

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติเชิงกล ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่บริสุทธิ์ และที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม



นายพลชีพ ลิมพงษ์
นายธำรงค์ศักดิ์ ลามวิบูลย์สุข

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เลขหมึก.....

เลขทะเบียน.....33507.....ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วัน, เดือน, ปี 13 ส.ค. 2542.....ถ้ามีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Experimental investigations of mechanical properties of unfilled and
Calcium carbonate-filled High density polyethylene



Mr. Pollacheep Limpong

Mr. Tamrongsak Lapviboonsuk

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 Lardkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่
บริสุทธิ์ และที่มีเคลือบคาร์บอนเป็นสารตัวเติม

นักศึกษา นายพลชีพ ลิมพงษ์ 38054239
นายธำรงค์ศักดิ์ ภาภวิบูลย์สุข 38054224

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. สุภรัตน์ จำปา
ดร. อธิพิล แจ่มชัด
ดร. ตะวัน สุขน้อย

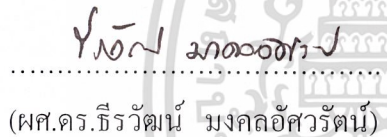
ภาควิชา เคมี สาขา เคมีอุตสาหกรรม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



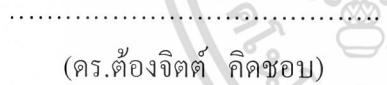
(ผศ.นงนุช เกตรานูวัฒน์)

หัวหน้าภาควิชาเคมี



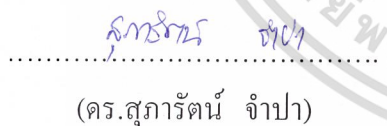
(ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัสวรัตน์)

ประธานกรรมการ




(ดร.ต้องจิตต์ คัดชอบ)

กรรมการ



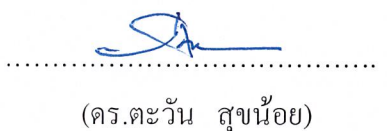
(ดร.สุภรัตน์ จำปา)

กรรมการ



(ดร.อธิพิล แจ่มชัด)

กรรมการ



(ดร.ตะวัน สุขน้อย)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอสงวนสิทธิ์ในการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่บริสุทธิ์ และที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม	
นักศึกษา	นายพลชีพ ลิมพงษ์	38054239
	นายธำรงค์ศักดิ์ ลาภวิบูลย์สุข	38054224
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. สุภารัตน์ จำปา	
	ดร. อธิธิพล แจ่มชัด	
	ดร. ตะวัน สุขน้อย	
ภาควิชา	เคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2541	

บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่บริสุทธิ์ และที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นสารตัวเติม เตรียมตัวอย่างโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวนอนเดี่ยว แล้วทำการตรวจสอบอัตราส่วนที่แน่นอนโดยนำตัวอย่างมาเผา ชั่งงานตัวอย่างเตรียมจากเครื่องฉีดขึ้นรูป แล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง เครื่องทดสอบแรงกระแทก และเครื่องทดสอบความแข็ง พบว่า เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ HDPE สูงขึ้นมีผลทำให้ค่ามอดูลัส การยืด ณ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทก เพิ่มขึ้นแต่การกระจายน้ำหนักโมเลกุลจะไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลที่ศึกษา การที่มี CaCO_3 ผสมใน HDPE มีผลทำให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกลดลง ส่วน CaCO_3 0-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผสมใน HDPE จะมีผลน้อยมากต่อค่าความแข็งแรง ณ จุด Yield และเมื่อปริมาณของ CaCO_3 เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่ามอดูลัส และค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ค่าการยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter พบว่า เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น มีผลทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวของผลึก (Crystalline Melting Temperature, T_m) สูงขึ้น เมื่อผสม CaCO_3 ทุกๆปริมาณ และทุกๆ เกรดที่ศึกษา มีผลทำให้อุณหภูมิของการตกผลึกใหม่ (Recrystallisation Temperature, T_c) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ค่า T_m ลดลง และมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) น้อยมาก ส่วนการทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา ศึกษาโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope และ Polarised Microscope ผลที่ได้ตรงกับผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกล และการทดสอบสมบัติทางความร้อน ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นมีผลทำให้การกระจายตัวของ CaCO_3 ใน HDPE ยากขึ้นและ CaCO_3 ทุกเกรดมีผลทำให้ขนาดผลึกของ HDPE เล็กลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Experimental investigations of mechanical properties of unfilled and Calciumcarbonate-filled High density polyethylene	
Name	Mr. Pollacheep Limpong	38054239
	Mr. Tamrongsak Lapviboonsuk	38054224
Special Project Advisor	Dr. Suparat Jumpa	
	Dr. Ittipol Jangchud	
	Dr. Tawan Sooknoi	
Department	Chemistry (Industrial Chemistry)	
Academic Year	1998	

Abstract

This research concerns mechanical properties of unfilled and calcium carbonate (CaCO_3) filled high density polyethylene (HDPE). All the compounds were prepared using a single-screw extruder and ashing determination was carried out to find an accurate filler content in each compound. Three main characteristics studied were tensile, izod impact, and hardness properties. Test specimens were prepared using an injection moulding. It has been found that for unfilled HDPE an increase in polymer molecular weight results in increasing Young's modulus, elongation at break, and impact strength. An addition of CaCO_3 decreases impact strength of the compounds. Yield strength is not significantly affected when CaCO_3 (0 to 30 % by weight) is incorporated into the compounds. The higher the CaCO_3 content, the greater the modulus and also the greater the hardness value. However, an increase in CaCO_3 content tends to decrease elongation at break of the compound.

In addition, some thermal properties of the compounds were also investigated using the Differential Scanning Calorimeter (DSC). It was observed that the crystalline melting temperature (T_m) decreases when CaCO_3 (in the range studied) is added. The degree of crystallinity is not significantly influenced by an incorporation of CaCO_3 , which slightly increases the recrystallisation temperature (T_c) of the compounds. Morphological studies were carried out using the Scanning Electron Microscope (SEM) and Polarised Microscope. It was found that the difficulty of filler dispersion in the compounds increases with increasing CaCO_3 content. The size of the spherulite (representing crystalline part in the compound) reduces when CaCO_3 is presented.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำจากบุคคล และองค์กรต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์ ดร.ต้องจิตต์ ทิดชอบ ดร.สุภารัตน์ จำปา ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ดร.ตะวัน สุขน้อย และ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษที่ช่วยกรุณาตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด และ บริษัท สุรินทร์ออมยา เคมิคอล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพลาสติก และแคลเซียมคาร์บอเนต

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากซึ่งมิได้กล่าวถึง ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นายพลชีพ ถิ่นพงษ์

นายธำรงค์ศักดิ์ ลาภวิบูลย์สุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญ และที่มาของ โครงการงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของโครงการงานพิเศษ	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	5
2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต	7
2.3 กระบวนการแปรรูปพลาสติก	11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 การทดลอง	
3.1 สารเคมี	24
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการในการทดลอง	26
3.3 วิธีการทดลอง	26
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลอง	30
4.1.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า MW และ MWD ของ HDPE โดยใช้ GPC	30
4.1.2 ผลการวิเคราะห์รูปร่างของ CaCO ₃ ด้วยเครื่อง SEM	30
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO ₃ ด้วยเตาเผา	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC	33
4.1.5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของ HDPE ด้วย เครื่อง Polarised microscope	35
4.1.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ในสารตัวอย่างด้วยเครื่อง SEM	37
4.1.7 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง	42
4.1.8 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก	48
4.1.9 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง	52
4.2 อธิบาย และวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.2.1 การวิเคราะห์รูปร่างของ CaCO_3	55
4.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในสารประกอบ	55
4.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	55
4.2.4 การวิเคราะห์รูปร่างผลึกของ HDPE	56
4.2.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ในสารตัวอย่าง	56
4.2.6 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง	57
4.2.7 ผลการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก	57
4.2.8 ผลการทดสอบความแข็ง	58
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารอ้างอิง	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเอทิลีน	13
ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่ผสมด้วย Carbon black	14
ตารางที่ 2.3 สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่ผสมด้วย Carbon black หลังจาก ปรับปรุงพื้นผิวด้วย γ - Methacryloxy – propyltrimethoxy silane	14
ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่ผสมด้วย Carbon black หลังจาก ปรับปรุงพื้นผิวด้วย γ - Aminopropyl – triethoxy silane	15
ตารางที่ 2.5 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ HDPE / CaCO ₃ คอมพอสิต	16
ตารางที่ 2.6 สมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่ผสมด้วย CaCO ₃	19
ตารางที่ 2.7 ค่า Impact strength ของ พอลิพรอพิลีน	19
ตารางที่ 2.8 ค่า Young 's Modulus (E) และ Fracture Energy (G _c) ของ พอลิ พรอพิลีนที่ผสม และ ไม่ได้ผสมด้วยสารตัวเติม ที่อุณหภูมิห้อง	20
ตารางที่ 2.9 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิต	21
ตารางที่ 2.10 สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่ผสม และ ไม่ได้ผสมด้วย CaCO ₃	21
ตารางที่ 2.11 สรุปสมบัติเชิงกลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE	25
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติบางประการของ CaCO ₃	26
ตารางที่ 3.3 ส่วนประกอบต่างๆ ของสารตัวอย่าง	27
ตารางที่ 4.1 ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO ₃	33
ตารางที่ 4.2 ค่าสมบัติทางความร้อน	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงสูตร โครงสร้างอย่างง่ายของ HDPE	6
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต	8
รูปที่ 2.3 แสดงเกรดของแคลเซียมคาร์บอเนต	8
รูปที่ 2.4 a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Falling weight impact strength กับ ปริมาณสารตัวเติม	10
รูปที่ 2.4 b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Notched izod impact strength กับ ปริมาณสารตัวเติม	10
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young 's Modulus ของ HDPE ที่ผสมด้วย mica (E_m) และ LDPE (E) กับ ค่าสัดส่วน โดยปริมาตร (V_f)	17
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young 's Modulus ของ LDPE ที่ผสมด้วย mica (E_m) และ LDPE (E) กับ ค่าสัดส่วน โดยปริมาตร (V_f)	18
รูปที่ 3.1 a) ตัวอย่าง dumbbell	28
รูปที่ 3.1 b) ตัวอย่าง notch izod	28
รูปที่ 4.1 แสดงรูปร่างของ CaCO ₃ เกรดต่างๆ	
รูปที่ 4.1a) แสดงรูปร่างของ CaCO ₃ ขนาด 0.5 μ m เกรด เคลือบด้วยกรดสเดียริก กำลังขยาย 3000 เท่า	30
รูปที่ 4.1b) แสดงรูปร่างของ CaCO ₃ ขนาด 0.5 μ m เกรดไม่ได้เคลือบด้วยกรดสเดียริก กำลังขยาย 3000 เท่า	31
รูปที่ 4.1c) แสดงรูปร่าง ของ CaCO ₃ ขนาด 5 μ m เกรดไม่ได้เคลือบผิว กำลังขยาย 3000 เท่า	31
รูปที่ 4.1d) แสดงรูปร่าง ของ CaCO ₃ ขนาด 10 μ m เกรดไม่ได้เคลือบผิว กำลังขยาย 3000 เท่า	32
รูปที่ 4.2 แสดงกราฟตัวอย่างของการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	34
รูปที่ 4.3 แสดงรูปร่างผลึกของสารตัวอย่างในส่วนประกอบต่างๆ	
รูปที่ 4.3a) แสดงรูปร่างกลุ่มก้อนผลึกของ HDPE2 ที่ปราศจาก CaCO ₃ กำลังขยาย 400 เท่า	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3b) แสดงรูปร่างกลุ่มก้อนผลึกของ HDPE2 + 20%wt CaCO ₃ 0.5 μm กำลังขยาย 400 เท่า	36
รูปที่ 4.3c) แสดงรูปร่างกลุ่มก้อนผลึกของ HDPE2 + 20%wt CaCO ₃ 0.5 μm (coated) กำลังขยาย 400 เท่า	37
รูปที่ 4.4) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ขนาดอนุภาค 5 μm ปริมาณต่างๆกัน ใน HDPE2	
รูปที่ 4.4a) แสดงลักษณะผิวของรอยแตก HDPE2 (ไม่มี CaCO ₃) กำลังขยาย 750 เท่า	37
รูปที่ 4.4b) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ขนาดอนุภาค 5 μm ปริมาณ 5%wt ใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า	38
รูปที่ 4.4c) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ขนาดอนุภาค 5 μm ปริมาณ 25%wt ใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า	38
รูปที่ 4.5) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 20%wt ขนาดอนุภาคต่างๆ ใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า	
รูปที่ 4.5a) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ขนาดอนุภาค 0.5 μm ปริมาณ 20%wt ใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า	39
รูปที่ 4.5b) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ขนาดอนุภาค 5 μm ปริมาณ 20%wt ใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า	39
รูปที่ 4.5c) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ขนาดอนุภาค 10 μm ปริมาณ 20%wt ใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า	40
รูปที่ 4.5d) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ขนาดอนุภาค 0.5 μm ปริมาณ 20%wt ซึ่งถูกเคลือบด้วยกรดสเตียริกใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า	40
รูปที่ 4.6) กราฟตัวอย่างแสดงผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง	41
รูปที่ 4.7) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile properties และ เกรดของ HDPE ที่มี MW และ MWD แตกต่างกัน	42
รูปที่ 4.8) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Yield strength และปริมาณสารตัวเติม ของสารผสม HDPE	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young 's Modulus at 1%Elongation และปริมาณสารตัวเติมของสารผสม HDPE	44
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elongation at break และปริมาณสารตัวเติมของสารผสม HDPE	45
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile properties และ HDPE ที่ผสมด้วย CaCO ₃ เกรดต่างๆ	46
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impact strength และ เกรดของ HDPE ที่มี MW และ MWD แตกต่างกัน	48
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impact strength และปริมาณสารตัวเติมของสารผสม HDPE	49
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impact strength และ HDPE ที่ผสมด้วย CaCO ₃ เกรดต่างๆ	50
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Hardness และ เกรดของ HDPE ที่มี MW และ MWD แตกต่างกัน	51
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hardness และปริมาณสารตัวเติมของสารผสม HDPE	52
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hardness และ HDPE ที่ผสมด้วย CaCO ₃ เกรดต่างๆ	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโรงงานพิเศษ

พอลิเมอร์เป็นสารประกอบเคมีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยอะตอมที่อยู่ในหน่วยมอนอเมอร์จำนวนมากเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นเส้นตรง โข่สาขา และร่างแห พอลิเมอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆด้วยกันคือ เทอร์โมเซต และเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นร่างแห นั่นคือ มีพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้มีความแข็งแรง และไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นโซ่ตรงหรือโซ่กิ่ง และไม่มีพันธะที่แข็งแรงเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่หลัก ทำให้สามารถนำไปหลอมขึ้นรูป และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งในโรงงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาเทอร์โมพลาสติกเนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสามารถนำไปแปรรูปได้ง่าย มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานการสึกกร่อนได้ดี และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อีกทั้งยังมีการใช้เทอร์โมพลาสติกในอุตสาหกรรมอย่างมากโดยจะถูกแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ภาชนะ บรรจุภัณฑ์ แก้ว ไม้ โต๊ะ ขวด อุปกรณ์ต่าง ๆ ฯลฯ ซึ่งการแปรรูปพลาสติกจะเป็นกระบวนการที่ทำให้เทอร์โมพลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากเม็ดพลาสติกไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ เช่น แท่ง เหลี่ยม ท่อกลม ท่อ กรอบ และแผ่น เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในกระบวนการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกอาจจะเกี่ยวข้องกับการตัด การต่อ การยึดติด และการขึ้นรูป ซึ่งจะสามารถผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีรูปร่างซับซ้อน ตัวอย่างของกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมมีหลายแบบ เช่น การอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การเป่าขึ้นรูป (Blow molding) การหมุนขึ้นรูป (Rotational molding) การรีด (Calendering) การขึ้นรูปร้อน (Thermoforming) การหล่อ (Casting) การเชื่อม (Welding) และการยึดติดด้วยกาว (Cementing) จากที่กล่าวมา กระบวนการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกที่มีความสำคัญที่สุดคือ การอัดรีด และการฉีดขึ้นรูป โดยผู้ผลิตจะต้องเข้าใจถึงคุณสมบัติต่างๆของพลาสติก สำหรับการประยุกต์ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกนั้นๆ จากความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆของพลาสติกจะช่วยในการเลือกใช้พลาสติกชนิดต่างๆเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากการเลือกใช้พลาสติกโดยการพิจารณาถึงคุณสมบัติต่างๆของพลาสติกแล้ว ยังจะต้องคำนึงถึงราคาของพลาสติกชนิดต่างๆที่จะนำไปใช้ประโยชน์ และพิจารณาถึงความยากง่ายในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆตามต้องการ ในปัจจุบันพลาสติกมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมสี อาหาร และยา เครื่องสำอาง กระดาษ การพิมพ์ เซรามิก ยาง สารเคลือบผิว กาว โฟม เส้นใย ฟิล์มและในอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกหลายประเภท ดังนั้นจึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นที่จะนำมาศึกษาในทางอุตสาหกรรม เพื่อการพัฒนาเทคโนโลยี กระบวนการผลิต หรือปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ [1]

อย่างไรก็ตามเนื่องจากพอลิเมอร์เป็นสารที่สังเคราะห์ได้จากมอนอเมอร์ และมอนอเมอร์ผลิตจากปิโตรเลียมซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด และมีโอกาสที่จะหมดไปในอนาคต ทำให้พอลิเมอร์มีแนวโน้มที่จะมีราคาสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการใส่สารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ เช่น สารตัวเติม (Fillers) เพื่อลดต้นทุนการผลิต สารเสริมแรง (Reinforcement) ปรับปรุงสมบัติเชิงกล สารช่วยใ้ฟอง (Blowing agents) สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants) สารป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Antioxidants) เพื่อรักษาเสถียรภาพของพลาสติก โดยสารเติมแต่งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทดแทนพอลิเมอร์บางส่วนคือ สารตัวเติม ทั้งนี้การใส่สารตัวเติมจะต้องไม่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปในทางลบมากเกินไป ซึ่งคุณลักษณะของพลาสติกที่มีสารตัวเติมผสมอยู่จะขึ้นกับองค์ประกอบหลายประการ เช่น คุณสมบัติ และปริมาณของพลาสติก และสารตัวเติม การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจะทำให้การผสมเข้ากันของพอลิเมอร์และสารตัวเติมเป็นไปได้ยากขึ้น [1] ดังนั้นในบางครั้งสารตัวเติมอาจจะต้องถูกปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารปรับปรุงพื้นผิว (Surface modifier) เพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ และป้องกันการเสียดสีสมบัติบางประการของพลาสติก ซึ่งสารปรับปรุงพื้นผิวที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดสเตียริก (Stearic acid) และ เมทัลลิกสเตียเรท (Metallic stearate) เป็นต้น

