่นปานกลาง เรียกว่า เอ็ม ดี พี อี (MDPE : Medium Density Polyethylene) มีความหนาแน่นช่วง $0.926-0.940 \text{ g/cm}^3$
3. ชนิดความหนาแน่นสูง เรียกว่า เอช ดี พี อี (HDPE : High Density Polyethylene) มีความหนาแน่นช่วง $0.941-0.959 \text{ g/cm}^3$

พอลิเอทิลีนจัดเป็นพลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และมีอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (T_g : glass transition temperature) ประมาณ -130 ถึง $60 \text{ }^\circ\text{C}$ พอลิเอทิลีนจึงมีลักษณะทั้งยืดหยุ่นและแข็งที่สภาวะปกติ สำหรับอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m : melting temperature) ของพอลิเอทิลีนมีค่าประมาณ $108-133 \text{ }^\circ\text{C}$ พอลิเอทิลีนยังมีสมบัติที่สำคัญๆ ดังนี้

1. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเหมาะสำหรับหุ้มสายไฟฟ้า
2. การละลาย โดยปกติจะไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า $70 \text{ }^\circ\text{C}$ จะเริ่มละลายได้

3. พวกที่มีความหนาแน่นต่ำจะใสมาก แต่จะขุ่นเมื่อมีความหนาแน่นสูง
4. ทนทานต่อกรดและเบส
5. ความเหนียวและทนทานต่อแรงดึงปานกลาง
6. ราคาถูก

2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE: Low Density Polyethylene)

2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ LDPE

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดแรก ที่นำมาใช้ในทางการค้า เริ่มผลิตครั้งแรกในประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ.1930 (2473) โดยบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) ขบวนการผลิตและลักษณะโดยทั่วไปของ LDPE มีดังนี้คือ

- ความดันที่ใช้ในขบวนการผลิตจะสูงมาก 1,000 – 3,000 บรรยากาศ (15,000 – 45,000 psi)
- อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) 200 – 400 °C
- พอลิเอทิลีนที่ได้มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.019 – 0.925 g/cm³ การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง (broad molecular weight distribution) และมีกิ่งก้านสาขาภายใน โมเลกุลมาก (highly branched chain molecule)

2.2.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LDPE

- มีการไหลตัวดี
- ช่วงอุณหภูมิการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปมาจาก LDPE แคบ
- มีค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength) ดีพอสมควร
- เป็นตัวกั้นความชื้นได้ดี (Good Moisture Barrier)
- ฟิล์มที่แปรรูปจาก LDPE จะมีความเป็นเงามันดี (high gloss) และความเป็นฝ้าต่ำ (low haze)
- เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ค่อนข้างดี (good dielectric property)

2.2.3 การใช้งาน LDPE ในปัจจุบัน

LDPE สามารถนำไปใช้แปรสภาพเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น

- ฟิล์มและงานเคลือบหลายๆ ชั้น (lamination) เช่น ฟิล์มหดหุ้ม (shrink wrap) หรือถุงที่ต้องการความใสมาก
- งานฉีดแบบ (injection moulding)

- งานเป่าแบบ (blow moulding)
- อื่นๆ เช่น ฟิล์มหลายชั้น (coextrusion) งานรีดท่อ (pipe extrusion) งานเคลือบสายไฟฟ้าและสายเคเบิล (wire and cable coating)

2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง (LLDPE : Linear Low Density Polyethylene)

2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ LLDPE

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง (LLDPE) เป็นเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดใหม่ที่ผลิตโดยใช้กระบวนการความดันต่ำ สามารถควบคุมโครงสร้างของโมเลกุลพอลิเอทิลีนได้ดีกว่ากระบวนการผลิตแบบเก่าที่ใช้ความดันสูง ทำให้เม็ดพลาสติกที่ผลิตได้เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นเส้นตรง มีกิ่งก้านสาขาเล็กๆ กระจายตลอดความยาวของเส้นตรงและมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลแคบ จากลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลนี้ ทำให้ LLDPE เป็นเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีคุณภาพสูง และเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตฟิล์มที่ต้องการฟิล์มคุณภาพสูง

2.3.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LLDPE

- มีความทนแรงกระแทกของอุณหภูมิต่ำกว่า LDPE
- ความต้านแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ -40°C พลาสติก LLDPE ที่ดัชนีการไหลเดียวกันกับ LDPE จะมีความต้านทานแรงกระแทกดีกว่า
- มีความต้านทานแรงเจาะทะลุดีกว่า LDPE ถึง 60%
- LDPE จะมีการต้านแรงดึงขาดต่ำกว่า LLDPE ประมาณ 50% ซึ่งถ้าเราผสม LLDPE ใน LDPE ก็จะทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงของพลาสติกสูงขึ้น
- มีความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Seal Strength) สูงกว่า LDPE มาก ซึ่งประโยชน์ในด้านนี้คือ การทำฟิล์มหลายๆ ชั้น
- การผลิตฟิล์มบางๆ LLDPE 100% สามารถผลิตฟิล์มความหนาประมาณ 38 ไมครอน แต่ถ้าผสม LLDPE 10-20% สามารถดึงฟิล์มได้มากขึ้น หนาเพียง 4-5 ไมครอน
- โดยทั่วไป LLDPE ไม่ค่อยใส ต้องใส่ LDPE เข้าไปปรับกระบวนการตกผลึกของโมเลกุลของ LLDPE ทำให้ได้ฟิล์มใสขึ้น

2.3.3 การใช้งาน LLDPE ในปัจจุบัน

- พลาสติกและซีท (film and sheet) ในการบรรจุหีบห่อฟิล์มและซีทจะต่างกันตรงความหนา โดยสามารถใช้ทั้งในลักษณะฟิล์มเดี่ยวๆ และฟิล์มหนาหลายชั้น
- ผลิตภัณฑ์เป่าแบบ (blow moulding) เช่น ขวดบีบ วัสดุภายในครัม (drum liner)
- ผลิตภัณฑ์ฉีดแบบ (injection moulding) เช่น ฝาขวด ตะกร้า ภาชนะบรรจุที่ใช้ในตู้เย็น และเครื่องใช้ในบ้านและในครัวเรือน

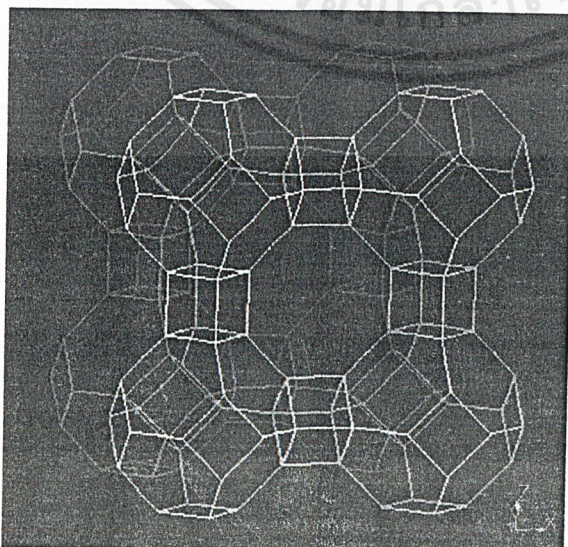
2.4 Zeolite NaA [2]

Zeolite เป็นสารประกอบของ SiO_2 ที่มีลักษณะเป็น tetrahedra ที่มี ออกซิเจน 4 ตัวล้อมรอบ การแทนที่ Si ด้วย Al ทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุ จึงต้องมีประจุบวกเพื่อทำให้เกิดความสมดุลของประจุ สูตรทางเคมีของ Zeolite เป็นดังนี้ $M_x^+ D_y^{2+} [Al_{(x+2y)} Si_{n-(x+2y)} O_{2n}] mH_2O$ โดยที่ $M_x^+ D_y^{2+}$ คือ charge balance cation จากสูตรทางเคมีจะเห็นว่าในโครงสร้างจะมีโครงสร้างของน้ำอยู่ด้วยเสมอ Zeolite เป็นสารที่มีรูพรุนจึงมีพื้นที่ผิวมากคือประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม ทำให้ดูดซับสารได้มาก Zeolite NaA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีอัตราส่วนระหว่าง ซิลิกอนและอลูมิเนียมเป็น 1 สูตรทางเคมีคือ

$\text{Na}_{12}[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12} \cdot 27\text{H}_2\text{O}]$ เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเป็น 4.2 Å

2.4.1 การนำ Zeolite NaA ไปใช้งาน

Zeolite NaA เป็น Zeolite ที่น่าสนใจเนื่องจากมีโครงสร้างแบบแอลฟาเคจ (α cage) เหมาะกับการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พื้นที่ภายในของโครงสร้างที่เป็นรูพรุนนั้นมีมากเหมาะที่จะทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสาร และขนาดของรูพรุนที่มีความเฉพาะเจาะจงสามารถจำกัดขนาดของโครงสร้างที่จะเข้าออกรูพรุนได้ นอกจากนี้ยังถูกใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนอีกด้วย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ Zeolite NaA

2.5 การอัดรีด (Extrusion) [3]

การอัดรีด(Extrusion)เป็นกระบวนการแปรรูปหลักของอุตสาหกรรมพลาสติกชนิดหนึ่ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (semi-finished product) ที่ต้องนำไปเข้ากระบวนการชนิดอื่นต่อเพื่อผลิตชิ้นงานขั้นสุดท้าย (finished product) การอัดรีดเทอร์โมพลาสติก ทำโดยการให้พลาสติกผง (power) หรือเม็ด (pellets) หลอมเป็นเนื้อเดียวแล้วผลักดันโดยการหมุนของสกรูให้พลาสติกหลอมไหลผ่านหัวคายน์ ที่มีรูปร่างตามลักษณะชิ้นงานที่ต้องการผลิต พลาสติกหลอมจะแข็งตัวเมื่อออกจากคายน์เนื่องจากการหล่อเย็นซึ่งสามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกในรูปแบบต่างๆเช่นผลิตเส้นใย (fiber) ท่อ (tube, pipe) แผ่นพลาสติก (sheet) ฟิล์มพลาสติก (film) และชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นโพรไฟล์ (profiles) นอกจากนี้ยังมีความสำคัญในการใช้เป็นเครื่องผสมเพื่อเตรียมคอมพาวด์พลาสติก โดยการผสมพลาสติกกับสารเติมแต่ง (additive) ต่างๆเข้าด้วยกันเพื่อเป็นการเตรียมวัสดุสำหรับใช้ในการแปรรูปโดยเทคนิคต่างๆ