ในการทดลองนี้ได้เลือกศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกที่มีสารตัวเติมเป็นองค์ประกอบ โดยเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในการศึกษาคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene , HDPE) เนื่องจากเป็นที่นิยมนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งปริมาณมากกว่าร้อยละ 40 ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงใช้ในการผลิตขวดพลาสติก และภาชนะบรรจุของอื่นๆ เช่น ภาชนะบรรจุกรดและเบส เคมีภัณฑ์ สารชำระล้าง อีกประมาณร้อยละ 20 ใช้ทำของใช้ในครัวและของเด็กเล่น ส่วนที่เหลือใช้ทำฟิล์มเพื่อห่อหุ้มของ และอาหาร ถุงพลาสติก (ถุงร้อน) หุ้มสายไฟฟ้า ทำสายยาง และอื่นๆ ส่วนสารตัวเติมที่ใช้คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งจะทำหน้าที่เพิ่มเนื้อ มีราคาถูก ช่วยลดต้นทุนการผลิต หาได้ง่ายซึ่งจะได้จากคาร์บอเนตหรือจากการสังเคราะห์แคลไซต์ (Calcite) โดยกระบวนการคาร์บอนชัน (Carbonation) ของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในบางครั้งแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จะถูกปรับปรุงพื้นผิวเพื่อเพิ่มการกระจายตัวก่อนนำมาผสมกับพลาสติก ในการทดลองนี้จะศึกษาผลของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยจะศึกษาผลของปริมาณ และขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และศึกษาสภาวะของสารตัวเติมที่เหมาะสมกับพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมสารตัวเติม เนื่องจาก

- ผลของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
- ผลของการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
- ผลของขนาดอนุภาคของสารตัวเติม
- ผลของปริมาณสารตัวเติม
- ผลของสารปรับปรุงพื้นผิว

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้จะเน้นการศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ในการทนต่อแรงดึง การทนต่อแรงกระแทก และความแข็ง ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้

1. ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
 - ใช้ HDPE 2 ชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน แต่การกระจายน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกัน
2. ศึกษาผลของการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
 - ใช้ HDPE 2 ชนิดที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน แต่น้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกัน
3. ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของสารตัวเติม
 - ใช้ HDPE 1 ชนิดผสมกับสารตัวเติมขนาดอนุภาค 0.5 5 และ 10 ไมครอน ที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก
4. ศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติม
 - ใช้ HDPE 1 ชนิดผสมกับสารตัวเติมขนาดอนุภาค 5 ไมครอน ปริมาณต่าง ๆ คือ 5 10 15 20 25 และ 30 % โดยน้ำหนัก
5. ศึกษาผลของสารปรับปรุงพื้นผิว
 - ใช้ HDPE 1 ชนิดผสมกับสารตัวเติมปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาค 0.5 ไมครอน ซึ่งจะเปรียบเทียบระหว่างการที่มีกรดสเตียริก และไม่เคลือบที่ผิวของสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- เพื่อพัฒนาความรู้เกี่ยวกับผลของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์
- เพื่อเป็นการพัฒนา เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ปรับปรุงสมบัติของ HDPE และนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับ HDPE
- เพื่อนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับสารตัวเติม-พอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene , HDPE)

2.1.1 ความเป็นมา

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน ซึ่งได้มาจากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ของเอทิลีน โดยเริ่มมีมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1956 และได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก HDPE อย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน [2]

2.1.2 กระบวนการผลิต และตัวเร่งปฏิกิริยา

พอลิเอทิลีนส่วนใหญ่ผลิตได้จาก Slurry process หรือ Gas phase process แต่ยังคงมีการใช้ Solution phase process อยู่บ้างเล็กน้อย ซึ่งในกระบวนการทั้งหมดนี้เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน โดยขึ้นกับส่วนประกอบหลัก คือ เอทิลีนมอนอเมอร์ α -โอเลฟิน โคมอนอเมอร์ ตัวเร่งปฏิกิริยา (อาจมีมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ) และสารละลายไฮโดรคาร์บอนบางชนิดโดยใช้ไฮโดรเจนกับตัวเร่งปฏิกิริยาในการควบคุมน้ำหนักโมเลกุล

สำหรับ Slurry process กระบวนการเริ่มจากเอทิลีนมอนอเมอร์กับโคมอนอเมอร์ (ถ้ามี) ทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาในถังปั่นกวนทำให้อนุภาคของพอลิเอทิลีนก่อตัวขึ้นเป็นพอลิเมอร์ จากนั้นนำมาทำให้แห้งแล้วนำมาเข้าเครื่อง Twin – screw extruder ขนาดใหญ่ จากนั้นทำให้เป็นเม็ด (Pellets)

ในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีเพื่อที่จะพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับ HDPE โดยแบ่งตามประเภทของการใช้เป็น 2 ประเภท คือ Phillips – type chromium oxide – based catalysts จะได้ HDPE ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ในช่วงปานกลาง – กว้าง ขณะที่ Titanate / aluminum alkyl catalysts จะใช้ในการผลิต HDPE ที่มี MWD ในช่วงที่แคบ [2]

2.1.3 คุณสมบัติทั่วไป

HDPE มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจาก มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง และมีโซ่กิ่งน้อยมาก ไม่มีขั้ว มีสมบัติต้านทานทางเคมีสูง และไม่ดูดซึมของผสม ซึ่งจัดว่าเป็นสารที่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor barrier) ที่ดี โดยทำการประยุกต์ใช้ในเรื่องของบรรจุภัณฑ์ มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี HDPE ที่มีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง – สูง จะมีสมบัติด้านความทนต่อแรงกระแทกได้ดีมาก ซึ่งมีสูตรโครงสร้างอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงสูตรโครงสร้างอย่างง่ายของ HDPE

สมบัติเฉพาะของ HDPE แต่ละชนิดจะขึ้นกับ 4 ตัวแปร คือ ความหนาแน่น น้ำหนักโมเลกุล (MW) การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD) และสารเติมแต่ง ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเป็นตัวแปรที่สำคัญในการหาคุณสมบัติของ HDPE โดย HDPE จะมีความหนาแน่นมากกว่า 0.940 g/cm^3 ส่วนพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) จะอยู่ในช่วง $0.926 - 0.940$ และโฮโมพอลิเมอร์มีความหนาแน่นสูงสุด มีความเหนียว (Stiffness) และสมบัติป้องกันการซึมผ่าน (Barrier properties) ที่ดีมาก แต่โดยทั่วไปจะให้ค่า Environmental Stress Crack Resistance (ESCR) ที่ต่ำ (ESCR คือ ความสามารถในการต้านทานการแตก ซึ่งมาจาก Mechanical หรือ Chemical stress) โดยปกติความหนาแน่นที่สูงกว่า จะปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล เช่น ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความเหนียว (Stiffness) และความแข็ง (Hardness) และสมบัติทางความร้อน เช่น จุดอ่อนตัว (Heat distortion temperature) และสมบัติป้องกันการซึมผ่าน (Barrier properties) เช่น ก๊าซ หรือไอน้ำ (Water vapor transmission) ส่วนที่มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าจะปรับปรุงสมบัติทางด้านความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) และความสามารถในการต้านทานการแตก (ESCR) [2]

- น้ำหนักโมเลกุล (MW)

ปกติ HDPE จะมี MW อยู่ในช่วง $40,000 - 300,000$ ซึ่งมีค่า Melt Flow Index (MI) อยู่ในช่วง $0.02-100 \text{ g} / 10 \text{ min}$ โดยค่า MW จะมีผลต่อค่า MI เนื่องจากความหนืดที่แตกต่างกันคือ ถ้าค่า MW สูงแล้วความหนืดจะสูง ทำให้ MI ต่ำ และถ้าค่า MW ต่ำแล้วความหนืดจะต่ำ ทำให้ MI สูง ค่า MW ที่สูงกว่า (MI ต่ำกว่า) จะปรับปรุงความทนต่อการหลอมเหลว (Melt strength) ให้ความเหนียว (Toughness) ดีกว่า และความสามารถในการต้านทานการแตก (ESCR) ที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม MW ที่สูงกว่าจะทำให้เวลานำไปใช้งานต้องใช้อุณหภูมิหรือความดันสูงตามด้วย [2]

- การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (MWD)

MWD ของพอลิเอทิลีนจะอยู่ในช่วงแคบ - กว้าง ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการที่ใช้ HDPE ที่มี MWD ที่แคบจะให้การโค้งงอ (Warpage) ที่ต่ำ และค่าความทนต่อแรงกระแทกสูง ส่วน HDPE ที่มี MWD อยู่ในช่วงปานกลาง - กว้าง จะให้ Processability

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ดีกว่าใน Extrusion process สำหรับ HDPE ที่มี MWD อยู่ในช่วงกว้างจะปรับปรุง Melt strength และความต้านทานต่อการขีดข่วนได้ดี [2]

- สารเติมแต่ง

สารเติมแต่งที่ใช้ อาจใช้ Antioxidants เพื่อป้องกันการสลายตัวของพอลิเมอร์ในระหว่างอยู่ในกระบวนการขึ้นรูป และในระหว่างการใช้งาน หรือใช้ UV stabilizer เพื่อป้องกันการสลายตัวเนื่องจากแสงอุลตราไวโอเล็ต นอกจากนี้ยังมีสารเติมแต่งชนิดอื่น เช่น สารตัวเติม (Fillers) เพื่อลดต้นทุนการผลิต สารเสริมแรง (Reinforcement) ปรับปรุงสมบัติเชิงกล สารช่วยให้พอง (Blowing agents) สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants)[2]

2.1.4 กระบวนการ และการประยุกต์ใช้งาน

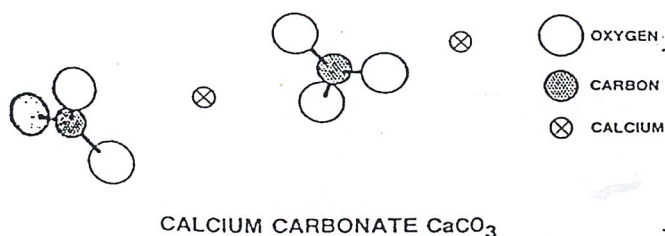
HDPE ถูกนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ภาชนะ บรรจุภัณฑ์ แก้ว โต้ะ ขวด อุปกรณ์ต่าง ๆ ฯลฯ โดยผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การเป่าขึ้นรูป (Blow molding) การหมุนขึ้นรูป (Rotational molding) การรีด (Calendering) การขึ้นรูปรีดร้อน (Thermoforming) ซึ่งปริมาณมากกว่าร้อยละ 40 ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงใช้ในการผลิตขวดพลาสติก และภาชนะบรรจุของอื่นๆ เช่น ภาชนะบรรจุกรด และเบส เคมีภัณฑ์ สารชำระล้าง อีกประมาณร้อยละ 20 ใช้ทำของใช้ในครัว และของเด็กเล่น ส่วนที่เหลือใช้ทำฟิล์มเพื่อห่อหุ้มของ และอาหาร ถุงพลาสติก (ถุงร้อน) หุ้มสายไฟฟ้า ทำสายยาง และอื่นๆ HDPE สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยนำมาผ่านกระบวนการใหม่ เช่น นำมาใช้ทำขวดน้ำดื่ม เป็นต้น [2]

2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)

2.2.1 ความเป็นมา

แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแร่ธาตุที่มีอย่างอุดมสมบูรณ์บนเปลือกโลก แต่ในอุตสาหกรรมมีการนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้เพียง 20% จากทั้งหมด แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารทั่วไปที่ใช้เติมลงในพลาสติก ซึ่งมีหลายชื่อโดยแบ่งตามแหล่งกำเนิด เช่น Marble , Limestone , Coral , Shell , Chalk แบ่งตามโครงสร้างผลึก เช่น Calcite , Aragonite และเมื่อมีแมกนีเซียมคาร์บอเนตอยู่ในโครงสร้างจะเรียก Dolomite ($\text{CaCO}_3 / \text{MgCO}_3$) แคลเซียมคาร์บอเนตถูกใช้เป็นสารตัวเติมอย่างกว้างขวางเนื่องจากความขาว มีการสึกกร่อนน้อย มีหลายขนาดอนุภาค ราคาถูก แคลเซียมคาร์บอเนตมีโครงสร้าง 2 แบบ คือ Alternating calcium cations และ Trigonal planer carbonate anions [3] ดังรูปที่ 2.2

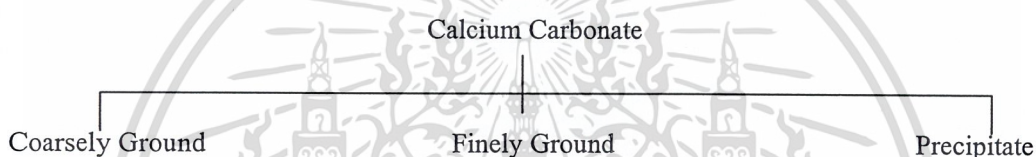
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดง โครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต [3]

2.2.2 การผลิต

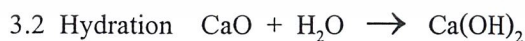
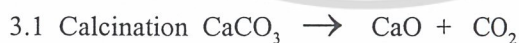
ในทางการค้าได้มีการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต 3 เกรดใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกคือ Coarsely ground , Finely ground และ Precipitates ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดง เกรดของแคลเซียมคาร์บอเนต [3]

การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตมี 3 วิธี คือ

1. Solvey Process (Na_2CO_3)
 2. Sodium Hydroxide Process
- ทั้งสองวิธีนี้จะ ได้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม
3. Carbonation Process เป็นวิธีที่ง่ายและได้แคลเซียมคาร์บอเนตโดยตรงมี 3 ขั้นตอน



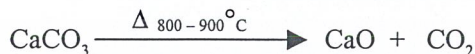
กระบวนการเริ่มจาก Calcination limestone ที่อุณหภูมิประมาณ 900°C จะได้ คาร์บอนไดออกไซด์ และ Quick lime หลังจากนั้นทำการแยกให้บริสุทธิ์ขึ้น Quick lime จะ กลายเป็นสารแขวนลอยของหินปูน (Milk of lime) และ น้ำ ผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสาร แขวนลอยของหินปูนจะได้แคลเซียมคาร์บอเนต โดยแยกขนาดอนุภาคด้วยการกรองโดยมี Rotary Vacuum filter , Pressure filter ช่วยในการกำจัดน้ำ หลังจากนั้นทำให้แห้งโดยใช้ Rotary Tunnel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Spray หรือ Flash dryers ในกระบวนการมักจะได้แคลเซียมคาร์บอเนตในรูปของ Aragonite มีขนาดอนุภาค 0.2 – 2.0 ไมครอน ซึ่งสภาวะของปฏิกิริยาจะมีผลต่อขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคโดยถ้ามีความชื้นมากเกินไปจะทำให้อนุภาคกระจายตัวได้ไม่ดี [3]

2.2.3 คุณสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนตประกอบด้วย แคลเซียม 40 % คาร์บอน 12% ออกซิเจน 48% ในสภาวะอุณหภูมิ 800 – 900°C แคลเซียมคาร์บอเนตจะแตกตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการ

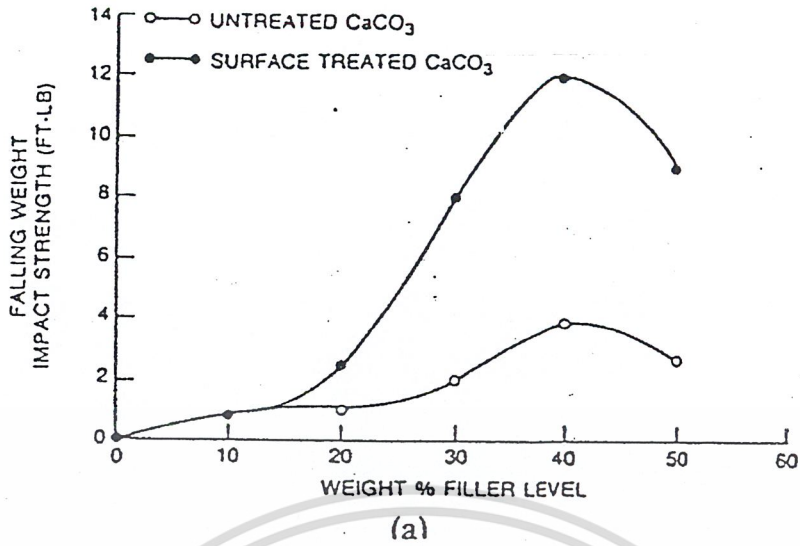


ข้อเสียของแคลเซียมคาร์บอเนตคือสามารถทำปฏิกิริยากับกรดได้ แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถปรับปรุงพื้นผิวได้โดยใช้เมทัลลิกสเตียเรท ซึ่งจะช่วยให้การกระจายตัวในพลาสติก และลดการจับตัวเป็นก้อน สเตียเรทจะไม่ทำปฏิกิริยากับพลาสติกแต่จะช่วยเพิ่ม Physical strength โดยทั่วไปจะใช้ปริมาณสเตียเรท 0.5 – 1.2 % แต่ถ้ามีพื้นที่ผิวสูงเช่นใน Precipitate grade อาจจะใช้ถึง 10 %wt แคลเซียมคาร์บอเนตไม่ได้ถูกจัดว่าเป็นสารที่อันตรายต่อสุขภาพ ไม่ติดไฟ และไม่จุระเบิด แคลเซียมคาร์บอเนตบริสุทธิ์สูงจะสามารถใช้เติมแต่งในอาหาร เช่น Baking soda , Sodium bicarbonate และใช้ในอาหารสัตว์ ปัญหาของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดปัญหาด้านฝุ่น เพราะฉะนั้นจึงควรป้องกันตา เพื่อไม่ให้สัมผัสฝุ่นแคลเซียมคาร์บอเนต [3]

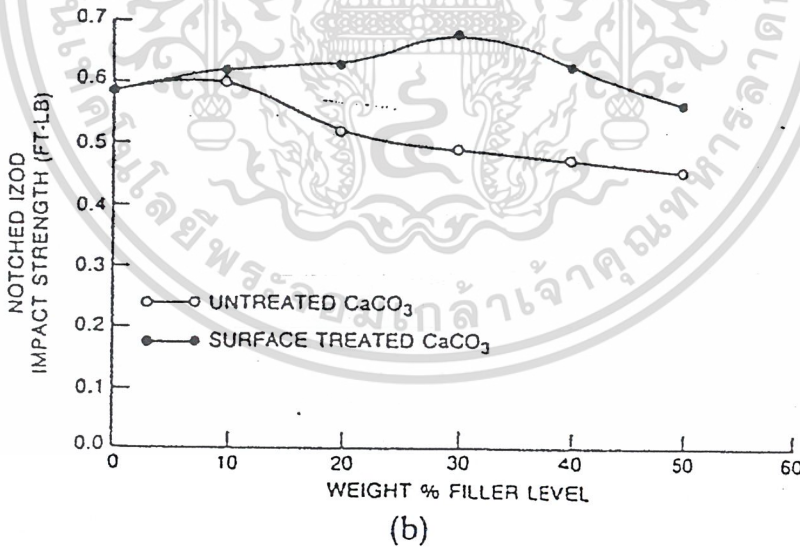
2.2.4 การประยุกต์ใช้งาน

แคลเซียมคาร์บอเนตนิยมใช้กับพอลิเอทิลีน และพอลิพรอพิลีนเพื่อลดต้นทุน Ground calcium carbonate จะนิยมใช้เติมลงในพอลิเอทิลีน ซึ่งสมบัติเชิงกลบางประการจะลดลง เช่น ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) [3] การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในพอลิพรอพิลีนในช่วง 20-40 % โดยน้ำหนัก จะช่วยเพิ่มความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) แต่ลดสมบัติการโค้งงอ (Flexural properties) [3] โดยแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว และจำพวก Finely grade จะมีการกระจายตัวในพอลิพรอพิลีนได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และ Coarsely grade ซึ่งจะมีผลต่อความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) [3] ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Falling weight impact strength กับ ปริมาณสารตัวเติม [3]



รูปที่ 2.4b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Notched izod impact strength กับ ปริมาณสารตัวเติม [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการแปรรูปพลาสติก

การแปรรูปพลาสติกจะเป็นกระบวนการที่ทำให้เทอร์โมพลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากเม็ดพลาสติกไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ เช่น แท่งเหลี่ยม ท่อกลม ท่อ กรอบ และแผ่น เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในกระบวนการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกอาจจะเกี่ยวข้องกับการตัด การต่อ การยึดติด และการขึ้นรูป ซึ่งจะสามารถผลิต ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีรูปร่างซับซ้อน ตัวอย่างของกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมมีหลายแบบเช่น การอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ฯลฯ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้เพียง 2 กระบวนการ ดังนี้

2.3.1 การอัดรีด (Extrusion)

การอัดรีดเป็นกระบวนการเบื้องต้นที่ใช้ในการแปรสภาพพอลิเมอร์ เช่น อัดรีดแล้วนำมาบิดเป็นเม็ดหรือผ่านแบบพิมพ์ให้ได้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ ข้อดีของการอัดรีดคือสามารถทำได้ในปริมาณมากและต่อเนื่อง แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

การอัดรีดจะใช้เครื่องอัดรีดพลาสติก โดยจะรับเม็ดพลาสติกจากกรวยป้อนเม็ด และจะส่งผ่านกระบอกสูบโดยเกลียวหนอน เม็ดพลาสติกจะได้รับความร้อนจากผนังของกระบอกสูบ และจากแรงเสียดทานของเกลียวหนอนจนทำให้พลาสติกเกิดการหลอมตัว พลาสติกหลอมจะถูกอัดโดยฟันเกลียวหนอนผ่านไปยังหัวอัดรีดรูปร่างต่างๆ ให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีลักษณะเป็นกรอบ ท่อ แผ่น แท่งกลม หรือมีรูปร่างที่ซับซ้อนแบบต่างๆ เครื่องอัดรีดพลาสติกจะทำงานอย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก ดังนั้นความหนืดของพลาสติกหลอมจะต้องสูงเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการยุบตัวของรูปร่างพลาสติก หรือไม่สามารควบคุมการเสียดทานของพลาสติก หลังจากผ่านหัวอัดรีดในกระบวนการอัดรีด พลาสติกหลอมที่ผ่านหัวอัดรีดจะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว โดยใช้น้ำหล่อหรือทำให้เย็นอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง ความหนืดของพลาสติกจะสูงขึ้นเมื่อใช้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น อัตราการเย็นตัวของพลาสติกสามารถวัดได้จากองศาของการตกผลึกของพอลิเมอร์ ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติก [4]

2.3.2 การฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

การฉีดขึ้นรูปเป็นเทคโนโลยีการแปรรูปที่สำคัญ และใช้กันอย่างกว้างขวาง มีความสะดวกในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก ข้อดีของการฉีดขึ้นรูป เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการแปรรูปชนิดอื่นๆ ก็คือความสามารถในการผลิตชิ้นงานพลาสติกที่มีขนาดต่างๆ ไม่ว่าจะมิจนขนาดเล็กหรือใหญ่ โดยใช้เครื่องฉีดพลาสติกที่สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ และมีความสะดวกในการ

ป้อนวัตถุดิบ (เม็ดพลาสติก) จึงทำให้กระบวนการฉีดขึ้นรูปสามารถทำการผลิตได้ในอัตราสูง ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การฉีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดพลาสติกหลอมในปริมาณที่กำหนด . จากนั้นจะทำการฉีดพลาสติกหลอมเข้าไปในแม่พิมพ์ เพื่อทำให้เกิดเป็นรูปร่างของชิ้นงานตามที่ต้องการ หลังจากการหล่อเย็นชิ้นงานแล้ว แม่พิมพ์จะเปิดออก และชิ้นงานจะถูกกระทุ้งออกมา จากนั้นแม่พิมพ์จะปิดอีกครั้งหนึ่งเพื่อเตรียมเริ่มวัฏจักรใหม่ของการฉีดขึ้นรูปต่อไป

เครื่องฉีดพลาสติกจะใช้เกลียวหนอนในการควบคุมการหลอมพลาสติกก่อนที่จะทำการฉีดเข้าไปยังช่องว่างของแม่พิมพ์ เกลียวหนอนจะหมุนเพื่อลำเลียง และหลอมพลาสติกที่ถูกส่งมาจากกรวยป้อนเม็ดพลาสติก พลาสติกหลอมจะถูกสะสมอยู่ด้านหลังของกระบอกฉีด จากนั้นเกลียวหนอนจะเคลื่อนที่ถอยหลังจนกระทั่งได้น้ำหนักในการฉีดพลาสติกหลอมตามต้องการ และการฉีดพลาสติกหลอมจะเริ่มขึ้นในขณะที่เกลียวหนอนเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

พลาสติกหลอมจะถูกฉีดผ่านหัวฉีดที่ประกอบติดกับตอนปลายของปลายของกระบอกฉีด ผ่านเข้าไปยังช่องทางเข้าของแม่พิมพ์ แม่พิมพ์จะยึดติดอยู่บนแท่นยึดแม่พิมพ์ซึ่งด้านหนึ่งจะถูกยึดอยู่กับที่ ในขณะที่อีกด้านหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระตามเพลลา ทำให้แม่พิมพ์สามารถปิดและเปิดออกได้

การหล่อเย็นแม่พิมพ์จะเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากพอลิเมอร์หลอมผ่านผนังของแม่พิมพ์ที่เย็น ซึ่งจะทำให้พลาสติกเย็นตัว และแข็งตัวถึงจุดที่สามารถจะกระทุ้งออกจากแม่พิมพ์ได้ การเย็นตัวของพลาสติกที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดการจลน์ โครงสร้างในโมเลกุลเกิดขึ้นแตกต่างกัน [4]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

V.P.Chacko และ F.E.Karasz [5] ทำการศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเอทิลีนที่ผสมด้วย CaCO_3 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทำให้ค่า Yield stress และการยืด ณ จุดขาดลดลง แต่หลังจากเมื่อปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 ด้วย Isopropyl triisostearyl titanate พบว่าปรับปรุงสมบัติทางด้านการยืด ณ จุดขาด และค่า Yield stress เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเอทิลีน [5]

Sample	Stress %		Elongation %	
	U	T	U	T
LPE	13.3		9	
+2%CaCO ₃	22.6	23.5	9	23
+4%CaCO ₃	22.0	22.2	7	15
+8%CaCO ₃	14.7	19.8	4	15
+19%CaCO ₃	12.68		3	3
MPE	12.9		530	
+2%CaCO ₃	8.6	12.3	140	290
+4%CaCO ₃	7.5	16.8	92	394
+8%CaCO ₃	7.0	13.3	100	300
+19%CaCO ₃	18.2	13.0		42
HPE	28.1		820	
+2%CaCO ₃	21.2		595	
+19%CaCO ₃	13.7	12.1	20	20
PE/ 38%CaCO ₃	12.6		410	

*U = untreated CaCO₃, T = CaCO₃ + 0.5%KRTTS

M.M.Tariq , J.C.Pierre , F.Meroslav และ D.Alain [6] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยนำมาผสมด้วย Carbon black พบว่าให้ค่าความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Toughness) ที่ดี หลังจากเมื่อปรับปรุงพื้นผิวของ Carbon black ด้วย Silane coupling agents ทำให้ลดแรงกระทำระหว่างอนุภาคของพอลิเมอร์กับสารตัวเติม อีกทั้งยังปรับปรุงการกระจายตัวของสารตัวเติม ดังแสดงในตารางที่ 2.2 – 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่ผสมด้วย Carbon black [6]

Weight Percent Carbon Black	Carbom Black		
	Modulus (MPa)	Yield Stress (MPa)	Break Elongation (%)
0	787	20.3	823
5	958	21.5	469
10	1018	21.8	352
15	1044	22.6	543
20	1324	24.6	375
25	1447	25.7	321
30	1501	27.3	221
35	1596	28.1	309
40	2030	30.4	154

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่ผสมด้วย Carbon black หลังจากปรับปรุงพื้นผิวด้วย γ - Methacryloxy - propyltrimethoxy silane [6]

Weight Percent Carbon Black	Carbom Black		
	Modulus (MPa)	Yield Stress (MPa)	Break Elongation (%)
0	787	20.3	823
5	954	21.2	396
10	990	21.6	311
15	1032	22.7	59
20	1226	24.7	114
25	1469	26.3	112
30	1414	27.7	34
35	1465	29.2	89
40	1760	30.8	59

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่ผสมด้วย Carbon black หลังจากปรับปรุงพื้นผิวด้วย γ - Aminopropyl - triethoxy silane [6]

Weight Percent Carbon Black	Carbon Black		
	Modulus (MPa)	Yield Stress (MPa)	Break Elongation (%)
0	787	20.7	823
5	1039	21.7	578
10	1057	23.0	265
15	1199	24.2	303
20	1321	25.5	388
25	1386	26.9	302
30	1412	28.3	236
35	1427	30.6	153
40	1592	31.8	

S.N. Maiti และ R. Jeyakumar [7] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิโอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยนำมาผสมด้วย CaCO_3 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจะให้ค่า Yield stress , Yield strain , Break strain และความทนต่อแรงกระแทก ลดลง ขณะที่ค่า Breaking strength และมอดูลัส เพิ่มขึ้น แต่หลังจากเมื่อนำสารตัวเติมมาปรับปรุงพื้นผิวด้วย Neopentyl (diallyl) neodecanoyl titanate พบว่า จะลดแรงยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม ดังแสดงในตารางที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติความทนต่อแรงดึงของ HDPE / CaCO₃ คอมพอสิต [7]

Sample composition	Yield stress $\sigma_y \times 10^{-3}$ (Psi)		Yield Elongation ϵ_y (%)		Breaking strength $\sigma_b \times 10^{-3}$ (Psi)		Breaking Elongation ϵ_b (%)		Elastic Modulus $E \times 10^{-4}$ (Psi)	
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
HDPE (unfilled)	2.9	—	9.0	—	1.4	—	426	—	8.6	—
HDPE + CaCO ₃ , 5%	2.9	2.6	9.0	8.0	1.5	1.3	225	240	8.7	8.5
HDPE + CaCO ₃ , 10%	2.8	2.5	9.0	7.0	1.3	1.2	93	157	9.4	8.2
HDPE + CaCO ₃ , 20%	2.6	2.3	7.8	8.0	1.0	0.9	35	44	10.2	8.3
HDPE + CaCO ₃ , 35%	2.4	2.2	5.0	5.2	2.4	1.9	7.0	8.4	11.0	9.4
HDPE + CaCO ₃ , 50%	2.2	1.9	2.0	4.4	2.2	1.7	2.4	4.0	11.2	9.5
HDPE + CaCO ₃ , 60%	1.9	1.7	0.9	2.0	1.9	1.7	0.9	2.0	11.5	9.7

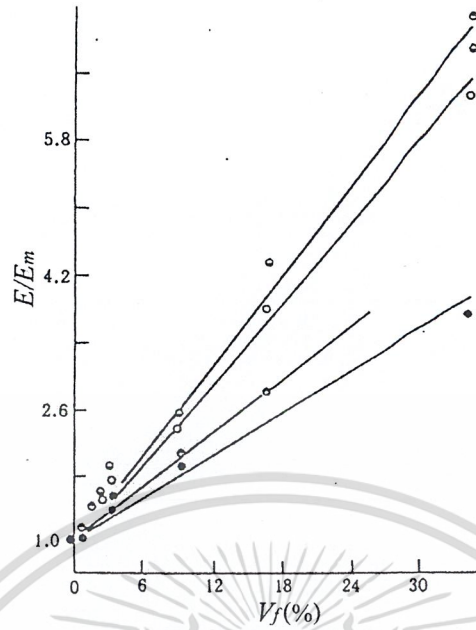
Column (a): values with untreated CaCO₃; Column (b): values with surface treated CaCO₃.

Q.Fu และ G.Wang [8] นำ HDPE มาผสมด้วย CaCO₃ ซึ่งถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วย Phosphate พบว่า ที่อัตราส่วนของ HDPE ต่อ CaCO₃ (80/20) จะให้ค่าความเหนียว และความทนต่อแรงกระแทก มากกว่า HDPE ที่ไม่ได้ผสมด้วย CaCO₃

C.D.Han, C.Sandford และ H.J.Yoo [9] ทำการศึกษาสมบัติของพอลิโพรพิลีน (HDPE, PP) ที่ผสมด้วย CaCO₃, Talc fiber glass ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย Titanate coupling agents จะทำให้ค่ามอดูลัส และค่าความแข็งแรงดึงลดลง ขณะที่ค่าการยืด ณ จุดขาด และค่าความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

X. Xi และ G. Xiaoyi [10] ทำการศึกษาระยะการกระจายตัวของ mica ในพอลิเอทิลีน พบว่า สารตัวเติมที่มีการกระจายตัวที่ดีกว่าจะให้ค่ามอดูลัสที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.5 - 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

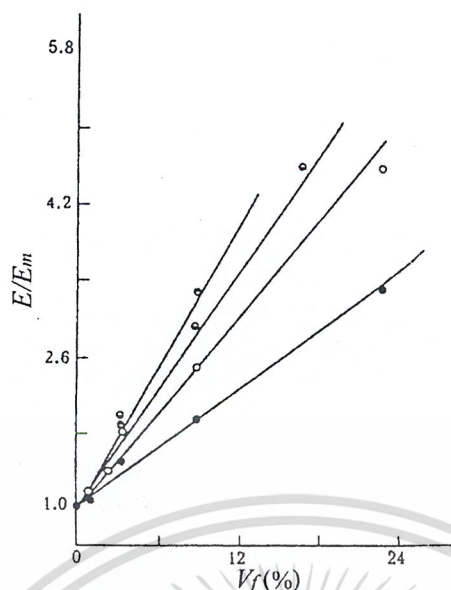


Reduced modulus of mica-filled HDPE vs V_f

- untreated mica filled
- mica treated at 60 w for 8 min
- mica treated at 100 w for 8 min
- mica treated at 160 w for 8 min

รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของ HDPE ที่ผสมด้วย mica (E_m) และ LDPE (E) กับ ค่าสัดส่วน โดยปริมาตร (V_f) [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Reduced modulus of mica-filled LDPE vs V_f

- untreated mica filled
- mica treated at 60 w for 8 min
- mica treated at 100 w for 8 min
- mica treated at 160 w for 8 min

รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของ LDPE ที่ผสมด้วย mica (E_m) และ LDPE (E) กับ ค่าสัดส่วน โดยปริมาตร V_f [10].