เครื่องอัดรีดที่ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกมีหลายชนิด แบ่งตามลักษณะการใช้งาน (mode of operation) ของเครื่องซึ่งแบ่งออกเป็นการใช้งานอย่างต่อเนื่อง และแบบไม่ต่อเนื่อง เครื่องอัดรีดที่ทำงานลักษณะต่อเนื่อง เป็นเครื่องที่มีสกรู (screw extruder) และ แบบดิสก์ (disk extruder) ส่วนเครื่องอัดรีดที่ทำในลักษณะไม่ต่อเนื่อง เป็นเครื่องที่มีสกรูเลื่อนไปมาในแนวแกนของสกรูได้ (reciprocating screw extruder) และเครื่องอัดรีดแบบลูกสูบ (ram extruder)

เครื่องอัดรีดที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิดคือ

- เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (single-screw extruder)
- เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (twin-screw extruder)

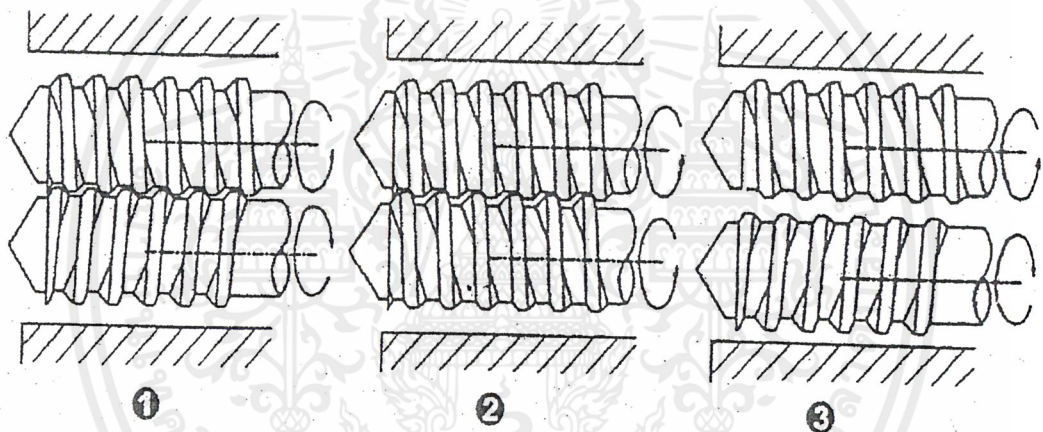
2.5.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (single-screw extruder)

สกรูของเครื่องเป็นแบบอาคิมิเดียน (Archimedean screw) ซึ่งสกรูที่ใช้ในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติก มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 25-200 mm มีความยาวเป็น 20-40 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (20-30D) สกรูในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวยังจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือส่วนป้อน (feed zone) เป็นส่วนที่มีความลึกของช่องสกรูมากที่สุด มีหน้าที่หลัก คือ การคั่งเม็ดหรือผงพลาสติกจากกรวยเติมพลาสติกลงในกระบอก เริ่มให้ความร้อนแก่พลาสติก และทำให้เกิดการผสมของพลาสติกและพาพลาสติกไปยังส่วนหลอมอัด (compression zone) ความลึกของร่องเกลียวจะค่อยๆลดลง เพื่อให้เกิดแรงดันของพลาสติกหลอมและทำให้ความหนาของชั้นพลาสติกที่ห่อหุ้มสกรูลดลง จึงเกิดการส่งผ่านความร้อนจากกระบอกได้ดีขึ้นความร้อนและแรงเสียดทานเนื่องจากการหมุนของสกรูในช่วงนี้จะสูงมาก ทำให้พลาสติกหลอมผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนสุดท้ายของสกรูคือส่วนส่งพลาสติกหลอม (metering zone) ลักษณะของสกรูจะมีความลึกของร่องเกลียวคงที่แต่มีความลึกน้อย

กว่าในส่วนป้อนพลาสติกหลอมในส่วนนี้จะมีความดันเพิ่มขึ้นและมีความเป็นเนื้อเดียวอย่างสมบูรณ์และจะเสถียรอยู่ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน

2.5.2 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ (twin-screw extruder)

เป็นเครื่องอัดรีดที่มีสกรู 2 ตัวอยู่ในกระบอกเดียวกันซึ่งมีภาพตัดขวางเป็นรูปเลขแปด การแบ่งเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่จะแบ่งตามทิศทางการหมุนและระดับของการอินเทอร์เมท (intermeshing) ซึ่งหมายถึงการหมุนของสกรูในลักษณะที่สันเกลียวของสกรูตัวหนึ่งแทรกอยู่ในร่องเกลียวของสกรูอีกตัวหนึ่ง ทิศทางการหมุนของสกรูก็หมุนได้ 2 แบบ คือ หมุนในทิศทางตรงกันข้ามกันหรือหมุนสวนทางกัน (counter-rotating) และการหมุนในทิศทางเดียวกัน (co-rotating)



รูปที่ 2.2 ลักษณะของสกรูในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ชนิดต่างๆ (1) ชนิดสกรูหมุนสวนทางกันและมีการอินเทอร์เมท (Counter-rotating Intermeshing Elements), (2) ชนิดสกรูหมุนในทิศทางเดียวกันและมีการอินเทอร์เมท (Co-rotating Intermeshing Elements), (3) ชนิดสกรูหมุนสวนทางกันและไม่มีการอินเทอร์เมท (Counter-rotating non-intermeshing Elements)

การหมุนของสกรูในสกรูที่หมุนสวนทางกันทำให้วัสดุถูกดันเข้าสู่ศูนย์กลางของการหมุนทำให้เกิดการสะสมวัสดุ (bank) ระหว่างสกรูทั้งสอง ในขณะที่หมุนจะมีวัสดุจำนวนหนึ่งไหลผ่านช่องว่างระหว่างสกรูทั้งสองได้ แต่จะมีส่วนหนึ่งถูกกักเอาไว้เนื่องจากการอินเทอร์เมท วัสดุที่ไหลผ่านช่องว่างจะมีความเค้นสูงมาก

การหมุนของสกรูในทิศทางเดียวกัน สกรูจะหมุนให้วัสดุเคลื่อนที่จากสกรูตัวแรกแล้วส่งผ่านไปยังสกรูตัวที่สอง โดยไม่มีการเกิดการสะสมวัสดุที่ระหว่างสกรูทั้งสองตัวทำให้วัสดุมีเส้น

ทางการไหลเป็นรูปเลข 8 ตลอดความยาวของกระบอก ข้อดีของการไหลในสกรูชนิดนี้คือ พอลิเมอร์ในกระบอกจะได้รับความเค้นใกล้เคียงกันและควบคุมอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมได้ดี

ขนาดของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่มีขนาดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกด้านเดียวจะอยู่ในช่วง 25-244 mm อัตราส่วนของความยาวกระบอกต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) อยู่ในช่วง 39:1 ถึง 48:1

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่มีสมรรถนะเหนือกว่าเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวหลายประการ สรุปได้ดังนี้

- ให้ผลผลิตสูงกว่าที่อัตราเร็วของการหมุนที่สกรูที่เท่ากัน
- สามารถปรับปรุงลักษณะการส่งพลาสติกหลอมเข้าสู่ดายน์ได้หลายแบบ
- สามารถลดการเกิดความร้อนเนื่องจากการไหลหนีได้
- สามารถใช้กับพอลิเมอร์ที่แปรรูปยากและมีความยุ่งยากในการป้อนเข้าเครื่อง
- ใช้พลังงานในการเดินเครื่องน้อยกว่า

2.6 งานวิจัยที่ผ่านมา

J. LEE และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของระบบ epoxy เมื่อเติม zeolite ธรรมชาติลงไปโดยศึกษาถึงผลกระทบของสารตัวเติมและขนาดอนุภาคเมื่อทำการเติม zeolite ที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน 3 ขนาด (270-200 mesh, 325-270 mesh และต่ำกว่า 325 mesh) ลงใน epoxy resin ในปริมาณที่ต่างกัน ได้ทำการทดสอบค่าความแข็งแรงการดึงยึด ความสามารถในการทนแรงกระแทก และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว พบว่าเมื่อปริมาณ zeolite เพิ่มขึ้นค่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและค่ามอดูลัสของยังก็เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งแรงการดึงยึดและความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกจะลดลงและในกรณีที่ขนาดของอนุภาค zeolite ลดลงคุณสมบัติทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น รวมทั้งค่าความแข็งแรงการดึงยึดก็เพิ่มขึ้นด้วย ร้อยร้าวบนพื้นผิวของส่วนประกอบได้แสดงถึงสัญญาณวิทยาของสารเชิงซ้อนที่มาก เมื่อปริมาณ zeolite เพิ่มขึ้น

D. DANJAJI และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาถึงการเติมแป้งสาकुลงใน LLDPE films เพื่อช่วยในการดูดซับน้ำ พบว่าค่าความแข็งแรงการดึงยึด เปรอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด และความเหนียวจะลดลงเมื่อปริมาณแป้งมากขึ้น และในทางตรงกันข้าม ค่ามอดูลัสจะสูงขึ้นการดูดความชื้นในอากาศและในน้ำจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณแป้งมากขึ้น และที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าจะมีการดูดความชื้นได้ดีกว่า ดังนั้นจึงแสดงถึงความต้านทานความชื้นที่ลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น การดูดความชื้นสูงสุดจะมีเมื่อสารประกอบถูกแช่ในน้ำอย่างสมบูรณ์ SEM จะแสดงกลุ่มก้อนของเม็ดแป้งที่กระจายตัวในอนุภาคของสารตัวเติม

K. CHO และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของ PE blend โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ พบว่า LDPE/LLDPE มีความสามารถในการเข้ากันได้ในภาวะหลอมเหลวแต่จะแสดงการตกผลึกและอุณหภูมิการหลอมเหลวเป็น 2 จุดแสดงว่าเกิดการแยกเฟสขณะทำการหล่อเย็นจากภาวะหลอมเหลว และที่อัตราความเครียดเฉือนน้อยๆ ความหนืดจะไม่ค่อยแตกต่างกันมากเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง LDPE และ LLDPE ซึ่งความหนืดจะเป็นไปตามกฎการผสม ในการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า Yield strength และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดจะดีขึ้นเนื่องมาจากเกิดการเกี่ยวพันกัน (entanglement) ระหว่างโซ่กิ่ง พบว่า LLDPE มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลมากกว่า LDPE และองค์ประกอบของ LDPE ที่ไม่เกิน 60% จะให้สมบัติที่ต้องการ