B.Pukanszky และ F.Tudos [11] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่ผสมด้วย CaCO_3 ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย กรดสเตียริก พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณกรดสเตียริก จะทำให้ให้ค่า Yield stress ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่ผสมด้วย CaCO_3 [11]

Surface coverage (%)	Treatment type	Yield stress (MPa)
0	Stearic acid	58.6
10	Stearic acid	50.9
25	Stearic acid	47.0
50	Stearic acid	45.2
75	Stearic acid	42.9
100	Stearic acid	42.1

D.E.Bissaad และ J.Beniska [12] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ พอลิพรอพิลีน ที่ผสมด้วย CaCO_3 ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย maleic anhydride พบว่าที่ maleic anhydride 2% และ CaCO_3 20% จะปรับปรุงสมบัติเชิงกล และให้ความสามารถในการแปรรูปที่ดี

A. D.Kupfer [13] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ พอลิพรอพิลีน ที่ผสมด้วย CaCO_3 พบว่าค่ามอดูลัส และค่าความทนต่อแรงกระแทก เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความแข็งแรงดึง ลดลง

A.M.Riley , C.D.Paynter , P.M.McGenity และ J.M.Adam [14] นำพอลิพรอพิลีนมาผสมด้วย mineral (Talc, mica, clay, CaCO_3) ทำให้ค่ามอดูลัส และค่าความทนต่อแรงกระแทก เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงค่า Impact strength ของ พอลิพรอพิลีน [14]

Sample	Charpy impact strength (kJ/m^2)	FW impact energy (J)
1CBR	11.50 ± 1.64	1.22 ± 0.10
1CBP	12.48 ± 0.47	1.10 ± 0.14
2CBR	11.99 ± 2.88	1.66 ± 0.56
2CBP	18.82 ± 3.63	8.59 ± 1.99
3CBR	16.76 ± 4.85	5.21 ± 2.36
3CBP	19.92 ± 4.63	4.62 ± 2.86

*1= Unfilled PP (homopolymer) , 2 = 30% Polcarb in PP , 3 = 30% Stearate coated

Polcarb in PP , CBR = compounded on brabender , CBP = compounded on Baker-Perkins

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L.S.Chen ,Y.W. Mai และ B.Cotterell [15] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่ผสมด้วย mineral เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทำให้ค่า Stiffness เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ CaCO_3 10% ขึ้นไป จะทำให้ลดต้นทุนการผลิต และไม่ทำให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเปลี่ยนแปลงมากนัก ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงค่า Young 's Modulus (E) และ Fracture Energy (G_c) ของ พอลิพรอพิลีนที่ผสม และไม่ได้ผสมด้วยสารตัวเติม ที่อุณหภูมิห้อง [15]

Material	E (GPa)	G_c (kJ/m ²)
PP homopolymer	1.40	2.87
PP homopolymer + omyacarb	1.78	3.13
PP homopolymer + winnofils	1.66	2.56
PP copolymer	1.12	3.86
PP copolymer + omyacarb	1.30	4.08
PP copolymer + winnofils	1.23	3.38

R.Kalinski , A.Galeski และ M.Kryszewski [16] ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยนำมาผสมด้วย Chalk และ liquid modifiers พบว่าเมื่อใช้ Chalk ปริมาณ 50% พร้อมกับปรับปรุงพื้นผิวด้วย Ethylene oxide ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงที่สูงดังแสดงในตารางที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิต [16]

Composite (7:3)	Modulus (N/m ²)×10 ⁶	Tensile strength (N/m ²)×10 ⁶	Ultimate elongation (%)
LDPE+chalk	125.5 ± 7.0	8.2 ± 0.1	105 ± 5
LDPE+chalk + glycerrin	94.0 ± 2.0	8.4 ± 0.1	130 ± 30
LDPE+chalk + ethylene glycol	97.0 ± 2.0	8.6 ± 0.2	90 ± 10
LDPE+chalk + OEO	103.0 ± 3.0	8.6 ± 0.1	250 ± 35

H.P.Schreiber , J.M.Viau , A.Fetoui และ Z.Deng [17] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) โดยนำมาผสมด้วย CaCO₃ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น และค่าการยืด ๓ จุดขาดลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่ผสม และไม่ได้ผสมด้วย CaCO₃ [17]

Compound	Modulus (E) Mpa	Elongation		
		E/E ₀	E _r (%)	E _r / (E _r) ⁰
LLDPE-control	270 (±12)	1.00	360 (±15)	1.00
+5%CaCO ₃	305	1.13	263	0.73
+8%CaCO ₃	335	1.24	216	0.60
+12%CaCO ₃	360	1.33	158	0.44
+20%CaCO ₃	370	1.37	75	0.21
+30%CaCO ₃	385	1.42	29	0.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 แสดงสรุปสมบัติเชิงกลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [5-17]

หมายเลขเอกสารอ้างอิง	พอลิเมอร์	สารตัวเติม (เพิ่ม)	สารปรับปรุงพื้นผิว /วิธีการที่ใช้	A	B	C	D	E	F	G
5	PE	CaCO ₃	Isopropyl triisostearyl titanate	-	-	↓	-	↓	-	-
6	HDPE	CaCO ₃	Silane coupling agents	-	-	-	-	-	↑	↑
7	HDPE	CaCO ₃	Neopentyl(diallyl) neodecanoyl titanate	↓	-	↑	-	-	-	-
8	HDPE	CaCO ₃	Phosphate	-	-	-	↑	-	-	↑
9	HDPE/PP	CaCO ₃	Coupling agents	↓	↓	↑	↑	-	-	-
10	HDPE/LDPE	Mica	/Plasma	↑	-	-	-	-	-	-
11	PP	CaCO ₃	Stearic acid	-	-	-	-	↓	-	-
12	PP	CaCO ₃	Maleic anhydride	↓	↓	-	↑	-	-	-
13	PP	CaCO ₃	-	↑	↓	-	↑	-	-	-
14	PP	Talc.	-	↑	-	-	↑	-	-	-
15	PP	Mineral	-	-	-	-	-	-	-	↑
16	LDPE	Chalk	Ethylene oxide	-	-	-	↑	-	-	-
17	LLDPE	CaCO ₃	-	↑	-	↓	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ :

A-G คือ คุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่ศึกษาเมื่อมีสารเติมแต่งผสมอยู่ ซึ่งตัวแปรดังกล่าวมีความหมายดังต่อไปนี้

- Modulus = A
- Tensile Strength = B
- Break Elongation = C
- Impact Strength = D
- Yield Stress = E
- Hardness = F
- Stiffness = G



-

- = สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเติมแต่งเพิ่มขึ้น
- = สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ลดลงเมื่อปริมาณสารเติมแต่งเพิ่มขึ้น
- = สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ทดสอบ และสารตัวเติมที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี

ในงานวิจัยนี้สารเคมีที่ใช้มีด้วยกัน 2 ชนิดคือ HDPE และ CaCO_3 โดยสารเคมีได้รับการอนุเคราะห์จากบริษัทไทยพอลิเอทิลีนจำกัด และบริษัทสุรินทร์ออยล์ เคมีคอล จำกัด ตามลำดับดังนี้

1. HDPE จากบริษัทไทยพอลิเอทิลีน จำกัด (TPE)
 - 1.1 HDPE1 (MW = 192877 , MWD = 11.67) H 5818 J
 - 1.2 HDPE2 (MW = 279088 , MWD = 11.22) H 6205 JU
 - 1.3 HDPE3 (MW = 265873 , MWD = 8.64) H 6105 JU
 สมบัติบางประการของ HDPE แสดงดังตารางที่ 3.1

2. CaCO_3 จากบริษัทสุรินทร์ออยล์ เคมีคอล จำกัด
 - 2.1 CaCO_3 ขนาดอนุภาค 0.5 ไมครอน เกรดเคลือบด้วยกรดสเตียริก (Hydrocarb 95T)
 - 2.2 CaCO_3 ขนาดอนุภาค 5 ไมครอน เกรดไม่ได้เคลือบ (Omyacarb 5)
 - 2.3 CaCO_3 ขนาดอนุภาค 10 ไมครอน เกรดไม่ได้เคลือบ (Omyacarb 10)
 สมบัติบางประการของ CaCO_3 แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติบางประการของ HDPE [18]

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	งานฉีดแบบ		
			H6205 JU	H6105 JU	H5818 J
ครรชนีการไหล	กรัม/10นาที	ASTM D1238	5.5	5.5	18
ความหนาแน่น	กรัม/ลบ.ซม.	ASTM D1505	0.962	0.961	0.962
ความต้านทานแรงดึงยืด	กก./ตร.ซม.	ASTM D638	310	310	280
ความต้านทานแรงดึงขาด	กก./ตร.ซม.	ASTM D638	220	220	200
ความยืดที่จุดขาด	%	ASTM D638	>500	>500	100
ความสามารถในการทรงรูป	กก./ตร.ซม.	ASTM D747	11000	11000	10000
ความต้านแรงกระแทก	กก./ตร.ซม.	ASTM D256	5	5	2
ความแข็ง Shore D	-	ASTM D2240	67	67	65
ความต้านแรงเค้นจากสิ่งแวดล้อม	F ₅₀ ซม.	ASTM D1693	-	-	-
จุดหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	ASTM D2117	133	133	131
จุดอ่อนตัว	องศาเซลเซียส	ASTM D1525	127	127	122
จุดเปราะ	องศาเซลเซียส	ASTM D746	<-80	<-80	<-80
ความต้านทานแรงกระแทกของฟิล์ม (ฟิล์มหนา 12 ไมครอน)	กรัม	ASTM D1709	-	-	-

* สมบัติที่แสดงดังตารางไม่ได้มีการทดสอบแต่ได้ข้อมูลมาจากบริษัทไทยพอลิเอทิลีน [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติบางประการของ CaCO_3 [19]

เกรด CaCO_3	Specific Gravity	Mean Particle size
0.5 μm (coated) *	-	-
5 μm (uncoated)	2.7	3-5
10 μm (uncoated)	2.7	9-11

*เนื่องจากเป็นข้อมูลของทางบริษัทจึงไม่สามารถเปิดเผยได้

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder , Axon ab. Plasma skiner รุ่น BX-18 ; Intro Engineering)
2. เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine , Cosmo รุ่น TTI 220/80 HITEC ; Welltec Industrial Equipment)
3. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester , LLOYD รุ่น LR 30 K ; LLOYD Instrument)
4. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC -50 ; Shimadzu)
5. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder , Bosco รุ่น A600 ; Bosco Engineering)
6. เครื่องวัดแรงกระแทก (Izod impact tester , Yasuda รุ่น 7697 ; Yasuda Seiki Seisakusho)
7. เครื่องวัดความแข็ง (Hardness tester , Shore D , Yasuda รุ่น 7689 ; Matsuzawa DXT)
8. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM รุ่น JSM 5200 ; JEOL)
9. เตาเผา (Furnace)
10. Polarised Microscope

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารตัวอย่าง

ตัวอย่างที่เตรียมเพื่อใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 12 ตัวอย่าง ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของสารตัวอย่าง

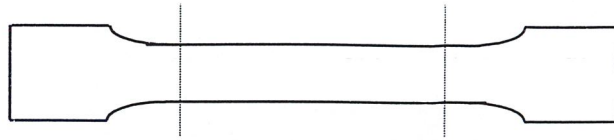
ตัวอย่าง	ส่วนประกอบของสารตัวอย่าง
1	HDPE1
2	HDPE2
3	HDPE3
4	HDPE2 + 5%wt CaCO ₃ 5 μm
5	HDPE2 + 10%wt CaCO ₃ 5 μm
6	HDPE2 + 15%wt CaCO ₃ 5 μm
7	HDPE2 + 20%wt CaCO ₃ 5 μm
8	HDPE2 + 25%wt CaCO ₃ 5 μm
9	HDPE2 + 30%wt CaCO ₃ 5 μm
10	HDPE2 + 20%wt CaCO ₃ 0.5 μm *(uncoated)
11	HDPE2 + 20%wt CaCO ₃ 0.5 μm (coated)
12	HDPE2 + 20%wt CaCO ₃ 10 μm

* CaCO₃ เกรด uncoated เตรียมจากการเผาไล่กรดสเตียริกออกจาก CaCO₃ 0.5 μm เกรดเคลือบด้วยกรดสเตียริกที่อุณหภูมิ 200 °C

วิธีการเตรียมตัวอย่างมีรายละเอียดดังนี้

- นำส่วนประกอบแต่ละชนิดผ่านเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder , Axon ab. Plasma skiner รุ่น BX-18 ; Intro Engineering) ที่อุณหภูมิของหัว die 180 °C ความเร็ว 35 รอบต่อนาที เมื่อสารผสมถูกอัดรีดออกมาจะถูกปล่อยให้เย็นโดยธรรมชาติ (ไม่มีกรใช้น้ำในการเย็นตัวของสารผสม)
- นำไปบดในเครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder , Bosco รุ่น A600 ; Bosco Engineering)
- แบ่งเม็ดพลาสติกที่บดได้นำไปฉีดขึ้นรูป dumbell และ notch izod ดังรูปที่ 3.1 ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine , Cosmo รุ่น TTI 220/80 HITEC ; Welltec Industrial Equipment) ที่อุณหภูมิ 220 °C เป็นชิ้นงานในการทดสอบขั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Guage length 70 mm

รูปที่ 3.1 a) ตัวอย่าง dumbbell



รูปที่ 3.1 b) ตัวอย่าง notch izod

3.3.2 การตรวจสอบตัวอย่าง

3.3.2.1 การตรวจสอบสารเคมีที่ใช้

- a) **HDPE** : หา MW และ MWD โดยส่งไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromatrography (GPC) ที่กองฟิสิกส์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
- b) **CaCO₃** : ดูรูปร่างโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้เครื่อง SEM กำลังขยาย 3000 เท่า

3.3.2.2 การตรวจสอบสารประกอบที่ผลิตได้

- a) **หาปริมาณที่แน่นอนของ CaCO₃ ที่มีอยู่ในสารประกอบ** : โดยนำครุชชีเบิลมาอบที่อุณหภูมิ 600 °C ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักครุชชีเบิล ใช้เทคนิค 4 ตำแหน่ง นำสารตัวอย่างมาใส่ในปริมาณ 1/4 ของครุชชีเบิลแล้วชั่งน้ำหนักก่อนเผาใช้เทคนิค 4 ตำแหน่งเช่นเดียวกันตลอด หลังจากนั้นนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจนเหลือแต่ CaCO₃ แล้วนำมาทิ้งไว้ให้เย็น ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณหาปริมาณ CaCO₃
- b) **ศึกษาสมบัติทางความร้อน** : โดยนำสารตัวอย่างที่ผลิตได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยใช้น้ำหนักของสารตัวอย่างประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้นคือ 50 °C อัตราการให้ความร้อนเป็น 10 °C / min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 180 °C และทำให้เย็นโดยลดอุณหภูมิที่อัตรา 10 °C / min จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น นำข้อมูลจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนของการหลอมตัว และ เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D3418 [20]

- c) **ศึกษาลักษณะผลึก** : โดยนำสารตัวอย่างที่เตรียมได้มาตัดเป็นชิ้นบางแล้วนำไปหลอมบนแผ่นแก้วที่อุณหภูมิ 180°C โดยใช้แทนให้ความร้อนเมื่อสารตัวอย่างหลอมหมดแล้วประกอบด้วยฟิล์มแก้วหลังจากนั้นนำไปมาคบนสารตัวอย่างเพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มบางที่สุด ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปส่องด้วยเครื่อง Polarised Microscope ที่กำลังขยาย 400 เท่า ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D2117 [21]
- d) **ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ในสารตัวอย่าง** : โดยนำสารตัวอย่างที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปเป็นคัมเบลล์ มาแช่ในไนโตรเจนเหลวแล้วทุบให้หักขณะที่ยังเย็นตัวอยู่ หลังจากนั้นตัดบางๆ นำพื้นผิวตรงรอยแตกหักมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 750 เท่า

3.3.3 การทดสอบสมบัติของสารตัวอย่าง

- a) **สมบัติความทนต่อแรงดึง** : นำตัวอย่างที่เตรียมเป็นคัมเบลล์มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester, LLOYD รุ่น LR 30 K; LLOYD Instrument) ที่ความเร็วการดึง 120 mm./min ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) เป็น 70 mm ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D638 [22] เพื่อหาค่า Yield Strength Young 's Modulus at 1 % Elongation และ Elongation at Break
- b) **สมบัติความทนต่อแรงกระแทก** : นำตัวอย่างที่เตรียมเป็น Notch izod มาทดสอบด้วยเครื่องวัดแรงกระแทก (Izod impact tester, Yasuda รุ่น 7697; Yasuda Seiki Seisakusho) จะได้ค่าความทนต่อแรงกระแทกในหน่วย kJ/m^2 ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D256 [23]
- c) **สมบัติความแข็ง** : นำตัวอย่างที่เตรียมเป็นคัมเบลล์มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Dead Load ชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐานทดสอบ ASTM E6 [24] จะได้ค่าความแข็งโดยตรงจากเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองสามารถแบ่งได้ 9 ส่วนดังต่อไปนี้

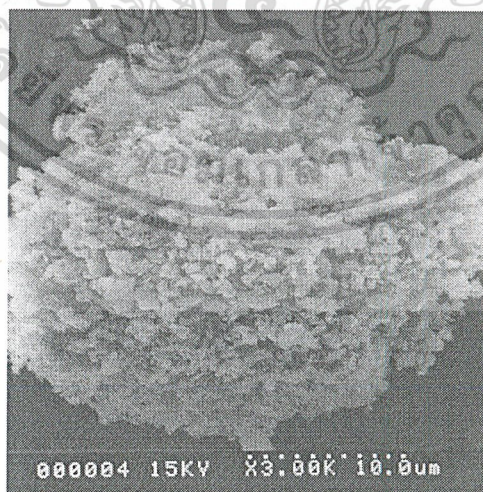
4.1.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า MW และ MWD ของ HDPE โดยใช้ GPC ที่กองฟิสิกส์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ยังไม่ได้ผลการวิเคราะห์ เนื่องจาก เครื่องมือขัดข้องจึงไม่สามารถนำมาเสนอในโครงการ

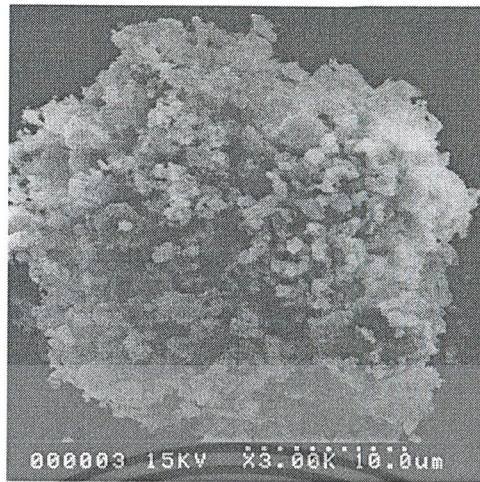
4.1.2 ผลการวิเคราะห์รูปร่างของ CaCO_3 ด้วยเครื่อง SEM

จากหัวข้อ 3.3.2.1b สามารถวิเคราะห์ รูปร่างของ CaCO_3 ด้วยเครื่อง SEM และใช้กำลังขยาย 3000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่ารูปร่างของ CaCO_3 มีลักษณะคล้ายทรงกลมแต่มีเหลี่ยมและมุม CaCO_3 จะอยู่รวมกันเป็นก้อนมากกว่าเป็นอนุภาคเดี่ยว แต่เมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นจะรวมตัวกันเป็นก้อนน้อยลง จากรูปที่ 4.1b - 4.1c CaCO_3 ขนาดอนุภาค 0.5 μm จะอยู่เป็นกลุ่มก้อนใหญ่มากกว่าขนาดอนุภาค 5 และ 10 μm ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับรูป 4.1a กับรูป 4.1b พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก

รูปที่ 4.1 แสดงรูปร่างกลุ่มก้อนของ CaCO_3 เกรดต่างๆ



รูปที่ 4.1a) แสดงรูปร่างกลุ่มก้อนของ CaCO_3 ขนาด 0.5 μm เกรด เคลือบด้วยกรดสเตียริก
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมวิทยาศาสตร์บริการ หากท่านใดมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อกรมวิทยาศาสตร์บริการ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ

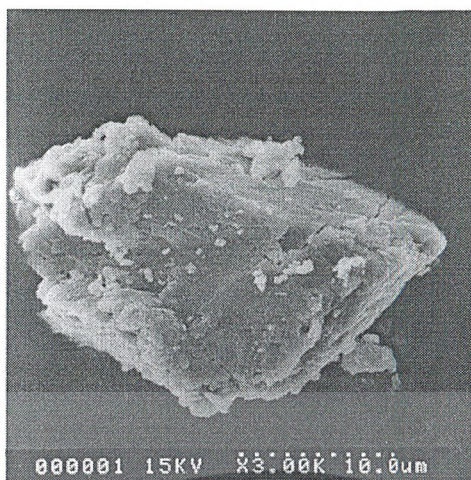


รูปที่ 4.1b) แสดงรูปร่างกลุ่มก้อนของ CaCO_3 ขนาด $0.5 \mu\text{m}$ เกรดไม่ได้เคลือบด้วย
กรดสเดยริกกำลังขยาย 3000 เท่า



รูปที่ 4.1c) แสดงรูปร่างกลุ่มก้อนของ CaCO_3 ขนาด $5 \mu\text{m}$ เกรดไม่ได้เคลือบผิว
กำลังขยาย 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1d) แสดงรูปร่างกลุ่มก้อนของ CaCO_3 ขนาด $10 \mu\text{m}$ เกรดไม่ได้เคลือบผิว
กำลังขยาย 3000 เท่า

4.1.3 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ด้วยเตาเผา

เมื่อทำการผสมสารประกอบเพื่อเตรียมสารตัวอย่างให้ได้สัดส่วนตามที่ กำหนดแล้วจำเป็น
จะต้องมีการตรวจสอบหาปริมาณที่มีอยู่จริงโดยใช้วิธีการดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.2a แล้วนำ
น้ำหนักที่ได้มาคำนวณดังนี้

$$\frac{[\text{น้ำหนักก่อนเผา (g)} - \text{น้ำหนักหลังเผา (g)}]}{\text{น้ำหนักก่อนเผา (g)}} \times 100 = \text{ปริมาณของ } \text{CaCO}_3 \text{ (\%wt)}$$

ผลการวิเคราะห์ได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3

สาร	ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 (%wt)
HDPE1	-
HDPE2	-
HDPE3	-
HDPE2 + 5%wt CaCO_3 5 μm	4.33
HDPE2 + 10%wt CaCO_3 5 μm	9.27
HDPE2 + 15%wt CaCO_3 5 μm	14.16
HDPE2 + 20%wt CaCO_3 5 μm	19.11
HDPE2 + 25%wt CaCO_3 5 μm	25.09
HDPE2 + 30%wt CaCO_3 5 μm	29.73
HDPE2 + 20%wt CaCO_3 0.5 μm	18.36
HDPE2 + 20%wt CaCO_3 0.5 μm (coated)	17.49 / 1.31*
HDPE2 + 20%wt CaCO_3 10 μm	21.15

*ปริมาณกรดเตตระไฮดรอกซีที่เคลือบ CaCO_3

จากตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณของ CaCO_3 ที่มีอยู่จริงในสารประกอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดได้ ซึ่งมีค่ามากกว่าที่กำหนดอย่างมาก คือ +1.15% และน้อยกว่าที่กำหนดไม่เกิน -2.51%

4.1.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC

เมื่อเตรียมสารตัวอย่างโดยใช้วิธีการดั่งที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.2.2b แล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเพื่อศึกษาว่า CaCO_3 มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของ HDPE อย่างไร จะได้ค่า T_m , T_c , heat of fusion (ΔH_f) และ heat of recrystallisation (ΔH_c) จากกราฟ แล้วนำค่า ΔH_f และ ΔH_c มาคำนวณ หาค่า %Crystallinity ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนด

T_m คือ อุณหภูมิของการหลอมเหลวของผลึก

ΔH_f คือ เอนทาลปีของการหลอมเหลวของผลึก (พื้นที่ใต้ พีกจากขั้นตอน heating)

%Crys 1 คือ เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่มีอยู่ในชิ้นงาน

T_c คือ อุณหภูมิของการตกผลึก

ΔH_c คือ เอนทาลปีของการตกผลึก (พื้นที่ใต้ พีกจากขั้นตอน Cooling)

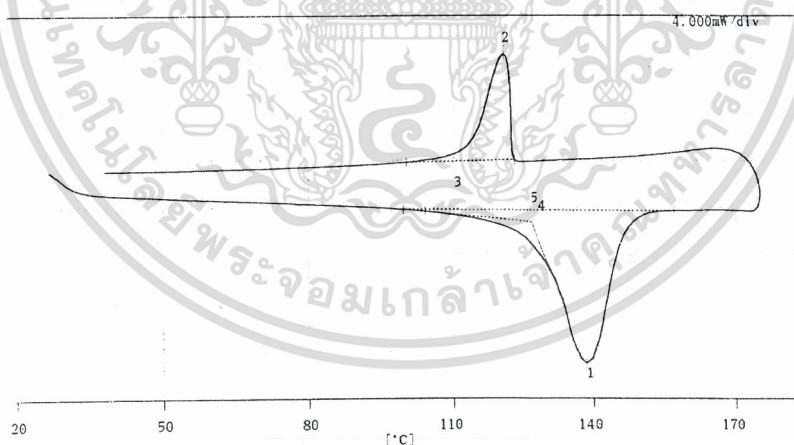
%Crys 2 คือ เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่เกิดขึ้นใหม่

ΔH_0 คือ เอนทาลปีของการหลอมเหลวของ HDPE ที่มีความเป็นผลึก 100% = 293 J/g[25]

$$\Delta H_{f,c} \text{ (J/g)} = \frac{\text{พื้นที่ใต้ peak ของการ heating หรือ cooling (mJ)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}}$$

$$\% \text{ Crys 1,2} = \frac{\Delta H_{f,c}}{\Delta H_0} \times \frac{100}{[100 - \text{ปริมาณ CaCO}_3 \text{ ที่มีอยู่จริงในตาราง 4.1 (\%)}]} \times 100$$

ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.2 และ ได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4.2



- เมื่อ
- 1 คือ T_m
 - 2 คือ T_c
 - 3 คือ พื้นที่ใต้พีกขั้นตอนการ cooling
 - 4 คือ พื้นที่ใต้พีกขั้นตอนการ heating

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้นรูปที่ 4.2 แสดงกราฟตัวอย่างของการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสมบัติทางความร้อน

สาร	T_m (°C)	ΔH_f (J/g)	%Crys 1	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	%Crys 2
HDPE1	137.4	152.5	52.04	118.7	147.5	50.32
HDPE2	142.0	157.0	53.63	118.8	154.0	52.56
HDPE3	141.8	156.8	53.51	119.1	156.4	53.37
HDPE2 + 5%wt CaCO ₃ 5 μ m	140.2	156.1	55.67	119.8	150.1	53.55
HDPE2 + 10%wt CaCO ₃ 5 μ m	139.3	150.2	56.51	120.3	149.1	56.07
HDPE2 + 15%wt CaCO ₃ 5 μ m	137.5	139.9	55.61	120.3	137.2	54.55
HDPE2 + 20%wt CaCO ₃ 5 μ m	140.3	31.4	55.46	120.2	131.4	55.45
HDPE2 + 25%wt CaCO ₃ 5 μ m	138.9	119.9	54.66	120.3	116.9	53.26
HDPE2 + 30%wt CaCO ₃ 5 μ m	139.2	115.0	55.86	120.3	111.9	54.36
HDPE2 + 20%wt CaCO ₃ 0.5 μ m	138.7	133.8	55.91	120.8	132.0	55.19
HDPE2 + 20%wt CaCO ₃ 0.5 μ m (coated)	138.6	133.0	55.02	120.4	132.9	54.96
HDPE2 + 20%wt CaCO ₃ 10 μ m	139.4	128.5	55.64	119.6	127.5	55.20

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่า %Crys 1 มากกว่า %Crys 2 ทั้ง 12 ตัวอย่าง HDPE ทั้ง 3 ชนิดมีค่า T_c ใกล้เคียงกัน แต่ HDPE1 มีค่า T_m ต่ำกว่า HDPE2 และ 3 ส่วนค่า T_m และค่า T_c ของ HDPE นั้นมีค่าลดลง และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามลำดับ เมื่อมี CaCO₃ ผสมในหลายๆ เกรด และทุกๆ ปริมาณ ค่า %Crys 1 และ %Crys 2 ของ HDPE เพิ่มขึ้นน้อยมาก หรือ อาจจะกล่าวได้ว่า CaCO₃ ในทุกๆ เกรด และทุกๆ ปริมาณมีผลต่อ %Crys 1 และ %Crys 2 น้อยมาก

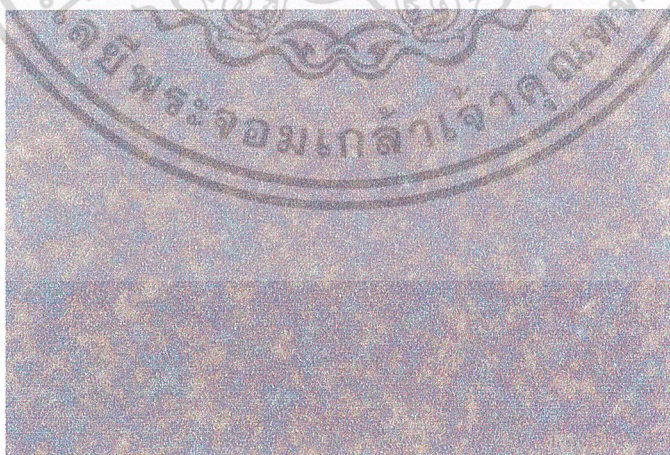
4.1.5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของ HDPE ด้วยเครื่อง Polarised microscope

เมื่อเตรียมสารตัวอย่างโดยใช้วิธีดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3.2.2c แล้วนำมาวิเคราะห์รูปร่างผลึกเพื่อศึกษาว่า CaCO₃ มีผลต่อผลึกของ HDPE อย่างไร ด้วยเครื่อง Polarised microscope ที่กำลังขยาย 400 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากรูปที่ 4.3 พบว่าผลึกของ HDPE ที่ปราศจาก CaCO₃ และที่ผสม CaCO₃ ทุกเกรดมีรูปร่างคล้ายกันคือ มีลักษณะเป็นทรงกลมจากจุดกำเนิดแต่ผลึกของ HDPE ที่ปราศจาก CaCO₃ มีขนาดใหญ่กว่าที่มีการผสม CaCO₃ ทุกๆ เกรด ส่วน HDPE ที่ผสม CaCO₃ เกรดเกลือบผิวและไม่เกลือบผิวจะไม่เห็นความแตกต่างของผลึกที่ชัดเจน

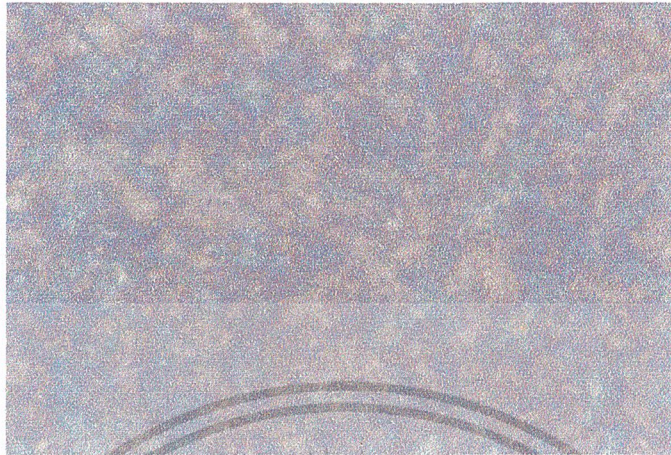
รูปที่ 4.3 แสดงรูปร่างผลึกของสารตัวอย่างในส่วนประกอบต่างๆ
กำลังขยาย 400 เท่า



รูปที่ 4.3a) แสดงรูปร่างผลึกของ HDPE2 ที่ปราศจาก CaCO_3
กำลังขยาย 400 เท่า



รูปที่ 4.3b) แสดงรูปร่างผลึกของ HDPE2 + 20%wt CaCO_3 , 0.5 μm
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีแบบลงในเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
กำลังขยาย 400 เท่า



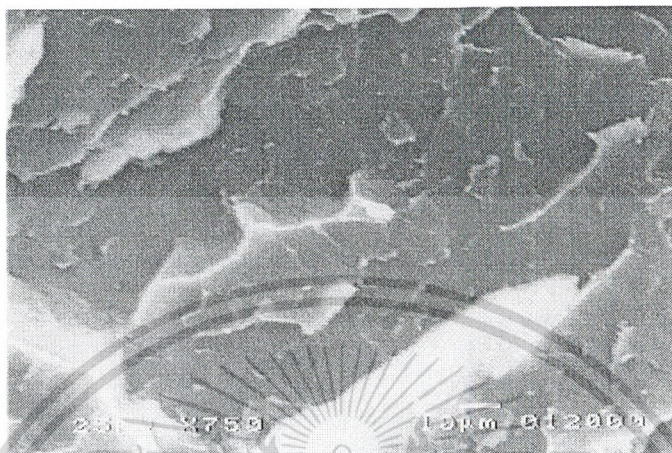
รูปที่ 4.3c) แสดงรูปร่างผลึกของ HDPE2 + 20%wt CaCO₃ 0.5 μm (coated)
กำลังขยาย 400 เท่า

4.1.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO₃ ในสารตัวอย่างด้วยเครื่อง SEM

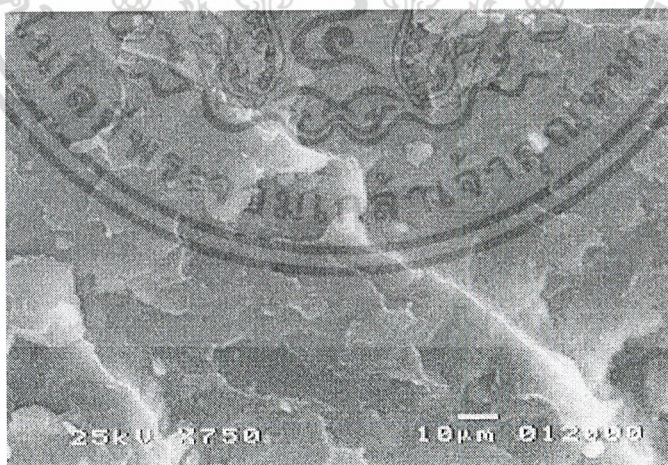
เมื่อเตรียมสารตัวอย่างโดยใช้วิธีดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.2.2d แล้วนำมาวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO₃ ในสารตัวอย่างด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 750 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.4 – 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ขนาดอนุภาค 5 μm ปริมาณต่างๆกัน
ใน HDPE2



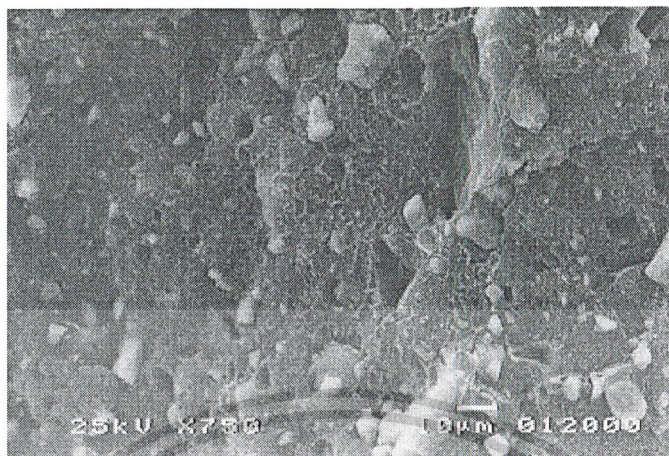
รูปที่ 4.4a) แสดงลักษณะผิวของรอยแตก HDPE2 (ไม่มี CaCO_3)
กำลังขยาย 750 เท่า



รูปที่ 4.4b) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ขนาดอนุภาค 5 μm ปริมาณ 5%wt

ใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า

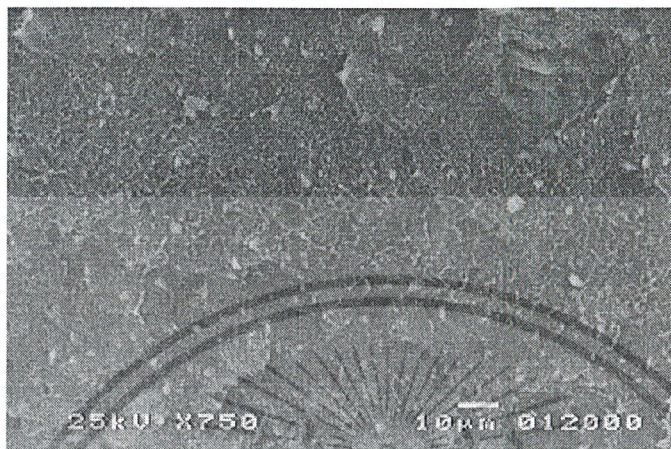
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



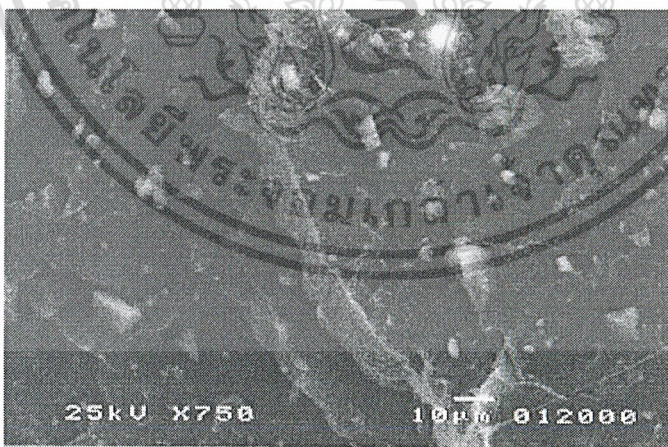
รูปที่ 4.4c) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ขนาดอนุภาค 5 μm ปริมาณ 25%wt ใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ปริมาณ 20%wt ขนาดอนุภาค
ต่างๆใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า