Y. WANG และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติและโครงสร้างระหว่างพื้นผิวของคอมโพสิต HDPE/CaCO₃ โดยใช้ Carboxylate polyethylene (CPE) และ CaCO₃ กราฟท์ด้วย acrylamide (CaCO₃-A) โดยศึกษาที่ปริมาณของหมู่ Carboxyl ใน CPE ตั้งแต่ 1-10% และหมู่ amide บนพื้นผิวของ CaCO₃ ที่ปรับปรุงแล้ว ตั้งแต่ 0.2-1.8 % จาก stress-strain curve ของ HDPE/CaCO₃ (80/25), HDPE/CPE/CaCO₃-A (70/10/25) และ HDPE พบว่า HDPE/CaCO₃ มีความเปราะมากที่สุด ส่วน HDPE/CPE/CaCO₃-A จะมีความเหนียวมากที่สุดและในการทดสอบสมบัติเชิงกลของ HDPE, HDPE/CaCO₃ (80/25), HDPE/CPE/CaCO₃ (70/10/25), HDPE/CPE/CaCO₃-A พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ความต้านแรงกระแทก ความดึงยืดสูงสุด ความแข็งแรงการโค้งงอ โมดูลัสการโค้งงอ ของ HDPE/CPE/CaCO₃-A มีค่าสูงที่สุดและในการทดสอบผลจากปริมาณของหมู่ amide บนพื้นผิวของ CaCO₃-A และ หมู่ Carboxyl ใน CPE พบว่าเมื่อมีมากขึ้นจนถึงค่าหนึ่งจะทำให้ความแข็งแรงการดึงยืดและความต้านทานแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก พันธะเคมีและพันธะไฮโดรเจน ระหว่าง CPE และหมู่ Carboxyl และ CaCO₃-A กับหัวของหมู่ NH₂

A. K. GUPTA และคณะ [8] ได้ศึกษาสมบัติความยืดหยุ่นต่อการโค้งงอและความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม HDPE/LLDPE โดยทำการผสม พอลิเมอร์ทั้งสองด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว และเตรียมตัวอย่างโดยใช้การฉีดขึ้นรูป จาก Flexural stress-strain curve พบว่า Flexural strength at yield ของ HDPE เป็น 90 MPa และของ LLDPE เป็น 79.5 MPa และความแข็งแรงการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสมจะอยู่ในช่วงนี้ ส่วน Flexural at yield จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ LLDPE มีค่าเพิ่มขึ้น และโมดูลัสการโค้งงอจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณ LLDPE อยู่ในช่วง 0-50% แต่เมื่อปริมาณ LLDPE อยู่ในช่วง 50-100% จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จากนั้นได้ทำการศึกษาความแข็งแรงกระแทกพบว่าเมื่อปริมาณ LLDPE อยู่ในช่วง 0-10% ค่าความแข็งแรงกระแทกจะลดลงและที่ปริมาณ LLDPE และที่ปริมาณ LLDPE เป็น 10% ค่าความแข็งแรงกระแทกจะมีค่าน้อยที่สุดแต่ค่าความแข็งแรงกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อปริมาณ LLDPE มีค่าตั้งแต่ 10-100% และที่ปริมาณ LLDPE เป็น 100% จะมีค่าความแข็งแรงกระแทกมากที่สุด

K. LIAO, X. CHEN และคณะ [9] ได้ทำการทดลองปรับปรุงสภาพพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิพรอพิลีน โดยใช้ Dimeric Aluminate เป็นสารปรับสภาพผิว การผสมทำในเครื่อง XSS-300 TORQUE RHEOMETER จากการทดลองพบว่าพอลิเมอร์ผสมมีความต้านทานแรงกระแทก ความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่แคลเซียมคาร์บอเนตไม่ได้ทำการปรับสภาพพื้นผิว แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้รับการปรับปรุงสภาพผิวจะสามารถยึดติดกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่าทำให้ลดช่องว่างระหว่างเฟสมีผลทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น

I. M. THAKORE, S. DESAI และคณะ [10] ได้ทำการทดลองนำแป้งมันเทศมาผสมใน LDPE โดยแป้งที่มาทดลองจะทำการสังเคราะห์ด้วย Formamide, Potassium acetate และ Phthalic anhydride ทำให้กลายเป็นแป้งที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซี การทดลองมีการเปรียบเทียบกันระหว่างพอลิเมอร์ผสมของ LDPE กับแป้งมันเทศที่ไม่สังเคราะห์ LDPE กับแป้งมันเทศสังเคราะห์ และ LDPE กับแป้งทั้งสองชนิด การผสมทำในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ จากการทดสอบพบว่าแป้งที่ทำการสังเคราะห์มีพื้นผิวขรุขระ ขนาดอนุภาคเล็กทำให้ยึดติดกับ LDPE ได้ดีกว่าแป้งที่ไม่สังเคราะห์ ทำให้ค่าความเหนียวและความทนทานต่อแรงกระแทกมากขึ้น ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกมากขึ้นเช่นกันแต่น้อยกว่า LDPE บริสุทธิ์ ส่วนการย่อยสลายทางชีวภาพนั้นพอลิเมอร์ผสมของแป้งสังเคราะห์จะย่อยสลายได้ยากกว่าพอลิเมอร์ผสมของแป้งที่ไม่ได้สังเคราะห์

P. MATZINOS [11] ศึกษาการผสม LDPE และ starch โดยใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม ผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ จากนั้นนำมาเข้าเครื่องฉีดขึ้นรูปและเครื่องเป่าฟิล์ม พบว่าสมบัติเชิงกลจะขึ้นกับความสามารถในการกระจายตัวของ starch ใน LDPE จากการทดสอบสมบัติเชิงกลในส่วนของการฉีดขึ้นรูปนั้น ความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากมีการส่งผ่านของแรงจาก LDPE ซึ่งอ่อนแอไปยังส่วนของ starch ที่แข็งแรงกว่าแต่จะมากที่สุดแค่ 30 wt% starch จากนั้นค่าจะลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณ starch เพิ่มขึ้น การกระจายตัวของ starch ก็จะไม่ดี แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลงเมื่อปริมาณ starch เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปนั้น มีการให้ความดันแก่ของผสมที่มากกว่าความดันที่ใช้ในเครื่องเป่าฟิล์ม ทำให้เกิดการผสมกันที่ดีกว่า ซึ่งเมื่อมองจากสัญญาณวิทยานาของ starch จะมีขนาดใหญ่กว่าตัวอย่างที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูป ซึ่งเป็นจุดบกพร่องเป็นสาเหตุทำให้สมบัติของฟิล์มลดลง แต่ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น

H.P.S.A. KHALIL และคณะ [12] ได้ศึกษาผลของการปรับปรุงแป้งสาด้วย hydride โดยวิเคราะห์จากสมบัติ Tensile strength และ Water absorption ของ LLDPE ที่ผสมแป้งสา โดยในขั้นแรกได้ทำการเตรียมและศึกษาแป้งสาที่ทำการปรับปรุงโดย ปฏิกิริยา Esterification โดยใช้ 2-dodecen-1-yl succinic anhydride (DSA) และ propionic anhydride (PA) และมีตัวทำละลาย 3 ชนิด คือ N,N-dimethylformamide (DMF) Trimethylamide (TEA) และ Toluene (TOU) ทำการตรวจ

สอบผลที่ได้จาก WPG และ FTIR พบว่าแป้งสาकुที่สังเคราะห์โดยใช้ระบบ DSA-DMF และ PA-DMF ที่ทำปฏิกิริยา Esterification ที่ 120 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ได้ผลมากที่สุด จากนั้นนำแป้งสาकुที่ปรับปรุงแล้วไป ผสม กับ LLDPE ที่ปริมาณต่างๆแล้วเปรียบเทียบกับ LLDPE ที่ผสมกับแป้งสาकुที่ยังไม่ได้ปรับปรุงพบว่า เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น Tensile modulus และ Water absorption เพิ่มขึ้น แต่ Tensile strength และ Elongation at break ลดลง สำหรับ LLDPE ที่ผสมกับ แป้งสาकुที่ยังไม่ได้ปรับปรุง แต่ LLDPE ที่ผสมกับแป้งสาकुที่ปรับปรุงแล้วพบว่า สมบัติเชิงกล และ Water absorption เพิ่มขึ้น



บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. LDPE เป็นเกรดเป่าฟิล์ม LD1905F/FA ผลิตโดย บริษัท ไทยโพลิเอททีลีน จำกัด (ตารางที่ 1)
2. LLDPE เป็นเกรดเป่าฟิล์ม L2020F ผลิตโดย บริษัท ไทยโพลิเอททีลีน จำกัด (ตารางที่ 1)
3. Zeolite NaA เป็นเกรด normal ผลิตโดยบริษัท PQ Chemicals (ประเทศไทย) จำกัด (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ PE (ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต)

Property	LDPE	LLDPE	ASTM
Melt flow index (g/10 min)	5.0	2.0	D1238
Density (g/cm ³)	0.919	0.920	D1505
Tensile strength (kg/cm ²)	MD:210*,TD:170*	MD:400*,TD:310*	D638
Elongation at break (%)	MD:320*,TD:680*	MD:600*,TD:810*	D638
Impact strength of film (g)	105**	80**	D1790
Hardness	46	52	D2240
T _m (°C)	108	122	D2117

** สมบัติของฟิล์มหนา 40 ไมครอน (LDPE) และ 38 ไมครอน (LLDPE) (เป่าที่อัตราแบ่ง 2:1)

*MD : ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

*TD ; ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ Zeolite NaA (ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต)

Characteristic	Result
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 Axon ab. Plama skinner รุ่น BX -18 ; Intro Engineering)
2. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder, รุ่น PL-200 ; Intro Engineering)
3. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinding, Bosco รุ่น A600; Bosco Engineering)
4. Compression molding machine โดย LAB TECH ENGINEERING COMPANY LTD.
5. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal tensile tester, LLOYD รุ่น LR 30K; LLOYD Instrument)
6. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC-50; Shimudsu)
7. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
8. เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary rheometer : บริษัท ROSAND)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเลือกสูตรพอลิเมอร์

ในการทดลองนี้ได้เลือกศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกที่มีสารเติมแต่งเป็นองค์ประกอบ โดยเทอร์โมพลาสติกที่ใช้คือ LDPE และ LLDPE ซึ่งเป็นเกรดสำหรับการเป่าขึ้นรูป ทำการผสมให้เข้ากันกับ Zeolite NaA ที่ใช้เป็นสารเติมแต่งที่มีรูพรุน โดยใช้อัตราส่วนต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.3 พอลิเมอร์ผสมสูตร LDPE/Zeolite NaA

LDPE	Zeolite NaA
100	0
100	5
100	10
100	15
100	20
100	25
100	30

ตารางที่ 3.4 พอลิเมอร์ผสมสูตร LLDPE/Zeolite NaA

LLDPE	Zeolite NaA
100	0
100	5
100	10
100	15
100	20
100	25
100	30

3.3.2 การผสมสูตรพอลิเมอร์

1. เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder)