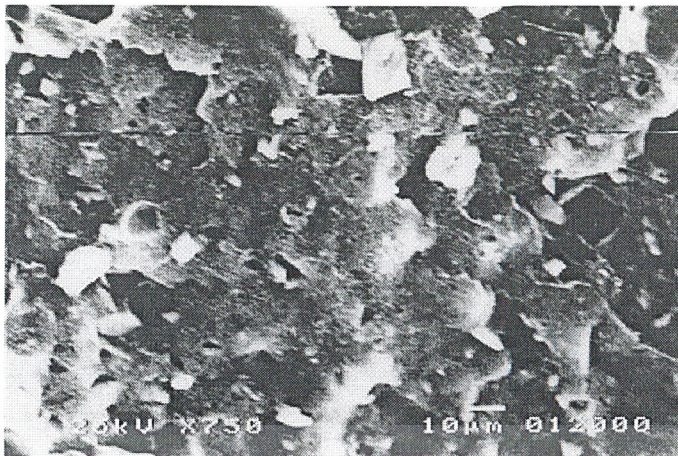


รูปที่ 4.5a) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ขนาดอนุภาค $0.5 \mu\text{m}$ ปริมาณ
20%wt ใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า



รูปที่ 4.5b) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ขนาดอนุภาค $5 \mu\text{m}$ ปริมาณ
20%wt ใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5c) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ขนาดอนุภาค 10 μm ปริมาณ 20%wt ใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า



รูปที่ 4.5d) แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ขนาดอนุภาค 0.5 μm ปริมาณ 20%wt ซึ่งถูกเคลือบด้วยกรดสเตียริกใน HDPE2 กำลังขยาย 750 เท่า

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อปริมาณของ CaCO_3 เพิ่มขึ้นจะมีการกระจายตัวของ CaCO_3 มากขึ้น และการกระจายตัวของ CaCO_3 ค่อนข้างดีเพราะ CaCO_3 อยู่ในลักษณะที่เป็นอนุภาคเดี่ยวๆ แต่ยังมี CaCO_3 ที่มีขนาดใหญ่หลงเหลืออยู่บ้าง (รูปที่ 4.4c)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

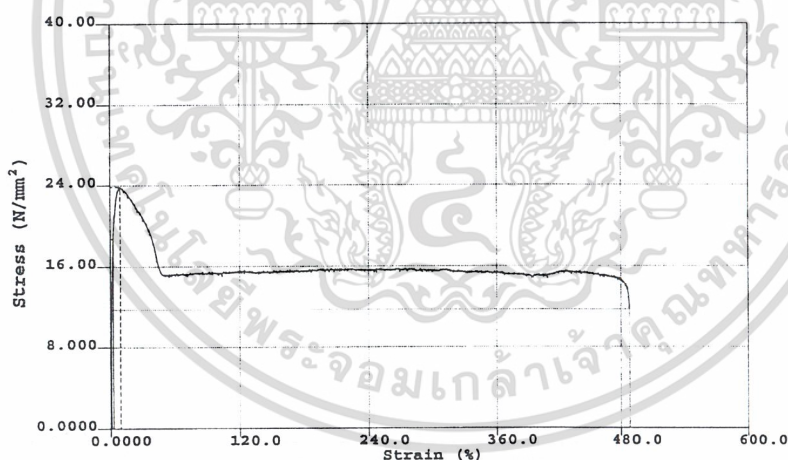
จากรูปที่ 4.5 พบว่า CaCO_3 มีการกระจายตัวคล้ายๆกันแม้ว่าขนาดอนุภาคของ CaCO_3 ใหญ่ขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับรูป 4.5a กับ 4.5d พบว่ามีการกระจายตัวคล้ายๆกัน แต่รูป 4.5d มีการเกิดการแตกหักใกล้เคียงกับแบบแข็งเหนียว (ductile) โดยสังเกตจากเส้นโยที่เพิ่มขึ้น

4.1.7 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

เมื่อเตรียมชิ้นงานโดยใช้วิธีการดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3.3a แล้วนำมาทดสอบเพื่อศึกษาว่า CaCO_3 มีต่อสมบัติทนการต่อแรงดึงของ HDPE อย่างไร จะได้ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก เเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่า Stress ที่ 1 เเปอร์เซ็นต์การยืด จากกราฟ Stress – Strain แล้วนำค่า Stress ที่ 1 เเปอร์เซ็นต์การยืด มาคำนวณค่ามอดูลัสที่ 1 เเปอร์เซ็นต์การยืด ดังนี้

$$\text{Modulus at 1\% Elongation (MPa)} = \frac{\text{Stress at 1\% Elongation (MPa)}}{\text{Strain}} \quad \text{เมื่อ Strain} = 0.01$$

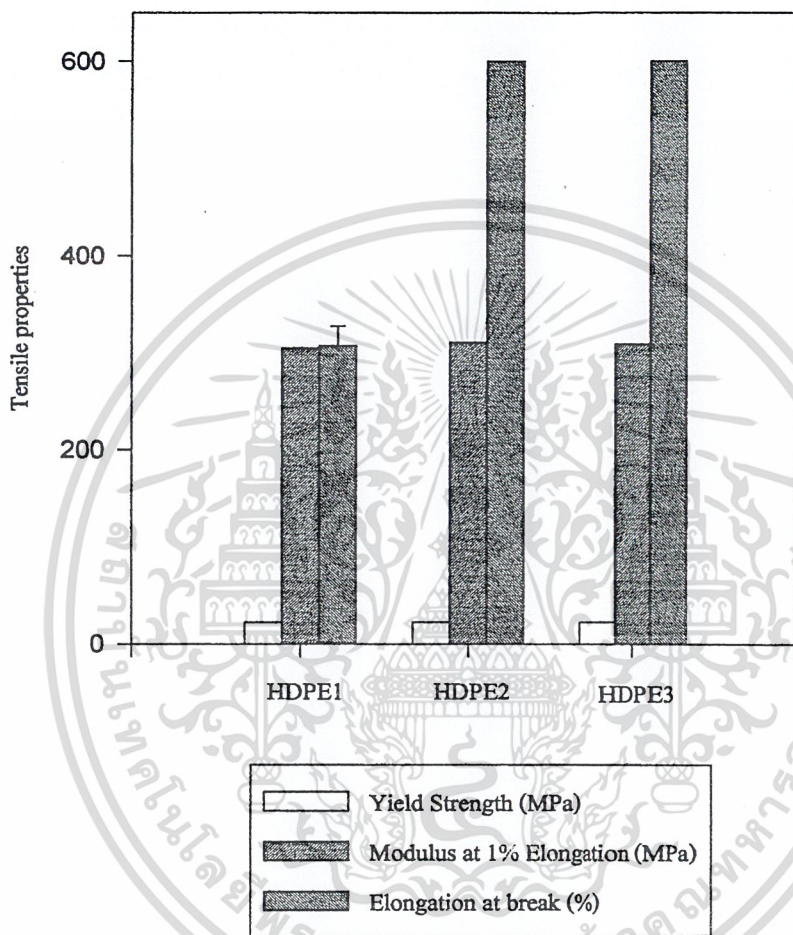
ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6 – 4.11



รูปที่ 4.6 กราฟตัวอย่างแสดงผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

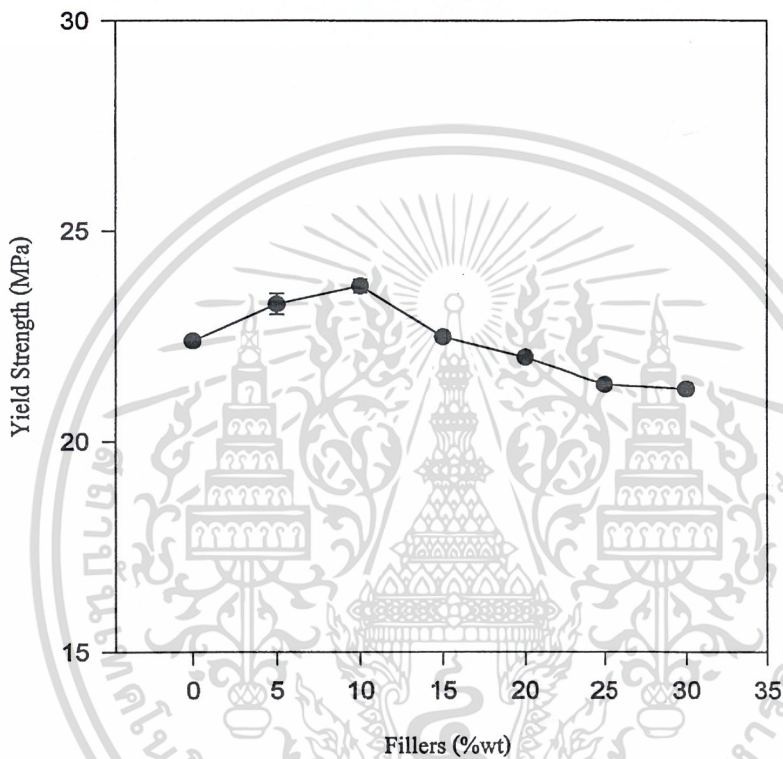
Effect of MW and MWD on Tensile properties of HDPE



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile properties และ เกรดของ HDPE ที่มี MW และ MWD แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

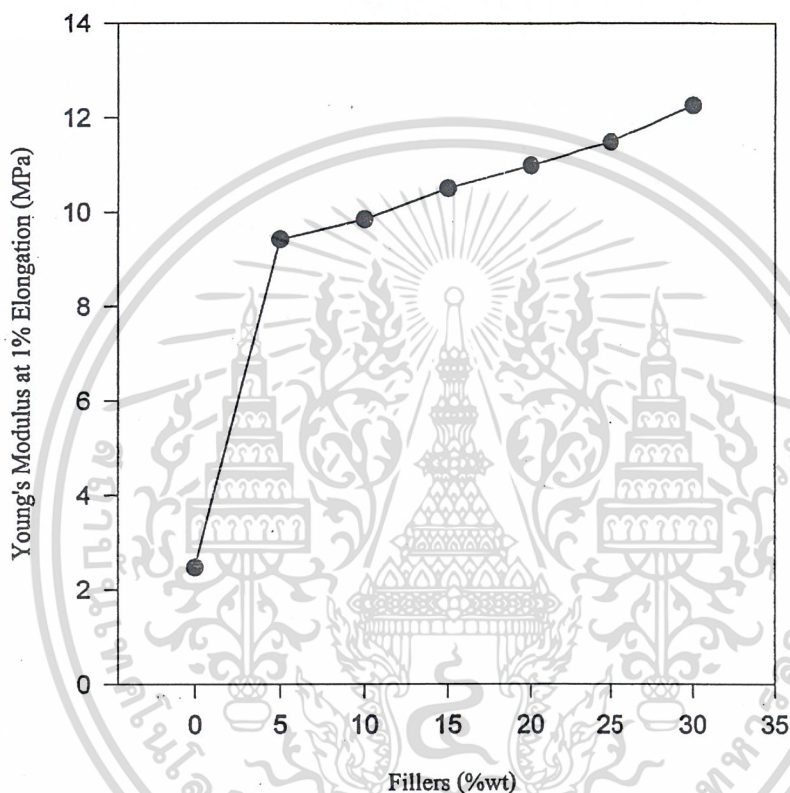
**Effect of CaCO_3 5 micron (uncoated) content on
Yield Strength of HDPE2 compounds**



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Yield strength และปริมาณสารตัวเติมของสารผสม HDPE2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Effect of CaCO_3 5 micron (uncoated) content on
Young's Modulus at 1% Elongation of HDPE2 compounds**

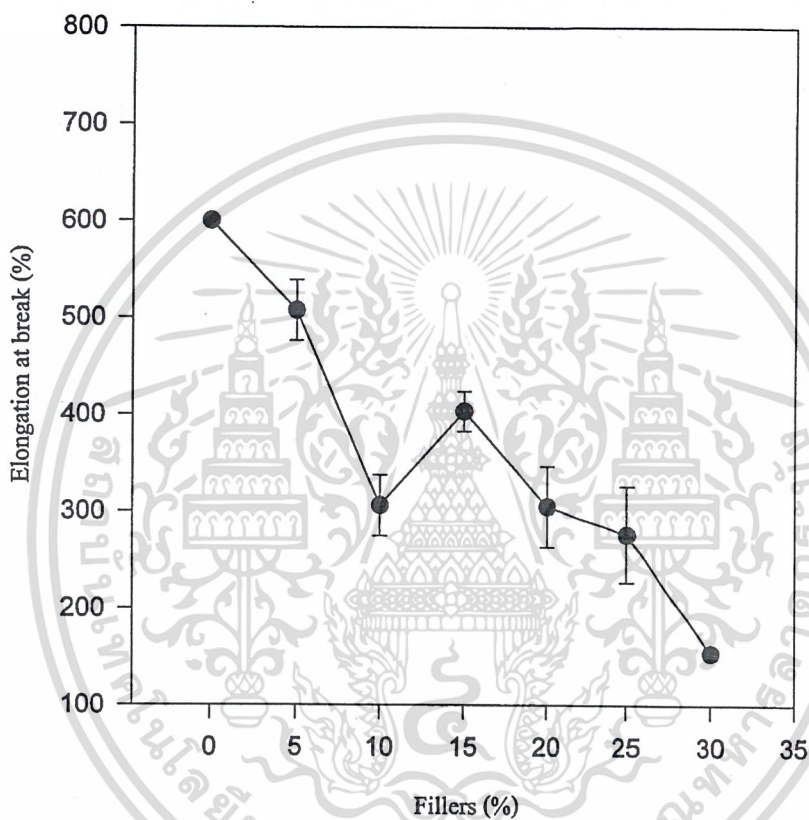


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus at 1% Elongation และปริมาณสาร
ตัวเติมของสารผสม HDPE2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of CaCO_3 5 micron (uncoated) content on

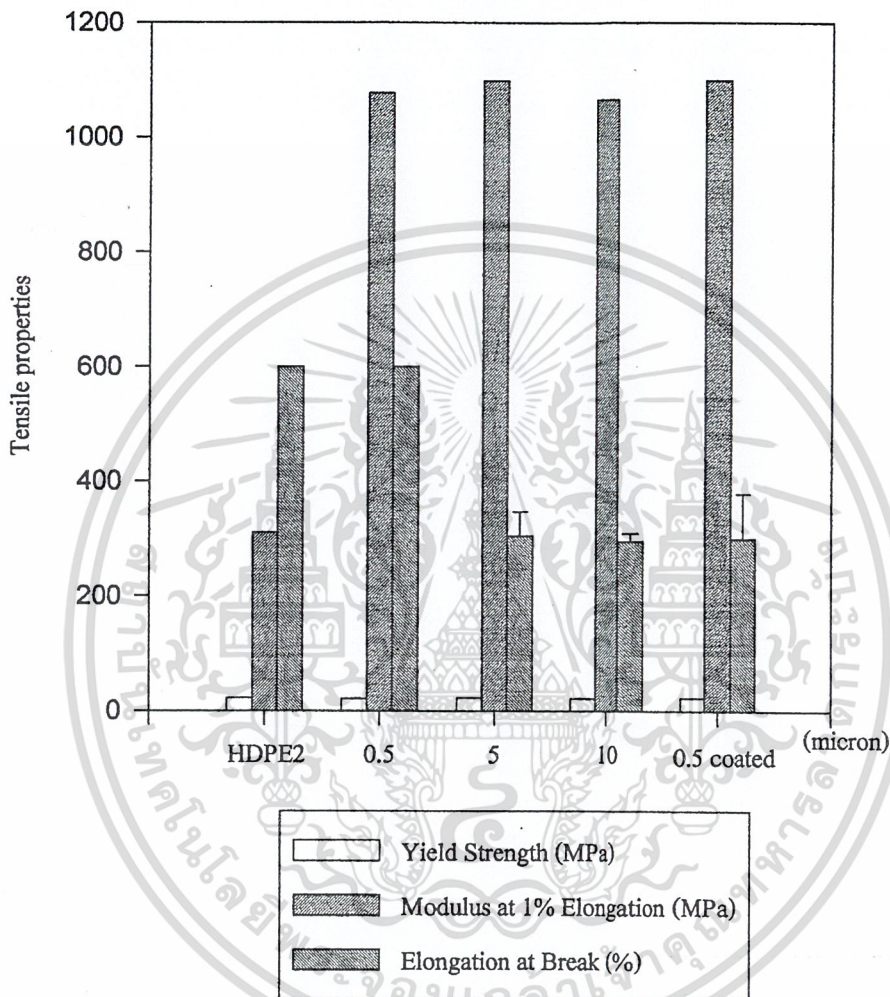
Elongation at break of HDPE2 compounds



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elongation at break และปริมาณสารตัวเติมของสารผสม HDPE2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Effect of Particle size and Stearic acid coating on
Tensile properties of HDPE2 filled with 20%wt CaCO₃**



HDPE2 = 100%wt HDPE2

0.5 = HDPE2 + 20%wt CaCO₃ 0.5 μm uncoated

5 = HDPE2 + 20%wt CaCO₃ 5 μm

10 = HDPE2 + 20%wt CaCO₃ 10 μm

0.5coated = HDPE2 + 20%wt CaCO₃ 0.5 μm coated by stearic acid

รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile properties และ HDPE2 ที่ผสมด้วย CaCO₃

เกรดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 – 4.11 พบว่าค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ของทั้ง 12 ตัวอย่างแตกต่างกันน้อยมาก และค่ามอดูลัส ของ HDPE ทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่ามอดูลัสของ HDPE2 และ 3 มีค่าสูงกว่า HDPE1 เล็กน้อย และค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น ส่วนขนาดของ CaCO_3 ที่แตกต่างกันในช่วงที่ศึกษาและกรดสเตียริกที่เคลือบ CaCO_3 ไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก และค่ามอดูลัส HDPE2 และ 3 จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด สูงกว่า HDPE1 และเมื่อเพิ่มปริมาณและขนาดอนุภาคของ CaCO_3 จะมีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดลง ส่วนการเคลือบ CaCO_3 ด้วยกรดสเตียริกมีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดลง

4.1.8 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก

เมื่อเตรียมชิ้นงานโดยใช้วิธีการดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3.3b แล้วนำมาทดสอบเพื่อศึกษาว่า CaCO_3 มีผลต่อสมบัติการทนต่อแรงดึงของ HDPE อย่างไร จะได้ค่าความทนต่อแรงกระแทก ซึ่งเครื่องมือคำนวณให้จากสมการ

$$\alpha KI \text{ (kJ/m}^2\text{)} = E / b(t-d) \times 1000$$

เมื่อ E = Energy required to rupture a specimen (J)

b = Width of specimen notch (mm)

t = Thickness of around specimen notch (mm)

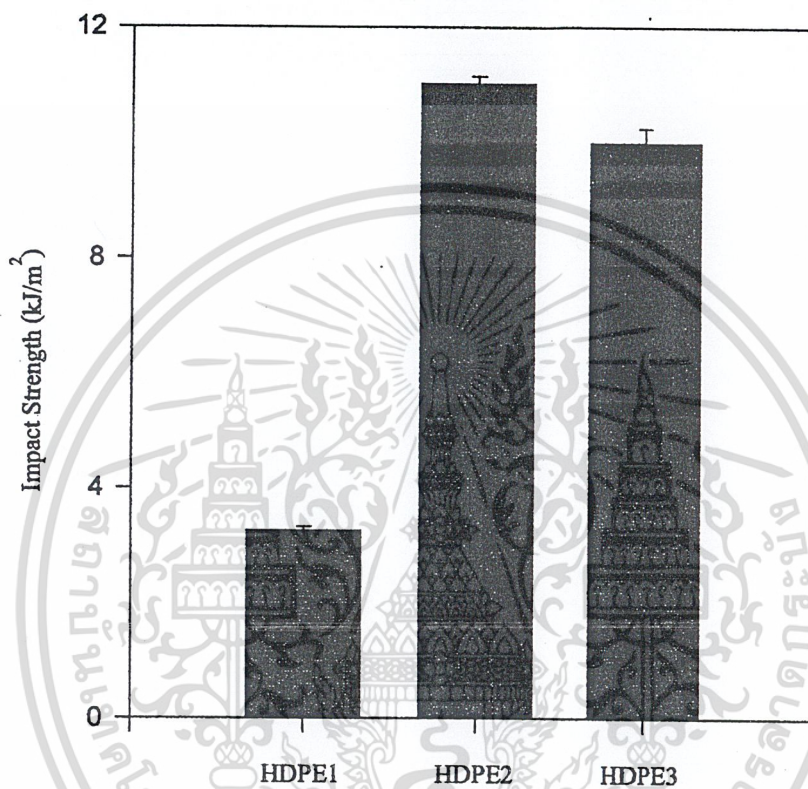
d = Depth of specimen notch (mm)

α = Lifting angle

ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.12 – 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of MW and MWD on Impact Strength of HDPE

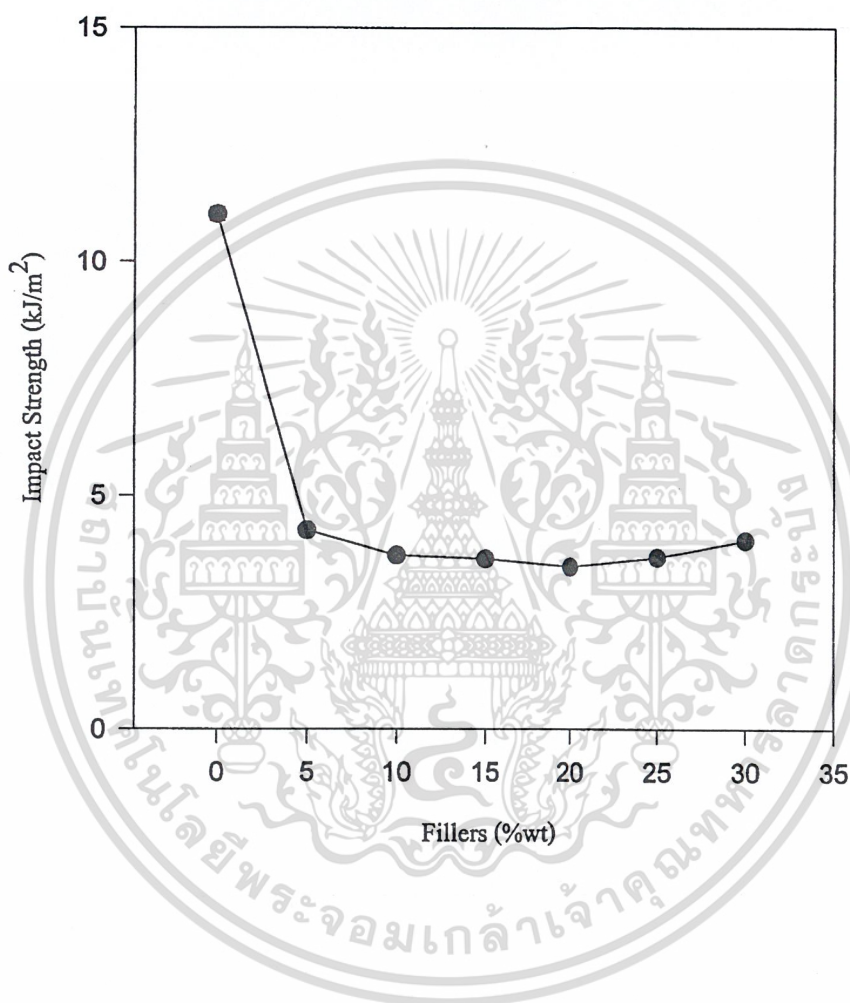


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impact strength และ เกรดของ HDPE ที่มี MW และ MWD ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of CaCO_3 5 micron (uncoated) content on

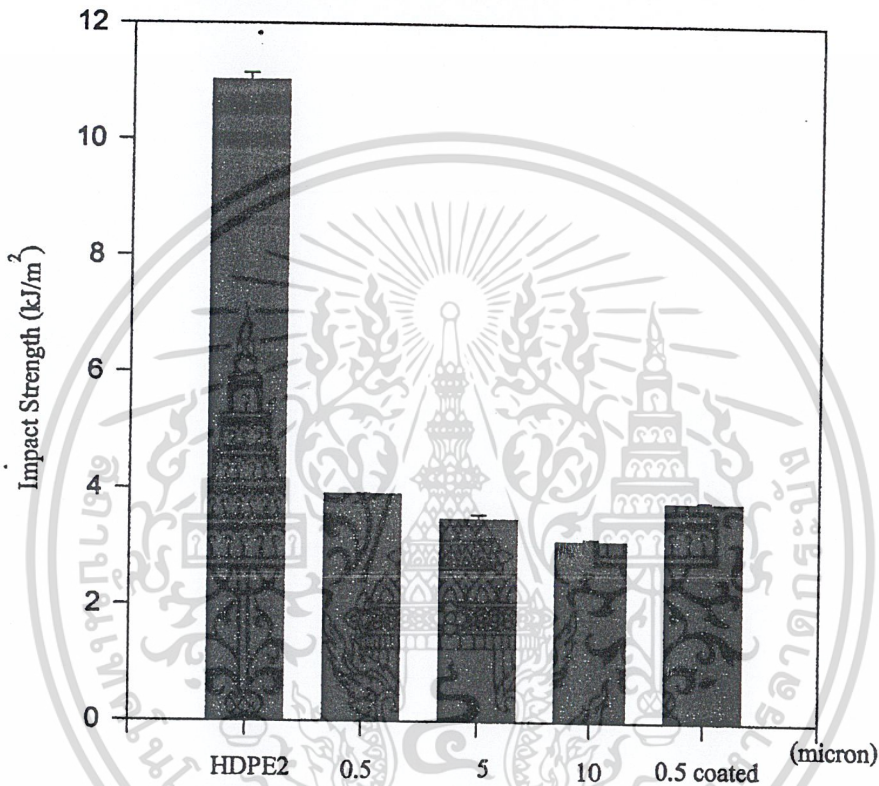
Impact Strength of HDPE2 compounds



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impact strength และปริมาณสารตัวเติมของสารผสม HDPE2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Effect of Particle size and Stearic acid on Impact Strength
of HDPE2 filled with 20%wt CaCO₃**



HDPE2 = 100%wt HDPE2

0.5 = HDPE2 + 20%wt CaCO₃ 0.5 μm uncoated

5 = HDPE2 + 20%wt CaCO₃ 5 μm

10 = HDPE2 + 20%wt CaCO₃ 10 μm

0.5coated = HDPE2 + 20%wt CaCO₃ 0.5 μm coated by stearic acid

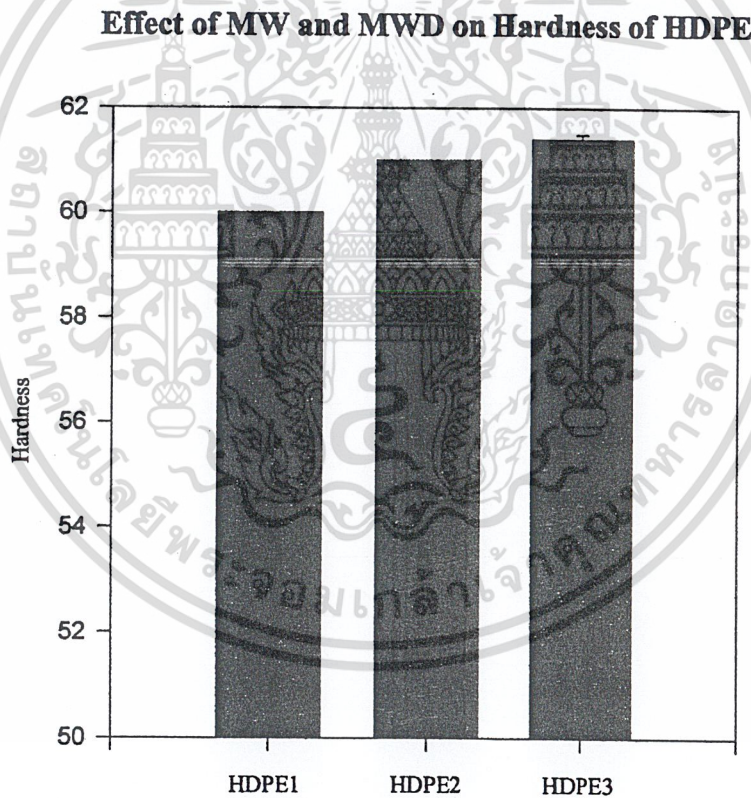
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impact strength และ HDPE2 ที่ผสมด้วย CaCO₃ เกรดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 – 4.14 พบว่าค่าความทนต่อแรงกระแทกของ HDPE2 และ 3 มีค่าสูงกว่า HDPE1 และค่าความทนต่อแรงกระแทกจะลดลงเมื่อผสม CaCO_3 ใน HDPE แต่เมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นในช่วงที่ศึกษาคือ 0-30%wt ค่าความทนต่อแรงกระแทกจะเปลี่ยนแปลงแต่ไม่ชัดเจน และเมื่อขนาดของ CaCO_3 ใหญ่ขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความทนต่อแรงกระแทก มีแนวโน้มลดลง ส่วนกรดสเตียริกที่เคลือบ CaCO_3 ไม่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกของสารผสม HDPE กับ CaCO_3

4.1.9 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง

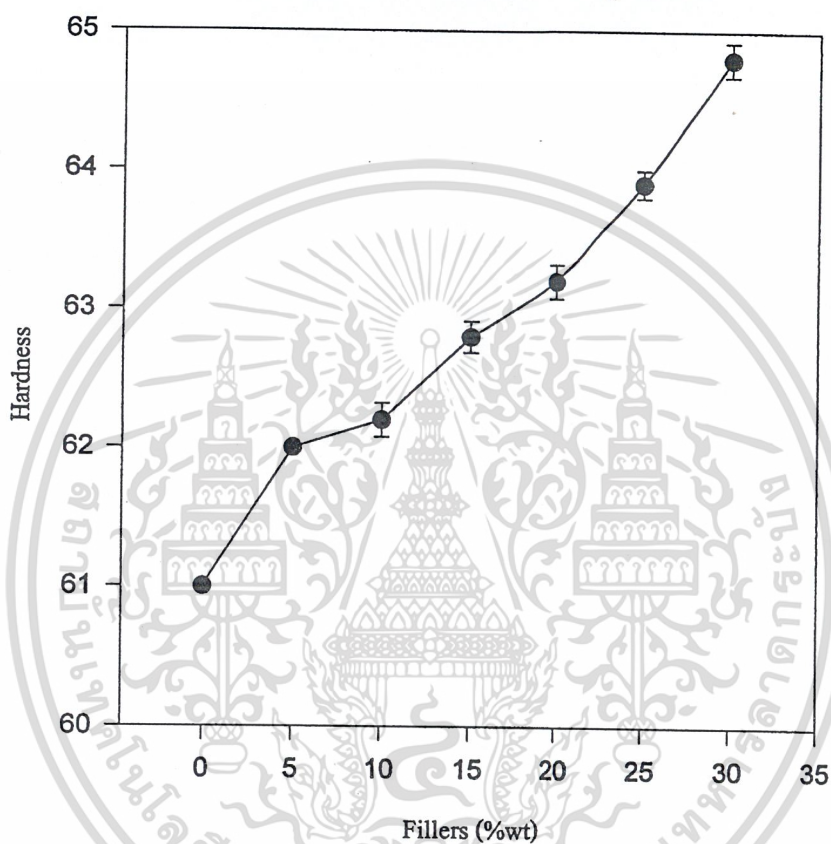
เมื่อเตรียมชิ้นงานโดยวิธีการดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.3c แล้วนำมาทดสอบเพื่อศึกษาว่า CaCO_3 มีผลต่อสมบัติความแข็งของ HDPE อย่างไร จะได้ค่าความแข็ง ซึ่งได้ค่าโดยตรงจากเครื่องมือ โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.15 – 4.17



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Hardness และ เกรดของ HDPE ที่มี MW และ MWD แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

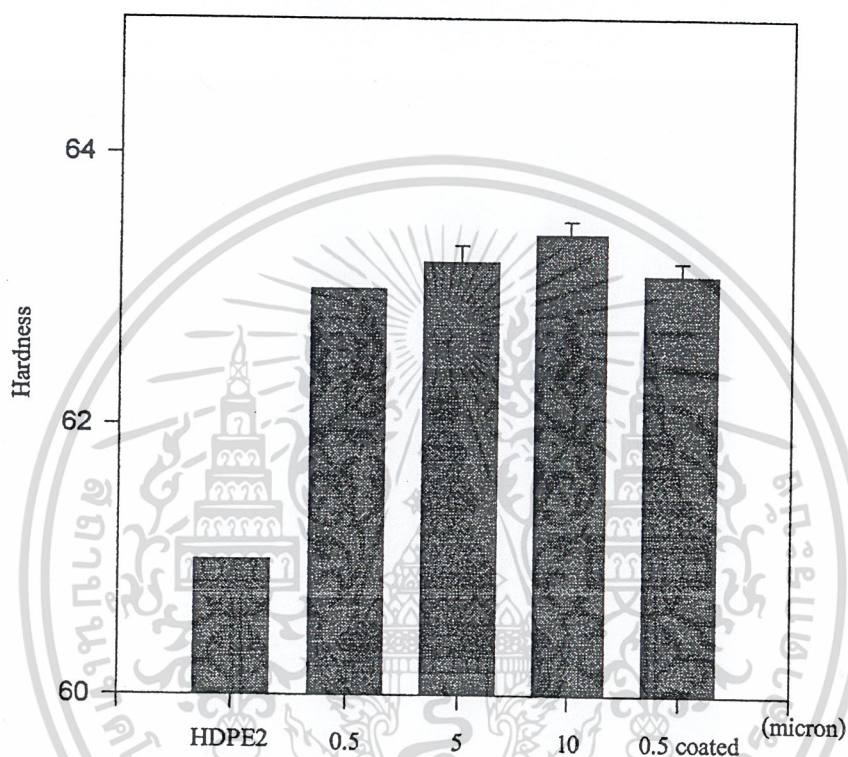
**Effect of CaCO_3 5 micron (uncoated) content on
Hardness of HDPE2 compounds**



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hardness และปริมาณสารตัวเติมของสารผสม HDPE2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Effect of Particle size and Stearic acid on Hardness
of HDPE2 filled with 20%wt CaCO₃**



HDPE2 = 100%wt HDPE2

0.5 = HDPE2 + 20%wt CaCO₃ 0.5 μm uncoated

5 = HDPE2 + 20%wt CaCO₃ 5 μm

10 = HDPE2 + 20%wt CaCO₃ 10 μm

0.5coated = HDPE2 + 20%wt CaCO₃ 0.5 μm coated by stearic acid

รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hardness และ HDPE2 ที่ผสมด้วย CaCO₃ เกรดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 – 4.17 พบว่าค่าความแข็งของ HDPE ทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อขนาดอนุภาค CaCO_3 ใหญ่ขึ้น ค่าความแข็งจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่เมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนกรดเตียริกที่เคลือบ CaCO_3 จะไม่มีผลต่อค่า ความแข็ง

4.2 อธิบายและวิจารณ์ผลการทดลอง

การอธิบายและวิจารณ์ผลการทดลองแบ่งเป็น 8 ส่วนด้วยกันดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์รูปร่างของ CaCO_3

จากรูปที่ 4.1 ในหัวข้อ 4.1.2 พบว่ารูปร่างของ CaCO_3 มีลักษณะคล้ายทรงกลมแต่มีเหลี่ยมและมุม CaCO_3 จะอยู่รวมกันเป็นก้อนมากกว่าเป็นอนุภาคเดี่ยว แต่เมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นจะรวมตัวกันเป็นก้อนน้อยลง จากรูปที่ 4.1b - 4.1c CaCO_3 ขนาดอนุภาค $0.5 \mu\text{m}$ จะอยู่เป็นกลุ่มก้อนใหญ่มากกว่าขนาดอนุภาค 5 และ $10 \mu\text{m}$ ตามลำดับ เนื่องจาก CaCO_3 เป็นสารที่มีขั้วจึงมีแรงกระทำระหว่างกันและ CaCO_3 ขนาดอนุภาค $10 \mu\text{m}$ มีน้ำหนักมากกว่าขนาดอนุภาค 5 และ $0.5 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ดังนั้นสำหรับ CaCO_3 ขนาดอนุภาค $10 \mu\text{m}$ แรงโน้มถ่วงจึงมีผลต่อ CaCO_3 มากกว่าแรงกระทำระหว่างอนุภาคของ CaCO_3 ทำให้ CaCO_3 ขนาดอนุภาคใหญ่สามารถกระจายตัวได้ดี และรวมกันเป็นก้อนได้น้อยกว่าขนาดอนุภาคเล็ก [26]

4.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในสารประกอบ

จากตารางที่ 4.1 ในหัวข้อ 4.1.3 พบว่าปริมาณของ CaCO_3 ที่มีอยู่จริงในสารประกอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้แสดงว่าวิธีการผสมสารประกอบเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสามารถยอมรับได้ คือการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว โดย CaCO_3 ไม่ตกค้างภายในแต่ผสมออกมาพร้อมกับ HDPE