นำพอลิเมอร์และ zeolite NaA ที่ชั่งได้จากข้อ 3.3.1 เทรวมกันในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) โดยตั้งอุณหภูมิที่ feed zone 150 °C compression zone 160 °C metering zone 170 °C และ die zone 180 °C ใช้ความเร็วรอบในการหมุน 75 รอบต่อนาที (screw speed 75 rpm) นำสารผสมที่ได้จากการอัดรีดมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้เป็นชิ้นเล็กๆ โดยใช้เครื่องบด (Grinding machine)

2. เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder)

นำพอลิเมอร์และ zeolite NaA ที่ชั่งได้จากข้อ 3.3.1 เทรวมกันในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) โดยตั้งอุณหภูมิที่ feed zone 160 °C compression zone 170 °C metering zone 180 °C และ die zone 190 °C ใช้ความเร็วรอบในการหมุน 35 รอบต่อนาที (screw speed 35 rpm) นำสารผสมที่ได้จากการอัดรีดมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้เป็นชิ้นเล็กๆ โดยใช้เครื่องบด (Grinding machine)

3.3.3 การอัดขึ้นรูป

ทำความสะอาดแม่พิมพ์ขนาด 6*6 นิ้วและนำพลาสติกแผ่นบางใส (ชื่อทางการค้า Milar) มาวางประกบแม่พิมพ์ทั้ง 2 ด้านเพื่อป้องกันการติดของพอลิเมอร์ผสมที่ใส่กับแม่พิมพ์ นำพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ได้จากข้อ 3.3.2 โดยปริมาณสารที่ใช้ในแต่ละแผ่น

เท่ากับ 5 กรัม มาจัดวางในแม่พิมพ์ เปิดเครื่องอัดรีดที่อุณหภูมิ 195 °C สำหรับ LDPE และ 200 °C เมื่อพอลิเมอร์ที่ใช้เป็น LLDPE เมื่ออุณหภูมิคงที่ นำแม่พิมพ์เข้าเครื่องอัดรีด อัดนานเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการหล่อเย็นแม่พิมพ์โดยให้ความดันคงที่เป็นเวลา 5 นาทีเช่นเดียวกัน นำแม่พิมพ์ออกจากเครื่อง และชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และตัดชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบต่อไป

3.3.4 การทดสอบสมบัติของสารตัวอย่าง

1. ปริมาณ Zeolite NaA ที่แน่นอน

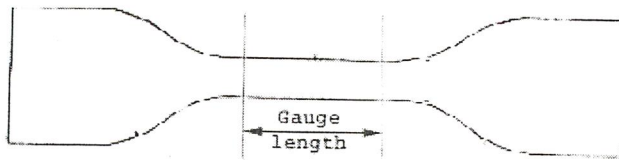
นำครุชชีเบลมาเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง รอให้อุณหภูมิในเตาเผาเย็นลงต่ำกว่า 150 °C จากนั้นทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักครุชชีเบลด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง นำสารตัวอย่างมาใส่ในครุชชีเบล โดยความสูงต้องไม่สูงกว่าครึ่งของความสูงครุชชีเบล แล้วชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นนำครุชชีเบลมาเผาด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณหาปริมาณสารที่หายไป

2. สมบัติการไหล

การทดสอบสมบัติการไหลโดยการนำเม็ดพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้วมาทดสอบที่อุณหภูมิ 190 °C โดยใช้หัวคายน์เรียบ (180 °C) L/R เท่ากับ 16:1 และ 0:1 เส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 2 mm ความเร็วในการเคลื่อนที่ลูกสูบ 0-300 mm/min ค่าที่ได้คำนวณเป็นความหนืด (viscosity) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D3835 [13]

3. สมบัติความแข็งแรงดึง

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ ทดสอบด้วย Universal Testing Machine ที่ความเร็วในการดึง 100 mm/min ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) เป็น 20 mm ที่อุณหภูมิห้อง เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 [14] เพื่อหาการยืด ณ จุดขาด (Elongation at Break) ค่ามอดุลัส (Modulus) และความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปดัมเบลล์

4. ทดสอบสมบัติความแข็งแรงฉีกขาด

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาตัดเป็นรูปปีกนก โดยการทดสอบเป็นลักษณะเดียวกันกับการทดสอบแรงดึง โดยใช้ความเร็วการฉีกขาดเท่ากับ 100 mm/min ที่อุณหภูมิห้อง เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1004 [15] เพื่อหาค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear Strength)



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานตัวอย่างรูปปีกนก

5. อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) พลังงานความร้อนของการหลอมผลึก (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)

นำเม็ดพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้วมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยใช้น้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น 20 °C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 170 °C นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิในการหลอมตัวของผลึก (T_m) พลังงานความร้อนของการหลอมผลึก (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)

6. ลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์

นำสารตัวอย่างที่ทำกรอัดขึ้นรูปตามขั้นตอน 3.3.3 ให้มีความหนา 1-2 mm แล้วตัดชิ้นงานขนาด 1*3 cm แซ่ชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว แล้วหักในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ เพื่อนำพื้นผิวตรงรอยแตกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การเลือกเครื่องมือที่ใช้ผสมสูตร

ในการผสมสูตรพอลิเมอร์เบื้องต้น ได้ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของการผสมสูตร โดยใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวและเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ จากนั้นนำมาอัดขึ้นรูปภายใต้สภาวะเดียวกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบด้วยตาเปล่าจะพบว่า ชิ้นงานที่ได้จากการผสมสูตรโดยใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่จะมีประสิทธิภาพในการผสมที่ดีกว่า การกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเติมดีกว่า ซึ่งในกรณีที่ผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวจะมองเห็นอนุภาคของสารตัวเติมอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนอย่างเห็นได้ชัด

ดังนั้นในการวิจัยนี้ จึงเลือกการผสมสูตรโดยใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ และทำการอัดขึ้นรูปภายใต้สภาวะเดิม สำหรับพอลิเมอร์ทุกสูตรที่ทำในงานวิจัยนี้

4.2 ผลการหาปริมาณที่แน่นอนของ Zeolite NaA ในสารตัวอย่าง

นำสารตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.2 มาทำการทดสอบเพื่อศึกษาหาปริมาณที่แน่นอนของ Zeolite NaA ที่มีอยู่ในสารประกอบแต่ละสูตร โดยนำเปอร์เซ็นต์แฉะ (%Ash) จากการเผา LDPE 100%, LLDPE 100% และ Zeolite NaA 100% พบว่า %Ash ของ LDPE, LLDPE และ Zeolite NaA เท่ากับ 0.3, 0.2 และ 87.0 ตามลำดับ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหา % Zeolite NaA ที่มีอยู่ ได้ผลตามตารางที่ 4.1

ตัวอย่างการคำนวณ เช่น สูตร LDPE + Zeolite NaA 10 phr มี %Ash อยู่ 8.0% เมื่อ %Ash ของ LDPE 100% เท่ากับ 0.3 และ %Ash ของ Zeolite NaA 100% เท่ากับ 87.0 สามารถคำนวณหาปริมาณ Zeolite NaA ที่มี % ความชื้นในสูตรนี้ ได้ดังนี้

$$\text{ที่ \%Ash } 87.0 - 0.3 \text{ พบว่ามี \% Zeolite NaA อยู่ } 100$$

$$\text{ที่ \%Ash } 8.0 - 0.3 \text{ พบว่ามี \% Zeolite NaA อยู่ } \{100 * (8.0 - 0.3)\} / (87.0 - 0.3)$$

$$= 8.88$$

พบว่าปริมาณที่แน่นอนของ Zeolite NaA ในสูตร LDPE + Zeolite NaA 10 phr มีค่าประมาณ 8.9 %wt จำนวนเช่นเดียวกันนี้ในสูตรอื่นที่เหลือ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณ Zeolite NaA ที่แน่นอนที่พบในสารตัวอย่าง

สูตร (phr)	Zeolite NaA ตามทฤษฎี (%wt)	LDPE		LLDPE	
		*Zeolite NaA ที่พบ (%wt)	% Ash	*Zeolite NaA ที่พบ (%wt)	% Ash
0	0	0	0.3	0	0.2
10	9.1	8.9	8.0	9.3	8.3
20	16.7	16.0	14.2	15.6	13.7
30	23.1	22.3	19.6	22.7	19.9

* เป็นปริมาณ Zeolite NaA ที่มี % ความชื้น

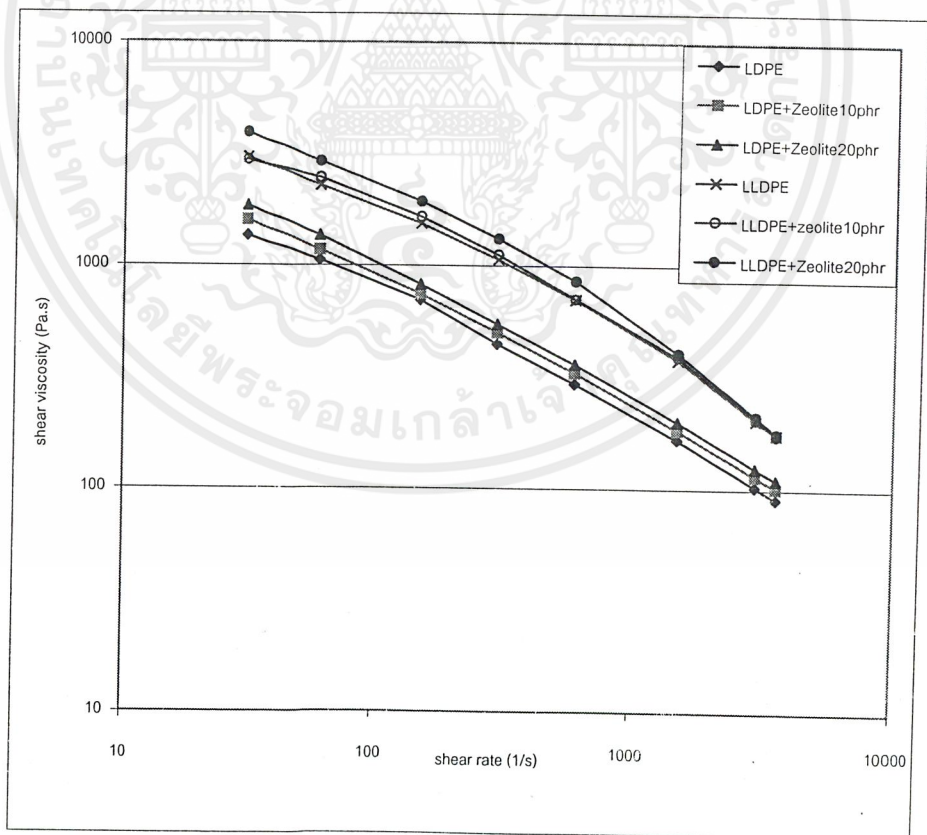
ดังนั้นจะพบว่า เทคนิคที่ใช้ในการผสมสารตัวอย่างมีปริมาณ Zeolite NaA ใกล้เคียงกับที่ได้คาดไว้