4.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

จากตารางที่ 4.2 ในหัวข้อ 4.1.4 พบว่าตัวอย่างทั้ง 12 ตัวอย่างมีค่า %Crys 1 มากกว่า %Crys 2 เนื่องจากก่อนนำมา heating ด้วยเครื่อง DSC ได้ผ่านการอัดรีดแล้วทิ้งไว้ให้เย็นตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้องทำให้ผลึกที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์ และมีจำนวนมากซึ่งแสดงได้จากค่า %Crys 1 แต่เมื่อ heating แล้ว cooling ใน DSC ที่มีการกำหนดอัตราการลดอุณหภูมิคือ $10^\circ\text{C}/\text{min}$ และได้ %Crys 2 ที่น้อยกว่า %Crys 1 แสดงว่า ผลึกที่เกิดขึ้นมีน้อยกว่าและอาจจะไม่สมบูรณ์เท่า นั่นคืออัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ $10^\circ\text{C}/\text{min}$ น่าจะมีค่าสูงกว่าอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นหลังจากสารผสมถูกอัดผ่านหัว die อัดรีด (extrusion die)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HDPE1 มีค่า T_m ต่ำกว่า HDPE2 และ 3 เนื่องจาก HDPE2 และ 3 มี MW สูงกว่า HDPE1 ซึ่งหมายความว่ามีการเกี่ยวพันของสายโซ่มาก ดังนั้นการเกิดผลึกจึงช้าทำให้ผลึกที่ได้มีขนาดใหญ่และสมบูรณ์เพราะฉะนั้นค่า T_m จึงสูงขึ้น

ค่า T_m ของ HDPE2 ลดลงเล็กน้อยเมื่อมี $CaCO_3$ ผสมในหลายๆเกรดและทุกๆปริมาณเนื่องจาก $CaCO_3$ ทำหน้าที่เป็น nuclei ในการเกิดผลึก ผลึกจำนวนมากจึงเกิดพร้อมๆกัน ทำให้ผลึกที่ได้มีขนาดเล็กลงเพราะฉะนั้นค่า T_m จึงลดลง

ค่า T_c ของ HDPE2 เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมี $CaCO_3$ ผสมในหลายๆเกรดและทุกๆปริมาณเนื่องจาก $CaCO_3$ ไปเพิ่มความหนืดของ HDPE และทำให้เกิด nuclei ที่อุณหภูมิสูงชันกว่า HDPE บริสุทธิ์ [27] จึงช่วยในการเกิดผลึกของ HDPE ได้ที่อุณหภูมิสูงชันทำให้เกิดผลึกที่อุณหภูมิสูงชันเพราะฉะนั้นค่า T_c จึงเพิ่มขึ้น ส่วน $CaCO_3$ มีผลต่อ %Crys น้อยมากเนื่องจาก $CaCO_3$ เป็น nuclei ที่อ่อน [28]

4.2.4 ผลการวิเคราะห์รูปร่างผลึกของ HDPE

จากรูปที่ 4.3 ในหัวข้อ 4.1.5 พบว่าผลึกของ HDPE ที่ปราศจาก $CaCO_3$ มีขนาดใหญ่กว่าที่มีการผสม $CaCO_3$ ทุกๆ เกรด เนื่องจาก $CaCO_3$ ทำหน้าที่เป็น nuclei ในการเกิดผลึก ผลึกจำนวนมากจึงเกิดพร้อมๆกัน ทำให้ผลึกที่ได้มีขนาดเล็กลงซึ่งสามารถนำผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนมายืนยันคือค่า T_m ของ HDPE2 ที่ปราศจาก $CaCO_3$ จะมีค่าสูงกว่าค่า T_m ของ HDPE2 ที่มี $CaCO_3$ ผสมอยู่ทุกเกรดดังที่แสดงค่าแล้วในตารางที่ 4.2

4.2.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของ $CaCO_3$ ในสารตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.4 ในหัวข้อ 4.1.6 พบว่าเมื่อปริมาณของ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้นการจับตัวเป็นก้อนของ $CaCO_3$ ก็จะมีมากขึ้นดังรูปที่ 4.4c เนื่องจาก $CaCO_3$ เป็นสารที่มีสมบัติมีขั้วจึงมีแรงกระทำระหว่าง $CaCO_3$ ต่อ $CaCO_3$ มากกว่าแรงกระทำระหว่าง $CaCO_3$ ต่อ HDPE ทำให้การกระจายตัวยากขึ้นเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.5 ในหัวข้อ 4.1.6 พบว่า $CaCO_3$ ส่วนใหญ่จะกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวแต่บางส่วนเป็นกลุ่มก้อนใหญ่เนื่องจาก $CaCO_3$ เป็นสารที่มีสมบัติมีขั้วจึงมีแรงกระทำระหว่าง $CaCO_3$ ต่อ $CaCO_3$ มากกว่าแรงกระทำระหว่าง $CaCO_3$ ต่อ HDPE ทำให้การกระจายตัวยากขึ้นเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้น และมีการกระจายตัวคล้ายๆกันแม้ว่าขนาดอนุภาคของ $CaCO_3$ จะใหญ่ขึ้น โดยเปรียบเทียบจากรูป 4.5a - 4.5c แสดงว่าเครื่องอัลตราซาวด์ช่วยให้การกระจายตัวของ $CaCO_3$ ได้ดีพอสมควรที่ปริมาณ $CaCO_3$ 20%wt เมื่อเปรียบเทียบรูป 4.5a และ 4.5d พบว่าการแตกหักของ HDPE ที่ผสม $CaCO_3$ เกรดที่เคลือบด้วยกรดสเตียริกมีเส้นใยเกิดขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากกรด สเตียริกจะลดแรงกระทำระหว่าง HDPE กับ $CaCO_3$ ทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่าง HDPE และ $CaCO_3$ แยกจากกันง่ายขึ้น

4.2.6 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง

จากรูปที่ 4.7 – 4.11 ในหัวข้อ 4.1.7 พบว่า ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ของทั้ง 12 ตัวอย่าง ในช่วงปริมาณ 0-30 %wt ที่มีการเติม CaCO_3 และขนาดอนุภาคต่างๆ คือ 0.5 μm เกรดเคลือบและ ไม่เคลือบกรดสเตรียริก 5 และ 10 μm มีความแตกต่างกันน้อยมากเนื่องจาก CaCO_3 ในช่วงที่ศึกษามี การกระจายตัวดีทำให้สมบัติไม่ด้อยลง ส่วนค่ามอดูลัสของ HDPE ทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันแต่ HDPE2 และ 3 มีค่ามอดูลัสมากกว่า HDPE1 เล็กน้อย เนื่องจาก HDPE2 มี MW ที่สูง การเกี่ยวพัน ของสายโซ่จึงมากทำให้มีความทนต่อแรงดึงสูงเพราะฉะนั้น ค่ามอดูลัสจึงสูงกว่า และค่ามอดูลัส เพิ่มขึ้นเมื่อผสม CaCO_3 ใน HDPE เนื่องจาก CaCO_3 มีค่ามอดูลัสมากกว่า HDPE [29] และเมื่อ CaCO_3 มีปริมาณเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนขนาดอนุภาคของ CaCO_3 ที่แตกต่างกันจะไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก และค่ามอดูลัส เนื่องจากที่ปริมาณ CaCO_3 20 %wt อนุภาคของ CaCO_3 มีการกระจายตัวดีทุกขนาดที่ศึกษา ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก และค่ามอดูลัส

เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ HDPE 2 และ 3 มีค่ามากกว่า HDPE1 เนื่องจาก HDPE1 มี MW ต่ำกว่า HDPE 2 และ 3 ทำให้สายโซ่สั้นและมีการเกี่ยวพันของสายโซ่น้อยจึงยืดออกได้น้อยเมื่อ ได้รับแรงกระทำ เมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ลดลง เนื่องจากในระหว่างการดึงชิ้นงานจะเกิดช่องว่าง (void) ระหว่าง CaCO_3 และ HDPE ซึ่งจะเป็นจุด ขาดของชิ้นงาน เมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นจะทำให้ void มากขึ้น ดังนั้นชิ้นงานจึงขาดง่ายขึ้น เพราะฉะนั้นเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดจึงลดลง ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ที่ลดลงเมื่อมี กรดสเตรียริกเคลือบ CaCO_3 อาจเป็นผลเนื่องมาจากแรงกระทำระหว่าง CaCO_3 และ HDPE ลดลงซึ่ง เห็นได้จากภาพที่เห็นเป็นเส้นใยในการแตกหัก (รูปที่ 4.5d)

4.2.7 ผลการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก

จากรูปที่ 4.12 – 4.14 ในหัวข้อ 4.1.8 พบว่าค่าความทนต่อแรงกระแทกของ HDPE2 และ 3 มีค่าสูงกว่า HDPE1 เนื่องจาก HDPE2 มี MW สูงกว่าทำให้มีสายโซ่พอลิเมอร์ยาวและมีการเกี่ยวพัน กัน (Chain entanglement) มาก เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกทำให้ดูดซับพลังงานได้มากดังนั้น จึงทนต่อแรงกระแทกได้มาก แต่ค่าความทนต่อแรงกระแทกลดลงเมื่อมีการผสม CaCO_3 ใน HDPE เนื่องจากการวัดค่าความทนต่อแรงกระแทกเป็นการให้แรงกระทำที่ความเร็วสูงดังนั้น โอกาสที่ชิ้น งานจะเปลี่ยนรูปในเวลาอันสั้นเมื่อได้รับแรงกระทำจึงมีน้อย ซึ่งในที่นี้ตัวรับแรงส่วนใหญ่คือ CaCO_3 แต่ CaCO_3 ไม่สามารถเปลี่ยนรูปได้เหมือน HDPE เพราะฉะนั้นชิ้นงานจะหักตรงรอยต่อ หรือที่ว่างระหว่าง CaCO_3 กับ HDPE และเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นค่าความทนต่อแรงกระแทก จะเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจนในช่วงที่ศึกษาคือ 5-30 %wt CaCO_3 ส่วนค่าความทนต่อแรงกระแทกมี แนวโน้มลดลงเมื่อขนาดอนุภาคของ CaCO_3 ใหญ่ขึ้นเนื่องจากเมื่อขนาดอนุภาคของ CaCO_3 ใหญ่

ขึ้นจะทำให้พื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงรับแรงกระทำได้มากขึ้น แต่ CaCO_3 เปลี่ยนรูปไม่ได้ เพราะฉะนั้นจึงทำให้หักได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก

4.2.8 ผลการทดสอบความแข็ง

จากรูปที่ 4.15 – 4.17 ในหัวข้อ 4.1.9 พบว่าค่าความแข็งของ HDPE ทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจาก HDPE ทั้ง 3 ชนิดมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน [18] แสดงว่า MW และ MWD ไม่มีผลต่อค่าความแข็ง แต่ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นเนื่องจาก HDPE มีค่ามอดูลัส น้อยกว่า CaCO_3 และ HDPE มีความหนาแน่น 0.96 g/cm^3 [18] ซึ่งน้อยกว่า CaCO_3 คือ 2.7 g/cm^3 [19] และเมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 ค่าความแข็งจึงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่ามอดูลัส ส่วนค่าความแข็งนั้นมีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่าขนาดอนุภาคของ CaCO_3 ใหญ่ขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคของ CaCO_3 ในช่วงที่ศึกษามีความหนาแน่นเท่ากันและใช้ในปริมาณที่เท่ากัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

1. พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุล (MW) สูง มีค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึก (Crystalline melting temperature, T_m) สูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์มากกว่า
2. พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีผลทำให้ค่า Modulus %Elongation at break และ Impact strength เพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์มีสายโซ่ที่ยาวและมีการเกี่ยวพันกันมาก ทำให้มีความสามารถในการทนหรือรับแรงได้มากกว่า
3. พอลิเมอร์ 2 ชนิดที่ศึกษาที่มีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกันแต่มีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ต่างกัน มีสมบัติเชิงกล เช่นค่า Hardness และค่า Yield strength ใกล้เคียงกัน
4. CaCO_3 ทุกเกรด (ขนาด 0.5 5 และ 10 μm) และทุกปริมาณ (0-30% โดยน้ำหนัก) ในช่วงที่ใช้ในการศึกษามีผลทำให้ค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ของ HDPE2 เปลี่ยนแปลงน้อยมาก เนื่องจาก CaCO_3 มีคุณสมบัติเป็นสารที่ช่วยในการเกิดผลึก (Nucleating agent) อย่างอ่อน [28]
5. สารผสมระหว่าง HDPE2 และ CaCO_3 ทุกเกรด (ขนาด 0.5 5 และ 10 μm) และทุกปริมาณ (0-30% โดยน้ำหนัก) ในช่วงที่ใช้ในการศึกษามีค่า Yield strength ใกล้เคียงกัน
6. สารผสมระหว่าง HDPE2 และ CaCO_3 ทุกเกรด (ขนาด 0.5 5 และ 10 μm) และทุกปริมาณ (0-30% โดยน้ำหนัก) ในช่วงที่ใช้ในการศึกษามีค่า Modulus สูงกว่า HDPE2 และเมื่อสัดส่วนของ CaCO_3 ในสารผสม HDPE2 เพิ่มขึ้นจึงมีผลทำให้ค่า Modulus ของสารผสมเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่า Hardness เพิ่มขึ้นด้วย
7. เมื่อสัดส่วนของ CaCO_3 ในสารผสม HDPE2 ในช่วงที่ใช้ในการศึกษาเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า %Elongation at break ของสารผสมมีค่าลดลง เนื่องจาก เกิดช่องว่างระหว่าง CaCO_3 กับ HDPE ซึ่งเป็นจุดขาดของชิ้นงานมีมากขึ้น
8. สารผสมระหว่าง HDPE2 และ CaCO_3 ทุกเกรด (ขนาด 0.5 5 และ 10 μm) และทุกปริมาณ (0-30% โดยน้ำหนัก) ในช่วงที่ใช้ในการศึกษามีค่า Impact strength ต่ำกว่า HDPE2 ที่ปราศจาก CaCO_3 เนื่องจาก CaCO_3 จะเป็นตัวรับแรงกระทำจากภายนอก แต่ไม่สามารถเปลี่ยนรูปได้เหมือนพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานได้ง่ายนั่นคือทนต่อแรงกระแทกได้น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. สมบัติเชิงกลที่ศึกษาได้จากสารผสมของ HDPE 80% และ CaCO_3 20% โดยน้ำหนัก ไม่มีผลเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการใช้สารเคลือบผิว ซึ่งก็คือ กรดสเตียริก ในปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก (โดยประมาณ) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าปริมาณสารเคลือบผิวที่ใช้ไม่เพียงพอที่จะช่วยในการปรับปรุงสมบัติของสารผสมที่ศึกษา

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้ปริมาณของ CaCO_3 ที่ผสมใน HDPE ปริมาณมากกว่า 30% โดยน้ำหนัก เพื่ออาจสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการได้ชัดเจนขึ้น
2. ศึกษาสมบัติการไหลเพิ่มเติม เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม
3. ศึกษาปริมาณกรดสเตียริกที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของ สารผสม HDPE กับ CaCO_3
4. ศึกษาผลของ CaCO_3 ที่มีต่อพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่อประยุกต์ใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติม และลดปริมาณพลาสติกชนิดอื่น
5. ศึกษาสารตัวเติมชนิดอื่นที่สามารถผสมใน HDPE เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการให้เหมาะสมกับการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ผศ.ดร.นิพนธ์ วงศ์วิเศษศิริกุล , การใช้ และการแปรสภาพพอลิเมอร์ : 1-38.
2. R.Wolfe , Plastic Handbook. 2 (1990) : 31-32.
3. E.Jesse , Plastic Additives and Modifiers Handbook. 1 (1996) :503-512.
4. ผศ.ดร.นิพนธ์ วงศ์วิเศษศิริกุล , ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์. 2 (2537) : 168-177.
5. V.P.Chacko , and F.E.Karasz , J. Appl. Polym. Sci. 28 (1983) : 2701-2713.
6. M.M. Tariq , J.C. Pierre , F.Meroslav , and D.Alain , J. Polym. Compos. 9 (1988) : 412- 418.
7. S.N.Maiti and R.Jeyakumar , J. Polym. Mater. 7 (1990) : 29-34.
8. Q.Fu and G.Wang , J. Polym. Eng. Sci. 32 (1992) : 94-97.
9. C.D.Han , C.Sandford , and H.J.Yoo , J. Polym. Eng. Sci. 18 (1978) : 849-853.
10. X.Xi and G.Xiaoyi , J. Polym. Sci. 9 (1991) : 108-112.
11. B.Pukanszky , F.Tudos , J. Mater. Sci. 8 (1989) :1040-1042.
12. D.E.Bissaad and J.Beniska , J. Polym. Sci. Tech. 16 (1989) : T70-T72.
13. A.D.Kupfer , ANTEC. (1984) : 191-194.
14. A.M.Riley , C.D.Paynter , P.M.McGenity , and J.M.Adam , Plastic and rubber processing and applications. 14 (1990) : 85-93.
15. L.S.Chen , Y.W.Mai , B.Cotterell , J. Polym. Eng. Sci. 29 (1989) : 505-512.
16. R.Kalinski , A.Galeski , and M.Kryszewski , J. Appl. Polym. Sci. 26 (1981) : 4047-4058.
17. H.P.schreiber , J.M.Viau , A.Fetoui , and Z.Deng , J. Polym. Eng. Sci. 30 (1990) : 263-269.
18. บริษัท ไทยพอลิเอทีลีน จำกัด
19. บริษัท สุรินทร์อ้อมยา เคมีคอล จำกัด
20. A.Storer Roberta, Annual book of ASTM Standards. 08.03. (1988) : 90-93.
21. A.Storer Roberta , Annual book of ASTM Standards. 08.01. (1988) : 195-199.
22. A.Storer Roberta , Annual book of ASTM Standards. 08.01. (1988) : 155-166.
23. A.Storer Roberta , Annual book of ASTM Standards. 08.01. (1988) : 57-73.
24. A.Storer Roberta , Annual book of ASTM Standards. 08.03. (1988) : 200-206.
25. Encyclopaedia of Polymer Science and Engineering , John Wiley and Sons. 4 (1986) : 487
26. Ess , J.W. and Hornby , P.R. , Plastic and rubber Processing and Applications. 8 (1987) : 147.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

27. Hill , C.T. , SPE Engineering Properties and Structure Division , Divtec Hadson , Ohio. 9 (1975).
28. Kowalewski , T. and Galeski , A. , J. Appl. Polym. Sci. 32 (1986) : 2919.
29. Kupfer , A.D. and Rozett , R. , ANTEC 1984 : 191.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้