4.3 การศึกษาสมบัติการไหล

เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 จึงนำมาทดสอบสมบัติการไหลดังหัวข้อ

3.3.4.2 เพื่อศึกษาผลของปริมาณ Zeolite NaA ที่มีต่อสมบัติการไหลของ LDPE และ LLDPE

โดยดูค่าความหนืดที่อัตราความเครียดเฉือนต่างๆ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear viscosity และ shear rate ในสารตัวอย่าง

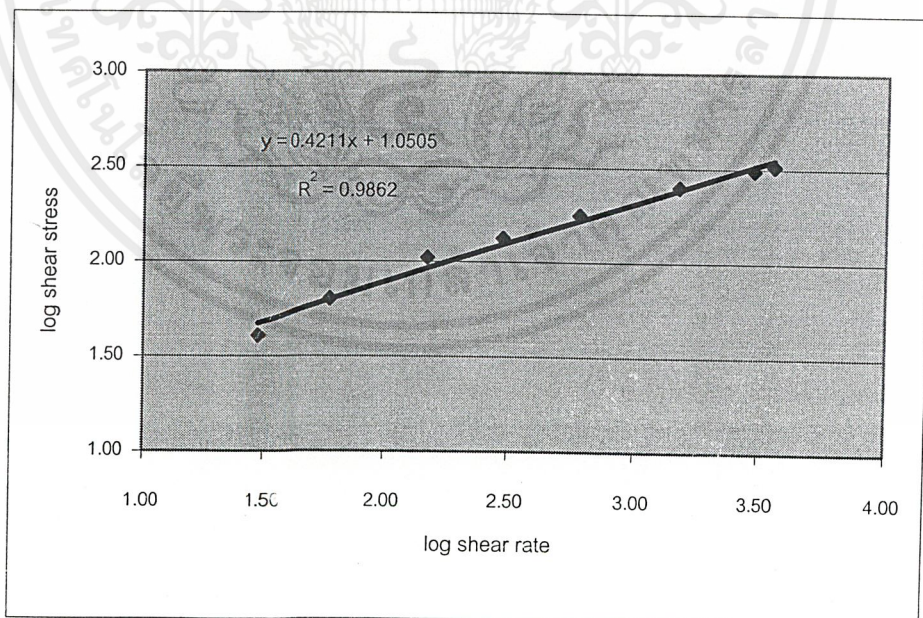
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 พบว่าทั้ง LDPE และ LLDPE ที่ผสมและไม่ผสม Zeolite NaA มีพฤติกรรมการไหลเป็น Pseudoplastic คือเมื่อให้อัตราความเครียดเพิ่มขึ้นความหนืดจะลดลง เนื่องจากเมื่อให้แรงเฉือนสายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดการคลายตัว (Chain Disentanglement) ได้มากขึ้น ทำให้ความหนืดลดลง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง LDPE และ LLDPE จะเห็นได้ว่า LLDPE มีความหนืดสูงกว่า เนื่องจาก LLDPE ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีค่า MFI น้อยกว่า แสดงว่ามีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า นั่นหมายถึงการที่มีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ (Chain Entanglement) ที่มากกว่า จึงทำให้ความหนืดสูงกว่า และเมื่อมีปริมาณ Zeolite NaA เพิ่มมากขึ้นความหนืดก็จะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก Zeolite NaA เป็นอนุภาคที่แข็ง เมื่อผสมลงในพอลิเมอร์และได้รับความร้อนสายโซ่จะเกิดการเคลื่อนที่ Zeolite NaA จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล การเคลื่อนที่ที่ยากขึ้นทำให้ความหนืดสูงขึ้น

4.3.1 การหาค่าความเป็น Pseudoplastic

ค่าความเป็น Pseudoplastic แสดงถึงความหนืดมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดเล็กน้อยเพียงไร หากค่ายิ่งเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดเพียงเล็กน้อยจะทำให้ความหนืดลดลงอย่างมาก

การหาค่าความเป็น Pseudoplastic หาได้จากค่า Power law index (n) โดยค่า n หาได้จากการเขียนกราฟระหว่างค่า log shear stress กับ log shear rate ดังตัวอย่างกราฟข้างล่าง



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง log shear stress กับ log shear rate ของสารตัวอย่าง LDPE 100%

จากกราฟรูปที่ 4.2 ค่า n คือความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 0.42 ดังนั้นค่าความเป็น Pseudoplastic ของ LDPE จึงมีค่าเท่ากับ 0.42 สารตัวอย่างอื่นๆ ทำได้โดยวิธีเดียวกันนี้ และค่า Pseudoplastic ของสารตัวอย่าง สรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่า Pseudoplastic (Power law index) ของสารตัวอย่าง

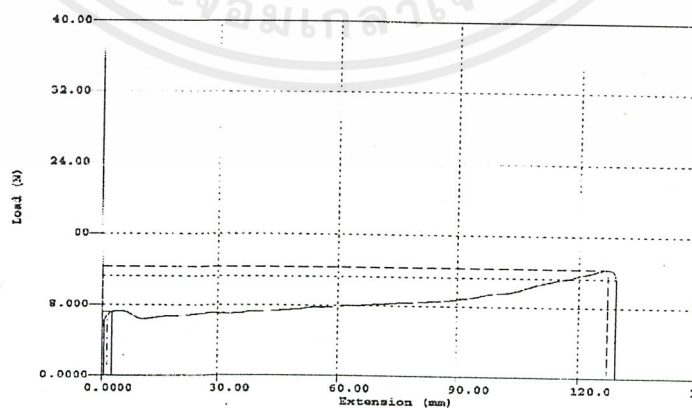
สูตร	n
LDPE	0.42
LDPE+Zeolite NaA 10 phr	0.41
LDPE+Zeolite NaA 20 phr	0.40
LLDPE	0.38
LLDPE+Zeolite NaA 10 phr	0.37
LLDPE+Zeolite NaA20 phr	0.32

จากการทดลองพบว่า ค่า n ลดลงเล็กน้อยเมื่อมี Zeolite NaA ในสารตัวอย่างมากขึ้น แสดงว่าสารมีความเป็น Pseudoplastic เพิ่มมากขึ้น นั่นคือเมื่อเพิ่มอัตราความเครียดเฉือน ค่าความหนืดจะลดลงได้มากกว่าสารที่มีค่า n สูงกว่า

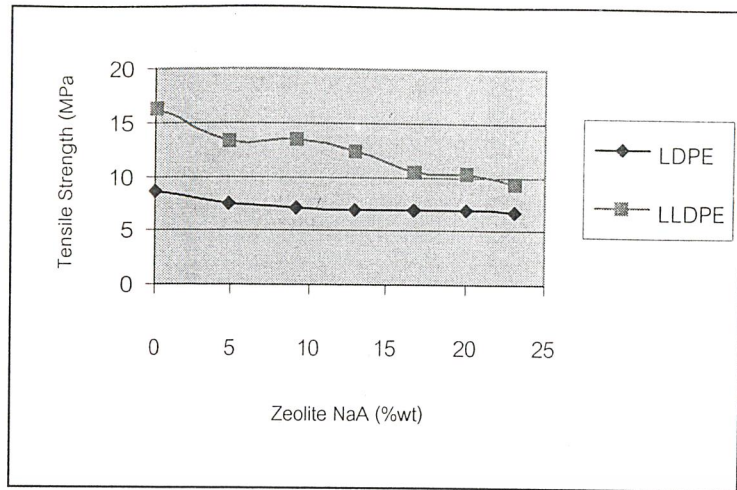
4.4 การศึกษาสมบัติเชิงกล

4.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Tests)

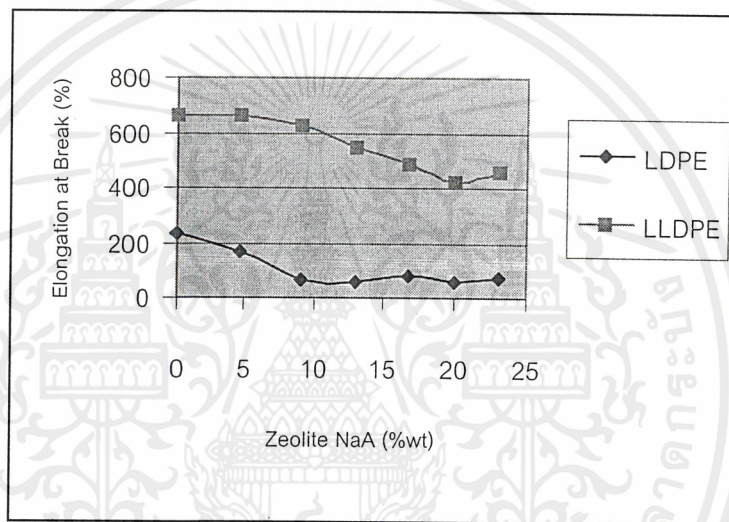
นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.3.3 มาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ที่มี Gauge length 20 mm จากนั้นนำมาทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของ Zeolite NaA ที่ใช้เป็นสารเติมแต่งใน LDPE และ LLDPE ที่มีต่อสมบัติการดึงยึดคือ ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at Break)



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของ LLDPE + Zeolite NaA 0 phr



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Zeolite NaA ที่มีต่อค่า Tensile Strength ในสารตัวอย่าง

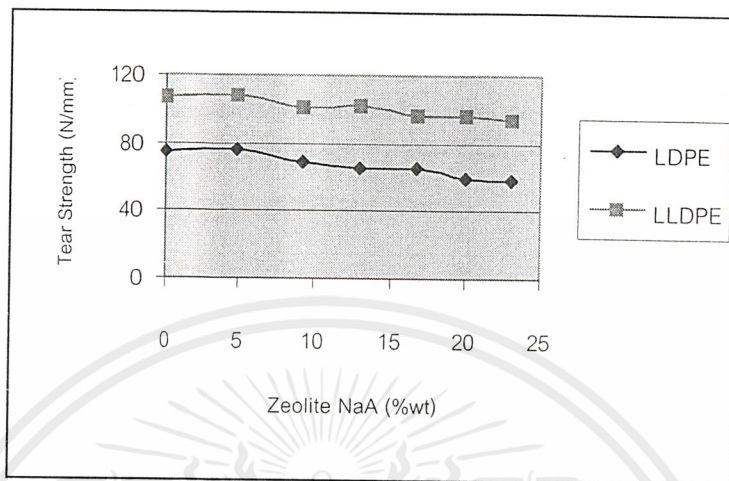


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Zeolite NaA ที่มีต่อค่า % Elongation at Break ในสารตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณ Zeolite NaA เพิ่มขึ้น Tensile Strength และ % Elongation at Break จะลดลง เนื่องจาก Zeolite NaA เป็นสารที่มีขี้ แต่ PE ไม่มีขี้ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างภูมิภาคต่ำ และเมื่อให้แรงดึงจะเกิดช่องว่างระหว่างภูมิภาค เมื่อปริมาณ Zeolite NaA เพิ่มขึ้นและมีการให้แรงดึง ทำให้โอกาสในการเกิดช่องว่างมีมากขึ้นด้วย Tensile Strength และ % Elongation at Break จึงลดลง และเนื่องจาก LLDPE ที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่า MFI ต่ำกว่า LDPE เพราะฉะนั้นน้ำหนักโมเลกุลของ LLDPE จึงสูงกว่า LDPE ทำให้รับแรงได้ดีกว่า ค่า Tensile Strength และ % Elongation at Break จึงสูงกว่า LDPE

4.4.2 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear tests)

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.3.3 มาตัดเป็นรูปปีกนก มาทำการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของ Zeolite NaA ที่ใช้เป็นสารตัวเติมใน LDPE และ LLDPE ที่มีต่อสมบัติความแข็งแรงฉีกขาด (Tear Strength) ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.6

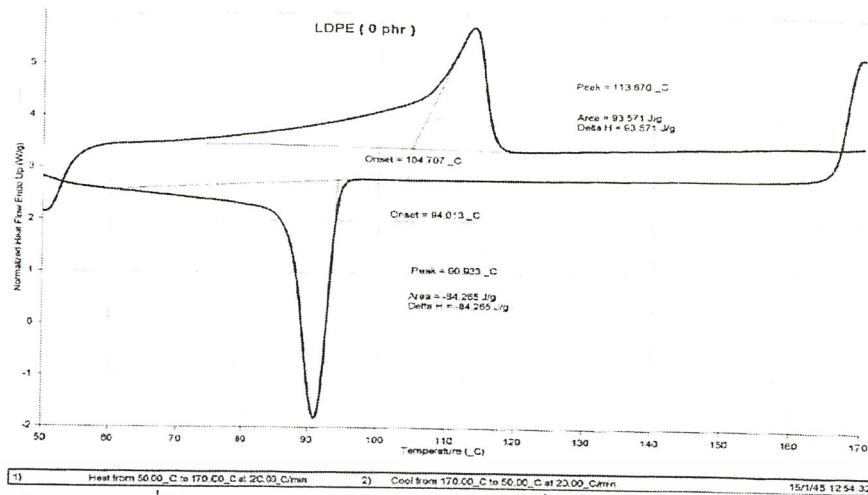


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Zeolite NaA ที่มีต่อค่า Tear Strength ในสารตัวอย่าง

จากกราฟเมื่อปริมาณ Zeolite NaA เพิ่มขึ้น Tear Strength จะลดลง เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างภูมิภาคของ Zeolite NaA ที่มีขั้วกับ LDPE (หรือ LLDPE) ที่ไม่มีขั้วมีค่าต่ำ เมื่อให้แรงดึงโอกาสที่จะเกิดช่องว่างระหว่างภูมิภาคจึงเพิ่มขึ้น Tear Strength จึงลดลง

4.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

เมื่อนำสารตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.2 มาทำการตรวจสอบเพื่อศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC จะได้ผลการทดลองดังตัวอย่างกราฟรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของ LDPE + Zeolite NaA 0 phr

นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 เมื่อ

T_m คือ อุณหภูมิของการหลอมผลึก

ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

% Crystallinity คือ เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกในสารตัวอย่าง

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

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

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} * \frac{100}{(100 - \text{ปริมาณ Zeolite NaA ที่มีอยู่จริง})} * 100$$

ซึ่งผลของการตรวจวัดเป็นดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 ปริมาณ Zeolite NaA ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนในสารตัวอย่าง LDPE

สูตร (phr)	ปริมาณ Zeolite NaA ที่แน่นอน (%wt)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_f (J/g)	% Crystallinity
0	0	114	94	32
10	8.9	113	83	26
20	16.4	112	71	28
30	22.3	112	62	26

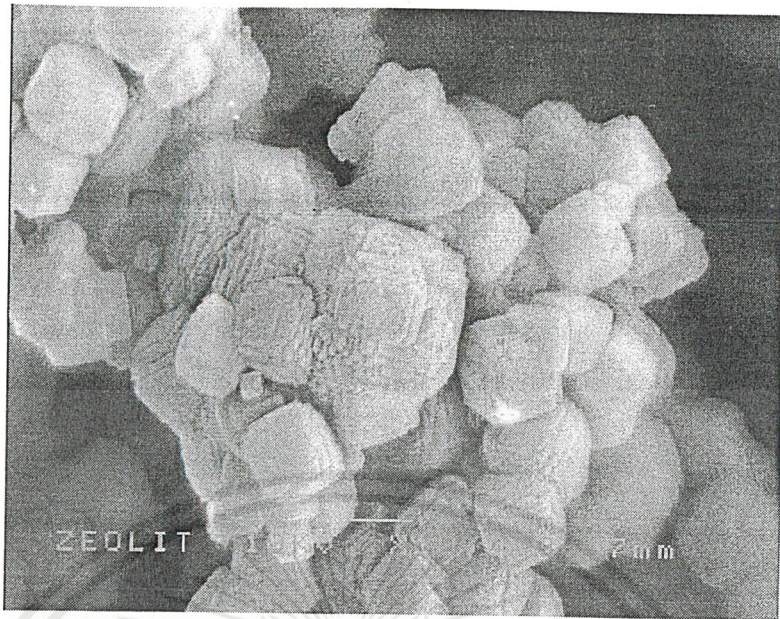
ตารางที่ 4.4 ปริมาณ Zeolite NaA ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนในสารตัวอย่าง LLDPE

สูตร (phr)	ปริมาณ Zeolite NaA ที่แน่นอน (%wt)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_f (J/g)	%Crystallinity
0	0	126	103	35
10	9.4	126	88	33
20	15.6	125	84	33
30	22.8	124	74	32

จากการตรวจสอบ เมื่อพิจารณาสารตัวอย่างทั้ง LDPE และ LLDPE พบว่าค่า T_m ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณของ Zeolite NaA เพิ่มขึ้น เพราะการมีอนุภาคของ Zeolite NaA อาจทำให้เกิดจุดเริ่มต้นในการเกิดผลึกมาก ทำให้ผลึกที่ได้มีขนาดเล็กแต่มีจำนวนมากและมีความสมบูรณ์ลดลง ค่า % Crystallinity หาได้จากพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึก ซึ่งพบว่า เมื่อปริมาณ Zeolite NaA เพิ่มขึ้น ความเป็นผลึกจะลดลง

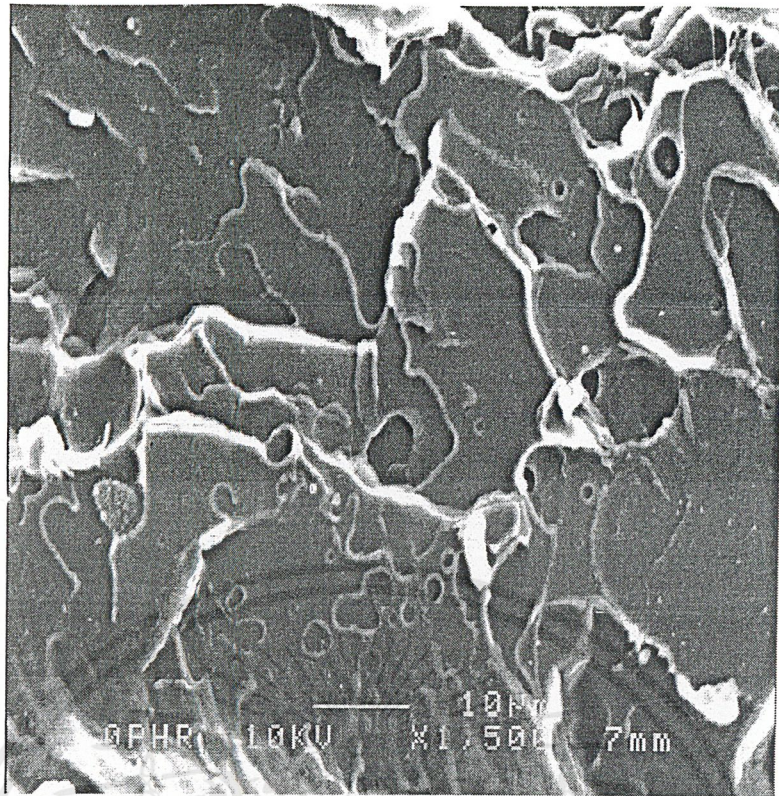
เมื่อทำการเปรียบเทียบสารตัวอย่างระหว่าง LDPE และ LLDPE ที่ค่า T_m พบว่า T_m ของสารตัวอย่าง LLDPE มีค่าสูงกว่า LDPE เพราะ LLDPE มีโครงสร้างของสายโซ่ที่เป็นกิ่งสั้นเกิดการจัดเรียงผลึกได้ดีกว่า LDPE และเมื่อพิจารณาที่ค่า % Crystallinity จะพบว่า % Crystallinity ของ LDPE มีแนวโน้มลดลงมากกว่า LLDPE เนื่องจากโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่กิ่งที่สั้นและน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่าของ LLDPE เช่นกัน จึงทำให้โอกาสที่อนุภาคของ Zeolite NaA จะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวใน LLDPE เกิดได้ยากกว่า

4.6 การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ Zeolite NaA ในพอลิเมอร์



รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของอนุภาค Zeolite NaA ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า มีขนาดระยะเท่ากับ 1 μm

จากสัณฐานวิทยาของ Zeolite NaA พบว่ามีลักษณะในการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) มากกว่าอยู่เป็นอนุภาคเดี่ยวๆ (Single Particle) เนื่องจากแรงดึงดูดของอนุภาคเป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ของสารที่มีขั้ว และรูปร่างมีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ มีการจัดเรียงกันเป็นชั้นๆ ในแต่ละอนุภาค ดังนั้นในขั้นตอนการผสม Zeolite NaA ที่มีขั้วกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วจะต้องใช้แรงเฉือนที่สูงกว่าแรงดึงดูดของอนุภาค Zeolite NaA เพื่อใช้ในการทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาค Zeolite NaA ในพอลิเมอร์ได้ดี



รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของ LDPE + Zeolite NaA 0 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

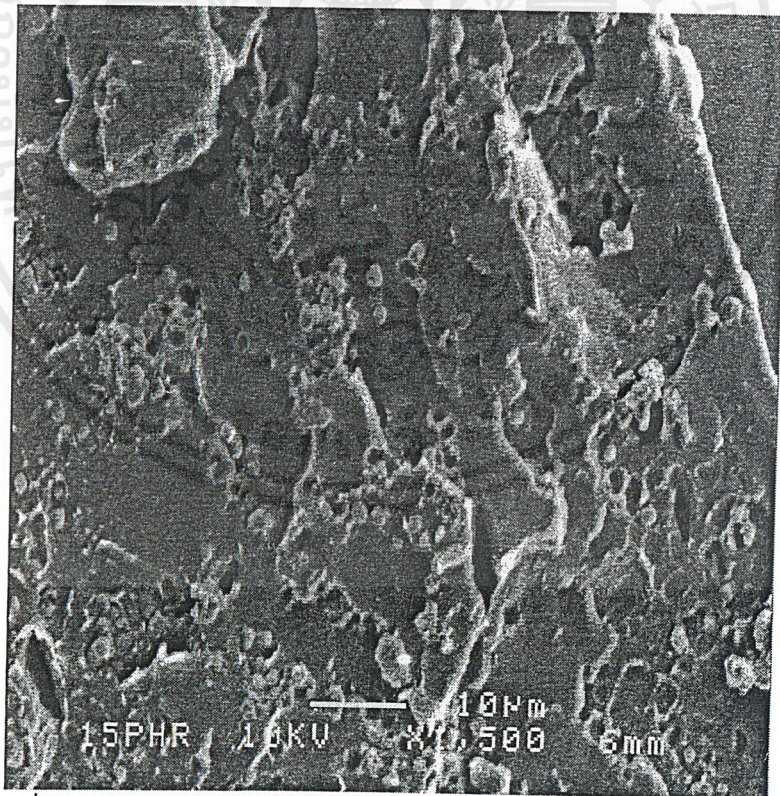


รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของ LDPE + Zeolite NaA 5 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

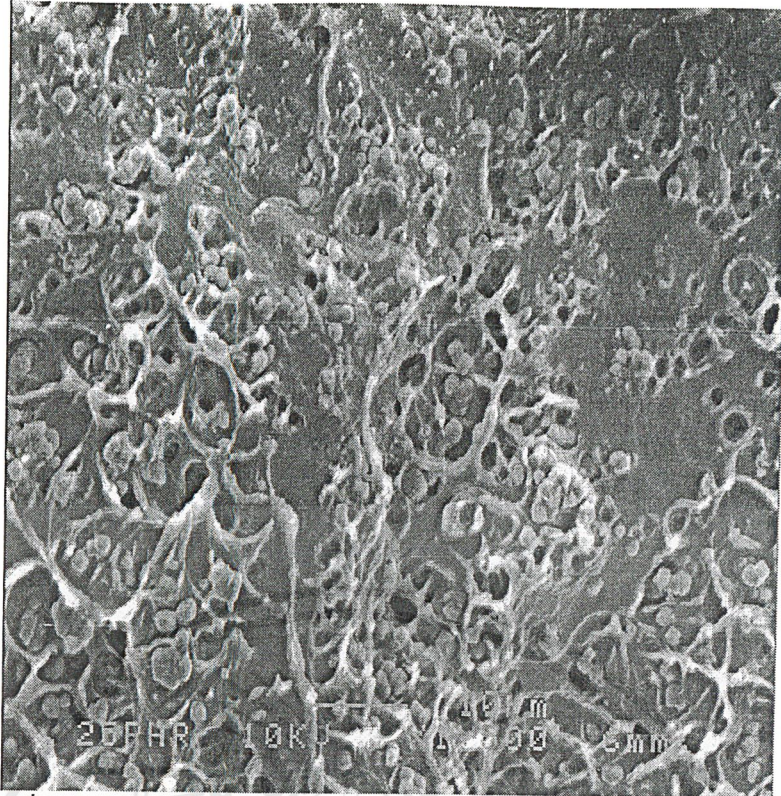
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 27 ราคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของ LDPE + Zeolite 10 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของ LDPE + Zeolite NaA 15 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของ LDPE + Zeolite NaA 25 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

จากรูปที่ 4.8 – 4.13 เป็นการแสดงสัณฐานวิทยาที่ได้จากการแตกหักของพื้นผิวฟิล์ม LDPE ที่ผสม Zeolite NaA ในปริมาณต่างๆ คือ 0, 5, 10 15 และ 25 phr ตามลำดับ โดยใช้กำลังขยายที่ 1,500 เท่า ในทุกรูปเท่ากัน มีขีดบอกระยะเท่ากับ $10\ \mu\text{m}$ เมื่อปริมาณของ Zeolite NaA เพิ่มขึ้น จะเห็นว่ากลุ่มก้อนของ Zeolite NaA มีมากขึ้นด้วย

ในสารตัวอย่างที่มีปริมาณ Zeolite NaA ต่ำๆ จะเห็นลักษณะการกระจายของอนุภาค Zeolite NaA ที่ดี แต่เมื่อปริมาณ Zeolite NaA สูงขึ้น อนุภาคของมันจะมีการจับรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วของสารทั้งสองชนิดซึ่งแตกต่างกันคือ Zeolite NaA เป็นสารที่มีขั้ว มีแวนโวน์ที่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้การกระจายใน LDPE หรือ LLDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วเป็นไปได้ยาก ดังนั้นเมื่อมีปริมาณ Zeolite NaA เพิ่มขึ้นในสารตัวอย่าง แวนโวน์มีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนก็มากขึ้นด้วย

จากรูปที่ 4.13 เมื่อปริมาณ Zeolite NaA เพิ่มขึ้น พบว่าจำนวนรูพรุนในชิ้นงานตัวอย่างมีปริมาณมากขึ้นด้วย ดังนั้นความสามารถในการดูดซับน้ำก็อาจมีสูงขึ้น เนื่องจากความเป็นขั้วของอนุภาค Zeolite NaA และน้ำ อีกทั้งขนาดโมเลกุลของน้ำที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนของ Zeolite NaA จึงทำให้น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปภายในรูพรุนของ Zeolite NaA ได้ โดยเราสามารถคาดการณ์ได้ว่า ฟิล์มตัวอย่างที่ผสม Zeolite NaA น่าจะมีปริมาณน้ำผ่านฟิล์มได้มากขึ้น

แวนโวน์ของชิ้นงานตัวอย่าง LLDPE น่าจะให้ผลการทดลองไปในแนวเดียวกับชิ้นงานตัวอย่าง LDPE เนื่องจากปริมาณของ Zeolite NaA ที่เติมลงไป และสภาวะที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน

ตัวอย่างในสูตรต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ทั้ง LDPE และ LLDPE ยังเป็นพอลิเมอร์เมตริก
ของพอลิเอทิลีนเหมือนกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

1. LDPE และ LLDPE จัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติความหนืดเป็น Pseudoplastic นั่นคือ ความหนืดลดลงเมื่ออัตราการความเครียดเพิ่มขึ้น LLDPE มีความหนืดสูงกว่า LDPE เนื่องจาก LLDPE ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ มีค่า MFI น้อยกว่า แสดงถึงน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่า นั่นหมายถึงมีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ที่มากกว่า ทำให้มีความหนืดและความแข็งแรงที่สูงกว่า
2. เมื่อปริมาณ Zeolite NaA เพิ่มขึ้น พบว่าความหนืดของพอลิเมอร์ทั้งสองมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก Zeolite NaA เป็นอนุภาคของแข็งอาจไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์
3. เมื่อปริมาณ Zeolite NaA เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า Tensile Strength, % Elongation at Break และ Tear Strength ลดลง เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างภูมิภาคของพอลิเมอร์และอนุภาคของ Zeolite NaA มีค่าต่ำ เมื่อปริมาณ Zeolite NaA เพิ่มขึ้นและมีการให้แรงดึง จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างภูมิภาคเพิ่มขึ้น
4. เมื่อปริมาณ Zeolite NaA เพิ่มขึ้นในสารตัวอย่าง Zeolite NaA มีแนวโน้มการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น ทำให้การกระจายตัวในพอลิเมอร์เป็นไปได้ยากขึ้นด้วย
5. เมื่อปริมาณ Zeolite NaA เพิ่มขึ้น พบว่าจำนวนรูพรุนในชิ้นงานตัวอย่างมีมากขึ้น ดังนั้นโอกาสที่น้ำจะผ่านเข้าออกฟิล์มจะมีสูงขึ้น

การเลือกสูตรผสมที่มีปริมาณ Zeolite NaA ตั้งแต่ 5-15 phr จะให้สมบัติส่วนใหญ่ เช่น Tensile Strength, % Elongation at Break และ Tear Strength ดีที่สุด อย่างไรก็ตามแล้วแต่ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม ในเรื่องสมบัติด้านอื่นๆที่สำคัญ ก่อนที่จะสามารถสรุปว่าควรใช้สูตรใดในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับปรุงเทคนิคการขึ้นรูปชิ้นงาน เพื่อให้ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างมีความใกล้เคียงกับสถานะการนำไปใช้งานมากที่สุด และนำไปศึกษาสมบัติอื่นเพิ่มเติม เช่น สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ
2. เลือกใช้สารเติมแต่งชนิดอื่นๆ ปรับปรุงให้มีสมบัติที่ดียิ่งขึ้น เพื่อเหมาะสมกับการใช้งาน
3. การเลือกใช้ LLDPE ในงานบรรจุภัณฑ์ดีกว่า LDPE เนื่องจากมีความแข็งแรง ความทนทานที่สูงกว่า มีความเหนียวมากกว่า ในกรณีที่ความใสไม่ใช่อุปสรรคสำคัญที่สุด



เอกสารอ้างอิง

1. F.W. Billmeyer, *Textbook of Polymer Science*, John Wiley & Sons, New York , 1984
2. ดร.ตะวัน สุขน้อย, “เอกสารประกอบการเรียนวิชาซีโพลีเมอร์และสารมีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง” คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
3. เจริญ นาคะสรรค์, “กระบวนการแปรรูปพลาสติก” คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2542
4. J. Lee, M. Shim and S. Kim. *Polym Eng Sci.* 1999, **39**, 1993-1997
5. I. D. Danjaji, R. Nawang, U. S. Ishiaku, H. Ismail and Z. A. Mohd. Ishak. *J Appl Polym Sci.* 2001, **79**, 29-37
6. K. Cho, B.H. Lee, K. M. Hawang, H. Lee and S. Choe. *Polym Eng Sci.* 1998, **38**, 1969-1975
7. Y. Wang, R. Li and G. Wang. *Polym Plast Technol Eng.* 1994, **33(6)**, 769-779
8. A. K. Gupta, S.A. Rana and B. L. Deopura. *J Appl Polym Sci.* 1993, **49**, 477-485
9. K. Liao, X. Chen and C. Zheng. *J Appl Polym Sci.* 1995, **57**, 1245-1250
10. I. M. Thakore, S. Desai, B. D. Sarawade and S. Devi. *European Polymer Journal.* 2001, **37**, 151-160
11. P. Matzinos, B. Bikiaris, S. Kokkou and C. Panayiotou. *J Appl Polym Sci.* 2001, **79**, 2548-2557
12. H.P.S. Abdul Khalil, W.C. Chow, H.D. Rozman, H. Ismail, M.N. Ahmad, and R.N. K umar. *Polym.-Plast. Technol. Eng.* 2001, **40(3)**, 249-263
13. Annual Book of ASTM Standard 08.03, 1992, 201-207
14. Annual Book of ASTM Standard 08.01, 1992, 159-180
15. Annual Book of ASTM Standard 08.01, 1992, 361-363

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การศึกษาสมบัติการไหล

ตาราง ก1 สารตัวอย่าง LDPE + Zeolite NaA 0 phr

Shear rate (s ⁻¹)	P _L (MPa)	Shear Stress (kPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
30.0	2.7	40.6	1354.4
60.0	4.3	63.4	1056.1
150.0	6.9	104.5	696.6
300.0	9.6	133.0	443.3
600.0	13.2	177.1	295.2
1500.0	19.8	250.3	166.9
3000.0	24.9	308.7	102.9
3600.0	26.4	326.8	90.8

ตาราง ก2 สารตัวอย่าง LDPE + Zeolite NaA 10 phr

Shear rate (s ⁻¹)	P _L (MPa)	Shear Stress (kPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
30.0	3.4	47.8	1593.5
60.0	4.9	70.6	1177.0
150.0	7.9	111.5	743.1
300.0	10.9	149.9	499.7
600.0	15.0	198.7	331.2
1500.0	21.6	275.5	183.7
3000.0	27.3	344.9	115.0
3600.0	29.1	365.2	101.4

ตาราง ก3 สารตัวอย่าง LDPE + Zeolite NaA 20 phr

Shear rate (s ⁻¹)	P _L (MPa)	Shear Stress (KPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
30.0	3.8	55.4	1846.3
60.0	5.5	81.7	1361.0
150.0	8.7	123.2	821.6
300.0	11.9	163.7	545.8
600.0	16.2	216.7	361.1
1500.0	23.5	300.1	200.0
3000.0	29.9	374.9	125.0
3600.0	31.8	397.1	110.3

ตาราง ก4 สารตัวอย่าง LLDPE + Zeolite NaA 0 phr

Shear rate (s ⁻¹)	P _L (MPa)	Shear Stress (KPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
30.0	6.1	91.0	3033.4
60.0	9.3	137.3	2287.8
150.0	15.7	231.1	1540.4
300.0	21.9	320.1	1067.1
600.0	29.3	423.9	706.4
1500.0	40.1	568.8	379.2
3000.0	44.7	612.6	204.2
3600.0	46.9	638.2	177.3

ตาราง ก5 สารตัวอย่าง LLDPE + Zeolite NaA 10 phr

Shear rate (s ⁻¹)	P _L (MPa)	Shear Stress (KPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
30.0	5.9	89.2	2972.6
60.0	9.7	148.7	2478.0
300.0	23.2	336.3	1121.1
600.0	29.8	425.7	709.5
1500.0	42.0	586.8	391.2
3000.0	47.1	618.3	206.1

ตาราง ก6 สารตัวอย่าง LLDPE + Zeolite NaA 20 phr

Shear rate (s ⁻¹)	P _L (MPa)	Shear Stress (KPa)	Shear Viscosity (Pa.s)
30.0	7.9	117.6	3918.8
60.0	12.0	175.7	2927.9
150.0	20.0	290.7	1937.8
300.0	27.5	396.1	1320.4
600.0	36.0	512.0	853.4
1500.0	44.4	610.0	406.6
3000.0	48.7	636.7	212.2

ภาคผนวก ข การศึกษาสมบัติเชิงกล

ตาราง ข1 สารตัวอย่าง LDPE + Zeolite NaA 0 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	8.0	227.8	74.8
2	8.5	258.7	79.4
3	8.7	214.2	79.5
4	10.6	486.2	72.9
5	6.5	14.6	78.5
6	7.7	243.5	74.3
7	7.5	137.2	76.1
8	11.7	305.6	67.8
Mean	8.7	236.0	75.4
Std dev	1.72	134.9	3.94

ตาราง ข2 สารตัวอย่าง LDPE + Zeolite NaA 5 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	6.9	19.1	71.5
2	7.0	93.9	79.0
3	7.6	88.5	78.5
4	7.6	204.3	75.1
5	8.0	316.3	75.9
6	8.1	208.1	78.6
7	6.9	184.6	74.5
8	7.5	201.1	71.2
Mean	7.4	164.5	75.5
Std dev	0.49	92.7	3.08

ตาราง ข3 สารตัวอย่าง LDPE + Zeolite NaA 10 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	7.3	37.2	63.5
2	7.8	75.1	77.3
3	6.9	47.8	73.4
4	5.3	19.0	63.7
5	7.6	95.7	74.1
6	7.5	160.8	57.8
7	6.8	12.5	68.9
8	7.2	60.5	-
Mean	7.1	63.6	68.4
Std dev	0.80	48.1	7.01

ตาราง ข4 สารตัวอย่าง LDPE + Zeolite NaA 15 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	6.3	60.6	74.1
2	7.0	15.3	67.5
3	7.1	32.2	62.5
4	7.0	54.3	74.6
5	6.5	111.6	57.3
6	7.4	-	58.6
7	7.2	-	66.8
8	6.7	-	61.7
Mean	6.9	54.8	65.4
Std dev	0.36	39.6	6.55

ตาราง ข5 สารตัวอย่าง LDPE + Zeolite NaA 20 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	7.4	140.9	70.0
2	6.9	77.7	66.2
3	6.9	46.3	73.7
4	6.6	70.5	58.3
5	6.6	91.0	61.0
6	6.8	34.3	-
7	6.8	89.0	-
8	7.2	70.0	-
Mean	6.9	77.5	65.8
Std dev	0.27	32.3	6.31

ตาราง ข6 สารตัวอย่าง LDPE + Zeolite NaA 25 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	6.8	74.2	57.2
2	7.1	128.9	69.0
3	7.3	53.0	58.7
4	7.0	62.7	51.7
5	6.8	41.4	67.2
6	7.1	27.1	45.0
7	7.1	23.8	57.5
8	6.8	-	71.7
Mean	7.0	58.7	59.8
Std dev	0.17	39.2	9.09

ตาราง ข7 สารตัวอย่าง LDPE + Zeolite NaA 30 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	6.7	70.4	56.4
2	7.1	65.0	58.0
3	6.3	57.5	58.2
4	6.7	88.2	54.0
5	7.0	20.5	64.3
6	7.0	90.1	50.1
7	7.0	102.9	65.4
8	6.4	-	-
Mean	6.8	70.7	58.0
Std dev	0.32	35.5	5.40

ตาราง ข8 สารตัวอย่าง LLDPE + Zeolite NaA 0 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	17.3	725.8	110.5
2	12.3	511.7	107.7
3	19.4	787.2	104.4
4	15.5	671.9	96.5
5	16.9	446.1	111.2
6	17.5	743.9	110.3
7	17.3	747.3	112.1
8	-	-	103.1
Mean	16.6	660.0	107.0
Std dev	2.23	5.6	5.34

ตาราง ข9 สารตัวอย่าง LLDPE + Zeolite NaA 5 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	9.9	651.6	112.8
2	16.3	754.9	107.0
3	14.8	675.8	105.6
4	13.3	663.5	109.2
5	8.6	531.3	105.4
6	12.5	589.0	112.6
7	15.4	731.3	103.3
8	14.7	712.3	108.5
Mean	13.2	663.7	108.0
Std dev	2.71	74.3	3.39

ตาราง ข10 สารตัวอย่าง LLDPE + Zeolite NaA 10 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	15.1	728.0	103.6
2	15.7	689.7	96.9
3	15.6	660.9	93.9
4	12.7	639.7	97.8
5	11.7	532.1	104.7
6	14.7	671.0	96.8
7	10.8	511.1	106.2
8	11.3	598.6	103.6
Mean	13.4	628.9	100.4
Std dev	2.04	76.2	4.58

ตาราง ข11 สารตัวอย่าง LLDPE + Zeolite NaA 15 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	15.3	702.6	107.7
2	11.2	607.9	147.2
3	10.7	501.9	95.2
4	10.7	525.7	100.1
5	13.9	635.9	110.8
6	10.2	489.5	104.0
7	8.7	319.4	101.3
8	17.6	564.9	93.1
Mean	12.3	543.5	93.1
Std dev	3.00	115.7	17.1

ตาราง ข12 สารตัวอย่าง LLDPE + Zeolite NaA 20 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	11.9	610.6	94.7
2	10.6	494.0	100.9
3	8.9	384.9	96.3
4	11.7	625.5	99.0
5	8.9	119.1	90.9
6	9.2	348.0	96.0
7	10.0	663.5	92.9
8	12.9	626.8	95.9
Mean	10.5	484.0	95.8
Std dev	1.51	189.1	3.17

ตาราง ข13 สารตัวอย่าง LLDPE + Zeolite NaA 25 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	10.3	371.2	95.6
2	12.5	432.4	91.5
3	7.9	288.1	98.9
4	10.5	599.4	95.6
5	11.0	613.0	91.0
6	8.0	272.2	93.5
7	10.5	364.8	101.0
8	10.9	432.2	100.2
Mean	10.2	421.7	95.9
Std dev	1.55	127.8	3.76

ตาราง ข14 สารตัวอย่าง LLDPE + Zeolite NaA 30 phr

Sample No.	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tear Strength (N/mm)
1	10.9	398.8	93.9
2	9.1	346.4	97.1
3	10.6	624.0	97.6
4	10.3	605.9	98.7
5	8.6	296.4	99.2
6	8.6	480.0	72.6
7	9.5	569.5	99.8
8	7.3	338.6	-
Mean	9.4	456.8	94.1
Std dev	1.19	130.5	9.68